



Bachelorarbeit

Entwicklung des Avionik-Thermal- Managements einer Experimentalrakete

cand. aer. Viktor Hoffmann

September 2025



Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt
der Universität Stuttgart

Direktor: Professor Dr.-Ing. B. Weigand



Bachelorarbeit

für Herrn cand. aer. Viktor Hoffmann

Entwicklung des Avionik-Thermal-Managements einer Experimentalrakete

Motivation und Zielsetzung:

Im Rahmen des Projekts BLAST der studentischen Arbeitsgruppe HyEnD e.V. wird für die neu entwickelte und leistungsstarke Avionik ein Thermal-Management-Konzept notwendig, das die Hardware während der gesamten Flugdauer auf einer sicheren Betriebstemperatur hält. Darunter fallen kritische Systeme wie die Flugcomputer, Telemetrie und Stromversorgung, deren Ausfall durch Überhitzung eine erfolgreiche Bergung verhindern kann, sowie sekundäre Komponenten wie Kameras. Bei der Entwicklung soll insbesondere auf Leichtbau und Ausfallsicherheit geachtet werden.

Zunächst sollen die Randbedingungen der Mission und die Anforderungen an das Thermal-Management mithilfe angemessener Annahmen festgestellt werden. Basierend darauf wird, durch eine Literaturrecherche zu bestehenden Methoden in der Luft- und Raumfahrtindustrie, eine Auswahl getroffen, die sowohl Leichtbau als auch Ausfallsicherheit maximiert. Für die ausgewählten Methoden soll anschließend eine Vorauslegung gemacht und durch Simulationen verifiziert werden.

Arbeitsschritte:

- Einarbeitung in die Thematik
- Festlegung der Randbedingungen und Anforderungen
- Literaturrecherche zu vorhandenen Thermal-Management-Methoden
- Auswahl, Konzeption und Vorauslegung geeigneter Methoden
- Simulation und Auswertung der gewählten Methoden zum Vergleich mit der Vorauslegung

Ort und Dauer der Arbeit:

Die Bachelorarbeit soll am ITLR sowie bei HyEnD durchgeführt und innerhalb eines Zeitraums von 4 Monaten abgeschlossen werden.

Betreuer:

- Dr.-Ing. Christian Waidmann, ITLR

Ausgabe: 01.05.2025

Abgabe: 01.09.2025

Dr.-Ing. Christian Waidmann

Hiermit versichere ich, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig mit Unterstützung des Betreuers / der Betreuer angefertigt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Die Arbeit oder wesentliche Bestandteile davon sind weder an dieser noch an einer anderen Bildungseinrichtung bereits zur Erlangung eines Abschlusses eingereicht worden.

Ich erkläre weiterhin, bei der Erstellung der Arbeit die einschlägigen Bestimmungen zum Urheberschutz fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten zu haben. Soweit meine Arbeit fremde Beiträge (z.B. Bilder, Zeichnungen, Textpassagen etc.) enthält, habe ich diese Beiträge als solche gekennzeichnet (Zitat, Quellenangabe) und eventuell erforderlich gewordene Zustimmungen der Urheber zur Nutzung dieser Beiträge in meiner Arbeit eingeholt. Mir ist bekannt, dass ich im Falle einer schuldhaften Verletzung dieser Pflichten die daraus entstehenden Konsequenzen zu tragen habe.

.....

