



Projekt Apex Explorer: Mit Sensoren und KI in den Himmel

J. Gilsbach ¹⁾, P. Bronner ²⁾, B. Bertsche ³⁾

¹⁾ Schülerin und ²⁾ Lehrer am Friedrich-Gymnasium Freiburg, ³⁾ Freiburger Raketenwerkstatt



1. Rakete, Datenauswertung & Flugphasen

Beschreibung der Rakete

- Zwei Treibsätze: C6 (h = 60 m) und D9 (h = 200 m).
- Elektronischer Zünder: ansteuerbar über eigenes WLAN.
- Drei Sensoren: Luftdruck p, 6-Achsen-IMU (,), Kraft F.
- Mikroprozessor: errechnet die Höhe, Geschwindigkeit, ...
- Bezug der Rakete: raketenwerkstatt.de, Preis: 495 €.

Auswertung der Sensor-Daten nach dem Flug

- PDF: Arbeitsblätter für den Unterricht mit Live-Flugdaten.
- CSV-Datei: Datenanalyse mit Excel, Python oder durch KI.
- KI-Datenanalyse mit ChatGPT, Claude oder Gemini liefert präzise Diagramme und interpretiert die Daten physikalisch.
- KI-Datenanalyse mit fobizz / AIS.chat noch nicht möglich.

Flugphasen der Rakete

1. Plattform: Rakete ruht auf Startrampe
2. Antrieb: Zündung Treibsatz & Schub
3. Freiflug: freier Fall & Apogäum
4. Fallschirm: Auslösung und Entfaltung
5. Sinkflug: Gebremster Fall
6. Landung: Rakete liegt am Boden



