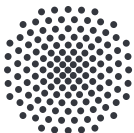




Bachelorarbeit

Entwicklung des Avionik-Thermal-Managements
einer Experimentalrakete

Viktor Hoffmann



Universität Stuttgart

Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt (ITLR)

Direktor: Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Weigand

Kurzzusammenfassung

Eine Leistungsstarke Avionik ist ein Grundstein einer jeden erfolgreichen Forschungsrakete. Ob es hierbei um redundante Flugcomputer, Telekommunikation über weite Distanzen oder Datenerfassung während dem Flug geht, Hochleistungsmikroelektronik ist immer gefragt. Diese Elektronik, die zudem noch extrem kompakt sein muss und extremen Bedingungen ausgesetzt ist, kommt jedoch mit einer substantiellen Abwärme, an welcher Stelle eine Thermal Management Lösung entwickelt werden muss, um nicht die Lebensdauer der Komponenten oder sogar die komplette Mission zu gefährden.

Abstract

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Tabellenverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VI
1 Einführung	1
1.1 Darstellung des Problems	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	1
1.3 Lösungsweg	1
2 Grundlagen	2
2.1 Sensible Wärmespeicher	2
2.2 Latente Wärmespeicher	2
2.3 Radiator	2
2.4 Hybrid Lösung	2
3 Methodik	3
3.1 PCM	3
3.2 Radiator	5
3.3 PCM Radiator Hybrid	6
4 Ergebnisse	9
5 Discussion and conclusions	11
5.1 Discussion about including pictures	11
6 Zusammenfassung und Ausblick	12
Appendix	15

Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

3.1	PCM Auslegung	4
3.2	Radiator Leistung nach Fläche und Temperatur	5
3.3	PCM Wärmestrom ohne aerodynamische Aufheizung	7
3.4	PCM Wärmestrom bei aerodynamischer Aufheizung	7
3.5	Konturlänge vom Staupunkt der Rakete bis zum Mittelpunkt des Radiators	7
3.6	Dimensionierungs-Ablauf in der Vorauslegung	8
4.1	PCM Wärmestrom während Flug	10
4.2	Reynolds- und Prandtlzahl während kritischer Phase im Flug	10

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

B_M - mass transfer number

Griechische Symbole

α $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ heat transfer coefficient

Indizes

0 initial condition

Hochgestellte Indizes

ct continuum regime

Abkürzungen

PCM Phase Change Material

BLAST Biliquid launch and Space Technology

FCC Flight Control Computer

HyEnD Hybrid Engine Development

CFD Computational Fluid Dynamics

1 Einführung

Für die im Rahmen des aktuellen Projekts, Biliquid launch and Space Technology (BLAST) der Studentischen Hochschulgruppe Hybrid Engine Development (HyEnD), neu entwickelte Avionik soll eine Therman-Management-Lösung entwickelt werden.

1.1 Darstellung des Problems

- Neues Projekt mit eigener Avionik
- Leistungsstarke Avionik mit Redundantem Flight Control Computer (FCC)
- Schwierige Umweltbedingungen
- (Pad ist nicht teil des Problems)

Beim Projekt BLAST der studentischen Hochschulgruppe HyEnD wird eine neue Avionik mit einem selbst entwickelten FCC gebaut. Durch

1.2 Zielsetzung der Arbeit

- Entwicklung eines Thermal-Managements für die komplette Flugdauer
- Ausfallsicher
- Leichtbau
- Wiederverwendbar

1.3 Lösungsweg

- vorauslegung
- simulation

[1-11]

T_c soll auf 85°C bleiben -> Beispielrechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit für STM32?

Mit trajektorien simulation und längs angeströmter turbulenter Platte bekomme ich spezifischen Wärmestrom an fixer Stelle über dein Flug

Aus flugmaxx krieg ich dauer und stärke der beschleunigung -> Ansys, transient

Rest des Fluges ist Mikrogravitation -> Ansys, transient

2 Grundlagen

2.1 Sensible Wärmespeicher

Unter sensibler Wärme versteht man die Eigenschaft von

$$c = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2.1)$$

Diese Thermodynamische Eigenschaft lässt sich somit leicht nutzen, um für einen begrenzten Zeitraum die Temperatur gewissermaßen zu dämpfen. Da in der Realität Elektronik keine Wärme produzieren kann, ohne auch Masse im System zu haben, hat jede Avionik inherent eine sogenannte Thermale Masse, welche sich bei Nutzung der sensiblen Wärme leicht durch hinzufügen von Heatsinks erhöhen lässt.

