

DFSV - Ballonfahrertag 2023

Im Heissluftballon automatisch

über die Alpen



Hilmar Lorenz,
Alpen Ballon Club
<https://hlballon.com>

moderne Balloninstrumente beruhen auf:

Fortschritten in der Sensortechnik

- ▶ **empfindliche GPS Empfänger**
- ▶ **hochgenaue Drucksensoren**
- ▶ **3D Beschleunigungsmessungen**

Mobiler Rechentechnik

- ▶ **„Moving Map“ Anwendungen**
- ▶ **Kommunikation und online Services**

Frage: Sind rechnergesteuerte Brenner und eine automatische Höhenkontrolle denkbar?

**Gibt es einfache
Antworten?**



Was sagen die erfahrenen Piloten?

**Die Luftfahrt ist
barometrisch bestimmt!**

**Die technische Entwicklung schreitet imposant
voran und bietet noch vor Jahren ungeahnte
Möglichkeiten**

**weiterhin Luftdruck bezogen messen und steuern
– ist das hinreichend?**

oder:

**sollten wir auf direkte Lagesensoren für die
„ballonspezifischen“ Anforderungen an einen
Autopiloten setzen?**

Das muss kein Widerspruch sein



Rechnergestützte Brennersteuerung:

- **Aerostatik & Aerodynamik**
- **Beschleunigungsmessungen**
- **Die Technik dahinter**

**Was bringt die
Steuerung?**



Rechnergestützte Brennersteuerung:

➤ Aerostatik & Aerodynamik

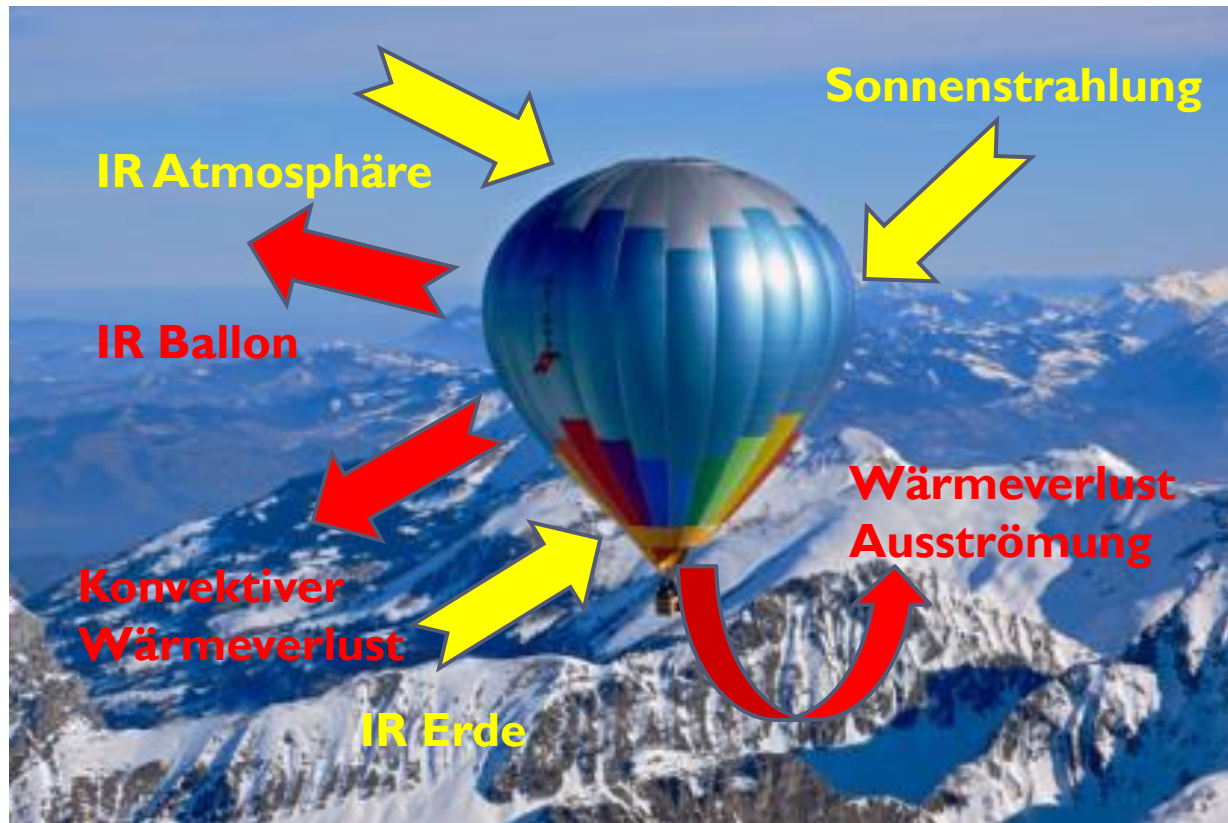


Heißluftballon – Aerostatik und Aerodynamik

- **Grundprinzip “Leichter als Luft”!**
- **bewegte träge Massen von mehreren Tonnen und somit beträchtliche dynamische Dämpfung**
- **konstantes Volumen**
- **aber: komplexe Thermodynamik**

Heißluftballon - ein **störrisches** Gefährt

warum ist das so? Ursache: **Thermodynamik**



Ein 4000er Heißluftballon verliert pro Sekunde etwa 100 W

Heißluftballon - ein **geniales** Gefährt

- **Der Freiballon ist als „offenes System“: druckneutral zur Umgebungsluft**

Heißluftballon: Maul

Gasballon: Appendizes

- **schwebt der Ballon auf konstanter Höhe ändert sich der Außen- und Innendruck nicht. Aus der Gasphysik folgt simple:**

die „innere Energie“ E bleibt konstant!