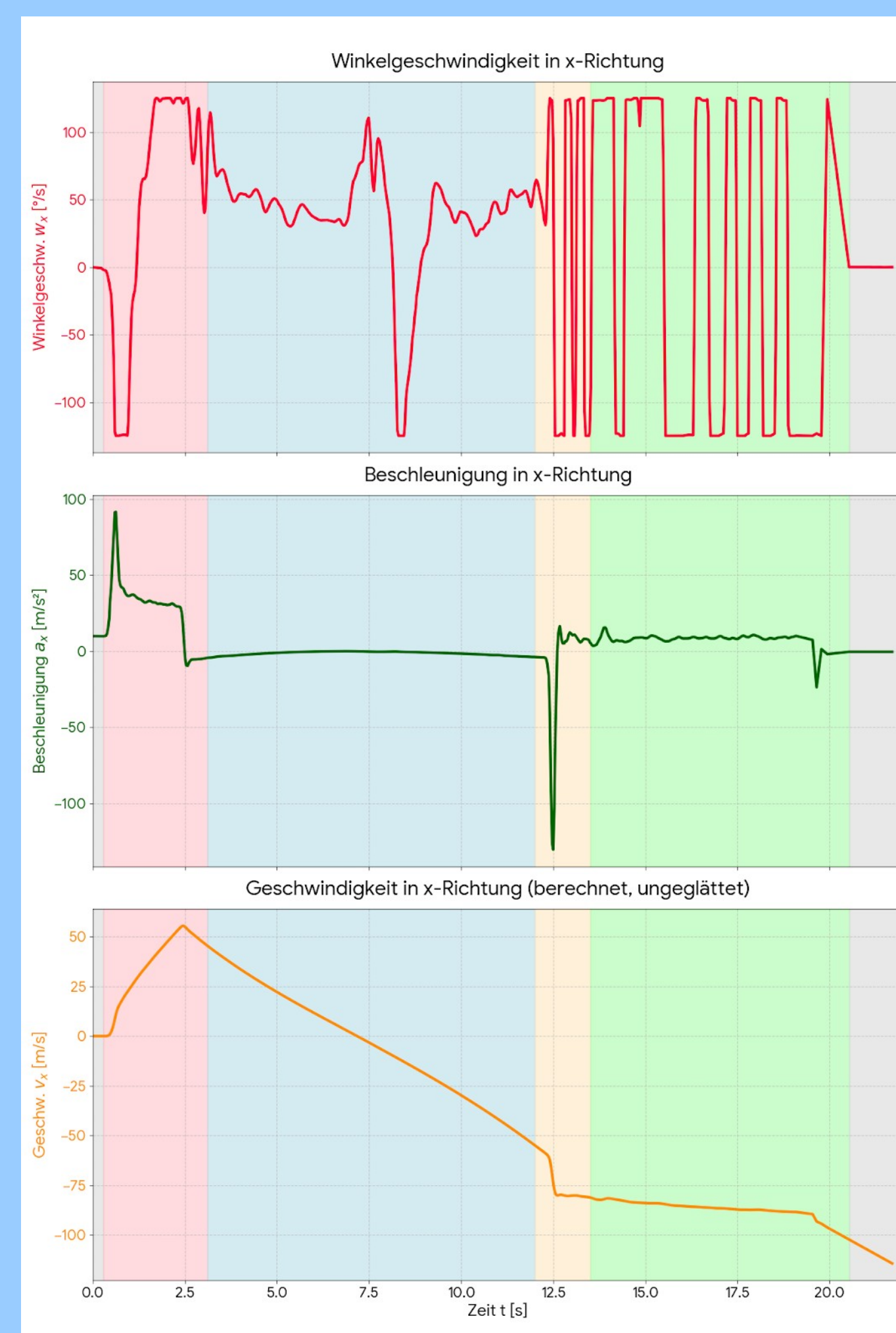
3. Messung mit dem IMU-Sensor

Die **Inertial Measurement Unit** BMI270 von Bosch misst die Winkelgeschwindigkeiten und die Beschleunigung ± 16 g jeweils in x -, y - und z - Richtung.

Die gemessene **Beschleunigung** muss vom Bezugssystem der Rakete auf das Bezugssystem der Erde umgerechnet werden: Man bestimmt dazu die Lagewinkel der Rakete durch Integration der Winkelgeschwindigkeiten. Die Winkel werden in die Rotationsmatrix eingesetzt und mit der gemessenen Beschleunigung multipliziert.

Die **Geschwindigkeit** berechnet man durch die Integration:

Die anfangs realistischen Werte werden unbrauchbar, sobald der Fallschirm sich entfaltet. Gründe hierfür sind das Taumeln der Rakete am Fallschirm (max. Messbereich Gyroskop), das Rauschen des Beschleunigungssensors aufgrund von Vibrationen und die zunehmende Sensordrift des Gyroskops.