Der eine, und auch größte, Nachteil von dieser Art an Thermal-Management ist, dass die Masse des Systems proportional zur Wärmekapazität steigt.

2.2 Latente Wärmespeicher

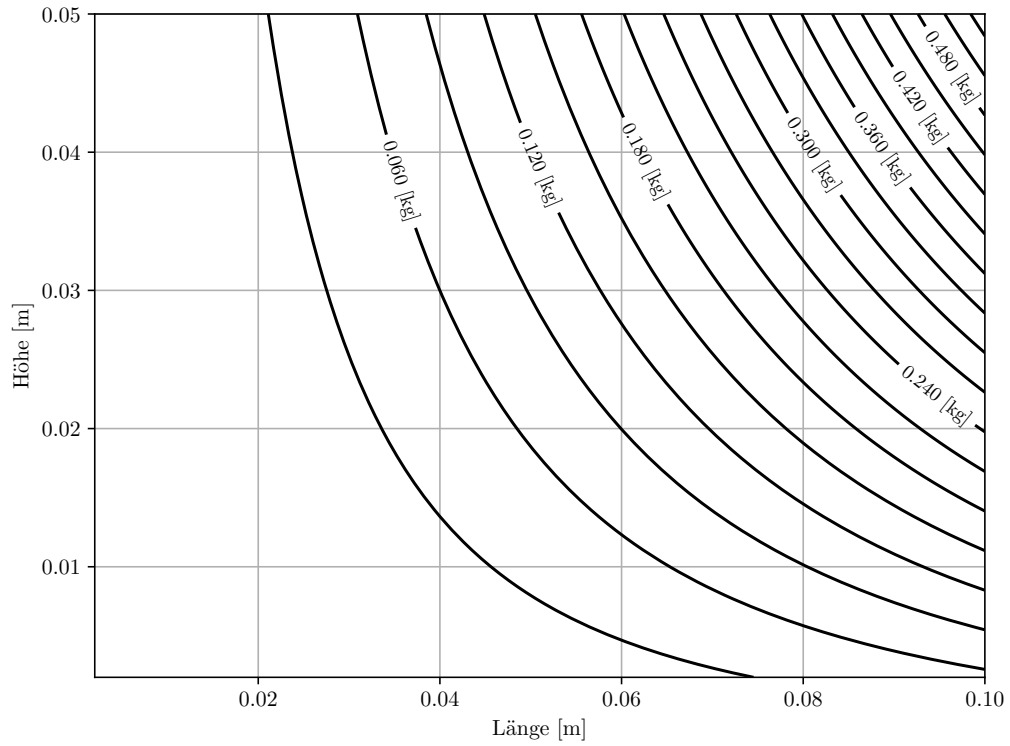
2.3 Radiator

2.4 Hybrid Lösung

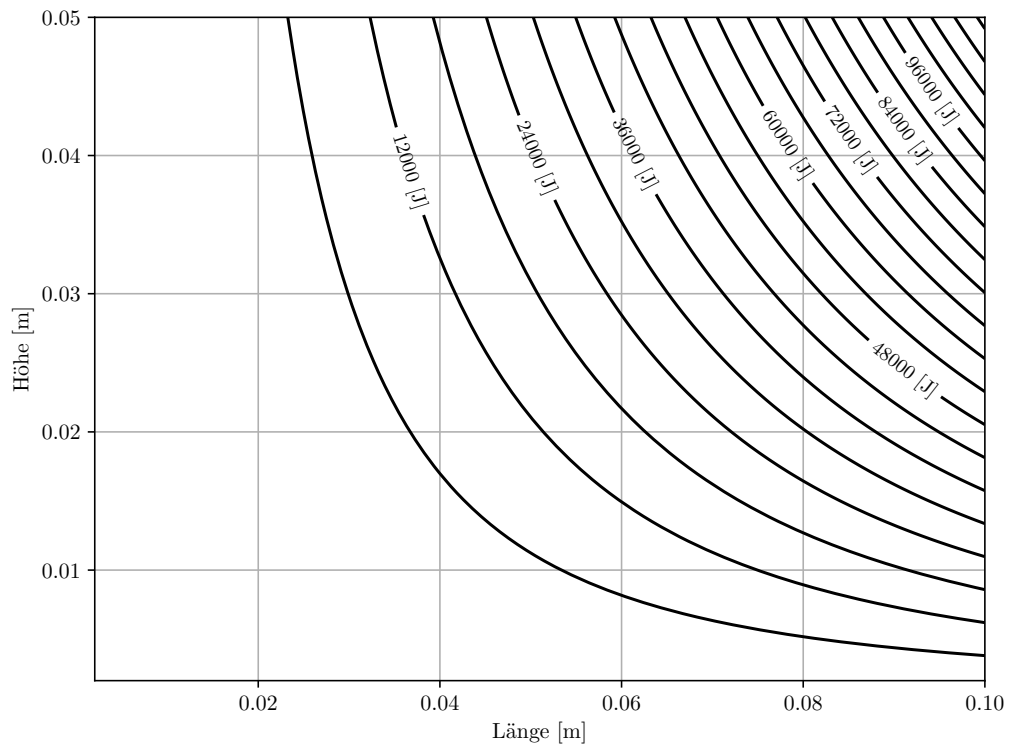
3 Methodik

3.1 PCM

Hier Steht was zu Phase Change Material ([PCM](#))



(a) PCM Masse



(b) PCM Wärmeaufnahme

Abbildung 3.1: PCM Auslegung

3.2 Radiator

Hier steht was zu Radiatoren.

