

Institut für Luft- und Raumfahrt
Fachgebiet Leichtbau und Luftfahrzeuggentwurf

Studienarbeit

**Rechnerische und experimentelle Untersuchung des Potenzials einer thermischen
Isolierung der Hülle eines Heißluftballons**

von
cand.Ing. Martin Wähler
(Matr.-Nr. 185080)

Dübendorf, den 28.01.2008

INHALT

1	EINLEITUNG	- 4 -
1.1	Bedeutung	- 4 -
1.2	Aufgabenstellung	- 6 -
2	STAND DER TECHNIK	- 7 -
2.1	Heißluftballontechnik	- 7 -
2.2	Isolationstechnik	- 8 -
3	GESTALTUNGSPARAMETER FÜR DIE BALLONANWENDUNG	- 10 -
4	RECHENMODELL FÜR DIE WÄRME- UND KRÄFTEBILANZ	- 11 -
4.1	Wärmeströme	- 11 -
4.2	Kräfte	- 25 -
5	MESSUNG UND ERGEBNISSE	- 28 -
5.1	Messaufbau	- 28 -
5.2	Ergebnisse	- 30 -
6	PARAMETERIDENTIFIKATION ZUR VALIDIERUNG DES RECHENMODELLS	- 34 -
7	MISSIONSRECHNUNG	- 36 -
7.1	Steigen und Schweben	- 36 -
7.2	Optimierung der Isolationsdicke	- 40 -
8	DISKUSSION DER POTENZIALE EINER ISOLIERUNG	- 42 -
	ANHANG	- 43 -

Verwendete Größen

F_T, f_T	[N],[N/m ³]	Tragkraft, bzw. spezifische Tragkraft
F_{ges}, f_{ges}	[N],[N/m ³]	Gesamtgewicht, bzw. spezif. Gesamtgewicht
F_W, f_W	[N],[N/m ³]	Widerstand, bzw. spezif. Widerstand beim Steigen
Nu	[-]	Nußelt - Zahl
Pr	[-]	Prandtl- Zahl
Gr	[-]	Grashof- Zahl
Re	[-]	Reynolds- Zahl
R	[J/(kg*K)]	spezifische Gaskonstante
p	[Pa]	Druck
T, θ	[K],[°C]	Temperatur
p_0	[Pa]	Normdruck nach ISA
T_0	[K]	Normdruck nach ISA
ρ	[kg/m ³]	Dichte
Q	[kW*h]	Wärmemenge
Q°	[kW]	Wärmestrom
P	[kW]	Leistung
λ	[W/(m*K)]	Wärmeleitwert
α	[W/(m ² *K)]	Wärmeübergangskoeffizient
α_{ISO}	[-]	Absorbtkoeffizient der Isolation
ε_{ISO}	[-]	Emissionskoeffizient der Isolation
d_{ISO}	[m]	Dicke der Isolation
n	[-]	Anzahl der Lagen der Isolation
σ	[W/(m ² *K ⁴)]	Stefan- Boltzmann-Konstante
$A_{TempGra}$	[K/m]	Temperaturgradient nach ISA
V	[m ³]	Volumen des Ballons
A	[m ²]	Gesamtoberfläche des Ballons
A_0	[m ²]	Äquatorkreisfläche
D	[m]	Durchmesser des Ballons
w	[m/s]	Geschwindigkeit der Gase im Ballon in z-Richtung
w_{Steig}	[m/s]	Steiggeschwindigkeit des Ballons
H_u	[kW*h/kg]	unterer Heizwert

Indizes

ISOi	innere Isolation
ISOa	äussere Isolation
V	Volumen, im Innern des Ballons
FF	Fernfeld, in der Umgebung
O ₂	Sauerstoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
N ₂	Stickstoff
H ₂ O	Wasserdampf
Br	Brenner

1 Einleitung

1.1 Bedeutung

Unbemannte Ballons bauten vor ca. 1000 Jahren die Inkas. Die bemannte Luftfahrt hatte ihre Geburtsstunde vor 225 Jahren. 1783 entwickelten unabhängig voneinander die Brüder Montgolfier den Heißluftballon und Jacques A.C. Charles den Gasballon. Beide Prinzipien sind bis heute gebräuchlich. Auch die Verbindung beider Prinzipien ist möglich, wie Rozier 1785 zeigte und Picard 1999 zur Weltumfahrung nutzte.

Ballons enthalten ein Gas, das wegen seiner geringeren Dichte leichter ist als die umgebende Luft. Der Ballonpilot kann mit Hilfe des Brenners, Ventilen und durch das Beobachten der Messinstrumente die Balloninnentemperatur steuern und so mit dem Ballon steigen, auf gleicher Höhe fahren oder sinken. Die Richtung legt der Wind fest und in kleinem Maße der Pilot durch das Nutzen der verschiedenen Windrichtungen in den unterschiedlichen Höhen.

Der Heißluftballon wird als Sportgerät sowie zu Werbe- und Forschungszwecken eingesetzt. Durch die technische Entwicklung auf dem Gebiet der Hüllenmaterialien, die Handhabung des Brennstoffes Propan in Flaschen und auch die Entwicklung der Brenner erfreut sich die Ballonfahrt steigender Beliebtheit. Auch wurden Heißluftluftschiffe verwirklicht, die mit einem Seiten- und Höhenleitwerk steuerbar sind.

Durch die Hülle geht Wärme durch Strahlung, Leitung und Konvektion verloren und die Heißluft kühlt sich ab. Es kommt zu einem Tragkraftverlust, den der Pilot durch Energiezufuhr vom Brenner ausgleichen muss.

Die Fahrzeit eines Heißluftballons hängt stark von der mitgeführten Brennstoffmenge ab. Der Brennstoffverbrauch wird umso größer, je größer die Hüllenoberfläche und je größer der Wärmeübergang vom Traggas durch die Hülle zur Umgebungsluft ist. Moderne Sportballone für 4 Personen weisen ein Volumen von ca. 3000 m³ auf und benötigen für eine einstündige Fahrt, je nach Fahrhöhe, zwischen 50 und 100 kg Propangas. Die zugeführte Energie gleicht dabei den Temperaturverlust infolge Wärmeabgabe an die Umgebung aus.

Es ist nun das Ziel aktueller Forschung auf diesem Gebiet, die Wärmeverluste durch thermische Isolierung der Hülle zu minimieren, wobei der zusätzliche materielle Aufwand der Isolierung mit einer benötigten Vergrößerung des Volumens bzw. der Oberfläche konkurriert. Das hierbei angewendete Isolationsprinzip (Strahlungsreflexion, Absorption, Wärmeleitung) spielt genauso eine wesentliche Rolle bei der Ballonauslegung wie auch die verwendeten Materialien, die bei geringer Gasdurchlässigkeit zugleich äußerst leicht und temperaturfest sein müssen. Außerdem müssen diese Materialien kostengünstig und witterungsbeständig sein, eine hohe Lebensdauer aufweisen und die nach jedem Flug notwendigen Faltungen und Knitterungen ertragen. Mit der Spezifikation der Isolierung kommt damit ein weiterer Auslegungsparameter für Heißluftballone ins Spiel, der bei Systemoptimierungen berücksichtigt werden muss.

Mit der durch eine thermische Isolierung der Hülle erzielten Verringerung der Brennstoffmenge kann sowohl eine Verlängerung der Fahrzeit bzw. der Reichweite als auch eine Erhöhung der Nutzlast und damit eine signifikante Steigerung der Flugleistungen eines Heißluftballons erreicht werden.



Abbildung 1-1 Ballon für Sport und Werbung

1.2 Aufgabenstellung

Ziel ist es, ein Rechenmodell zu erstellen, welches den Einfluss der Oberflächeneigenschaften (Reflexion) und der Isolation (Absorption, Emission, Leitung) beschreibt und ermöglicht, die Massenbilanzen und Wärmebilanzen eines Heißluftballons während des Betriebs aufzustellen und eine Missionsanalyse durchzuführen. Ferner soll der Nutzen einer thermischen Isolation beispielhaft für eine realtypische Mission ermittelt und mit der konventionellen Ballonbautechnik verglichen werden.

Die Aufgabe umfasst im Einzelnen:

- Durchführung einer Recherche zum Stand der Heißluftballontechnik und zur thermischen Isolierungstechnik.
- Herausarbeitung der Gestaltungsparameter einer für die Ballonanwendung geeigneten Isolierungstechnik.
- Erstellung eines Rechenmodells für die Wärmebilanz eines Heißluftballons auf Grundlage einer Weiterentwicklung bestehender Rechenansätze (Dichtl, Skutnik)
- Vermessen eines isolierten und eines nicht isolierten Modellballons bezüglich der Temperaturverteilung an der Hülle, der Hüllenkräfte und des Brennstoffbedarfs.
- Parameteridentifikation zur Validierung des Rechenmodells mit Hilfe der aus dem Experiment gewonnenen Daten.
- Optimierung der Isolationsdicke für idealtypische Missionen mit Hilfe des entwickelten Rechenmodells.
- Diskussion der Potenziale einer Isolierung im Hinblick auf die verbesserten Flugleistungen und den damit verbundenen Mehraufwand

2 Stand der Technik

2.1 Heißluftballontechnik

In den frühen 1970er Jahren wurde der Heißluftballon wiederentdeckt. Jackson und Dichtl [6] beschrieben die Handhabung eines Heißluftballons und sie stellten in einem rechnerischen Teil die Energiegewinne und – verluste gegenüber.

Ähnlich geht Hallmann [9] zur Bilanzierung der Wärmeströme vor. Die relevanten Parameter wurden in systematischen Experimenten, die an der Fachhochschule Aachen durchgeführt wurden, ermittelt. Unter anderem wurden bei Ballonfahrten das Geschwindigkeitsfeld und Temperaturfeld innerhalb des Ballons bestimmt.

Stefan Skutnik [7] untersuchte die Wärmeübergänge am Heißdampfärostaten HeiDAS. Dabei wurde die Isolationsschicht mit in die Rechnung einbezogen. Dieses Berechnungsverfahren führt zu einem nichtlinearen Gleichungssystem, was aber mit modernen PCs gelöst werden kann. Diese Herangehensweise wurde auch in der vorliegenden Arbeit für den Heißluftballon verwendet, da der Einfluss der Isolation auf das Flugverhalten des Ballons untersucht werden kann.

Für Gasballone zur Untersuchung der höheren Atmosphäre existieren bereits Programme zur Energiebilanz und Missionsrechnung. Die NASA nutzt die beiden Programme SINDBAD (Scientific Balloon Analysis Model) und Balloon Ascent [10]. Beide Programme sind sehr umfangreich und lassen sie sich nicht ohne weiteres auf Heißluftballone anwenden.

Das Handbuch für Prüfungsfragen zur Erlangung der Privatpilotenlizenz PPL D (Technik) [11] stellt Diagramme aus den Flughandbüchern bekannter Hersteller zusammen. In den Diagrammen werden die Zusammenhänge zwischen maximaler Steighöhe, Außentemperatur (bei angenommener Innentemperatur 100°C), Gesamtmasse und Tragfähigkeit eines herkömmlichen Ballons mit unisolierter Hülle dargestellt. Damit können die hier vollzogenen Rechnungen zu einem unisolierten Ballon auf Plausibilität hin untersucht werden.

Im Übersichtsbuch über Leichter-als-Luft-Technik von Bock und Knauer [12] nimmt die Hüllenkonstruktion einen breiten Raum ein. Sie stellen die Aufgaben der Hülle den Forderungen gegenüber:

Aufgaben:

- mechanische Funktionen: hohe Reißfestigkeit
- Gasdichtheit: Porosität lässt Wärme entweichen und schwächt das Material
- Schutzfunktion: UV-Strahlung der Sonne führt zu Alterung des Materials

Forderungen:

- Design: geringes Flächengewicht
- Fertigung: gute Handhabbarkeit
- Ausgangsmaterial: geringe Kosten, gute Beschaffbarkeit

Die beiden Autoren weisen darauf hin, dass die kombinierte Belastung der Hülle eines konventionellen Heißluftballons aus UV-Bestrahlung und gleichzeitiger Temperaturbelastung besonders kritisch ist. Zur Erhöhung der UV-Beständigkeit und zur Minderung von Energieverlusten regen sie an, die Hülle zu metallisieren, z.B. durch eine dünne, aufzudampfende Aluminiumschicht.