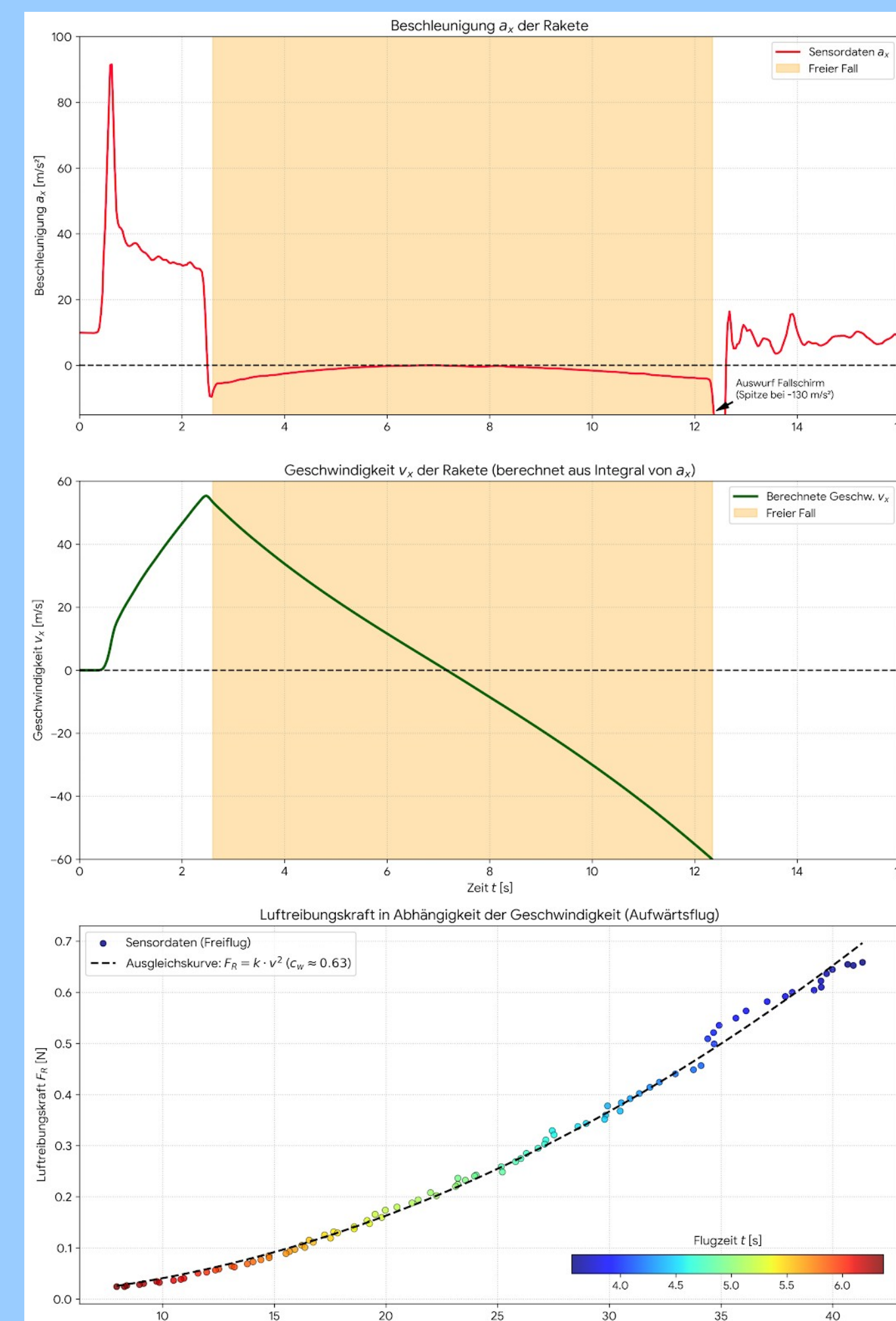
5. Bestimmung des c_w - Werts der Rakete

Zwischen dem Brennschluss und der Fallschirmöffnung befindet sich die Rakete im **freien Fall**. Da sie in dieser Phase ausschließlich durch die Gravitation beschleunigt wird und keine Stützkkräfte auf sie wirken, herrscht an Bord Schwerelosigkeit. Der Sensor misst $a = 0$ m/s².

Die **Luftreibung** wird aus der Abweichung der Beschleunigung während des freien Falls berechnet:

Formel Luftreibung:
Kreisförmige Querschnittsfläche: $10,5 \text{ cm}^2$.
Luftdichte in Freiburg: ca. $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Wenn die Werte der Luftreibung gegen die Geschwindigkeit aufgetragen werden, kann man mithilfe einer quadratischen Anpassung den **Luftwiderstandsbeiwert** bestimmen: 0,63. Es wurden dabei nur die Daten des Aufwärtsflugs vom Brennschluss bis zum Apogäum verwendet, da sich die Rakete im Abwärtsflug nicht mehr im stabilen Flug befindet und taumelt.