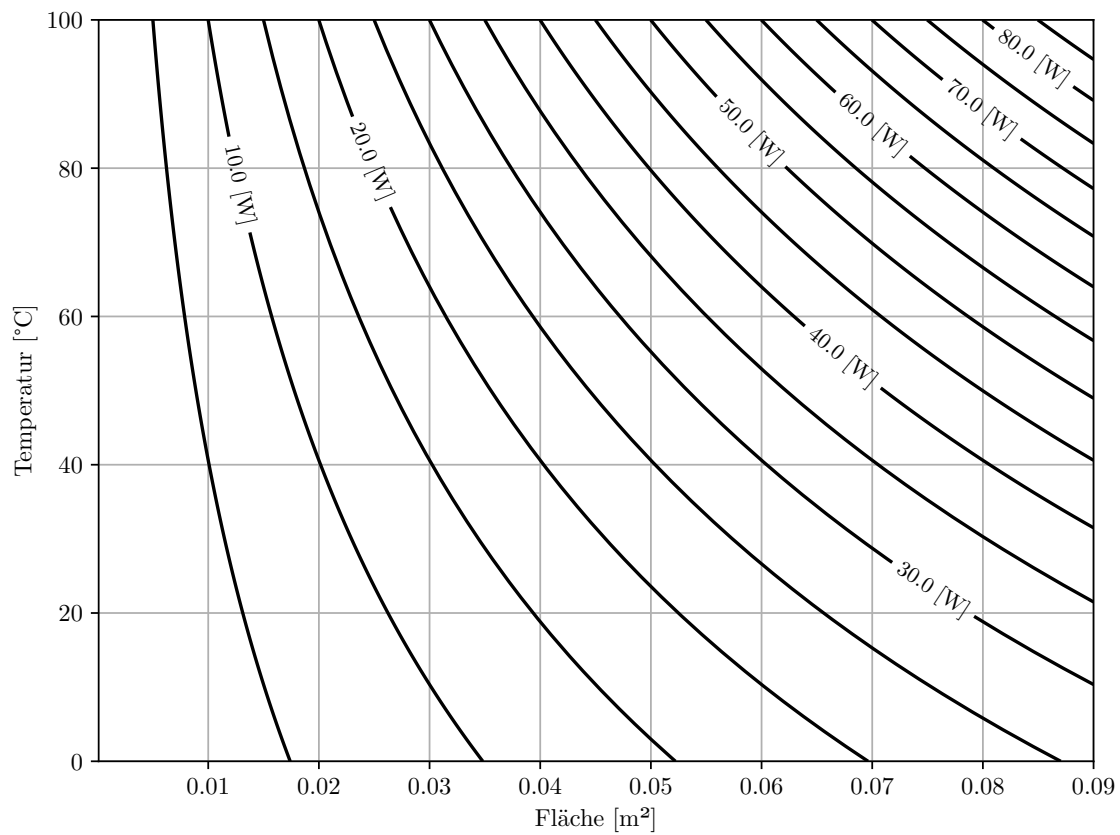


Abbildung 3.2: Radiator Leistung nach Fläche und Temperatur

3.3 PCM Radiator Hybrid

Eine Hybridlösung wird auch in erwägung gezogen, um die Masse durch Nutzung eines Radiators zu minimieren, wobei wegen aerodynamischer Aufheizung für kurze Zeit ein PCM gebraucht werden könnte. Um eine umständliche Simulation mittels Computational Fluid Dynamics (CFD) zu vermeiden, wird die Außenkontour der Rakete von Spitze bis Avionik-Sektion, mit Hilfe der Nußelt-Beziehungen, als längs-angeströmte ebene Platte angesehen, wie in Abbildung 3.5 dargestellt ist. Um zu wissen, ob hier die Beziehung für laminare oder turbulente Grenzschichten angewandt werden soll, müssen zunächst die Gültigkeitsbereiche der Reynolds- und Prandtlzahl (3.4, 3.3) überprüft werden.

$$\dot{q} = \alpha (T_r - T_w) \quad (3.1)$$

$$\text{Nu}_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda} = 0,0296 \text{ Re}_x^{0,8} \text{ Pr}^{\frac{1}{3}} \quad (3.2)$$

Es gilt folgender Gültigkeitsbereich: $5 \cdot 10^5 \leq \text{Re}_L \leq 10^7$, $0,6 \leq \text{Pr} \leq 60$ und muss berücksichtigt werden, wobei die Reynoldszahl direkt aus der Trajektorien-Simulation ausgegeben wird, aber zur Überprüfung trotzdem auch ausgerechnet wird.