Die aufgezählten Literaturstellen zeigen, dass ein Interesse an der Heißluftthematik im praktischen Ballonfahren wie auch auf Seiten der Berechnung der Missionen bestehen. Aber sie zeigen auch, dass es bisher keine Modellbeschreibungen für Heißluftballone zur Wärme- und Kräftebilanz und zur Missionsrechnung gibt, die die Eigenschaften der Isolation berücksichtigen.

2.2 Isolationstechnik

Wichtiger Bestandteil eines Heißluftballons ist die Hülle, evtl. mit Isolation. Sie umschließt die heiße Luft, die den nötigen Auftrieb erzeugt.

Verwendet wird ein hitzebeständiges Gewebe vorwiegend aus Nylon (Polyamid 6.6) mit einer Beschichtung aus Silikon oder Polyurethan [8]. Diese Beschichtung dichtet das Gewebe ab und schützt es in gewissem Maße auch gegen die Einwirkung der UV-Strahlung. Das Flächengewicht des Stoffes liegt für heute übliche Ballone zwischen 38 und 90 g/m². Je nach Verarbeitung sind Stofftemperaturen zwischen 100 und 140 °C möglich. Um zu verhindern, dass der Stoff bei einer Beschädigung weiter aufreißen kann,

wechseln sich im Gewebe enge und weite Maschenabstände ab. Dieses so genannte Ripp-Stopp-Gewebe zeichnet sich durch hohe Weiterreißfestigkeit aus.

Für besonders belastete Hüllenbereiche wie das Top und der untere Rand der Hülle stehen Gewebe mit höherer Festigkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit zur Verfügung.

In der Arbeitsgruppe HeiDAS – Heißdampfaerostat – wurde ein leichter Isolationsstoff zum Verhindern des Abkühlens des Traggases verwendet. Da das Traggas Wasserdampf bei Abkühlung auf 100°C kondensieren würde, ist der Isolation ein hoher Stellenwert eingeräumt. Mit der Maßgabe des geringen Gewichtes wurde ein neuartiges Isolationsmaterial entwickelt [5]. Bei einer Dicke von 2,5 bzw. 5 mm haben beide einen Wärmeleitwert λ von ca. 0,03 W/(m*K) und einen Emissionskoeffizienten ε von weniger als 0,1. Die Flächengewichte der Isolationsmaterialien sind 25 g/m² (2,5 mm Folienisolation) bzw. 45 g/m² (3,5 / 6 mm Gewebeisolation). Die Gewebeisolation (aerofabrix® [Iso]) ist zwar das Schwerere von beiden, hat aber den Vorteil der doppelten Spaltbreite und einer höheren Stabilität der Trägermembran. Was einer Forderung aus der Praxis der Heißluftballone nahe kommt.

3 Gestaltungsparameter für die Ballonanwendung

Die Gestaltungsparameter sind in der in dieser Arbeit zu Grunde gelegten Modellierung im Einzelnen

- Eigenschaften der Isolation: Dicke d_{ISO} , Wärmeleitwert λ_{ISO} , Emissionskoeffizient ϵ_{ISO} , das Flächengewicht $(F_G/A)_{ISO}$
- Geometrie: Volumen V , Oberfläche $A_{Oberfläche}$, Durchmesser D
- Energieverbrauch: Massenstrom an Propan m°_{Propan}
- Abflugmasse: Masse des Ballons, bestehend aus Hülle, Korb mit Nutzlast und Brenner und den gefüllten Propanflaschen m_{ges}
- Atmosphärische Bedingungen während der Fahrt: Umgebungsdruck p , Umgebungstemperatur T_{FF}

Die oben genannten Gestaltungsparameter wirken sich auf die Gleichgewichtstemperaturen im Volumen T_V , auf der Innenseite der Isolation T_{ISOi} und auf der Aussenseite der Isolation T_{ISOa} aus.

Eine weitere, hier nicht näher untersuchte Eigenschaft der Isolation ist die reversible Kompressibilität, damit auch nach häufigem Verstauen die Ballonhülle ihre Isolationswirkung behält.

4 Rechenmodell für die Wärme- und Kräftebilanz

4.1 Wärmeströme

Ein Wärmestrom ist der Transport von Wärmeenergie innerhalb eines Zeitbereiches. Der Energietransport erfolgt von der hohen zur niedrigen Temperatur und führt somit zum Ausgleich der Temperaturen.

Wärme kann auf drei Arten übertragen werden: durch Leitung, Konvektion und Strahlung.

- Wärmeleitung ist der molekulare, von Stoffteilchen zu Stoffteilchen erfolgende Transport von Wärme unter der Wirkung eines Temperaturgefälles. Beim Festkörper ist dabei die mittlere Lage der einzelnen Teilchen unverändert. Beim Heißluftballon tritt Wärmeleitung von der Innenseite zur Außenseite der Isolation der Hülle auf.
- Die Konvektion ist ein Wärmetransportmechanismus in Gasen (gilt auch für Flüssigkeiten), wobei durch makroskopische Strömungsvorgänge Wärme in Form von innerer Energie von einem Ort zum anderen befördert wird. Man spricht von freier Konvektion, wenn die Bewegung aufgrund von Dichteunterschieden (Auftrieb) als Folge von Temperaturunterschieden hervorgerufen wird. Dies trifft für einen Heißluftballon an der Außenseite der Hülle zu, wenn dieser auf gleicher Höhe bleibt. Das ist der Fall, wenn der Ballon gefesselt ist oder auf gleicher Höhe fährt. Dabei hat er die gleiche Geschwindigkeit wie die ihm umgebende Luft. Von erzwungener Konvektion spricht man, wenn die Strömung durch äußere Einflüsse verursacht wird. Das ist auf der Innenseite der Isolation durch den Volumenstrom des Brenners gegeben und auf der Außenseite der Isolation der Hülle, sobald der Ballon die Höhe ändert und deshalb relativ zur umgebenden Luft eine Geschwindigkeit in der Vertikalen aufweist.
- Ein dritter Wärmetransport resultiert aus der Wärmestrahlung. Festkörper, Flüssigkeiten und Gase können thermische Energie in Form elektromagnetischer Wellen aussenden und durch Absorption mehr oder weniger aufnehmen und in innere Energie umwandeln. Ist das Medium

zwischen den im Strahlungsaustausch stehenden Körpern strahlungsdurchlässig, wie z.B. Luft, so hat dessen Temperatur keinen Einfluss auf den auch hier vom wärmeren zum kälteren Körper als Wärme fließenden Energiestrom. Der Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung liegt im Infrarotbereich zwischen 0,8 μm und 800 μm . Die äußere Isolation der Hülle sendet Infrarotstrahlung an die Umgebung ab und empfängt auch von dieser Strahlungsenergie.

Die Wärmeübertragung innerhalb der Isolation geht im Wesentlichen durch Leitung vor sich. Die Wärmeübertragung von der heißen Luft innerhalb des Ballons an die Innenseite der Isolation, wie auch die Wärmeübertragung von der Außenseite der Isolation zur umgebenden Luft, wird als Wärmeübergang bezeichnet. Sie erfolgt überwiegend durch Konvektion und Strahlung.

Bei Wärmeübertragungsvorgängen wird zwischen zeitlich unveränderlichen (stationären) und zeitlich veränderlichen (instationären) Vorgängen unterschieden. Im stationären Fall bleiben die Temperaturen an jeder Stelle des betrachteten Mediums und damit auch die Wärmeströme zeitlich konstant. Dieser stationäre Zustand ist hier die Voraussetzung zur Untersuchung der Wärmeströme. Zeitlich veränderliche Wärmetransportvorgänge erfordern einen hohen Rechenaufwand.

Grundgleichungen für die stationäre Wärmeübertragung:

- Wärmeaufnahme

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (4-1)$$

Q	Wärmemenge
m	Masse
c	Wärmekapazität
ΔT	Temperaturdifferenz

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \quad (4-2)$$

\dot{Q} Wärmestrom

Wärmetransport:

- Wärmeleitung

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot \Delta T \quad (4-3)$$

λ Wärmeleitungskoeffizient der isolierten Ballonhülle

d Dicke der isolierten Ballonhülle

A Fläche

- Wärmeübergang

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (4-4)$$

α Wärmeübergangskoeffizient

- Wärmestrahlung

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (4-5)$$

σ Strahlungskonstante, Stefan-Boltzmann-Konstante

T_1 Temperatur der äußeren Isolation der Hülle

T_2 Temperatur der Umgebungsbauten, bzw. der Erdoberfläche

ε Emissionskoeffizient des Hüllenmaterials

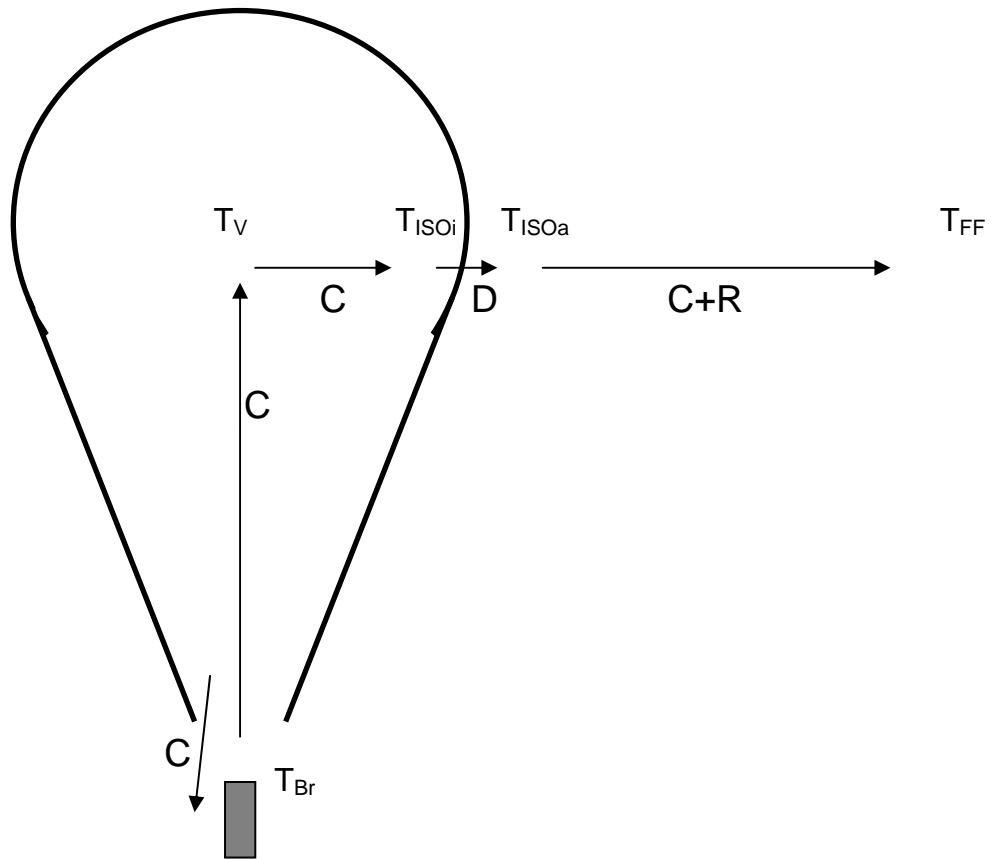


Abbildung 4-1 Wärmeströme am Ballon

	V	ISOi	ISOa	FF
Br	C			
V		C		C
ISOi			D	
ISOa				C+R

Br Brenner

V Volumen

ISOi Innenseite der Isolation

ISOa Außenseite der Isolation

FF	Fernfeld
C	Konvektion
D	Diffusion (Wärmeleitung) durch die Isolation
R	Radiation (Wärmestrahlung)

Im Einzelnen lauten die Wärmeströme:

Konvektion vom Brenner zum Volumen

$$\dot{Q}_{Br-V} = \dot{m}_{Br} \cdot c_p \cdot (T_{Br} - T_V) \quad (4-6)$$

\dot{m}_{Br}	Massenstrom an Gas, der den Brenner verlässt
c_p	spezifische Wärmekapazität der Luft bei konst. Druck
T_{Br}	Temperatur der Gase, die den Brenner verlassen
T_V	Volumentemperatur, d.h. repräsentative Innentemperatur

Konvektion vom Volumen zum Fernfeld durch die Ballonöffnung

$$\dot{Q}_{V-FF} = \dot{m}_{Br} \cdot c_p \cdot (T_V - T_{FF}) \quad (4-7)$$

\dot{m}_{Br}	Massenstrom, der den Ballon durch die Öffnung verlässt, ist identisch dem Massenstrom, den der Brenner ausstößt
T_{FF}	Temperatur des Fernfeldes, d.h. Temperatur der Umgebung

Konvektion vom Volumen zur Innenseite der Isolation

$$\dot{Q}_{V-ISOi} = \alpha_{V-ISOi} \cdot A \cdot (T_V - T_{ISOi}) \quad (4-8)$$

α_{V-ISOi}	Wärmeübergangskoeffizient vom Volumen zur inneren Isolation
A	Oberfläche des Ballons
T_{ISOi}	Temperatur auf der Innenseite der Isolation

Wärmeleitung (Diffusion) von der Innen- zur Außenseite der Isolation

$$\dot{Q}_{ISOi-ISOa} = \frac{\lambda_{ISO}}{d_{ISO}} \cdot A \cdot (T_{ISOi} - T_{ISOa}) \quad (4-9)$$

λ_{ISO} Wärmeleitwert der Isolation

d_{ISO} Dicke der Isolation

T_{ISOa} Temperatur der Außenseite der Isolation

Konvektion von der Außenseite der Isolation zum Fernfeld

$$\dot{Q}_{ISOa-FF} = \alpha_{ISOa-FF} \cdot A \cdot (T_{ISOa} - T_{FF}) \quad (4-10)$$

$\alpha_{ISOa-FF}$ Wärmeübergangskoeffizient von der Außenseite der Isolation zum Fernfeld

Strahlung (Radiation) von der Außenseite der Isolation zum Fernfeld

$$\dot{Q}_{ISOa-FF(Rad)} = \varepsilon_{ISOa} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{ISOa}^4 - T_{FF}^4) \quad (4-11)$$

ε_{ISOa} Emissionskoeffizient der Außenseite der Isolation

Die Wärmeströme lassen sich in drei Gleichgewichtsprozesse einteilen.

Der Wärmestrom vom Brenner erwärmt das Volumen und von diesem wiederum gehen Wärmeströme an die innere Isolation und durch die Öffnung an das Fernfeld:

$$\dot{Q}_{Br-V} = \dot{Q}_{V-ISOi} + \dot{Q}_{V-FF} \quad (4-12)$$

Der Wärmestrom vom Volumen an die innere Isolation verursacht einen Wärmestrom durch die Isolation hindurch auf die Außenseite der Isolation:

$$\dot{Q}_{V-ISOi} = \dot{Q}_{ISOi-ISOa} \quad (4-13)$$

Der Wärmestrom durch die Isolation bewirkt auf der Außenseite einen Wärmestrom an das Fernfeld einerseits durch Konvektion und andererseits durch Strahlung:

$$\dot{Q}_{ISOi-ISOa} = \dot{Q}_{ISOa-FF} + \dot{Q}_{ISOa-FF(Rad)} \quad (4-14)$$

Diese drei Prozesse können zu einem Gleichungssystem zusammengefasst werden, das wegen der Strahlungsterme in vierter Potenz der Temperaturen ein nichtlineares Gleichungssystem ist:

$$\begin{pmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & 0 \\ \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ 0 & \alpha_4 & \alpha_5 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_V \\ T_{ISOi} \\ T_{ISOa} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (4-15)$$

$$\alpha_1 = -\left(2 \dot{m}_{Br} \cdot c_p + \alpha_{V-ISOi} \cdot A\right) \quad (4-16)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{V-ISOi} \cdot A \quad (4-17)$$

$$\alpha_3 = -\left(\alpha_{V-ISOi} + \frac{\lambda_{ISO}}{d_{ISO}}\right) \cdot A \quad (4-18)$$

$$\alpha_4 = \frac{\lambda_{ISO}}{d_{ISO}} \cdot A \quad (4-19)$$

$$\alpha_5 = -\left(\frac{\lambda_{ISO}}{d_{ISO}} + \alpha_{ISOa-FF}\right) \cdot A \quad (4-20)$$

$$X = -\dot{m}_{Br} \cdot c_p \cdot (T_{Br} + T_{FF}) \quad (4-21)$$

$$Y = 0 \quad (4-22)$$

$$Z = -\alpha_{ISOa-FF} \cdot A \cdot T_{FF} + \varepsilon_{ISOa} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{ISOa}^4 - T_{FF}^4) \quad (4-23)$$

Wegen dieser Abhängigkeit in vierter Potenz ist es nicht möglich, nach den drei gesuchten Temperaturen T_V , T_{ISOi} und T_{ISOa} aufzulösen. Aber mithilfe von Startwerten ist das iterative Lösen möglich. Für jeden Versuchsballon sind die Größen: Dicke der Isolation d_{ISO} , Wärmeleitfähigkeit der Isolation λ_{ISO} und der Emissionskoeffizient der Außenseite der Isolation ε_{ISOa} charakteristisch. Für vorgegebene Brennerleistungen P_{Br} ergeben sich durch das Gleichungssystem für jeden Ballon die drei Temperaturen im stationären Zustand.

Der Wärmestrom vom Volumen zur Innenseite der Isolation durch erzwungene Konvektion hängt ab von der Geschwindigkeit der heißen Gase. Diese Geschwindigkeit soll mit einem einfachen Modell abgeschätzt werden.

Der Brenner erzeugt einen Volumenstrom an heißen Gasen, die innerhalb einer Säule der Höhe h (Höhe des Ballons) aufsteigen. Die Gase erreichen den Top des Ballons, der hier vereinfacht als Zylinder betrachtet wird, und ändern die Strömungsrichtung. Sie strömen im gesamten Volumen, vermindert um das Volumen der Säule über dem Brenner, nach unten. Der Massenstrom steht mit der Geschwindigkeit der ausströmenden Gase in folgendem Zusammenhang:

$$\dot{m}_{Br} = \rho_{Br} \cdot \dot{V}_{Br} = \rho_{Br} \cdot \frac{V_{Zylinder}}{t} = \rho_{Br} \cdot A_{Br} \cdot \frac{h}{t} = \rho_{Br} \cdot A_{Br} \cdot v_{Br} \quad (4-24)$$

Gemäß der Kontinuitätsgleichung bleibt der Massenstrom bei Änderung des Querschnittes gleich. Somit gilt für die im Hohlzylinder nach unten strömenden Gase:

$$\dot{m}_{Br} = \rho_V \cdot \dot{V}_{Hohlzylinder} = \rho_V \cdot \frac{V_{Hohlzylinder}}{t} = \rho_V \cdot A_{Hohlzylinder} \cdot \frac{h}{t} = \rho_V \cdot A_{Hohlzylinder} \cdot v_{Hohlzylinder} \quad (4-25)$$

Die Grundfläche des Hohlzylinders beträgt:

$$A_{Hohlzylinder} = \frac{V_{Ballons}}{h} - A_{Br} \quad (4-26)$$

Mithilfe der Zustandsgleichung des idealen Gases ergibt sich damit für die Geschwindigkeit innerhalb des Ballons:

$$v_{\text{Hohlzylinder}} = \frac{T_V}{T_{Br}} \cdot \frac{A_{Br}}{A_{\text{Hohlzylinder}}} \cdot v_{Br} \quad (4-27)$$

V_{Ballon}

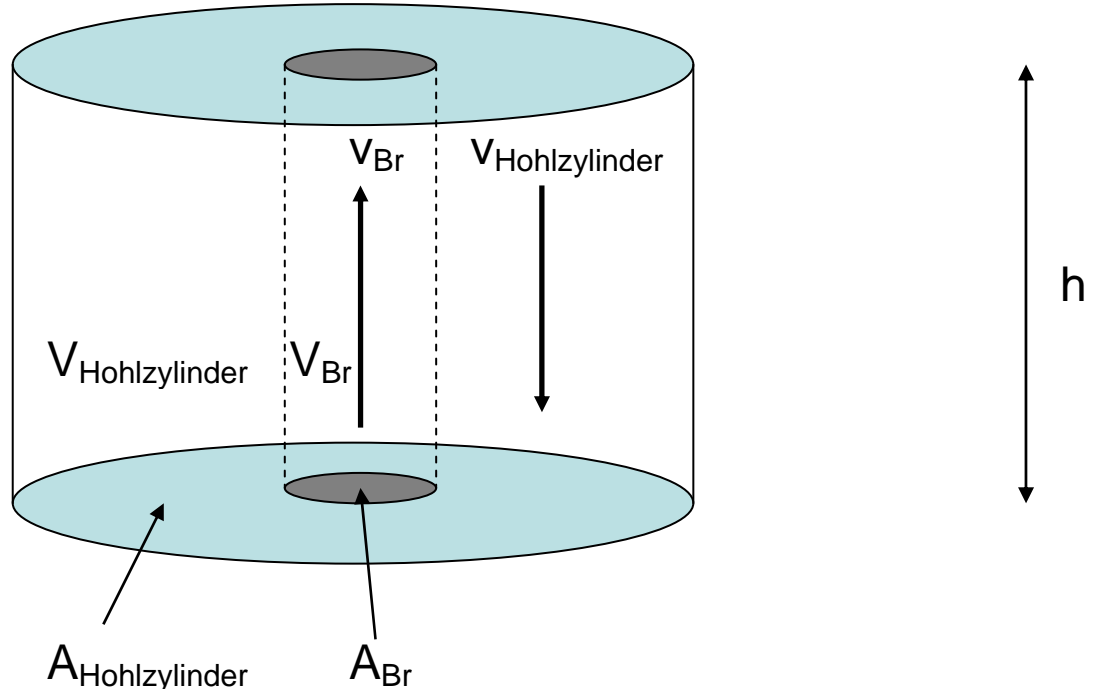


Abbildung 4-2 Modell zur Ermittlung der Geschwindigkeit innerhalb des Ballons

Geometrie des Ballons

Zur Berechnung der Wärmeströme ist die Kenntnis einiger Abmessungen nötig. Hüllen von Heißluftballonen werden, abgesehen von Sonderformen, in einer Form genäht, die einem umgedrehten Tropfen entspricht. Dies hat gegenüber der Kugelform den Vorteil der günstigen Krafteinleitung. Nur bei einem Helium oder Wasserstoff gefüllten Gasballon, die einen Innendruck aufweisen, der höher ist als der Umgebungsdruck, ist die Kugelform geeigneter.

Jeder Hersteller von Heißluftballonen hat seine eigene Form, die sich aus den Faktoren Material- und Herstellungskosten, Gewicht und Geschmack des Kunden

ergibt. Ballone, die an Rennen teilnehmen, zeichnen sich durch ihre schlanke Gestalt aus, da sie beim Wechseln der Fahrhöhe einen geringeren Widerstand aufweisen.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Modellballone sind solche Renn-Ballone vom Typ Racer. Aus Betrachtungen zu Kugel- und Kegelabschnitten können die Zusammenhänge von Volumen V , Gesamtoberfläche A , Äquatorkreisfläche A_0 , Durchmesser D und Höhe H des Ballons gewonnen werden. So kann aus dem Volumen auf die anderen Abmessungen geschlossen werden:

$$D = 2 \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{V}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4-28)$$

$$A = \frac{9}{8} \cdot \pi \cdot D^2 \quad (4-29)$$

$$A_0 = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \quad (4-30)$$

$$H = \frac{3}{2} \cdot D \quad (4-31)$$

Bei einer abweichenden Geometrie ist es möglich, die Abmessungen dem Flughandbuch des Herstellers zu entnehmen.