2. Messung mit dem Drucksensor

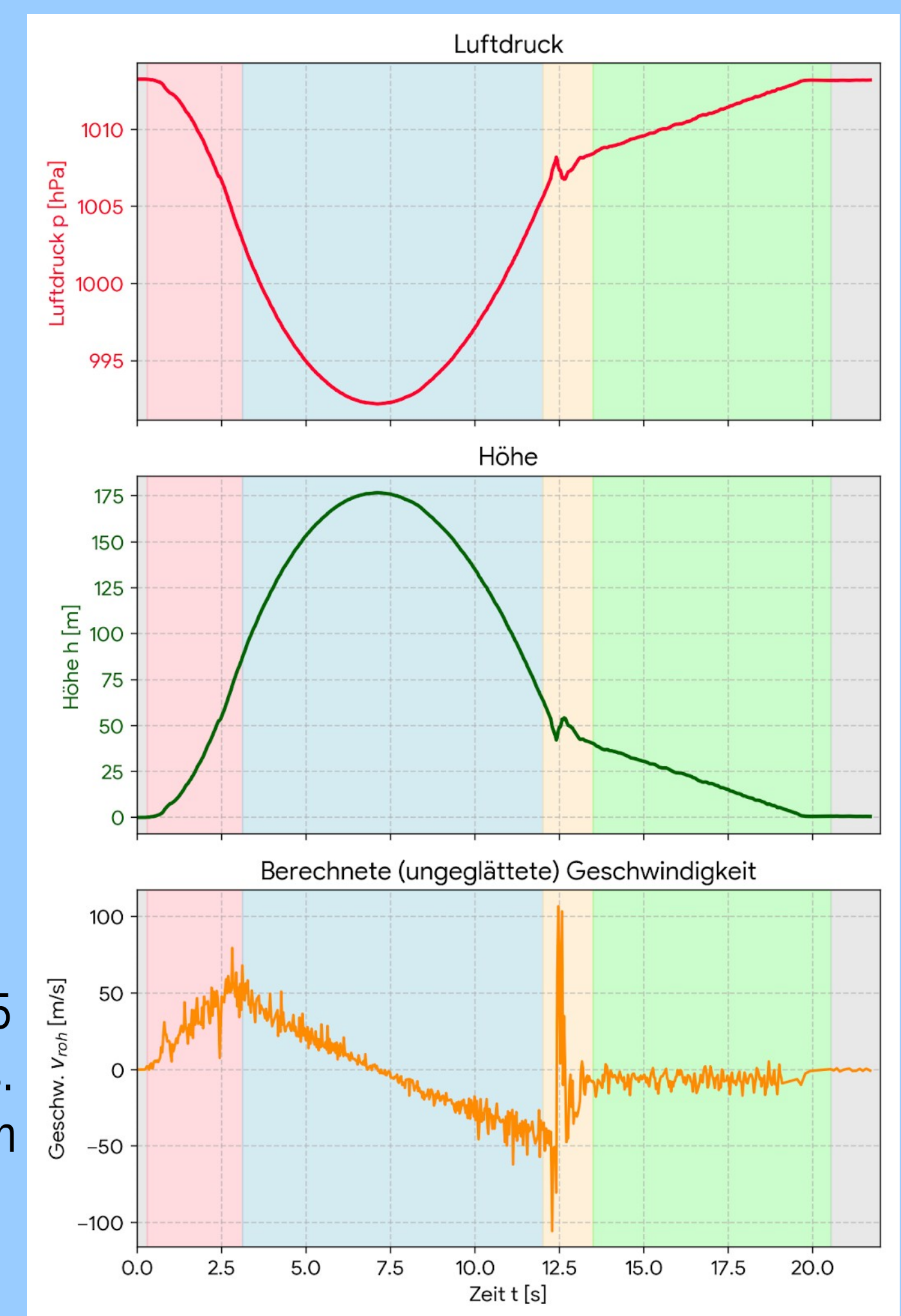
Der BMP390 von Bosch hat einen Messbereich von 300 - 1250 hPa, eine Genauigkeit von $\pm 0,03$ hPa (entspricht ± 25 cm Höhenauflösung) und eine Abtastrate von 200 Hz.