Ort, Datum, Unterschrift

Kurzzusammenfassung

Für das Projekt Biliquid launch and Space Technology ([BLAST](#)) der Hochschulgruppe Hybrid Engine Development ([HyEnD](#)) wird eine neue, kompakte und hochleistungsfähige Avionik entwickelt, die unter extremen Flugbedingungen arbeitet. Die in dieser Arbeit entwickelte Kühlung muss leicht, zuverlässig, wiederverwendbar und für eine maximale Gehäusetemperatur von $T_C \leq 89,15^\circ\text{C}$ für die gesamte Flugdauer ausgelegt sein. Basierend auf den Anforderungen und Flugbedingungen wurden drei Konzepte untersucht: reiner Radiator, reines Phase Change Material ([PCM](#)) und eine hybride Radiator-[PCM](#)-Lösung. Die Vorauslegung ergab, dass ein Radiator wegen Aerodynamischer Aufheizung ungeeignet ist. Die hybride Lösung ist möglich, jedoch durch geometrische Verluste und hohe Luftwärmeströme der Vorauslegung nach mit 4,256 kg schwerer als ein einfaches [PCM](#) mit 0,347 kg. Simulationen der Außenströmung und des [PCM](#) bestätigten trotz angenommener Vereinfachungen die Vorauslegungsergebnisse mit einer Masse des hybriden Radiator-[PCM](#) von 1,654 kg.

Abstract

For the [BLAST](#) project of the [HyEnD](#) university group, a new, compact, and high-performance avionics system is being developed to operate under demanding flight conditions. The cooling system developed in this work must be lightweight, reliable, reusable, and designed for a maximum case temperature of $T_C \leq 89,15^\circ\text{C}$ for the entire flightduration. Based on the requirements and flightconditions, three concepts were investigated: pure radiator, pure [PCM](#), and a hybrid radiator-[PCM](#) solution. Preliminary design showed that a radiator is unsuitable due to aerodynamic heating. The hybrid solution is feasible but, according to the preliminary design, heavier at 4,256 kg due to geometric losses and high convective heat flux than a simple [PCM](#) at 0,347 kg. Simulations of the external flow and the [PCM](#) confirmed the preliminary design results despite assumed simplifications with a mass of the hybrid radiator [PCM](#) of 1,654 kg.

Inhaltsverzeichnis

Kurzzusammenfassung	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einführung	1
1.1 Darstellung des Problems	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	2
1.3 Lösungsweg	2
2 Grundlagen	3
2.1 Sensible Wärme	3
2.2 Latente Wärme	3
2.3 Wärmeübertragung	4
2.3.1 Wärmestrahlung	4
2.3.2 Wärmeleitung	5
2.3.3 Konvektion	5
2.4 Simulation	7
3 Vorauslegung	10
3.1 Anforderungen	10
3.2 Thermale Schnittstelle	12
3.2.1 Heatpipes	13
3.2.2 Wärmeleitbänder	14
3.2.3 Gesamte Schnittstelle	16
3.3 PCM	17
3.4 Radiator	19
3.5 PCM-Radiator-Hybrid	20
4 Simulation	25
4.1 PCM	25

4.2	Aerodynamische Aufheizung	31
5	Discussion and conclusions	38
5.1	Discussion about including pictures	38
6	Zusammenfassung und Ausblick	39
	Appendix	42

Abbildungsverzeichnis

3.1	Flugdaten der Trajektoriensimulation	12
3.2	Wärmerohr Aufbau und Funktionsweise	14
3.3	Kommerziell erhältliche Wärmeleitbänder aus Pyrolithic Graphite Sheet (PGS) (links), Kupfer und Aluminium [4]	15
3.4	Reduced Order Model (ROM) der Thermalen Schnittstelle aus Heat-pipe und Wärmeleitbändern. Hier sind nur 2 von 4 Wärmeleitbändern dargestellt.	17
3.5	PCM Wärmestrom ohne aerodynamische Aufheizung	21
3.6	PCM Wärmestrom bei aerodynamischer Aufheizung	21
3.7	Kontourlänge vom Staupunkt der Rakete bis zum Mittelpunkt des Radiators	22
3.8	Dimensionierungs-Ablauf in der Vorauslegung	23
3.9	Reynolds- und Prandtlzahl während kritischer Phase im Flug	24
3.10	PCM Wärmestrom während Flug	24
4.1	PCM Struktur und vereinfachtes Mesh	25
4.2	Effektive spezifische Wärmekapazität von n-Eicosan	27
4.3	Sensible spezifische Wärmekapazität von n-Eicosan	27
4.4	Approximiertes Beschleunigungsprofil	28
4.5	Flüssigkeitsanteil Konturen. Die Legende bezieht sich auf 4.5d	29
4.6	Konturen der statischen Temperatur. Die Legende bezieht sich auf 4.6d	29
4.7	Geschwindigkeitsvektoren der Konvektionswirbel einer, durch Nachbearbeitung, vervollständigten Zelle bei 900 s. Darstellung der weiteren Zeitschritte ist in 6.5 zu finden.	30
4.8	Darstellung der Außensströmungssimulation mit Meshstruktur in grau, velocity inlet in blau, pressure outlet in rot, Symmetrien in gelb und Partitionen der parallelisierung in lila	33
4.9	Schichtaufdickungen des Mesh an der Rakete	33
4.10	Spezifischer Wärmestrom an der Außenhaut bei maximalem dynamischen Druck, sowie 10 s davor, danach und 20 s danach	34
4.11	y+ Wert an der Außenhaut bei Maximaler dynamischer Druck (max Q), sowie 10 s davor, danach und 20 s danach	35