$$\text{Re}_x = \frac{V \rho x}{\eta} \quad (3.3) \quad \text{Pr} = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (3.4)$$

Die Dynamische Viskosität wird mittels der Sutherlands-Formel berechnet, und die Recoverytemperatur mittels der adiabaten Strömungsgleichung, welche auch vom Recovery-Faktor abhängt.

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T_\infty + C} \left(\frac{T_\infty}{T_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (3.5)$$

$$T_r = T_\infty \left(1 + r \frac{\kappa + 1}{2} \text{Ma}^2 \right) \quad (3.6)$$

Für turbulente Grenzschichten lässt sich folgende Approximation des Recovery-Faktors anwenden.

$$r = \frac{2}{(\kappa - 1) \text{Ma}_e^2} \left(\frac{T_{aw}}{T_e} - 1 \right) \approx \sqrt[3]{\text{Pr}} \quad (3.7)$$

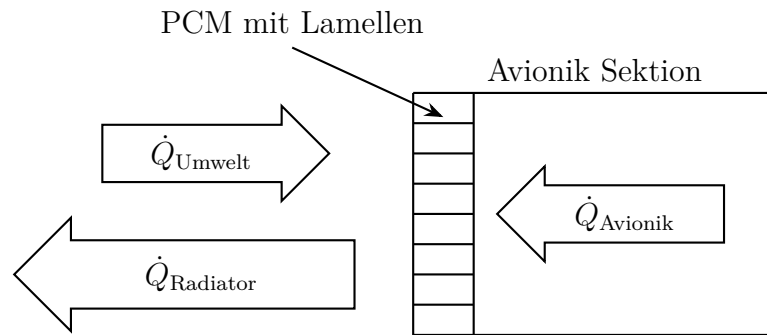


Abbildung 3.3: PCM Wärmestrom ohne aerodynamische Aufheizung

$\dot{Q}_{\text{Radiator}} = \dot{Q}_{\text{Umwelt}} + \dot{Q}_{\text{Avionik}}$ In diesem Fall reicht die Leistung des Radiators, um die Avionik auf Betriebstemperatur zu halten.