Heißluftballon - Aerostatik und Aerodynamik

Die Gasballonfahrer kennen aus der Gasphysik:

- **Im Ballon mit konstantem Volumen ändern sich Temperatur und Dichte umgekehrt proportional**

also einfach:

- **Ein Brennerstoß erhöht Hüllentemperatur und verringert die Dichte der Hüllenluft!!!**

Heißluftballon – Aerostatik und Aerodynamik

Schlussfolgerung:

für unsere Steuerung brauchen wir keine komplizierte Thermodynamik

was passiert:

Brennerstoß → Heizimpuls



Hüllentemperatur steigt → Dichte fällt

Abstrahlung → Hüllentemperatur fällt

→ Dichte steigt



**Masseänderung bzw. Kraftwirkung
sind die Steuergrößen unserer
Höhenkontrolle!**



Rechnergestützte Brennersteuerung:

➤ Beschleunigungsmessungen

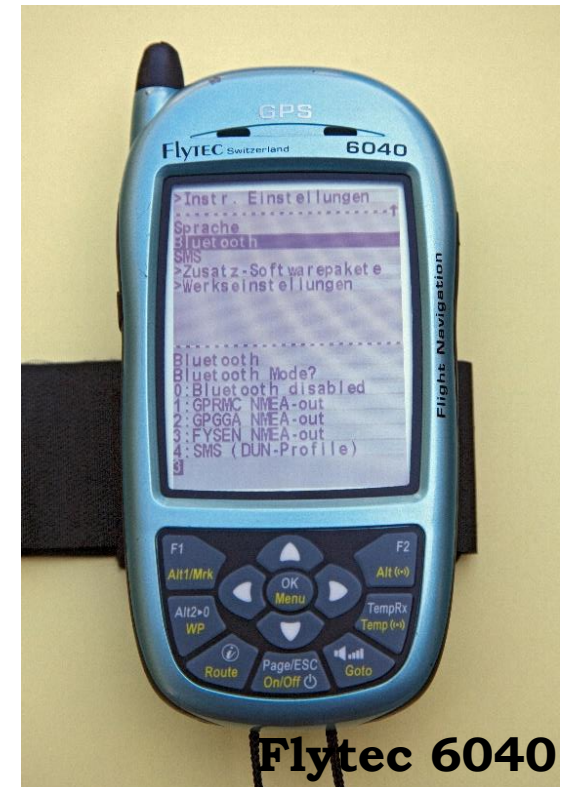


Beschleunigung messen

Historisch gegeben: **Variometer - Steigrate**



das bewährte mechanische
“Winter-Instrument”



Flytec 6040

Beschleunigung messen

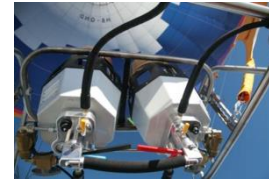
Atmosphäre

Widerstandskräfte

Brenner



variabel



$$\text{Beschleunigung } a = \frac{F}{m}$$

Ausrüstung

Zuladung

Masse der Heißluft



const

$$a \sim F$$

Beschleunigung messen

- **die Heißluft im Ballon kühlt**

pro Sekunde etwa $0.03\text{ }^{\circ}\text{K}$

(Kompensation über Brenner mit 8g Propangas)

- **umgerechnet auf Tragkraft bedeutet dies:**

wir verlieren pro Sekunde etwa 4 N

- **Beschleunigung wächst**

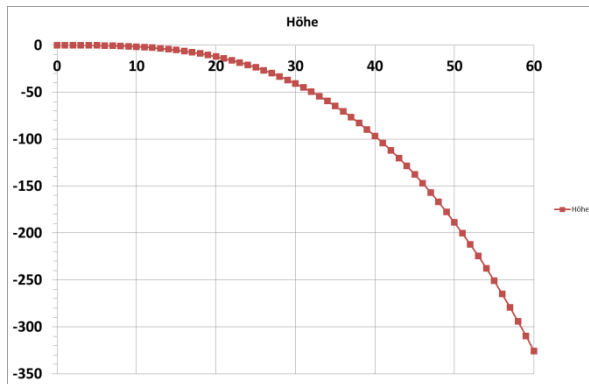
pro Sekunde um etwa -0.001 m/s^2

Beschleunigung messen

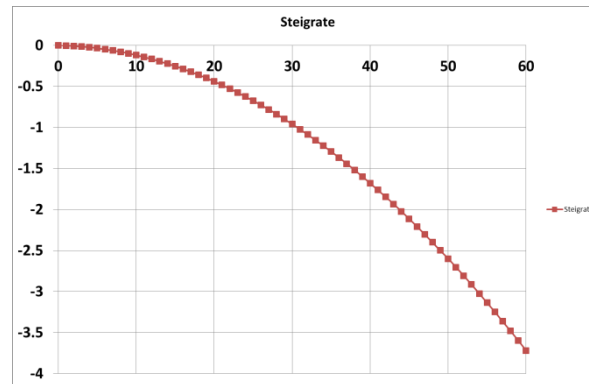
nach 60 Sekunden

bedeutet die Kühlung der Heißluft:
(ohne Betrachtung von Widerstandskräften)