Brennertemperatur und Volumenstrom

Propan verbrennt mit Sauerstoff zu Kohlendioxid und Wasser. Da die Verbrennungstemperaturen höher als die Siedetemperatur des Wassers sind, befindet sich das Wasser im gasförmigen Zustand –Dampf. Die chemische Reaktion folgt der Reaktionsgleichung:



Aus den molaren Massen der Reaktionspartner ergeben sich die umgesetzten Massen. Es reagieren 44g Propan mit 160g Sauerstoff zu 132g Kohlendioxid und 72g Wasser. Die tatsächlich im Experiment verbrauchte Masse an Propan wird mit

der Masse aus der chemischen Reaktionsgleichung ins Verhältnis gesetzt. Aus diesem Verhältnis ergeben sich die Massen der anderen Reaktionspartner im Experiment.

Mithilfe der Zustandsgleichung des idealen Gases ergeben sich aus den Massen die Volumina, bzw. Volumenströme:

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (4-33)$$

$$\dot{V} = \frac{m \cdot R \cdot T}{p \cdot t} \quad (4-34)$$

p	Druck
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
m	Masse
R	spezielle Gaskonstante
T	Temperatur
t	Zeit

Das Gebläse im Brenner liefert einen Volumenstrom an Luft. Stickstoff reagiert nicht innerhalb des Verbrennungsprozesses, liefert aber einen Teil des Volumenstromes, der den Brenner verlässt. Sauerstoff wird zu einem Teil verbrannt zum anderen aber nur wie Stickstoff durch den Brenner transportiert und erwärmt.

Die Brennertemperatur T_{Br} und der Volumenstrom \dot{V}_{Br} können damit aus den beiden folgenden Gleichungen iterativ bestimmt werden:

$$\dot{V}_{Br} = \left[\dot{m}_{CO_2} \cdot R_{CO_2} + \dot{m}_{H_2O} \cdot R_{H_2O} + (a_{O_2} \cdot \dot{m}_{Luft} - \dot{m}_{O_2}) \cdot R_{O_2} + a_{N_2} \cdot \dot{m}_{Luft} \cdot R_{N_2} \right] \cdot \frac{T_{Br}}{p} \quad (4-35)$$

$$T_{Br} = \left(\frac{1}{1 - \frac{P_{Br} \cdot R_{Luft}}{p \cdot \dot{V}_{Br} \cdot c_p}} \right) \cdot T_{FF} \quad (4-36)$$

- \dot{V}_{Br} Volumenstrom, der den Brenner verlässt
- \dot{m} Massenstrom der beteiligten Gase, Index: CO₂, H₂O, Luft, O₂
- a_{O_2} Massenanteil des Sauerstoffs an der Luft: 21%
- a_{N_2} Massenanteil des Stickstoffs an der Luft: 78%

Wärmeübergangskoeffizient

Der Wärmeübergangskoeffizient beschreibt die Fähigkeit der Luft, Wärmeenergie an die Innenseite der Isolation abzugeben α_{v-ISOi} und von der Außenseite der Isolation von der Umgebungsluft $\alpha_{ISOa-FF}$ aufzunehmen.

Bei der Konvektion wird der Wärmeübergang durch Strömungs- und Wärmeleitungsvorgänge bestimmt [14]. Diese Vorgänge können durch Differentialgleichungen beschrieben werden. Nußelt formte diese Gleichungen so um, dass in ihnen dimensionslose Kenngrößen auftreten (Ähnlichkeitstheorie des Wärmeüberganges). So kann der Wärmeübergangskoeffizient zur dimensionslosen Nußelt -Zahl (Nu-Zahl) in Beziehung gesetzt werden:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (4-37)$$

Zur Bestimmung der Nu-Zahl wurde das Programmpaket Fluent 6.1 verwendet. Es wurde mit einem zweidimensionalen rotationssymmetrischen Modell gerechnet, ähnlich dem, wie es in der Diplomarbeit von S. Skutnik [7] beschrieben ist. Die Nu-

Zahl wurde nach dem dort beschriebenen Verfahren auf die dimensionslosen Ähnlichkeitskennzahlen Grashof (Gr), Prandtl (Pr) und Reynolds (Re) bezogen.

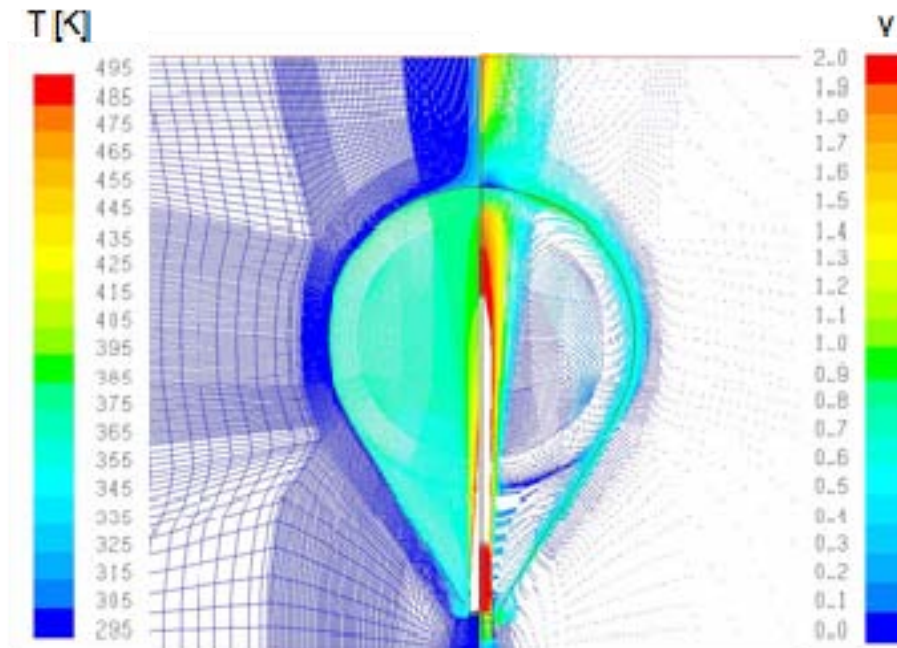


Abbildung 4-3 Rotationssymmetrische CFD-Modellrechnung für einen isolierten Heißluftballon. Absolute Temperatur- (links) und Geschwindigkeitsverteilung (rechts) Fluent6.1 axi,dp,sst-k- ω

Auf der Innenseite des Ballons prägt der Volumenstrom an Heißluft, die den Brenner verlässt, der Luft eine Bewegung auf. Es tritt erzwungene Konvektion auf. Die Nu-Zahl ist in diesem Falle neben der Gr- und der Pr- Zahl auch von der Re- Zahl abhängig.

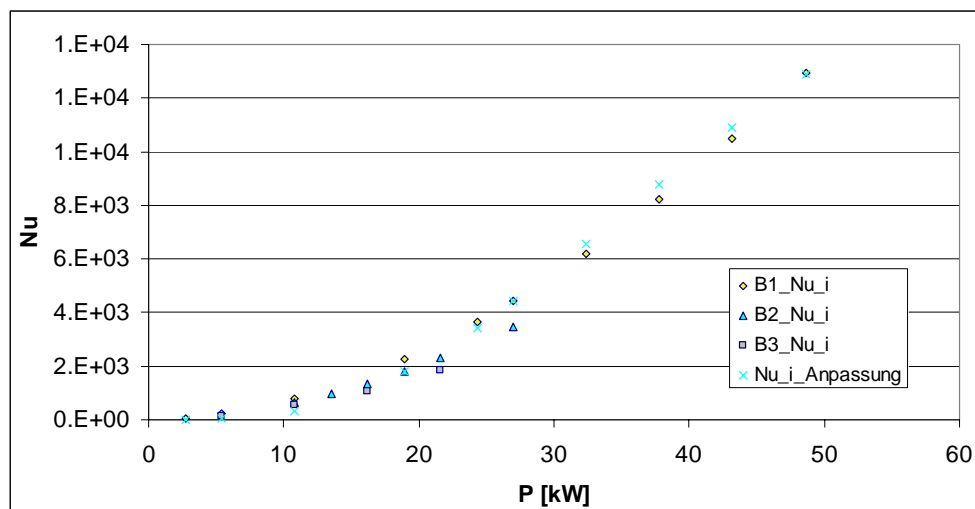


Abbildung 4-4 Nusselt Zahl-Anpassung auf der Innenseite

Die Anpassungsfunktion lautet:

$$Nu_i = 2,13 \cdot 10^{-57} \cdot (Gr(T_v, T_{ISOi}) \cdot Pr(T_{ISOi}))^{5,14} \cdot Re(T_{ISOi})^{0,7} \quad (4-38)$$

Auf der Außenseite des Ballons tritt, solange er nicht die Fahrhöhe ändert, wie dies z.B. auch auftritt bei den Messungen in der Versuchshalle, freie Konvektion auf. Die Nu-Zahl hängt dann allein von der Gr- und der Pr-Zahl ab.

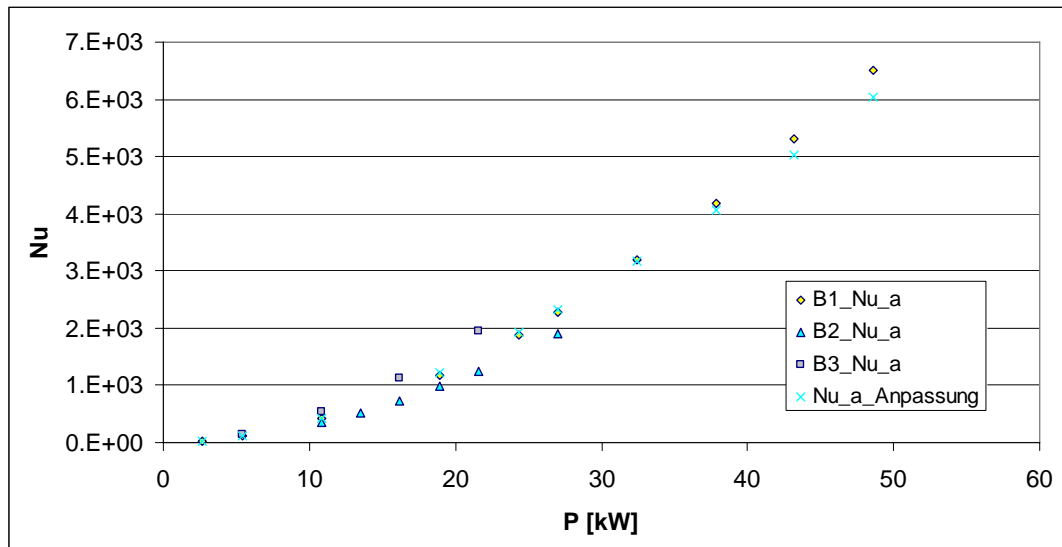


Abbildung 4-5 Nusselt Zahl-Anpassung auf der Außenseite

Die Anpassungsfunktion hat die Form:

$$Nu_a = 2 \cdot 10^{-24} \cdot (Gr(T_{FF}, T_{ISOa}) \cdot Pr(T_{ISOa}))^{2,4} \quad (4-39)$$

4.2 Kräfte

Kräftebilanz

Es gilt das Gesetz vom Auftrieb nach Archimedes: Ein in Flüssigkeit eingetauchter Körper bekommt eine so große Auftriebskraft, wie sie der Gewichtskraft der von ihm verdrängten Flüssigkeit entspricht. Das ist dementsprechend bei verdrängten Gasen auch der Fall.

Bezüglich der Auftriebskraft und der Gewichtskraft lassen sich bei einem Ballon drei Zustände unterscheiden:

$F_A > F_G$ Steigen

$F_A = F_G$ Schweben

$F_A < F_G$ Sinken

Wobei

$$F_A = V \cdot g \cdot \rho_{FF} \quad (4-40)$$

$$F_G = V \cdot g \cdot \rho_V \quad (4-41)$$

F_A Auftriebskraft, erzeugt von der umgebenden Luft

F_G Gewichtskraft der Heißluft

V Volumen des Ballons

g Erdbeschleunigung

ρ_V Dichte innerhalb des Ballonvolumens

ρ_{FF} Dichte der umgebenden Luft – im Fernfeld

Die Luft im Ballon wird durch den Brenner erwärmt, sie dehnt sich aus und ein Teil verlässt den Ballon durch die Öffnung. Die im Ballon verbleibende Luft hat eine geringere Dichte als die Außenluft.