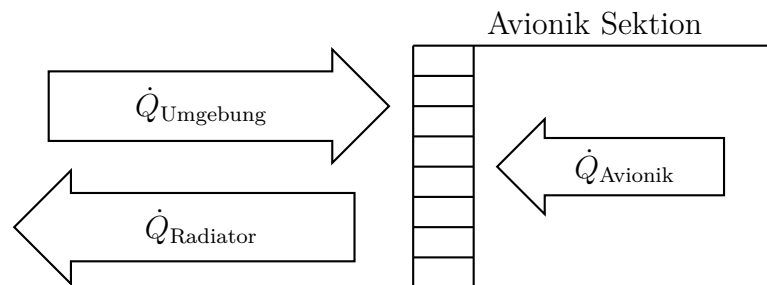


Abbildung 3.4: PCM Wärmestrom bei aerodynamischer Aufheizung

Hier reicht die Leistung des Radiators nicht mehr aus, resultierend steigt die Temperatur leicht an (Tut sie nicht, wir nehmen wegen dem PCM die Hauttemperatur als isotherm an, lediglich gibt es einen infinitesimalen Schritt über den Schmelzpunkt hinweg) und das PCM fängt an zu schmelzen. Zu beachten ist, dass die Leistung des Radiators durch die Temperaturerhöhung auch steigt.

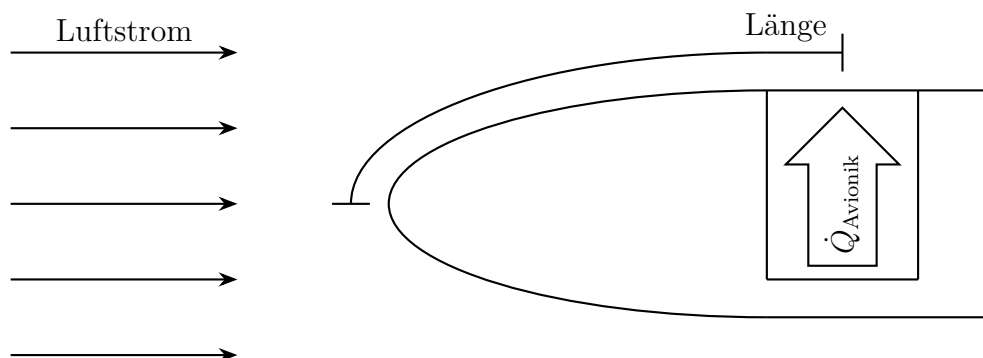


Abbildung 3.5: Kontourlänge vom Staupunkt der Rakete bis zum Mittelpunkt des Radiators

In Abbildung 3.6 sieht man wie die Dimensionierung in den Programmen abläuft. Die Programme erzeugen alle Graphen und rechnen simultan für gegebenen Avionik Wärmestrom alle Werte aus.