Mit der Barometrischen Höhenformel berechnet der Mikroprozessor aus dem Druck p die **Höhe**:

Durch Ableiten der Höhe wird die **Geschwindigkeit** der Rakete bestimmt:

Gründe für das „Zittern“ der Geschwindigkeit:

- **Turbulenzen:** Luftverwirbelungen in der Hochgeschwindigkeitsphase erzeugen Druckschwankungen am Körper der Rakete.
- **Quantisierung:** Diskrete Druckstufen von ± 25 cm aufgrund der Höhenauflösung des Sensors.
- **Messfehler:** Sensor misst quantisiert in kleinen Zeitabschnitten. Die Ableitung von zwei ungenauen Messwerten verstärkt Rauschen.

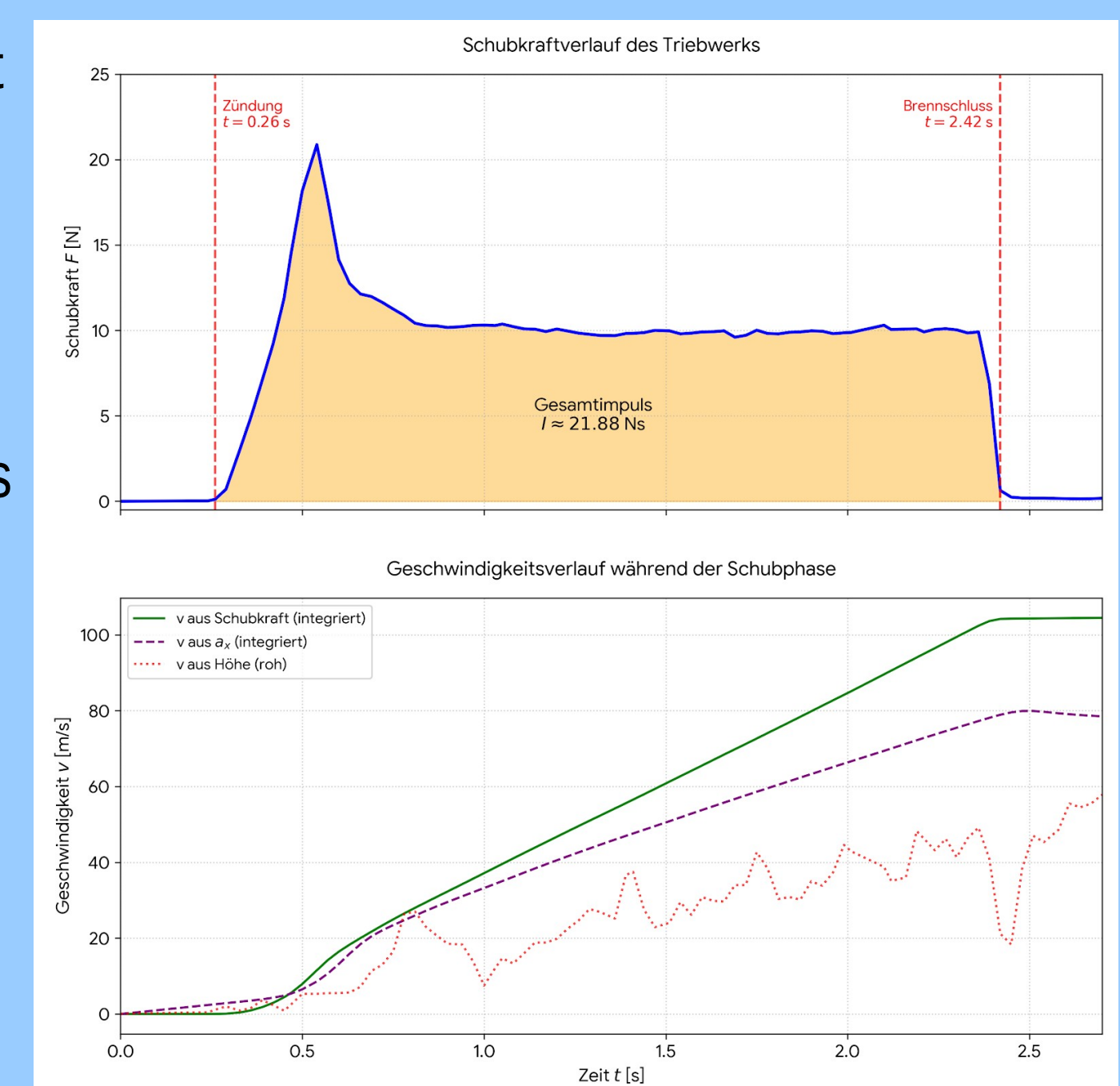


4. Messung mit dem Kraft-Sensor

Der Sensor aus der FMA-Serie von Honeywell hat einen Messbereich bis 25 N und eine Auflösung von 0,0061 N.

Der **Gesamtimpuls I** entspricht der Fläche unter der Kraft-Zeit-Kurve: $I = 21,88$ Ns. Laut Hersteller hat der verwendete Treibstoff einen Gesamtimpuls von $I = 20$ Ns, die beiden Werte stimmen überein.

Der Impuls des Gases muss nach unten gleich groß sein wie der Impuls der Rakete nach oben. Die Masse des Gases wird über den Gewichtsverlust des Treibsatzes bestimmt. Berechnung der **Geschwindigkeit des Gases**:

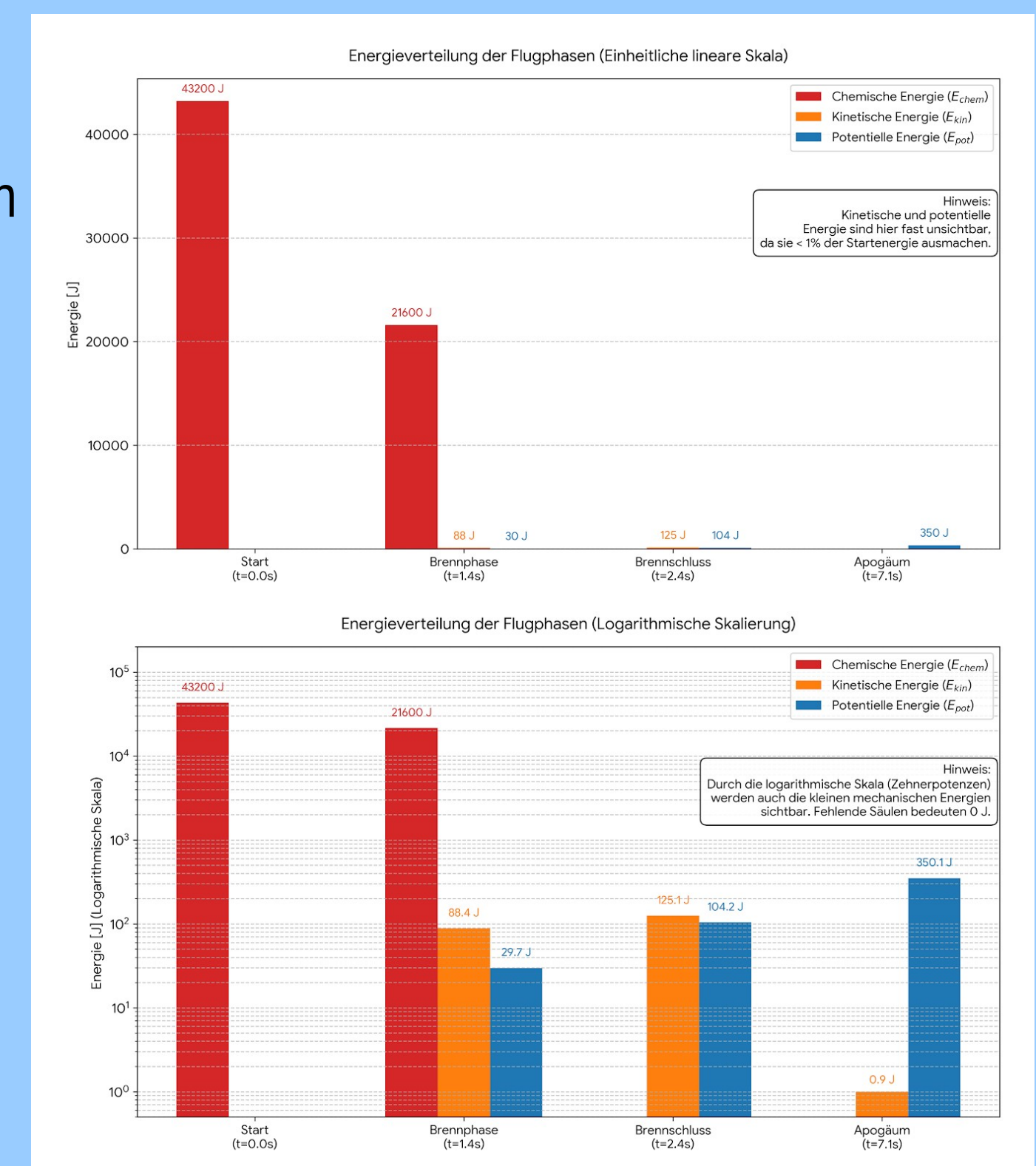


Die **Geschwindigkeit** der Rakete wird wie folgt berechnet: und . Dabei muss die Massenänderung beachtet werden. Die Geschwindigkeitswerte, die sich aus der Schubkraft ergeben, sind im Vergleich zu den Werten, die sich aus der Höhenableitung oder der Beschleunigungsintegration ergeben, zu hoch. Dies liegt daran, dass der Energieverlust durch den Luftwiderstand vernachlässigt wurde. Zudem bleibt die Rotation und die Abweichung der Rakete von einer idealen, geradlinigen Flugbahn unberücksichtigt.

6. Bestimmung des Wirkungsgrads η der Rakete

Beim Raketenstart wird die chemische Energie des Treibstoffs (E_{chem}) in kinetische Energie (E_{kin}) und potentielle Energie (E_{pot}) umgewandelt. Dabei geht ein großer Teil der Energie in Form von z. B. Wärme „verloren“. **Wirkungsgrad** der Energieumwandlung:

Der Wirkungsgrad ist unerwartet klein. Sinnvoller ist es mit der spezifischen Energie des Treibstoffs zu rechnen. Diese gibt an, wie viel Druck durch Volumenausdehnung erzeugt werden kann. Damit beträgt der **Wirkungsgrad**:



Die beiden **Diagramme** visualisieren die Energieverteilung in den Flugphasen. Die lineare Darstellung (oben) betont zwar den minimalen Anteil der mechanischen Energie, macht jedoch die kleinen Werte kaum unterscheidbar. Für die präzise Ablesbarkeit von kinetischer und potenzieller Energie ist daher die logarithmische Skala (unten) deutlich besser geeignet.

7. Fazit: Die Faszination für Raketen, gepaart mit Sensorik und KI – ein Gewinn für den Physikunterricht

Im Vergleich zur Wasserrakete bereichert die Sensor-Rakete den Physikunterricht durch echte Messdaten und beeindruckende Flüge. Die KI-gestützte Datenauswertung liefert zwar effizient Ergebnisse, erfordert jedoch eine enge didaktische Begleitung, damit das physikalische Grundverständnis und das eigenständige Denken der Schülerinnen und Schüler nicht auf der Strecke bleiben. Trotz der Herausforderungen – wie höhere Kosten, aufwändigere Startlogistik und ökologische Aspekte bei der KI-Nutzung – überwiegt der Mehrwert: Das Projekt vermittelt Physik auf eine deutlich greifbarere, modernere und zugänglichere Weise.