4.12	PCM Wärmestrom während Flug mit Simulationsergebnissen und Fit	
	Kurve	36
4.13	max Q Konturen der Luft	37
6.1	Radiator Leistung nach Fläche und Temperatur	42
6.2	PCM Auslegung	43
6.3	Statische Temperaturkontur der Luft	47
6.4	Machzahlkontur der Luft	48
6.5	Konturen der statischen Temperatur. Die Legende bezieht sich auf 4.6d	49

Tabellenverzeichnis

3.1	Leistung der Avionik	11
3.2	Ampelbewertung von Materialien für Wärmeleitbänder.	16
3.3	Ampelbewertung für Alkane als PCM [12].	18
3.4	AZ-93 Spezifikationen [1]	20
4.1	Stoffdaten für n-Eicosan	26

Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

T	K	Temperatur
c	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
h	J kg^{-1}	Spezifische Schmelzenthalpie
Q	J	Wärme
\dot{Q}	W	Wärmestrom
\dot{q}	W m^{-2}	Wärmestromdichte
m	kg	Masse
A	m^2	Fläche
S	N m^{-3}	Quellterm
R	K W^{-1}	Wärmeleitwiderstand

Griechische Symbole

ρ	kg m^{-3}	Dichte
λ	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
γ	K^{-1}	Flüssigkeitsanteil
β		Wärmeausdehnungskoeffizient
ε		Emissionsgrad
α		Absorptionsgrad
∇		Nablaoperator

Indizes

solidus	Solidus Punkt des Phasenwechsels
liquidus	Liquidus Punkt des Phasenwechsels
solid	Feststoff Eigenschaften
liquid	Flüssigstoff Eigenschaften
fus	Schmelz Phasenwechsel

safety	Mit Sicherheitsfaktor 1.5
senke	Wärmesenke
total	Totalgröße
ges	Gesamt
p	Konstanter Druck
J	Sperrschicht
C	Gehäuse
f	Freistrom
w	Wand
t	Spektral integriert
s	Solar
x	Lokale Größe
r	Recovery Größe
a	adiabat

Konstanten

σ	$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante
κ	1,40	Isentropenexponent der Luft
η_0	$18,27 \cdot 10^{-6} \text{ Pa s}$	Sutherlands-Formel Referenzviskosität
T_0	291,15 K	Sutherlands-Formel Referenztemperatur
C	120 K	Sutherland Konstante

Abkürzungen

PCM	Phase Change Material
PCB	Printed Circuit Board
BLAST	Biliquid launch and Space Technology
FCC	Flight Control Computer
HyEnD	Hybrid Engine Development
CFD	Computational Fluid Dynamics
CHT	Conjugate Heat Transfer
PGS	Pyrolithic Graphite Sheet
max Q	Maximaler dynamischer Druck
GSE	Ground Support Equipment
PCDU	Power Control and Delivery Unit
ATM	Avionik-Thermal-Management
ROM	Reduced Order Model
UDF	User Defined Function