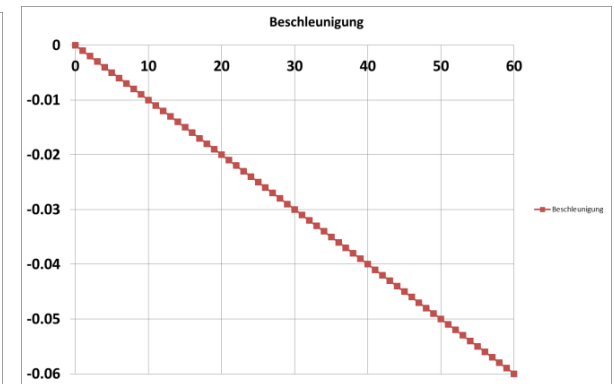
Höhe
-315 m



Fallgeschwindigkeit
-3.6 m/s



Beschleunigung
0.06 m/s²



Die Aerodynamik des Heißluftballons ist charakterisiert durch eine beschleunigte Bewegung, wobei der Betrag der Beschleunigung mit der Zeit wächst.

Beschleunigung messen

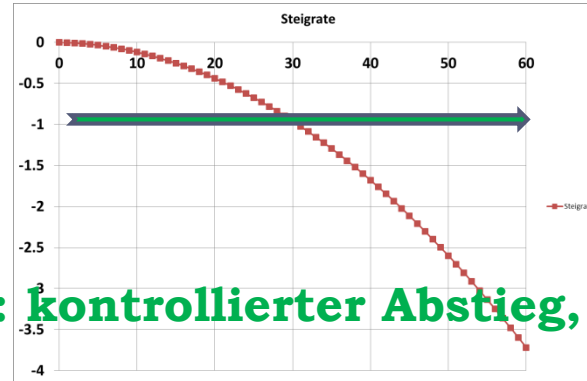
würde bedeuten:

Maß für die aktuell am Ballon wirkenden Kräfte

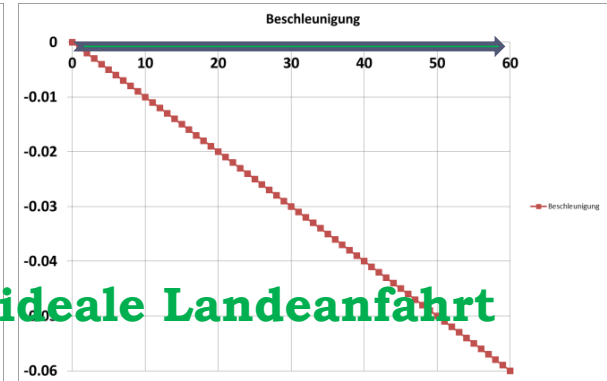
Höhe



Vertikalgeschwindigkeit



Beschleunigung



Spezialfall: kontrollierter Abstieg, ideale Landeanfahrt

Aufgabe: Die Beschleunigung müsste mit $\pm 0.001 \text{ m/s}^2$ bestimmt werden können?

Beschleunigung messen

- **Beschleunigung als dv/dt im Ballon nicht direkt messbar**
u.a. durch Bewegung der Passagiere im Korb verfälscht
- **Messgrößen sind verrauschte Druckwerte**

aber:

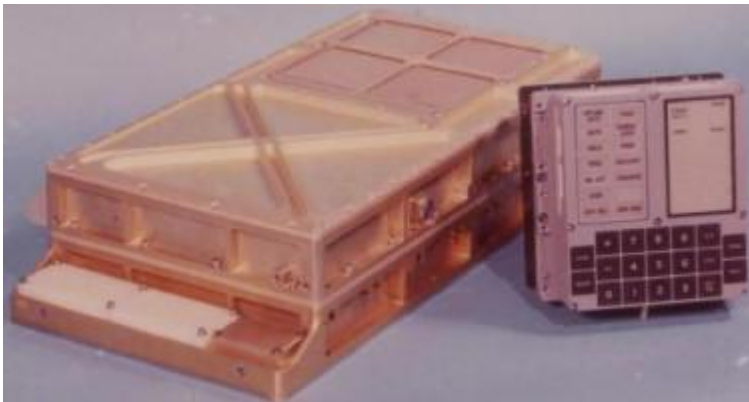
- **träge Masse dämpft**
- **hochgenaue, moderne barometrische Sensoren**
- **Fortschritte bei der Signalverarbeitung**
- **Lösung bekannt in der Filter- und Signaltheorie:**