Die Tragkraft ist die Differenz aus Auftriebs- und Gewichtskraft:

$$F_T = F_A - F_G = V \cdot g(\rho_{FF} - \rho_V) \quad (4-42)$$

Zur Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Ballonen wird die Kraft auf das Volumen bezogen, die spezifische Tragkraft:

$$f_T = \frac{F_T}{V} \quad (4-43)$$

Mit der Zustandsgleichung des idealen Gases

$$\rho = \frac{p}{T \cdot R} \quad (4-44)$$

gilt für die spezifische Tragkraft:

$$f_T = \frac{p \cdot g}{R_{Luft}} \left(\frac{1}{T_{FF}} - \frac{1}{T_V} \right) \quad (4-45)$$

- p Druck als Funktion der Höhe (ICAO- Standardatmosphäre)
Innen- und Außendruck sind annähernd gleich groß, da durch die Öffnung ein Druckausgleich erfolgt.
- T_{FF} Temperatur des Fernfeldes (Außentemperatur) als Funktion der Höhe (ICAO- Standardatmosphäre)
- T_V Volumentemperatur (Innentemperatur): Referenztemperatur, die den gesamten Gasraum repräsentiert
- R_{Luft} spezielle Gaskonstante der Luft

Die Gewichtskraft des Ballons mit Heißluft lautet:

$$F_G = (m_{ges} + m_{Heissluft})g \quad (4-46)$$

Die Gewichtskraft des Ballons, bestehend aus Hülle, evtl. mit Isolation, Korb, Brenner, Propan in Flaschen und Nutzlast aber ohne Heißluft ist die Gesamtgewichtskraft, oder bezogen auf das Volumen, die spezifische Gesamtgewichtskraft:

$$F_{ges} = m_{ges} g \quad (4-47)$$

$$f_{ges} = \frac{m_{ges} g}{V} \quad (4-48)$$

5 Messung und Ergebnisse

5.1 Messaufbau

Drei Modellballone B1, B2 und B3, die sich durch die Art der Isolation unterscheiden wurden untersucht.

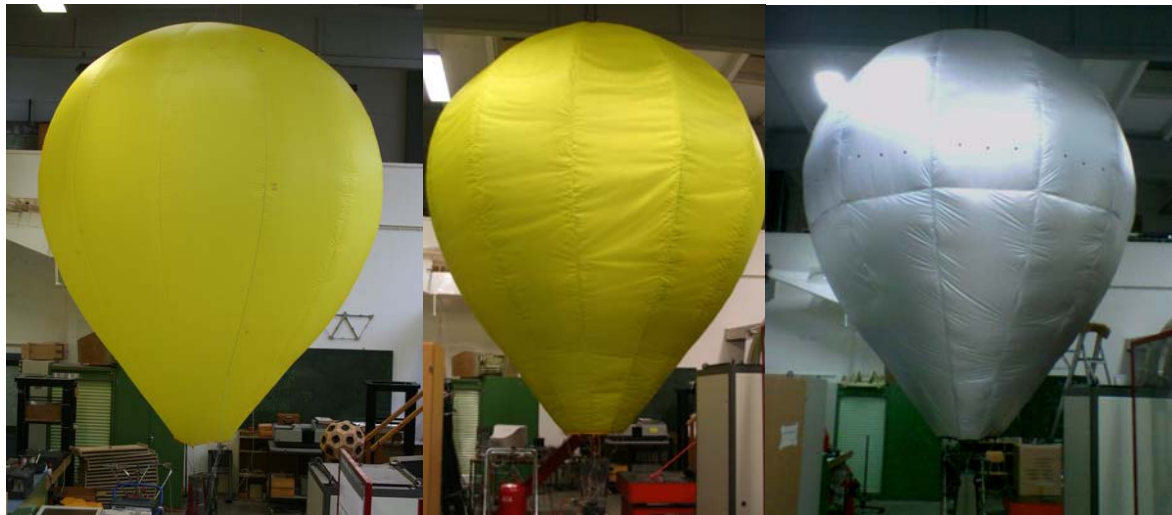


Abbildung 5-1 Die Ballone bei der Vermessung

Sie besitzen das gleiche Volumen von $30,8\text{m}^3$, während die Form dem Ballonmuster Racer von Ultramagic entspricht. Der Referenzballon B1 ist aus „Rip Stop“- Nylon. Der Ballon B2 trägt zusätzlich auf der Innenseite eine sehr leichte Isolationsschicht aus einer mit Aluminium bedampften Polyesterfolie, die Distanzhalter zur Nylonfolie besitzt. Der Ballon B3 besteht aus zwei Aluminium bedampften Nylonschichten, die durch Distanzhalter voneinander getrennt sind. Alle Ballone sind aus 12 Meridiansegmenten aufgebaut. Im Ballon B3 wurden mehrere Isolationstypen gleichzeitig verbaut und getestet. Hier haben vier Meridian-Segmente einen Isolationsspalt von 6mm und acht Segmente einen Abstand von 3,5mm besitzen. Die unterschiedlichen Segmente sind gleichmässig über den Umfang verteilt.

Die Eigenschaften der Modellballone lauten zusammengefasst:

Eigenschaft:	B1	B2	B3
V [m^3]	30,8	30,8	30,8

$m_{\text{H\u00fc}}le$ [g] (mit Isolation)	2400	3440	4850
$A_{\text{Oberfl\u00e4che}}$ [m^2]	49,4	49,4	49,4
$m_{\text{ISO}}/A_{\text{Oberfl\u00e4che}}$ [g/m^2]	0	21,1	49,6
$\lambda_{\text{H\u00fc}}le$ [$W/(m \cdot K)$]	0,28	0,026	0,026
$d_{\text{H\u00fc}}le$ [mm]	$60 \cdot 10^{-3}$	2,5	4,3
$\varepsilon_{\text{H\u00fc}}le$	0,97	0,97	0,05

Tabelle 5-1 Ballon-Parameter

In einem Fesselversuch in der Halle werden der Auftrieb, der Propanverbrauch und Innen- und Au\u00dfentemperaturen der H\u00fc}le gemessen. Dazu wird der zu vermessende Modellballon an einem Brenner an vier Punkten mit Seilen befestigt. Der Brenner steht auf einer Waage und ist mit Gewichten beschwert, um ein Abheben des Hei\u00dfluftballons zu verhindern. Die Daten werden gleichzeitig vom Messrechner mit dem Programm DASyLab erfasst und in eine gemeinsame Excel-Datei geschrieben.

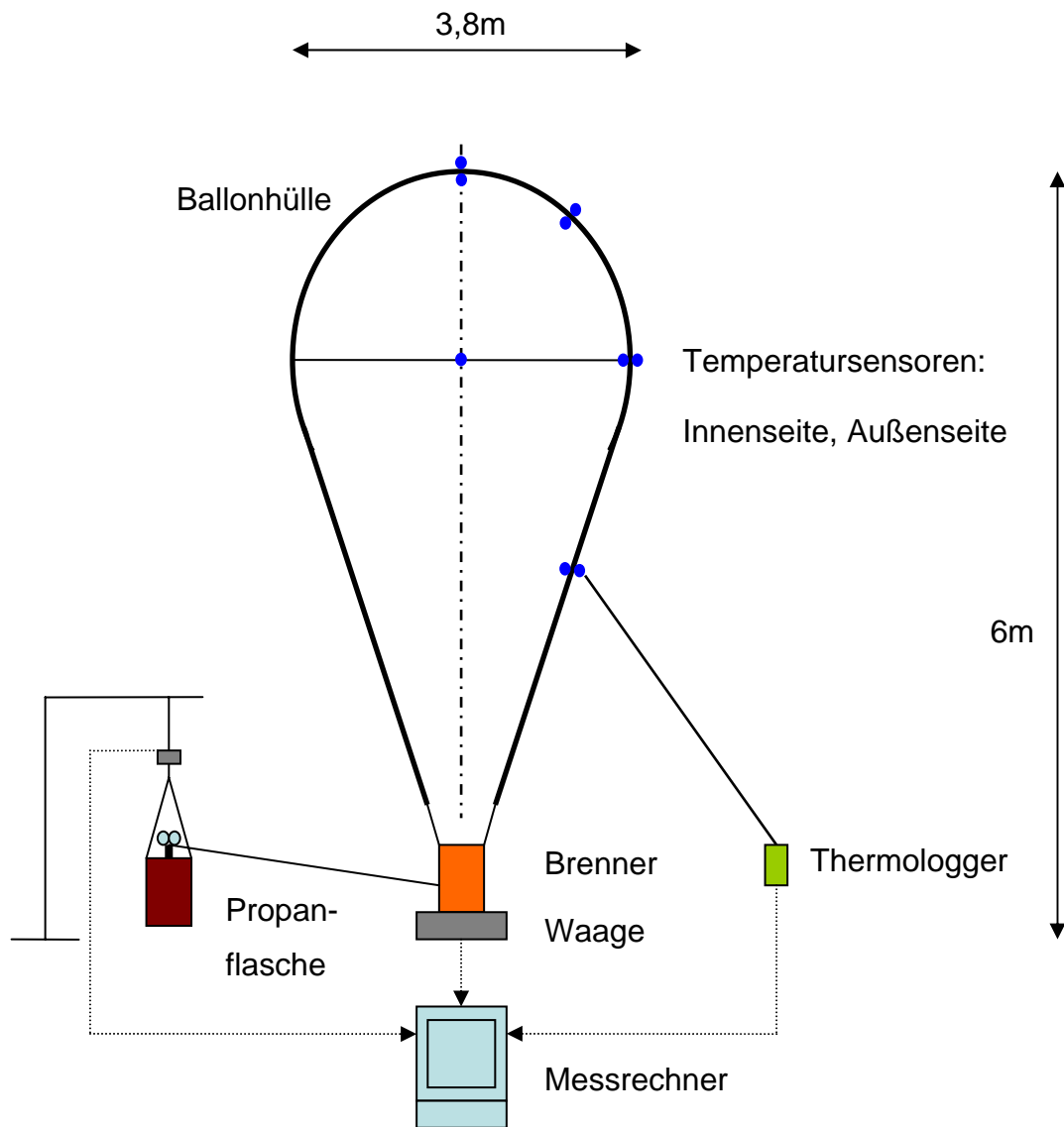


Abbildung 5-2 Messaufbau

5.2 Ergebnisse

Die Temperaturen

Die Temperaturen werden mit Thermoelementen bestimmt. Das Thermoelement besteht aus zwei zu einem Punkt verschweißten Drähten verschiedener Metalle oder Metalllegierungen. Das Erwärmen dieser Verbindungsstelle (Messstelle) erzeugt an

den freien Enden (Anschlussstelle) eine elektrische Spannung. Diese wird im Thermologger zu einer elektrischen Spannung gemäß DIN 43710 umgewandelt und vom Messrechner erfasst [Hallmann, Grundl.der LFzT, S88]. Eine typische Metallpaarung ist der Typ K: NiCr-Ni.

Die Thermoelemente waren auf der Innen-, der Außenseite und im Zentrum des Ballons auf Äquatorhöhe angebracht. Mit Teflonklebeband wurden die Messspitzen der Sensoren flach auf die Hülle geklebt, damit sie nicht in die Temperaturgrenzschicht hineinragen.