1 Einführung

Die Avionik ist ein Grundstein jeder erfolgreichen Experimentalrakete. Ob es hierbei um Telekommunikation, Datenerfassung oder auch aktive Steuerung und Regelung von Instrumenten und dem Fahrzeug während des Flugs geht, kompakte Hochleistungsmikroelektronik ist immer gefragt und muss oft redundant ausgeführt sein. Diese Elektronik, die zudem noch extremen Bedingungen ausgesetzt wird, kommt jedoch mit einer substanziellen Wärmeleistung und Wärmestromdichte die, bei mangelhafter Rücksicht zu reduzierter Lebensdauer der Avionik führt, oder sogar die Mission frühzeitig scheitern lässt.

Diese Arbeit befasst sich mit der Lösung des dargestellten Problems für das Projekt [BLAST](#) der studentischen Hochschulgruppe [HyEnD](#) wo eine neue Avionik entwickelt wird und ein Avionik-Thermal-Management ([ATM](#)) benötigt wird.

1.1 Darstellung des Problems

Das Thermal-Problem einer Experimentalrakete beginnt bereits lange vor dem eigentlichen Start. Oft muss nach Integration und Befestigung der Rakete auf der Startvorrichtung und Verbindung mit dem Ground Support Equipment ([GSE](#)) noch einige Stunden auf das Startfenster gewartet werden. Während dieser Zeit steht die Rakete der Umwelt ausgesetzt in der Sonne und kann, je nach Bedingungen unzulässige Temperaturen für Elektronik erreichen. Da in dieser Phase eine Verbindung mit dem [GSE](#) besteht kann Masse durch externe Kühlung währenddessen eingespart werden, weshalb in dieser Arbeit nur für die darauf folgende Flugphase das [ATM](#) entwickelt werden soll. Da [BLAST](#) für ein Apogäum über der Kármán-Linie (100 km) entwickelt wird, sind während dem Flug extreme Umweltbedingungen durch Aerodynamische Aufheizung, Mikrogravitation und annäherndes Vakuum zu erwarten, die ein komplexes [ATM](#) fordern.

In der Vergangenheit wurde bei [HyEnD](#) oft die Avionik ohne Redundanz oder

zusammen mit fertig gekaufter Avionik, für missionskritische Aufgaben wie den Fallschirm-Auswurf, ausgeführt. Beim Projekt **BLAST** soll das vermieden werden, indem der selbst entwickelte Flight Control Computer (**FCC**) in Dual Duplex Redundanz ausgelegt wird. Dementsprechend gibt es vier Computer die die selben Programme ausführen und den vierfachen Stromverbrauch gegenüber einfach ausgeführter Avionik haben. Hinzu kommen weitere Kameras, Funkplatinen, Verstärker, Sensorplatinen etc. die jedoch keine redundante Ausführung haben.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Da es sich beim **ATM** um ein unterstützendes Subsystem handelt, soll besonders hohe Zuverlässigkeit gewährleistet werden, da trotz der Redundanz des **FCC** ein Ausfall der Kühlung zum Ausfall durch Überhitzung führen kann.

Des weiteren ist Wiederverwendbarkeit, Kosten minimieren und besonders komplexe Integrations- und Vorbereitungsvorgänge vermeiden eine Priorität.

Als letzte Anforderung, nach einer Auswahl basierend auf den ersten beiden, soll wegen des begrenzten Massenbudgets der Avionik besonders auf Leichtbau geachtet werden und die Masse des **ATM** soweit wie möglich minimiert werden.

1.3 Lösungsweg

Um ein geeignetes **ATM** zu entwickeln wird zunächst eine Auswahl an etablierten Lösungen aus der Luft- und Raumfahrtindustrie getroffen, die die gestellten Anforderungen erfüllen können.

Diese werden in der Vorauslegung mithilfe eines **ROM** in Python ausgewertet, um eine erste Abschätzung der Leistungsfähigkeit zu erhalten.