Kalman Filter

Beschleunigung messen: Kalman Filter



Quelle: <http://www.ethlife.ethz.ch>



- ▶ **1960 von Rudolf E. Kalman entwickelt**
- ▶ **Grundlegend für Apollo bei Mondlandung**
- ▶ **Implementierung des Algorithmus**
(Variante EKF, Stanley F. Schmidt)
- ▶ **Echtzeitsignalverarbeitung**
- ▶ **Apollo Guidance Computer (AGC)**
- ▶ **Steuerung des Navigationssystems der Mondfähre während der Landephase**

Beschleunigung messen: Kalman Filter

- **mit dem Filter wird in unserer Steuerung in definierten Zeitschritten die Beschleunigung aus gemessenen Druckänderungen geschätzt**
- **Grundlage ist die Bewegungsgleichung des Ballons**
- **aus dem vergangenen Systemzustand wird zunächst mit Hilfe der verrauschten, fehlerbehafteten Druckwerte der zukünftige Bewegungszustand geschätzt**
- **dabei erfolgt die Anpassung und Korrektur der neuen Vorhersage unter Berücksichtigung des Fehlers der vorangegangenen Schätzung**

Beschleunigung messen: Kalman Filter

- **als optimaler Schätzalgorithmus bekannt**
- **sehr zuverlässig und gegen Fehler robust**

**heute Standard in der digitalen
Signalverarbeitung**

Rechnergestützte Brennersteuerung:



Brenner



„Schroeder“ FB 6

2x Magnetventil

12V Versorgung

von der Stange - absolut zuverlässig & über Trennventile sicher!

M5Stack Module: M5Core



Steuerbox mit Barosensor, GPS und Brenner Relais

Entwicklungsbox



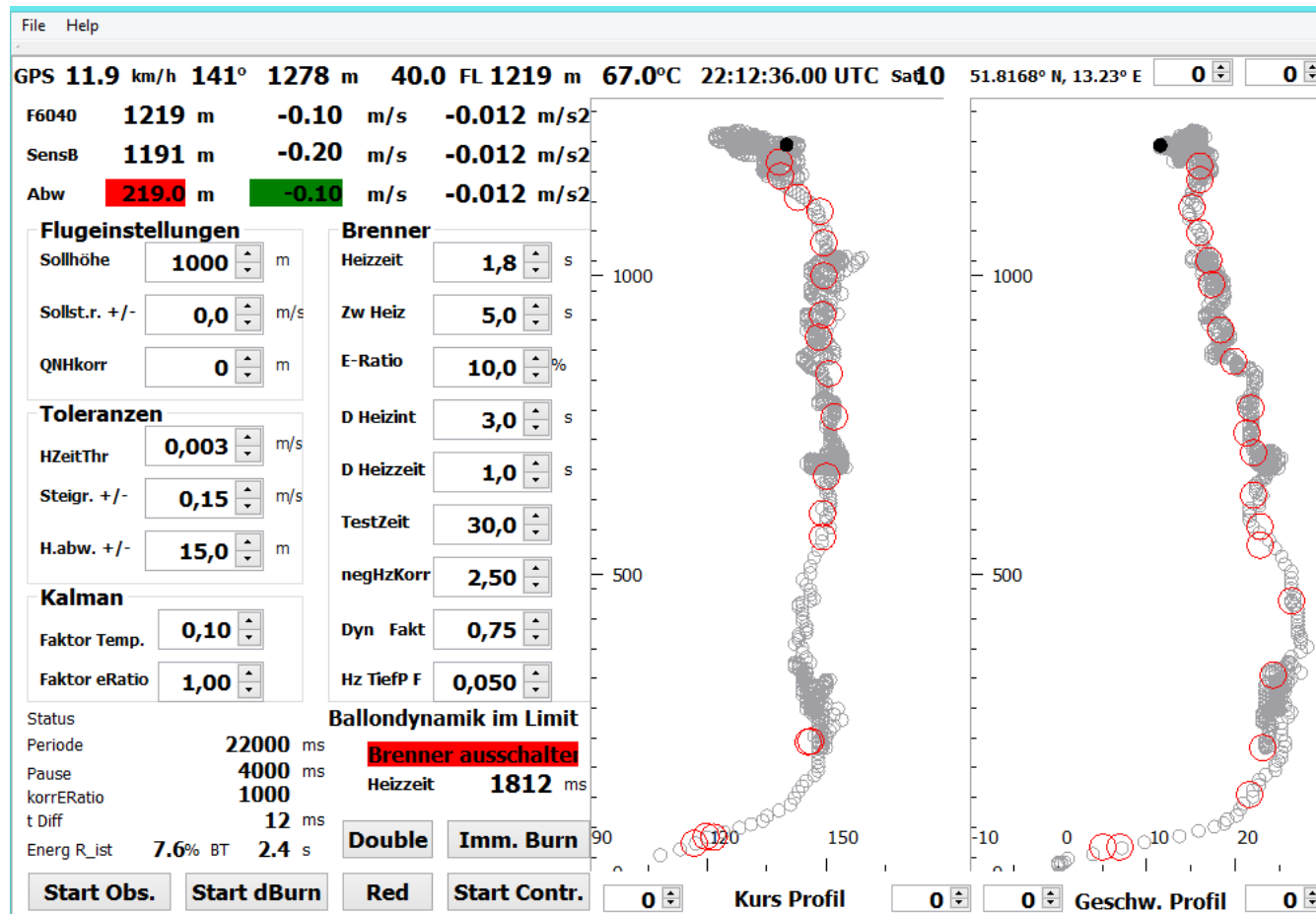
2008 gebaut

anfangs mit „Poti“

Relaiskarte mit serielllem Interface



PC Variante: Nutzerinterface



Parameter Eingabe (links) sowie Kurs- und v-Profil (rechts)