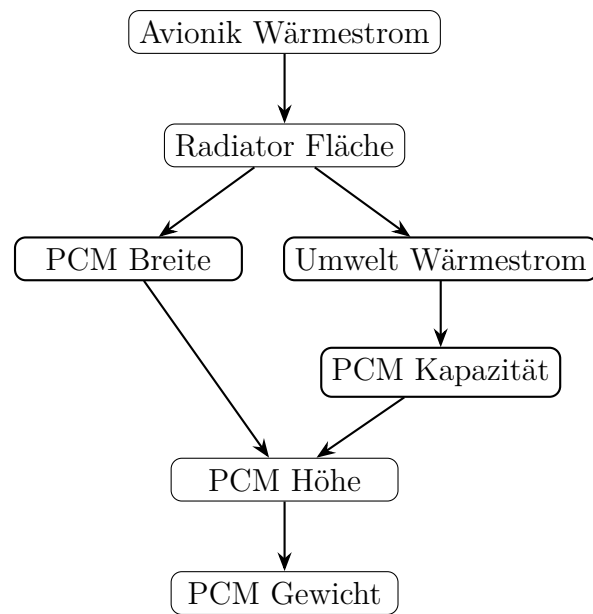


Abbildung 3.6: Dimensionierungs-Ablauf in der Vorauslegung

4 Ergebnisse

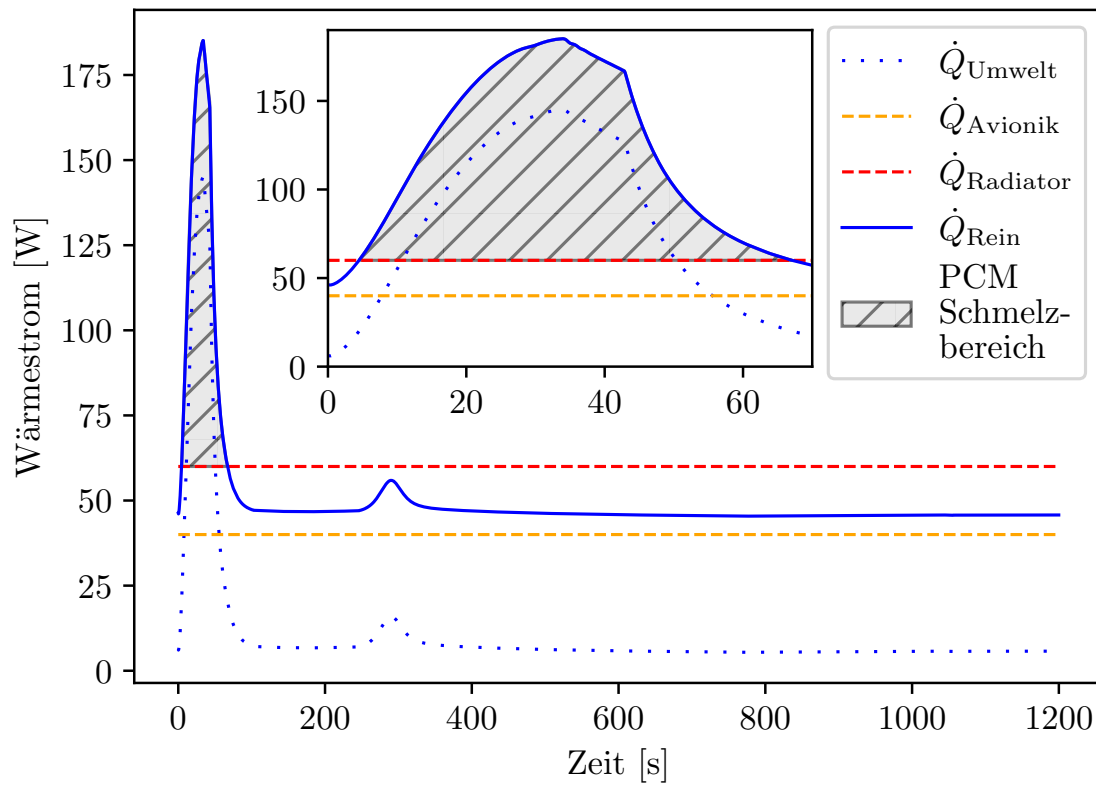


Abbildung 4.1: PCM Wärmestrom während Flug

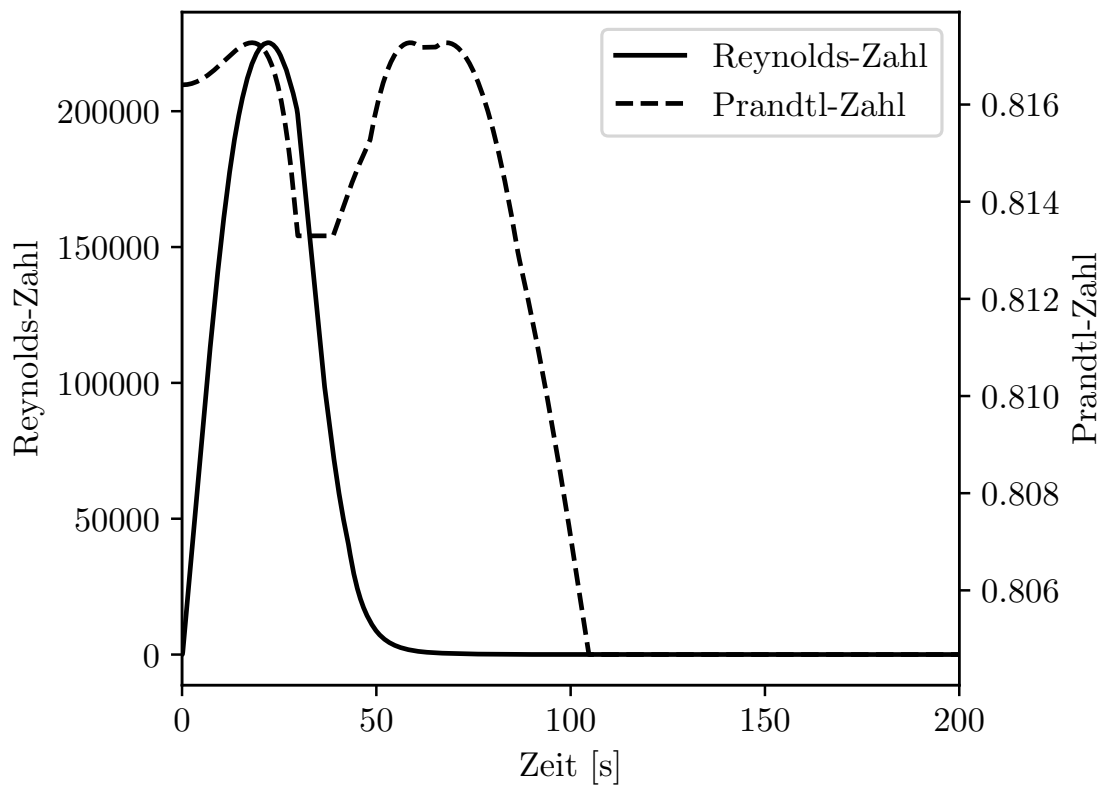


Abbildung 4.2: Reynolds- und Prandtlzahl während kritischer Phase im Flug

5 Discussion and conclusions

5.1 Discussion about including pictures

6 Zusammenfassung und Ausblick

Beispielliteraturverweise:

1. Fachzeitschrift
2. Internetquelle
3. Buch
4. Vorlesungsskript

Anmerkung: Es gibt verschiedene Referenzierungsstile

Literaturverzeichnis

- [1] M.E. Abdelrahman, A.M.A. Soliman, M. Kassab, and A.A. Hawwash. Experimental and numerical investigations of an open-cell copper foam (occf)/phase change material (pcm) composite-based module for satellite avionics thermal management in a thermal vacuum chamber (tvc). *Journal of Energy Storage*, 75, 2024. [1](#)
- [2] Z. Claudio, R. Giulia, M. Simone, H. Romain, S. Claude, P. Vincent, and Bertrand Truffart. Active and passive cooling technologies for thermal management of avionics in helicopters: Loop heat pipes and mini-vapor cycle systems. *Thermal Science and Engineering Progress*, 5:107–116, 2018.
- [3] David G. Gilmore. *Spacecraft Thermal Control Handbook*. The Aerospace Press, 2002.
- [4] J.Y. Ho, Y.S. See, K.G. Leong, and T.N. Wong. An experimental investigation of a pcm-based heat sink enhanced with a topology-optimized tree-like structure. *Energy Conversion and Management*, 245, 2021.