Anschließend wird die Vorauslegung, soweit mit vorhandenen Rechenressourcen möglich, durch Conjugate Heat Transfer (**CHT**)-Simulationen mit Domänenreduktion verifiziert und vergleichbar gemacht.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Thermodynamischen, Chemischen und Numerischen Grundlagen die in dieser Arbeit angewandt wurden aufgelistet und erläutert.

2.1 Sensible Wärme

Unter sensibler Wärme versteht man die Eigenschaft von Masse durch eine Temperaturänderung Wärmeenergie zu absorbieren oder abzugeben. Dieses Phänomen kann durch die Änderung der kinetischen Energie von den molekularen Teilchen im System erklärt werden. Durch das Einführen von Wärmeenergie in ein System steigt die kinetische Energie der Teilchen:

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

c beschreibt die spezifische Wärmekapazität, welche entweder bei konstantem Druck oder konstantem Volumen angegeben ist, Q ist die Wärmeenergie, m die Masse und T die Temperatur

Da Elektronik eine gewisse Eigenmasse hat und meist Teil einer größeren Baugruppe ist, gibt es durch die sensible Wärme eine Dämpfung zu Temperaturänderungen, welche jedoch zeitlich von der Wärmeleitfähigkeit der Materialien abhängt.

2.2 Latente Wärme

Im Gegenteil zur sensiblen Wärme ist latente Wärme, auch Umwandlungsenthalpie genannt, die Eigenschaft von Masse bei einem Phasenwechsel Wärmeenergie zu absorbieren oder abzugeben, ohne dass sich dabei die Temperatur ändert. Das ist durch die Erhöhung der potentiellen Energie der Teilchen, statt der kinetischen wie bei der sensiblen Wärme, zu verstehen. Effektiv erhöht sich die potentielle Energie durch

Änderung der Bindungszustände. Die Stoffkonstante der Umwandlungsenthalpie ist die spezifische Umwandlungsenthalpie h :

$$h = \frac{\Delta Q}{m} \quad (2.2)$$

Zu beachten ist, dass die Konvention der Schreibweise für die massenspezifische Fest-Flüssig Umwandlungsenthalpie spezifische Schmelzenthalpie ist, aber für die massenspezifische Flüssig-Gas Umwandlungsenthalpie nur Verdampfungsenthalpie ist.

Die latente Wärme ist für die meisten Materialien im Fest-Flüssig Übergang um mindestens den Faktor 10 größer als die sensible Wärme bei einem Grad Temperaturerhöhung. Genauso ist die Verdampfungsenthalpie vom Flüssig-Gas Übergang meist um etwa den Faktor 10 größer als die spezifische Schmelzenthalpie [2].

2.3 Wärmeübertragung

Um Wärme innerhalb von einem System günstig zu verteilen, oder die Energie aus dem System zu entfernen, gibt es drei Mechanismen.

2.3.1 Wärmestrahlung

Bei der Wärmestrahlung geben Teilchen beim aufnehmen oder abgeben kinetischer Energie eine gewisse Menge an Energie in Form von Elektromagnetischer Strahlung ab. Da die Strahlungsleistung von der vierten Potenz der Temperatur abhängt, ist dieser Modus erst bei sehr hohen Temperaturen dimensionierend, kann jedoch im Vakuum dominant sein:

$$\dot{Q} = \sigma \varepsilon A T^4 \quad (2.3)$$

\dot{Q} ist der Wärmestrom, σ die Stefan-Boltzmann-Konstante, ε der Emissionsgrad, welcher von der Wellenlänge abhängt, A die Fläche und T die Temperatur des Radiators.