M5Stack Module: M5Core2



ESP32, Touchscreen, modulare Struktur, WLAN, Bluetooth

M5Stack Module: M5Core2



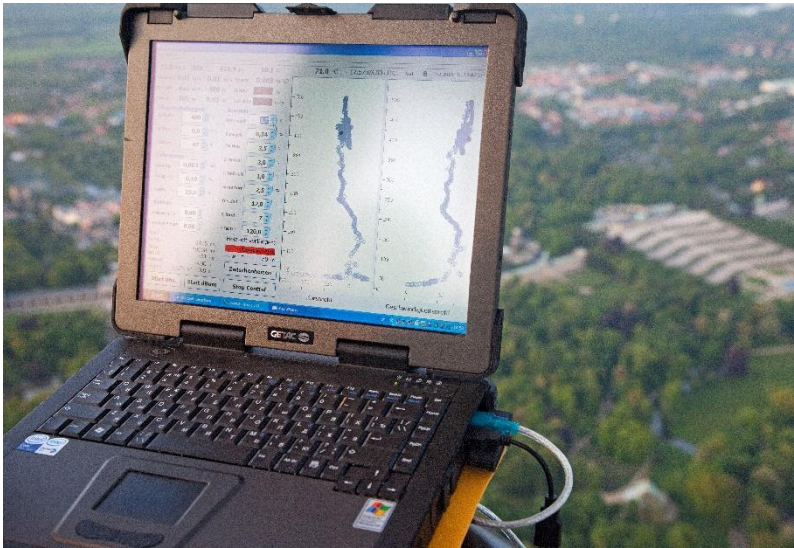
Webinterface und ToF Entfernungsmesser 180m

M5Stack Module: M5Core2



Größenvergleich im Korb, geringes Gewicht, 0.14A Strom!!!

im Kontrast zu:



8kg Notebook mit 3.5 A Stromaufnahme 7 kg Steuerbox mit 12 Ah Akku

plus Reserveakku und, und, und

Rechnergestützte Brennersteuerung:



höhenkontrollierte Nachtfahrt



22 Juli 2022, nördlich Falkenberg

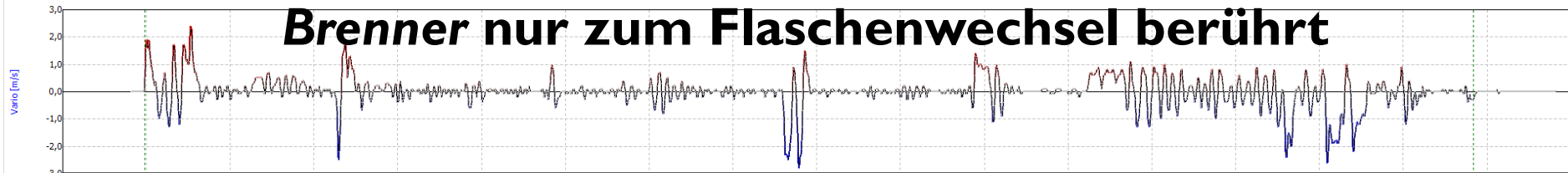
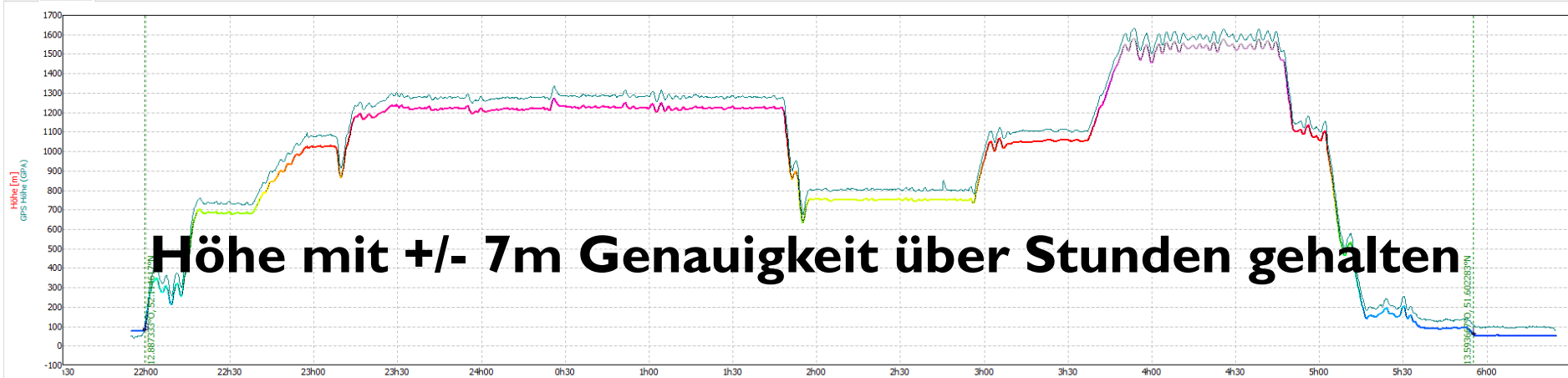
8 Stunden Fahrt von Sonnenuntergang zu Aufgang