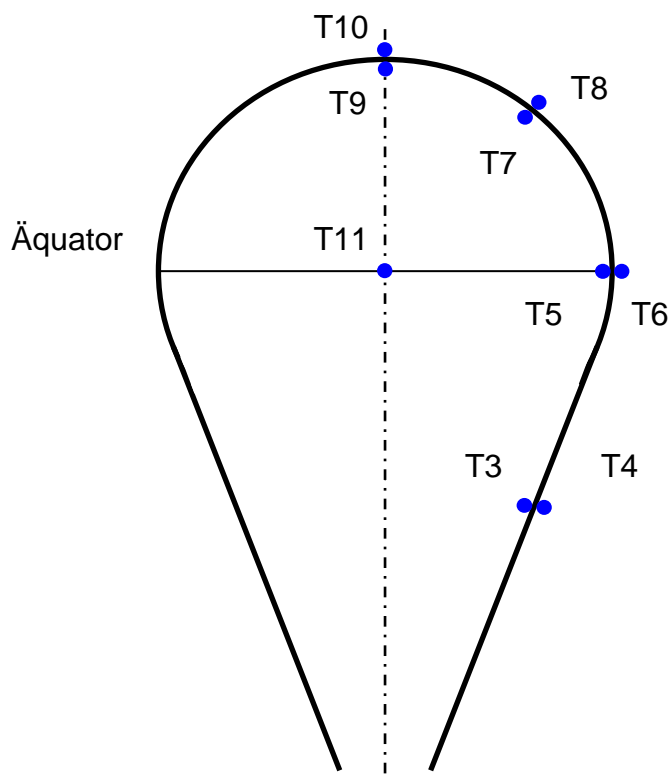


Abbildung 5-3 Positionen der Thermoelemente

Einen typischen Temperaturverlauf zeigt die folgende Grafik bei der Vermessung des Ballons B3. Variiert wurde der Massenstrom des Propans.

Aufgenommen wurden die Temperaturen bei unterschiedlichen Brennerleistungsstufen. Im Diagramm ist auch die Tragkraft F_T dargestellt, die direkt von der Temperatur abhängt. Nach einer Einstellzeit von einigen Minuten bildet sich ein thermisches Gleichgewicht aus. Dieses wurde abgewartet und dann ein Mittelwert über einen Zeitraum von etwa 5min gebildet.

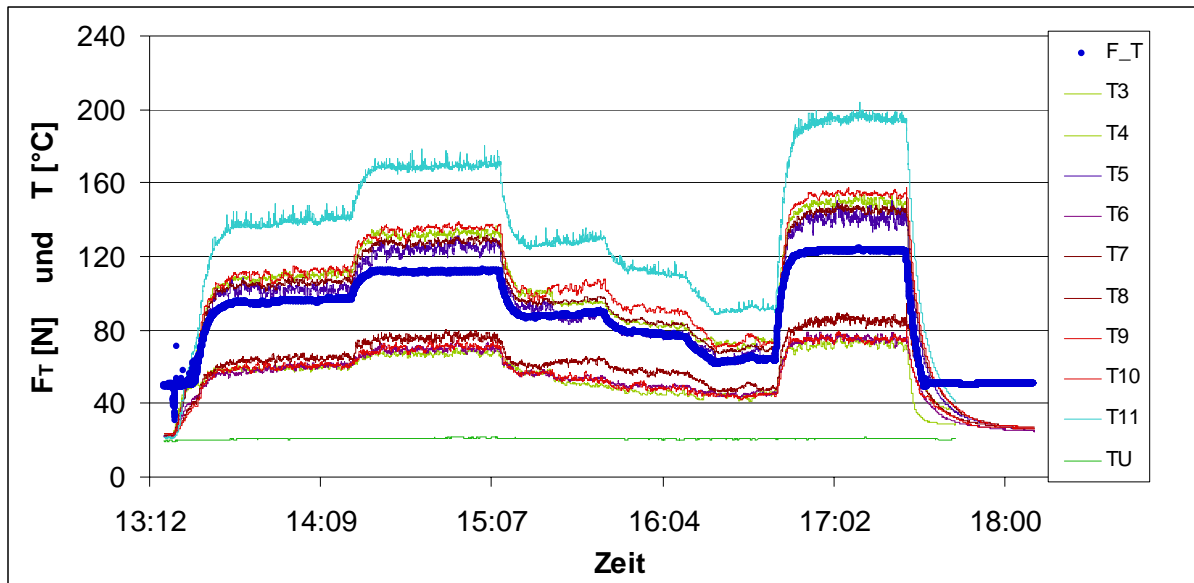


Abbildung 5-4 Tragkraft und Temperatur am Ballon B3

Die Temperaturen lassen sich in drei Gruppen aufteilen. Die höchste Temperatur wird im Innern gemessen, am Temperatursensor, der sich auf Äquatorhöhe befindet. Die Temperaturen der Innenseite sind niedriger wegen der Abnahme der Temperatur mit dem Abstand vom Zentrum. Die Temperaturen der Außenseite sind wegen der Isolationswirkung noch niedriger. Nur beim Referenzballon B1, der keine Isolation trägt, stimmen die Werte für die Innen- und die Außenseite überein. Die Umgebungstemperatur wurde mit aufgezeichnet.

Der Verbrauch

Mittels eines Druckminderers an der Propanflasche ließen sich verschiedene Propandrucke einstellen, die einem bestimmten Massenstrom an Propan entsprechen. Der Massenstrom \dot{m}_{Propan} wurde mit Hilfe eines Kraftaufnehmers bestimmt, der das aktuelle Gewicht der Propanflasche über eine Messbrücke dem Messrechner mitteilt. Der Kraftaufnehmer wurde mithilfe von 12 Gewichten von je 100g bzw. 150g vor jeder Messung kalibriert (Kalibrierkurve im Anhang).

$$\dot{m}_{\text{Propan}} = \frac{m_{\text{Propan}}}{t} \quad (5-1)$$

Aus dem Verbrauch errechnet sich die Leistung des Brenners:

$$P_{Br} = H_u \cdot \dot{m}_{Propan} \quad (5-2)$$

H_u unterer Heizwert des Propan

Spezifische Tragkraft

Die Tragkraft wurde gemessen, wobei der Brenner beschwert auf einer Waage stand. Die Massenanzeige der Waage wird auf „Tara“ gestellt und sobald vom Ballon eine Tragkraft erzeugt wird, wird dies als Masse $m_{angehoben}$ angezeigt. Der Messrechner erfasst diesen Wert der Masse. Neben diesem Anheben trägt die Heißluft zusätzlich auch die Hülle $m_{Hü}$. Die spezifische Tragkraft lautet:

$$f_T = \frac{(m_{angehoben} + m_{Hü})g}{V} \quad (5-3)$$

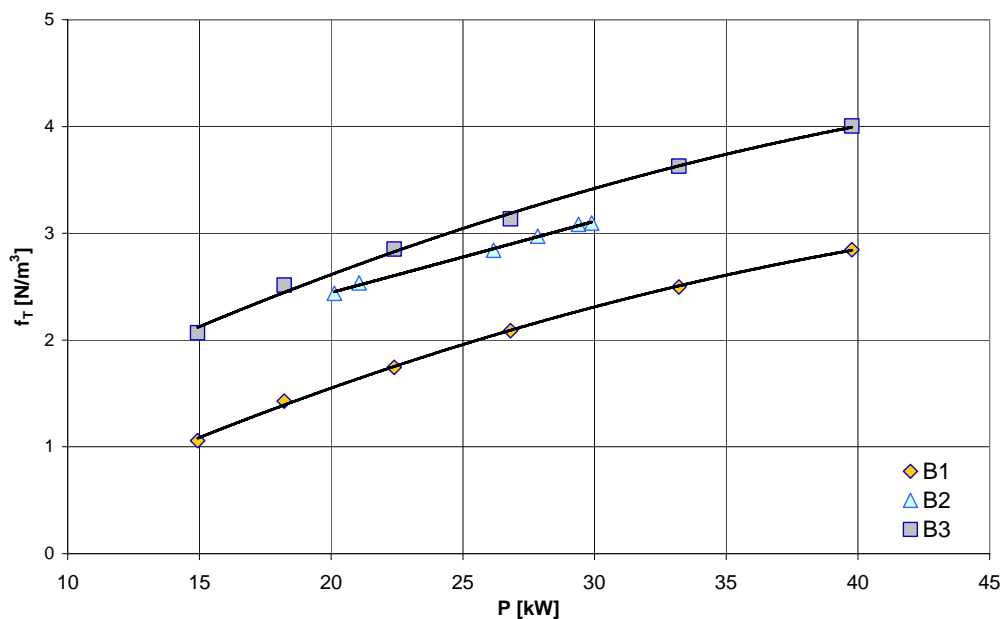


Abbildung 5-5 Spezifische Tragkraft in Abhängigkeit von der Brennerleistung

6 Parameteridentifikation zur Validierung des Rechenmodells

Zur Anpassung der Parameter im Modell an die Experimentergebnisse wurden die Nu-Zahlen verändert. Dazu wurden die Exponenten zum Produkt aus Gr-Zahl und Pr-Zahl mit den Faktoren 1,03 für die innere Nu-Zahl und 0,9 für die äußere Nu-Zahl multipliziert. Die Abweichung kann ihre Ursache in der zweidimensionalen rotationssymmetrischen Berechnungsmethode haben, die nahe aber doch nicht identisch zum dreidimensionalen Fall ist.

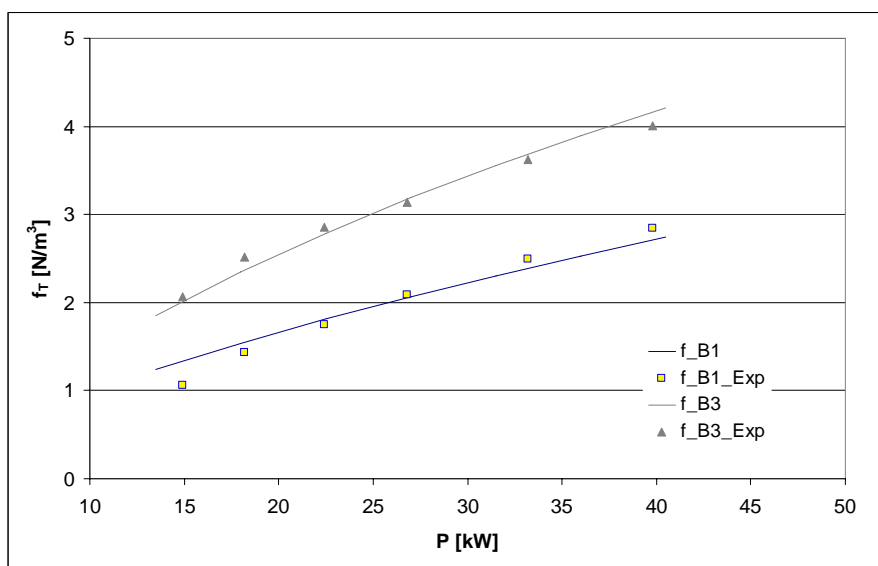


Abbildung 6-1 Spezifische Tragkraft aus mathematischem Modell und Experiment

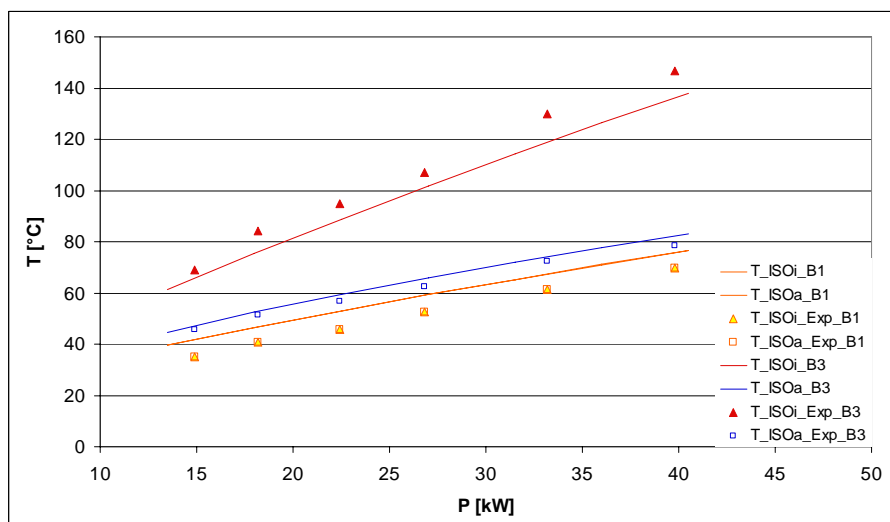


Abbildung 6-2 Innen- und Außentemperaturen aus mathematischem Modell und Experiment

Ein weiterer Parameter, der Einfluss auf die spezifische Tragkraft und die Temperaturen hat, ist der Wirkungsgrad des Brenners. Dieser spiegelt sich wider im Volumenstrom an Kaltluft, mit dem er versorgt werden kann. Dort existiert ein Optimum, das in einem linearen Zusammenhang zur Leistung steht:

$$\dot{V}_{Kaltluft} = 9 \frac{kW}{\left(\frac{m^3}{h}\right)} \cdot P_{Br} - 200 \frac{m^3}{h} \quad (6-1)$$

Wird dem Brenner weniger Kaltluft zur Verbrennung angeboten, so ist diese unvollständig. Wird dem Brenner mehr Kaltluft als diese optimale Menge zugeführt, so ist zwar die Sauerstoffmenge ausreichend und die Verbrennung geschieht vollständig. Aber eine größere als benötigte Menge kalter Luft kühlt den Ballon.