2.3.2 Wärmeleitung

Bei der Wärmeleitung wird Wärmeenergie in einem Körper durch Diffusion der kinetischen Energie der Teilchen verteilt. Die Wärmestromdichte \vec{q} in einem Temperaturgradienten wird durch das Fourier-Gesetz beschrieben:

$$\vec{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.4)$$

Hier ist λ die Wärmeleitfähigkeit des Materials. Für eine eindimensionale Wand ergibt sich die Gleichung mit der Querschnittsfläche A und der Dicke Δx zu:

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2.5)$$

Der Wärmeleitwiderstand R für einen Körper lässt sich durch die Temperaturdifferenz pro Watt definieren:

$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (2.6)$$

2.3.3 Konvektion

Bei der Konvektion wird Wärmeenergie durch Massenaustausch transportiert. Bei der erzwungenen Konvektion bekommt das Fluid durch äußere Kräfte eine relative Geschwindigkeit, die zum Massenaustausch führt. Andererseits resultiert bei der natürlichen Konvektion nur die eigene inhomogene Temperaturverteilung, durch beispielsweise eine anliegende heiße Wand, zu einem Temperaturanstieg und infolge dessen zu einem Dichteanstieg, der in einem Beschleunigungsfeld zu Auftriebskräften und automatischer Bewegung des Fluids führt. Für den Wärmeübergang zwischen Fluid und Festkörper ergibt sich:

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (2.7)$$

Hier ist α der Wärmeübergangskoeffizient. Für den spezifischen Wärmestrom zwischen Fluid und Wand folgt daraus:

$$\dot{q} = \alpha (T_\infty - T_w) \quad (2.8)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α kann aus der Nußelt-Beziehung für Längsan-
geströmte ebene Platte genommen. Diese lautet für laminare Grenzschichten im
Gültigkeitsbereich $Re < Re_k$ ($Re_k \approx 5 \cdot 10^5$) und $0,6 \leq Pr \leq 2000$:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda} = 0,332 Pr^{\frac{1}{3}} Re_x^{\frac{1}{2}} \quad (2.9)$$

für turbulente Grenzschichten mit Gültigkeitsbereich: $5 \cdot 10^5 \leq Re_L \leq 10^7$ und
 $0,6 \leq Pr \leq 2000$ lautet die Gleichung:

$$Nu_x = \frac{\alpha_x x}{\lambda} = 0,0296 Re_x^{0,8} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (2.10)$$

Für die Reynolds-Zahl und Prandtl-Zahl werden die folgenden zwei Gleichungen
verwendet:

$$Re_x = \frac{V \rho x}{\eta} \quad (2.11)$$

$$Pr = \frac{c_p \eta}{\lambda} \quad (2.12)$$

Die Dynamische Viskosität η wird mittels der Sutherlands-Formel berechnet, wobei
 η_0 , C und T_0 Konstanten für Luft sind:

$$\eta = \eta_0 \frac{T_0 + C}{T_\infty + C} \left(\frac{T_\infty}{T_0} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (2.13)$$

Eine Strömung ist im Überschallbereich, wenn ihre Machzahl größer als 1 ist:

$$Ma = \frac{U}{a} \quad (2.14)$$

Wobei U die Strömungsgeschwindigkeit und a die lokale Schallgeschwindigkeit ist.
Im Überschallbereich treten verschiedene Effekte durch die Kompressibilität der
Strömung auf, wie etwa durch Stoßwellen mit sprunghaftem Anstieg von Temperatur
und Druck, oder Expansionsfächern mit sprunghaftem Abfall dieser Größen. Auch die
adiabate Kompression resultiert in Temperaturerhöhungen. Die in einer Grenzschicht
erreichte Temperatur durch Reibung ist immer kleiner als die Totaltemperatur $T_\infty <$
 $T_r < T_{\text{total}}$, da die kinetische Energie nur teilweise in innere Energie umgewandelt
wird und somit mit dem Recovery-Faktor r skaliert ist:

$$T_r = T_\infty \left(1 + r \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right) \quad (2.15)$$