FlyChart - [Flug 23 vom 27.07.22, 21:54:26]

Datei Bearbeiten Ansicht Fenster Extras Hilfe



Daten Barogramm



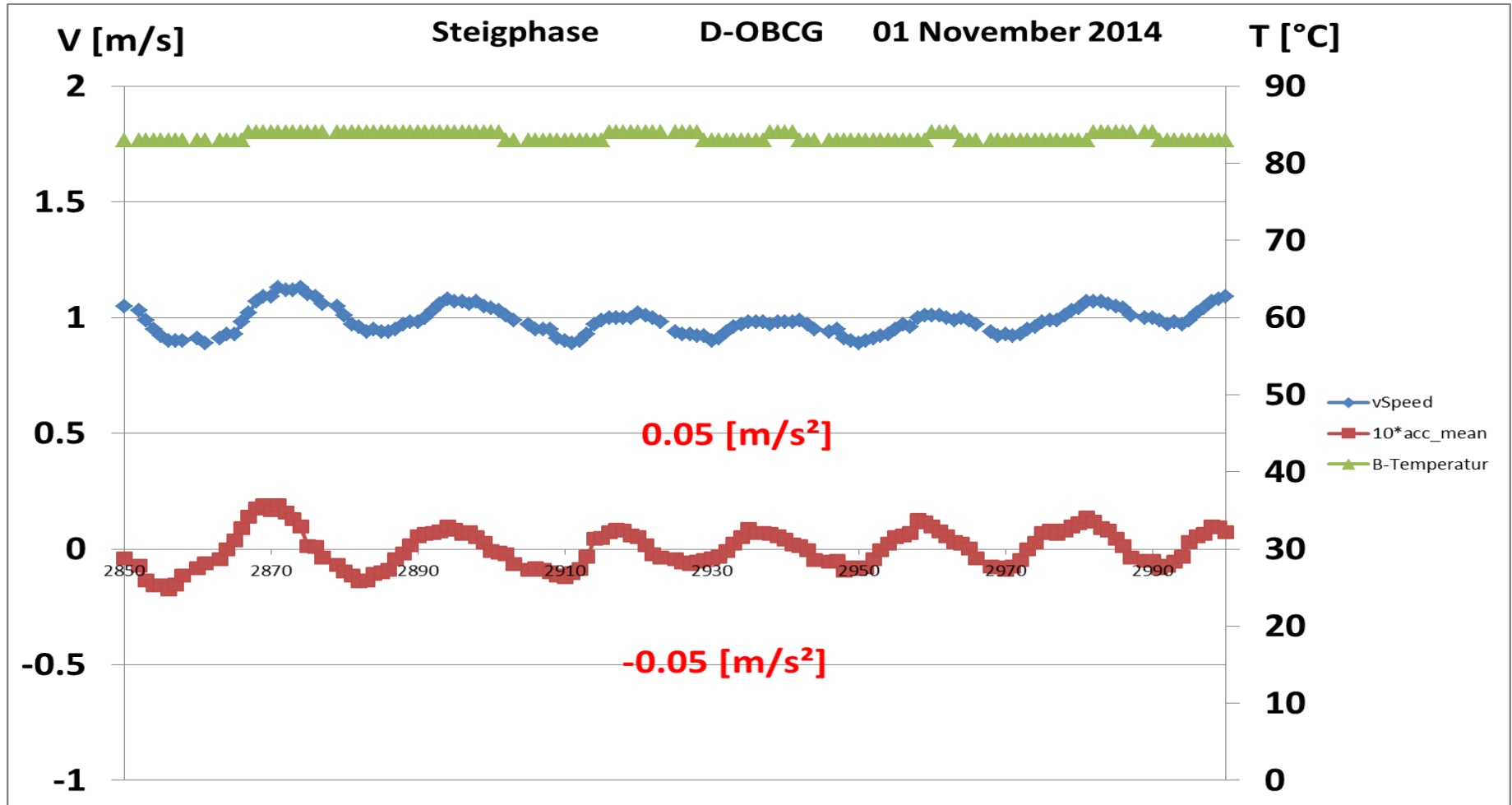
Linke Maustaste: ausmessen; +Alt: zoomen; +Strg: verschieben; Rechte Maustaste: Menu