7 Missionsrechnung

7.1 Steigen und Schweben

Da Ballone in unterschiedlichen Höhen operieren, muss die Abhängigkeit der Dichte der Heißluft und der Umgebungsluft von der Höhe berücksichtigt werden. An der Ballonöffnung sind der Innendruck und der Umgebungsdruck gleich, man spricht deshalb auch von offenen Systemen [12].

$$p_V(H) = p_{FF}(H) = p(H) \quad (7-1)$$

$p_V(H)$ Druck im Volumen in der Höhe H

$p_{FF}(H)$ Druck in der Umgebung (Fernfeld) in der Höhe H

Bis zu 11000m wird Normatmosphäre vorausgesetzt. Dabei wird angenommen, dass sich die Luft mit 6,5K je 1000m abkühlt:

$$A_T = -6,5 \frac{K}{km} \quad (7-2)$$

A_T Temperaturgradient

Des Weiteren gilt für H=0m (Meeresniveau):

$$T_{FF}(0) = 288K$$

$$p(0) = 101325Pa$$

Damit ergeben sich die Umgebungstemperatur $T_{FF}(H)$ und nach der barometrischen Höhenformel [13] der Druck bei Fahrhöhe $p(H)$:

$$T_{FF}(H) = T_{FF}(0) + A_T \cdot H \quad (7-3)$$

$$p(H) = p(0) \cdot e^{\frac{-g \cdot H}{T_{FF}(H) \cdot R}} \quad (7-4)$$

Eine Ballonfahrt setzt sich im einfachsten Falle aus den drei Segmenten: Steigen, Schweben und Sinken zusammen. Dabei ist der Verbrauch an Propan beim Sinken der geringste der drei Fahrphasen, aber in der Realität wird zum Abfangen des Ballons wieder viel Propan verbraucht und auch wird Propan benötigt, um vor dem Aufsetzen, Hindernissen auszuweichen. Deshalb wurde zur erneuten Vereinfachung der Abschnitt des Sinkens dem Schweben zugeordnet, da sich die Einsparung und der Mehrverbrauch in etwa die Waage halten.

In der Praxis wechseln sich die 3 Fahrtabschnitte häufig ab und auch das Sinken kann mit und ohne Brennerunterstützung geschehen, sowie ein beschleunigtes Sinken durch Ziehen des Parachutes. Wobei der Parachute eine Art Fallschirm im Ballon-Top ist, der das schnelle Entweichen einer großen Warmluftmenge ermöglicht. Die hier verwendete Berechnung nur von Aufstieg und Schweben ist also eine starke Vereinfachung.

Das Schweben

Durch den Verbrauch an Propan wird der Ballon leichter und die maximale Fahrtdauer ist erreicht, wenn der gesamte Propanvorrat aufgebraucht ist.

Der Ballon ändert seine Fahrhöhe nicht, da die spezifische Tragkraft f_T gleich der spezifischen Gewichtskraft f_{ges} des Ballons ist:

$$f_T = f_{ges} \quad (7-5)$$

Mit der höhenabhängigen spezifischen Tragkraft:

$$f_T(H) = \frac{p(H) \cdot g}{R} \left(\frac{1}{T_{FF}(H)} - \frac{1}{T_V} \right) \quad (7-6)$$

und der zeitabhängigen spezifischen Gewichtskraft:

$$f_{ges}(t) = \frac{m_{ges}(t) \cdot g}{V} = (m_{Ballon_ohne_Propan} + m_{Propan}(t)) \cdot \frac{g}{V} \quad (7-7)$$

folgt für die Höhen und Zeit abhängige Volumentemperatur, die zum Halten der Fahrhöhe erzeugt werden muss:

$$T_V(H,t) = \left[\frac{1}{T_{FF}(H)} - \frac{R \cdot (m_{Ballon_ohne_Propan} + m_{Propan}(t))}{V \cdot p(H)} \right]^{-1} \quad (7-8)$$

Die Volumentemperatur ist direkt vom Massenstrom an Propan abhängig und kann durch eine lineare Funktion angenähert werden:

$$T_V = b \cdot \dot{m}_{Propan} + c \quad (7-9)$$

\dot{m}_{Propan} Massenstrom an Propan, die dem Brenner zugeführt wird

b, c Fitparameter

Damit ergibt sich der Zusammenhang aus Massenstrom an Propan mit der Höhe und der aktuellen Propanmasse an Bord:

$$\dot{m}_{Propan}(H,t) = \frac{\left[\frac{1}{T_{FF}(H)} - \frac{R \cdot (m_{Ballon_ohne_Propan} + m_{Propan}(t))}{V \cdot p(H)} \right]^{-1} - c}{b} \quad (7-10)$$

Aus der Kenntnis der Propanmenge beim Start kann die Propanmenge zu jeder weiteren Sekunde berechnet werden, woraus sich dem folgend auch ein neuer Massenstrom an Propan ergibt. Dieser Massenstrom wird immer geringer, da der Ballon durch Verbrauchen von Propan leichter wird:

$$m_{Propan}(t+1s) = m_{Propan}(t) - \dot{m}_{Propan}(t) \cdot (1s) \quad (7-11)$$

Das Steigen

Der Ballon erfährt eine nach oben gerichtete Kraft, die spezifische Tragkraft f_T .

Beim Steigen wirkt zusätzlich die spezifische Widerstandskraft nach unten:

$$f_w = \frac{c_w \frac{\rho}{2} w_{Steig}^2 A_o}{V} \quad (7-12)$$

- c_w Widerstandsbeiwert (0,1 für Steigen [2])
- w_{Steig} Geschwindigkeitskomponente in z-Richtung
- A_o Kreisfläche in Äquatorhöhe

Bei Körpern mit großem Volumen muss auch der Einfluss der virtuellen Masse berücksichtigt werden. Das ist die Masse an Luft, die dem Ballon anhaftet und vom Ballon mit in die Höhe getragen wird. Sie beträgt etwa 1/3 der Masse der durch den Ballon verdrängten Luft [9] und wirkt auch nach unten:

$$f_{G_virtMasse} = \frac{1}{3} \cdot f_{G_Luft} = \frac{1}{3} \cdot \frac{p(H) \cdot g}{T_{FF} \cdot R_{Luft}} \quad (7-13)$$

Zusammen stehen die spezifischen Kräfte im Gleichgewicht, wenn der stationäre Zustand erreicht ist und der Ballon mit konstanter Steiggeschwindigkeit an Höhe gewinnt:

$$f_T = f_w + f_{G_virtMasse} \quad (7-14)$$

Das bedeutet für die Volumentemperatur T_V , dass sie folgenden Wert annehmen muss, um die Steiggeschwindigkeit w_{Steig} zu halten:

$$T_V = \left[\frac{1}{T_{FF}} - \left((m_{Ballon_ohne_Propan} + m_{Propan}) \frac{g}{V} + \frac{c_w A_o w_{Steig}^2 p}{2VT_{FF} R_{Luft}} + \frac{pg}{3T_{FF} R_{Luft}} \right) \frac{R_{Luft}}{pg} \right]^{-1} \quad (7-15)$$

Auch hier gilt, dass die Umgebungstemperatur T_{FF} und der Druck p von der Höhe abhängen und die Masse an Propan m_{Propan} von der Zeit.

Aus Gleichung (7-9) lässt sich dann wieder für jeden Zeitpunkt der Massenstrom berechnen. Aus Gleichung (7-11) folgt die momentane Propanmenge. Das Steigen erfolgt innerhalb der Steigzeit, die sich aus der angestrebten Fahrhöhe H_{Fahrt} und der Steiggeschwindigkeit w_{Steig} ergibt:

$$t_{\text{Steig}} = \frac{H_{\text{Fahrt}}}{W_{\text{Steig}}} \quad (7-16)$$

Beim Zusammensetzen der beiden Flugphasen Steigen und Schweben werden die jeweiligen Zeiten addiert und die Masse an Propan, die sich an Bord befindet, sobald ins Schweben übergegangen wird, ist der Endwert der Masse, wie sie sich aus dem Steigen ergab.

7.2 Optimierung der Isolationsdicke

Durch die Variation der Isolationsdicke kommt es zu unterschiedlich langen Fahrzeiten für den Ballon. Mit steigender Anzahl an Isolationen nimmt die Isolationswirkung aber gleichzeitig auch die Masse des Ballons zu.

$$d_{\text{ISO}_{\text{gesamt}}} = a \cdot d_{\text{ISO}} \quad (7-17)$$

a Anzahl der Isolationen

d_{ISO} Dicke einer Isolation

$$m_{\text{Hülle}_{\text{plus}_{\text{ISO}}}} = m_{\text{Hülle}} + a \cdot m_{\text{ISO}} = A \cdot \left(\frac{m}{A} \right)_{\text{Hülle}} + a \cdot A \cdot \left(\frac{m}{A} \right)_{\text{ISO}} \quad (7-18)$$

$\left(\frac{m}{A} \right)$ „Flächengewicht“ (Masse pro Fläche)

A Oberfläche des Ballons

Der Effekt soll an einer Ballonfahrt gezeigt werden, die mit einem Ballon von $V=3000\text{m}^3$ Volumen durchgeführt wurde. Die Bedingungen der Fahrt waren: 4 Passagiere $m_{\text{NL}}=300\text{kg}$, Gesamtmasse m_{ges} etwa 500kg , Propanmenge, die verbraucht wurde $m_{\text{Propan}}=80\text{kg}$, Fahrthöhe $H_{\text{Fahrt}}=500\text{m}$ über N.N. bei einer Startplatzhöhe von $H_{\text{Start}}=100\text{m}$ und einer Umgebungstemperatur von 10°C . Der Ballon hatte eine übliche Rip-Stop-Hülle. Die Fahrzeit betrug 2h. Das mathematische Modell beinhaltet nicht die Sonneneinstrahlung, die dem Ballon Wärme zuführt und ermittelt einen zu kleinen Wert gegenüber der tatsächlichen Fahrzeit. Wie das

Diagramm zeigt, ist die längste Fahrzeit von 8,1h zu erreichen, wenn auf der Hülle 7 Lagen Isolation angebracht werden:

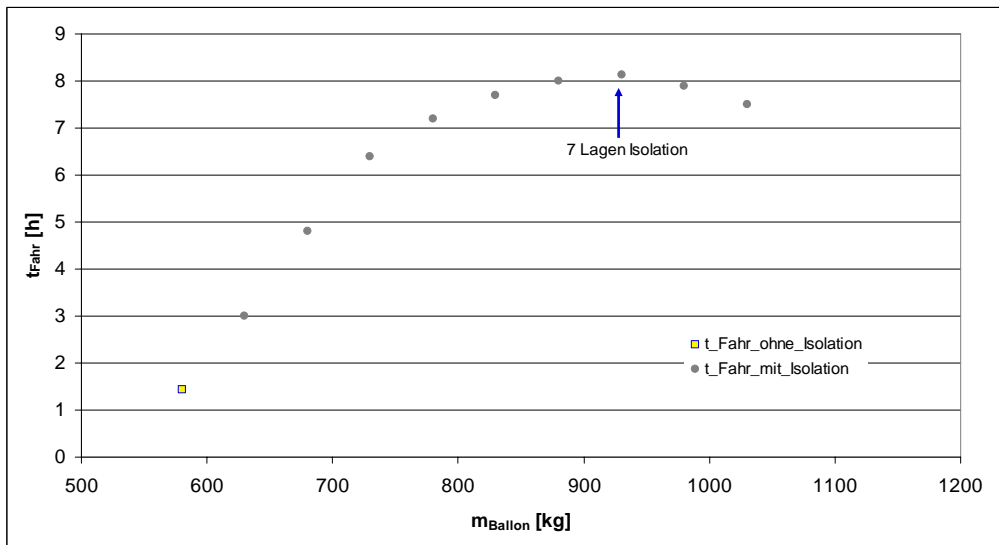


Abbildung 7-1 Fahrzeit eines $V=3000\text{m}^3$ -Ballons in Abhängigkeit der Masse des Ballons

Wenn beim gleichen Ballon nur 40kg Propan verbraucht werden, so kann eine Fahrzeit von 1h mit maximaler Nutzlast erreicht werden, wenn 3, 4 oder 5 Lagen Isolation verwendet werden. Das Optimum liegt also bei etwa 4 Lagen.