- [5] Peabody Hume. Thermal design for spaceflight. In *Spacecraft Thermal Engineering Course*, 2022.
- [6] Kaitlin Liles and Ruth Amundsen. *NASA Passive Thermal Control Engineering Guidebook*. National Aeronautics and Space Administration, 2023.
- [7] K.V. Pavia, M.B.H. Mantellim, and L.K. Slongo. Experimental testing of mini heat pipes under microgravity conditions aboard a suborbital rocket. *Aerospace Science and Technology*, 45:367–375, 2015.
- [8] I. Steven, A.A. Diego, and S. Greg. Development of a lightweight and low-cost 3d-printed aluminum and pcm panel for thermal management of cubesat applications. In *47th International Conference on Environmental Systems*, 2017. Charleston, South Carolina.
- [9] STMicroelectronics. Guidelines for thermal management on stm32 applications. 2024.

-
- [10] Yu Xu, W. Jiale, and Li Tong. Experimental study on the heat transfer performance of a phase change material based pin-fin heat sink for heat dissipation in airborne equipment under hypergravity. *Journal of Energy Storage*, 52, 2022.
- [11] K. Yang. Ground operations, launch and ascent thermal analysis using thermal desktop. In *Thermal and Fluids Analysis Workshop*, 2015. NASA Goddard Space Flight Center, Silver Spring, MD. [1](#)

Appendix

Appendix A: bla

Hier ist noch mehr Zeug

Appendix B: bla