Flytec

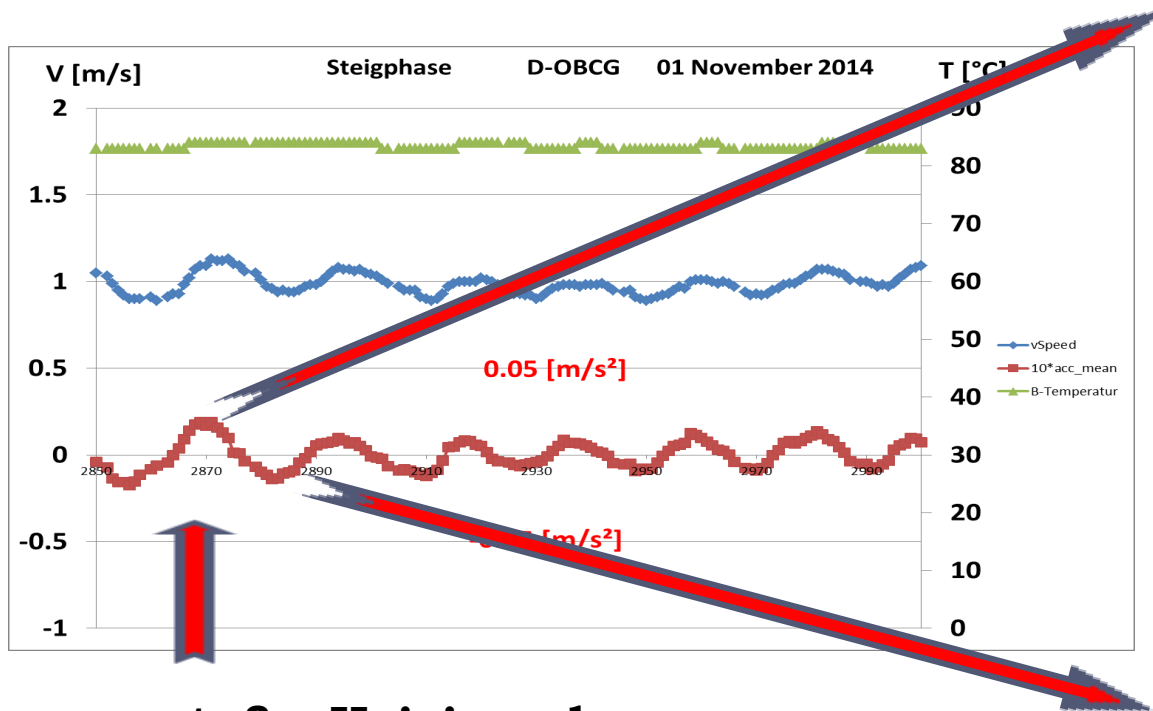
zurück zur Theorie: Funktionsprinzip Steuerung