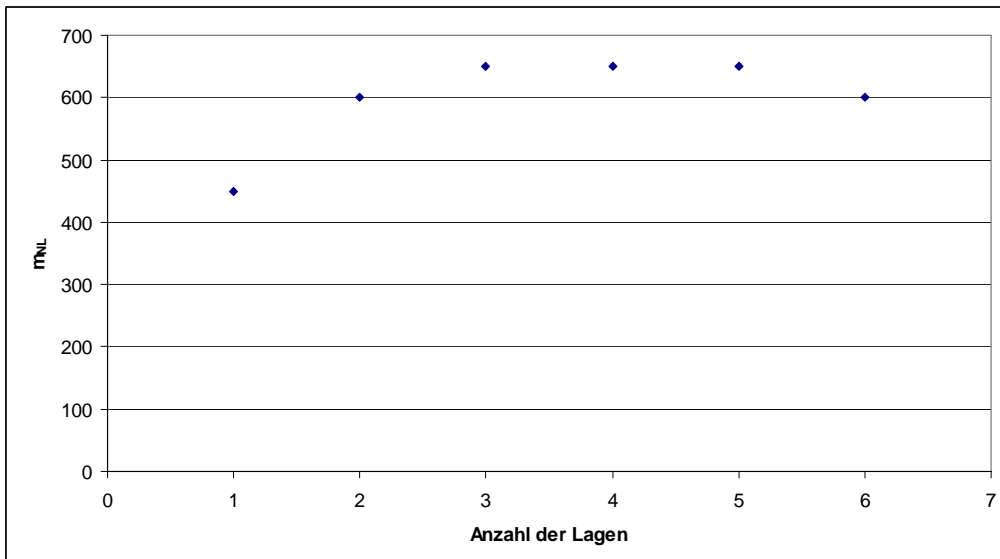


Abbildung 7-2 Maximale Nutzlast bei einer Fahrdauer von 1h, $V=3000\text{m}^3$

8 Diskussion der Potenziale einer Isolierung

Bei der Isolierung von Häusern gibt es verbindliche Richtlinien zur Wirkung der Isolation. In diesem Zusammenhang wird von Niedrigenergie- und Nullenergiehäusern gesprochen. Hier wird schon das Sparpotenzial sehr gut genutzt.

Wie die Experimente und die Modellrechnung zeigen, ist bei einem Heissluftballon noch eine grosse Energieeinsparung möglich. Der isolierte Ballon kann bei gleicher Nutzlast die gleiche Fahrtzeit erreichen wie ein nicht isolierter Ballon, abhängig von seiner Grösse, Fahrhöhe, Dicke und Art der Isolierung, bei einem etwa 40% niedrigerem Propanverbrauch. Oder die eingesparte Menge wird zum Erreichen einer höheren Fahrdauer und damit Distanz genutzt. Damit kann der Ballonsport insgesamt preiswerter werden. Auf Seiten des Modells ist bei einer späteren Verbesserung als erstes die Einbeziehung der Solarstrahlung zu nennen, als Möglichkeit, der Realität näher zu kommen. Sie wurde hier ausgeklammert, da sie stark variiert mit dem Stand der Sonne über dem Horizont und vom Bedeckungs- und Trübungszustand der Atmosphäre abhängt. Und nicht zuletzt ist der Absorptionskoeffizient für jedes Hüllenmaterial abhängig von der Farbe, Textur und Alter. Aber sicher kann gesagt werden, dass ein konventioneller Ballon mit Rip-Stop-Hülle einen Absorptionskoeffizienten ε von etwa 0,7 bis 1,0 aufweisen kann, wogegen die hier untersuchten Isolationsmaterialien ein ε nahe 0,05 besitzen und damit stark reflektieren und die Wärmestrahlung der Sonne nur zu einem kleinen Teil nutzen können.

Durch den hier begonnen Versuch, das komplexe Zusammenspiel der Parameter zu fassen, ist ein Werkzeug geschaffen, sich einen Ballon „Maß zu schneiden“. Einmal indem bei einem Neubau eines Ballons die optimale Lage an Isolation benutzt wird, mit günstiger Dicke, Wärmeleitzahl und Flächengewicht für die gewünschten Missionen. Aber auch möglich ist es vor einer Fahrt, bei Kenntnis der Windgeschwindigkeit in den verschiedenen Höhen, eine Voraussage zu treffen, wie viel Propan bei der geplanten Strecke benötigt wird. Damit kann mit einer kleineren Propanmenge gestartet werden, womit der Ballon leichter ist und eine Person mehr mitfahren dürfte.

Anhang

Geräte für die Messungen

Heißluftgebläse: Propanbrenner der Firma Einhell, HGG350-Niro

Elektronische Waage: Firma Mettler, PM34 Delta Range

Messrechner: Dolch PAC586, DAQ- Datenerfassungskarte

Thermoelemente: Firma Thermocoax

Thermologger: Firma Voltcraft, Voltcraft304, 4-Kanal-Thermometer

Kraftaufnehmer: Firma HBM, U2B (1kN)

Messbrücke: Firma Philips, PR9307

Kalibrierkurve für Verbrauch

Ermittelt durch Auflegen von 100g- und 150g- Gewichten auf die Propanflasche, die sich am Kraftaufnehmer befand. Die Gewichte wurden im umgekehrter Reihenfolge wieder entfernt und es wurde der Mittelwert aus beiden Messungen ermittelt.

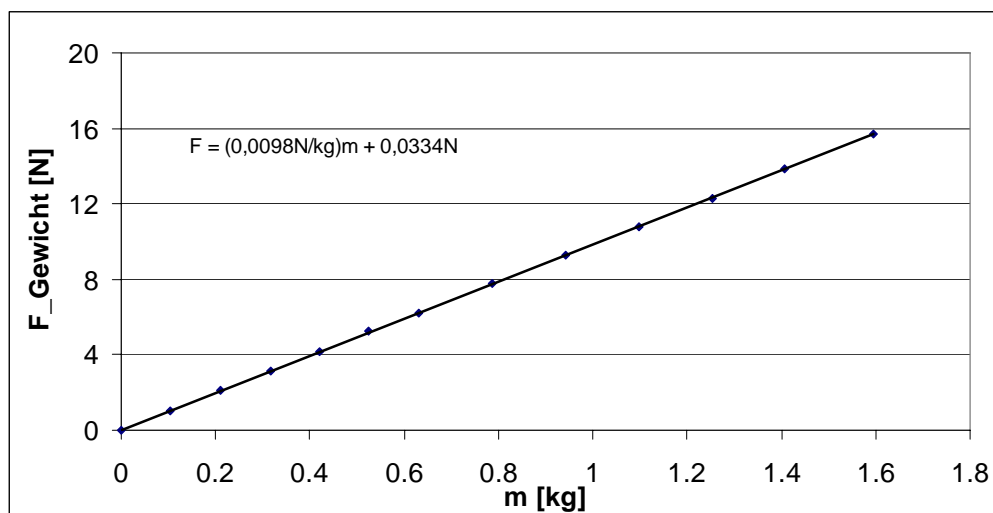


Abbildung A-1 Kalibrierkurve für den Verbrauch

Literatur

- [1] Physik für Ingenieure, VDI Verlag 1989
- [2] Hallmann,W. „Temperaturvermessung an einem Heißluftballon“ 1990, LBA
- [3] Farley,R.E. „Ballon Ascent“ AIAA2005-7412; 2005
- [4] Hallmann,W. „Thermalknotenpunktsmodell“;1991, interner Bericht, LBA
- [5] Bormann, A., Skutnik, S., Llado, J.M. and Duvoisin, P. „New Insulation for Thermal Balloons and Airships“
- [6] Jackson, J.P. and Dichtl, R.J. “The Science and the art of hot Air Ballooning”, Garland Publishing Inc., New York & London, 1977
- [7] Skutnik, S. “Niederparametrisches Ersatzmodell der Wärmebilanzen eines Heißdampfaerostaten gestützt auf Strömungssimulation und Messung“, Diplomarbeit, Institut für Luft- und Raumfahrt der Technischen Universität Berlin, 2005
- [8] Fink, A. und Fink, T. „Ballonfahren Basics“, Pietsch Verlag Stuttgart, 2000
- [9] Hallmann, W. „Grundlagen der Luftfahrzeugtechnik in Theorie und Praxis; Sonderband II/S Ballone“, erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln 1992
- [10] Garde, A. „Comparison of Two Balloon Flight Simulation Programs“, AIAA 5th Aviation, Technology, Integration and Operations Conference (ATIO) 26.-28.Sep.2005, Arlington, Virginia
- [11] Ebert, F. “Privatpilotenlizenz PPL (D) – Alle Fragen gut erklärt – Lehrbuch zum Verständnis der Prüfungsfragen“, Dieter Franzen-Verlag, Bad Oeynhausen 1997
- [12] Bock, J.K. und Knauer, B. „Leichter als Luft : Transport- und Trägersysteme - Ballone, Luftschiffe, Plattformen“, Verlag Frankenschwelle KG, Hildburghausen 2003
- [13] Formelsammlung „Formeln-Tabellen-Daten“, Duden Paetec Schulbuchverlag, Berlin und Frankfurt a.M. 2005
- [14] Cerbe,G. und Hoffmann, H.-J. “Einführung in die Wärmelehre – Von der Thermodynamik zur technischen Anwendung“, Carl Hanser Verlag, München Wien 1987

Danksagung

Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Thorbeck danke ich für die Möglichkeit, diese interessante Studienarbeit in seiner Arbeitsgruppe anfertigen zu können. Und für sein stetes und förderndes Interesse für die Aerostatik.

Meinem Betreuer, Herrn Dr.-Ing. Alexander Bormann, danke ich ganz herzlich für die richtungsweisenden Gespräche, die guten Ideen bei den Experimenten und Rechnungen sowie der großen Unterstützung bei den CFD-Rechnungen und nicht zuletzt für die Bereitstellung der Forschungsballone. Und Herrn Dipl.-Ing. Stefan Skutnik möchte ich meinen Dank aussprechen für die Hilfe bei der Wärmebilanzrechnung und bei der computermäßigen Erfassung und Verarbeitung der Messsignale. Der HeiDAS-Gruppe als Ganzes danke ich für ihr Engagement bei der Entwicklung des Isolationsmaterials und die Überführung der Ergebnisse aus den Messungen und Berechnungen in die Realisierung eines bemannten Heissluftballons, wie er Ende des Jahres 2007 in Spanien verwirklicht werden konnte.

Meinen Kommilitonen Martin Zobel, Erich Fink, Milan Habovcic, Rolf Kranz, Oliver Speer und Olaf Hasenjäger wie auch den beiden Techniker des ILR, Maik Scheel und Reiner Thiel, danke ich für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der Messungen und im täglichen Umgang mit Excel, Word und Mathcad.

Der Assistentin der Aerodynamik, Frau Dipl.-Ing. Ilka Rudolph, danke ich für die Kooperation bei der Thermografie der Heißluftballone und für ihre Vorlesungsunterlagen zur Theorie der Wärme.

Dem Ballonpiloten Dipl.-Ing. Yousif Abdel Gadir danke ich für das Wissen aus der Praxis des Ballonfahrens und die Möglichkeit, an solch einer beeindruckenden Fahrt teilnehmen zu dürfen. Auch danke ich Herrn Dipl.-Ing. Lars Fucke für die Gespräche zur Flugmechanik eines Ballons.

Meinen Eltern und Geschwistern danke ich.