Ballonsteuerung: Funktionsprinzip



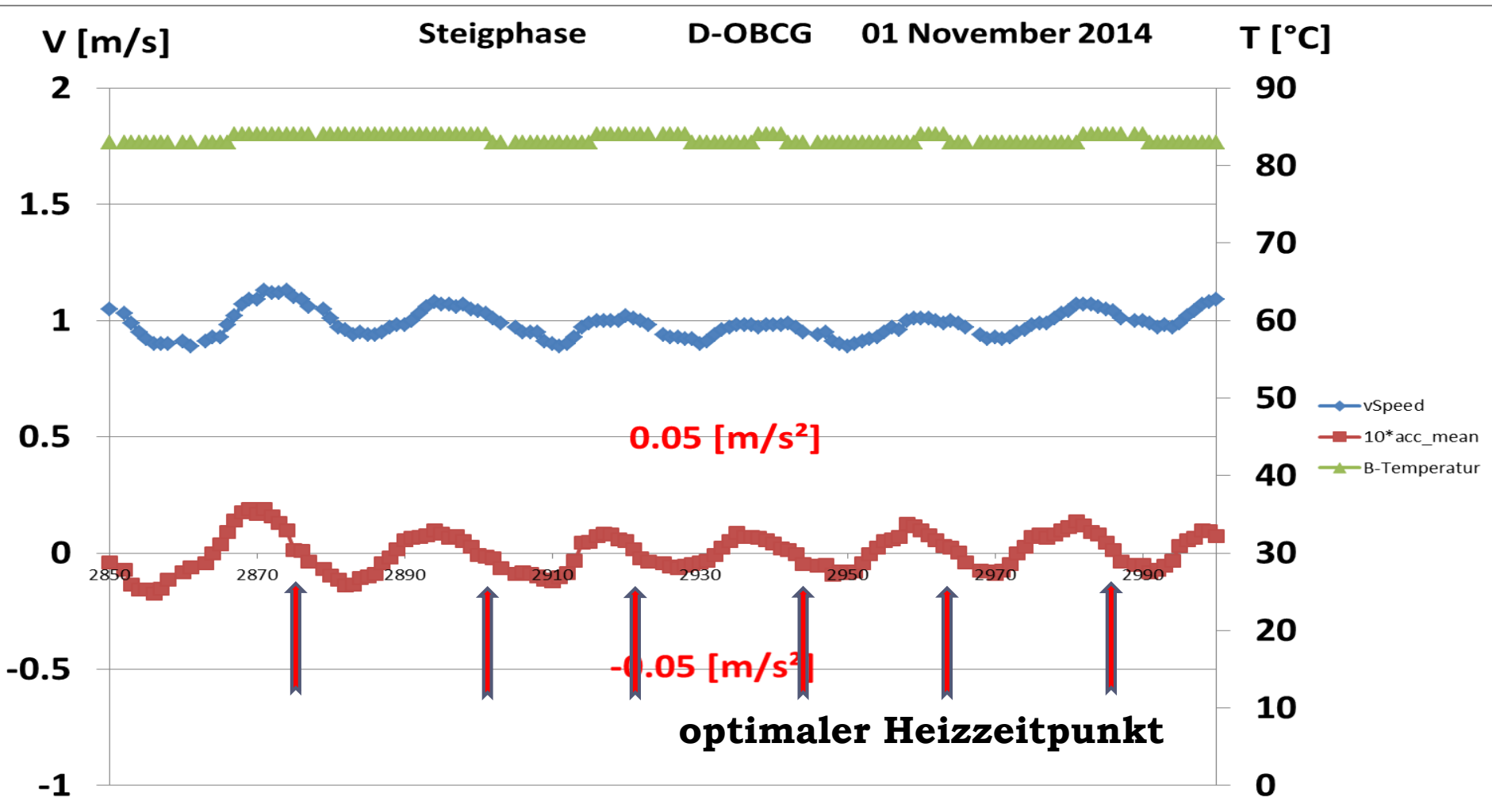
Ballonsteuerung: Funktionsprinzip



Brennerstoß – Heizimpuls

der Ballon atmet im dynamischen Sinne

Anwendung: Ballonsteuerung: Steigen mit 1m/s

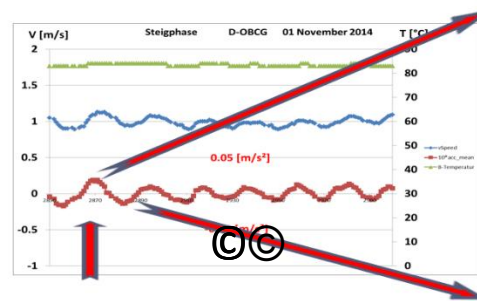


Ballonsteuerung: Funktionsprinzip

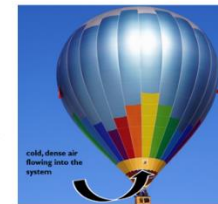
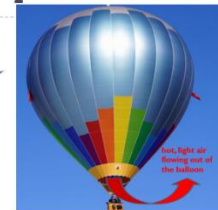
DFS -Ballonfahrertag 2023



Ballonsteuerung: Funktionsprinzip



Brennerstoß – Heizimpuls



<https://hballon.com> 01/04/2023

Heizzeitpunkt bei $dE/dt = 0$

**das ist unser Kunstgriff zur
Steuerung des Brenners**

zusammenfassend

- **neben Höhe und Steigrate ist die Beschleunigung des Ballons bestimmbar**
- **Beschleunigung ist ein direktes Maß für die am Ballon wirkenden Kräfte**
- **erst die Kenntnis der Kraftwirkung ermöglicht die Ballonsteuerung und somit gassparendes Fahren**

Abschätzung der möglichen Kräfte am Ballon bedeutet

Berechenbarkeit

Aus der Kenntnis der wirkenden Kräfte resultiert
Ökonomie & Sicherheit



unsere Mitstreiter:

Sebastian Hanisch

Christoph Tatray

Jens Berger

Michael Haberler

hervorzuheben:

Vincent Amon



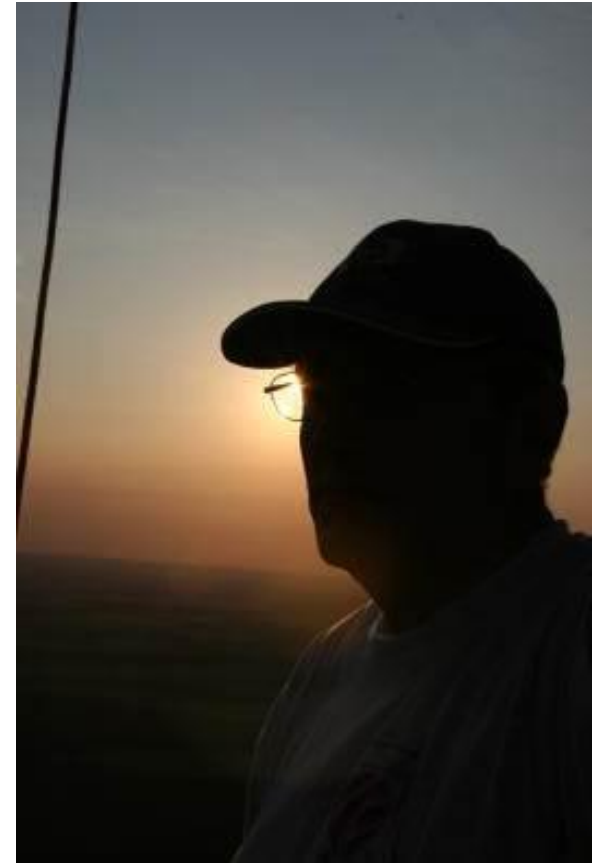
Ballon Vario auf M5Stack Basis

nun dürft Ihr mich stellvertretend löchern!

**was haltet Ihr von den neuen
Beschleunigungsmessungen im
Ballon?**



**Herzlichen Dank
und immer „Gut Land“!**



<https://hlballon.com>