Der Recovery-Faktor kann mittels der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$r = \frac{2}{(\kappa - 1) \text{Ma}_\infty^2} \left(\frac{T_{\text{aw}}}{T_\infty} - 1 \right) \approx \begin{cases} \sqrt[3]{\text{Pr}} & \text{für turbulente Grenzschicht} \\ \sqrt{\text{Pr}} & \text{für laminare Grenzschicht} \end{cases} \quad (2.16)$$

In einer kompressiblen Strömung bei $\text{Ma} > 0.3$ wird somit T_∞ aus 2.8 zu T_r :

$$\dot{q} = \alpha (T_r - T_w) \quad (2.17)$$

2.4 Simulation

Aerodynamische Aufheizung

Die numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics (CFD)) ist ein Verfahren zur Berechnung von Strömungs- und Wärmeübergangsprozessen mithilfe numerischer Methoden. CFD erlaubt die Untersuchung komplexer Geometrien und Betriebsbedingungen, die experimentell nur schwer oder gar nicht möglich sind. Ziel ist es, die Navier-Stokes-Gleichungen in differentieller Form auf einer diskreten Gitterstruktur zu lösen. Diese Erhaltungsgleichungen sind die Massenerhaltung:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{u}) = 0 \quad (2.18)$$

Impulserhaltung:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \vec{g} \quad (2.19)$$

und Energieerhaltung:

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla [(\rho E + p) \vec{u}] = \nabla (k \nabla T) + \Phi \quad (2.20)$$

Hier sind ρ die Dichte, \vec{u} der Geschwindigkeitsvektor, p der statische Druck, τ der Spannungstensor, \vec{g} die Gravitationsbeschleunigung, E die spezifische Gesamtenergie, T die Temperatur, k die Wärmeleitfähigkeit und Φ der viskose Dissipationsterm.

Eine wichtige Metrik bei der Behandlung von Grenzschichten in viskosen Fluiden ist der Dimensionslose Wandabstand:

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y}{\eta} \quad (2.21)$$

Dieser wird mittels des Abstandes y der ersten Zelle die an der Wand anliegt, der Schubspannung an der Wand τ_w und der daraus resultierenden Schubspannungsgeschwindigkeit u_τ berechnet:

$$\tau_w = \eta \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.22)$$

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.23)$$

Hierbei ist η die dynamische Viskosität und $\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}$ der Geschwindigkeitsgradient senkrecht zur Wand. Für Wärmeübertragungsprobleme an Wänden muss man die Zellhöhe so wählen, dass man im Bereich $y^+ \leq 1$ bleibt.

PCM

Um Temperatur- und Phasenabhängige Eigenschaften für die [CHT](#)-Simulation von [PCM](#) darzustellen, sowie Zeitabhängige Auftriebsterme, kommen weitere Modelle dazu, die in ANSYS Fluent nicht implementiert sind. Dafür wird eine in C programmierte User Defined Function ([UDF](#)) verwendet, die in Fluent direkt importiert und kompiliert werden kann. Die Boussinesq-Approximation modelliert den Auftrieb infolge von geringen Dichteänderungen. Für den Auftrieb in dem Impulsterm ergibt sich somit [\[5\]](#):

$$S = -\rho_0 g_{\text{eff}}(t) \beta (T - T_0) \quad (2.24)$$

Hierbei ist S der Quellterm, β der Wärmeausdehnungskoeffizient, $g_{\text{eff}}(t)$ die effektive, Zeitabhängige Beschleunigung, T_0 und ρ_0 die Referenz-Temperatur und Dichte. Diese Approximation kann den Rechenaufwand erheblich verringern und ist für folgende Bedingungen gültig:

$$\frac{\Delta T}{T_0} \ll 1 \quad (2.25)$$

$$\text{Ma} \ll 1 \quad (2.26)$$

ANSYS Fluent verwendet zur Modellierung des Schmelzbereiches ein internes Enthalpy-Porosity-Modell, welches das [PCM](#) als poröses Material mit diskreter Fest- und Flüssigphase ansieht. Hierfür ist die Dichte ρ notwendig und kann in Abhängigkeit

des Flüssigkeitsanteils γ berechnet werden. Zwischen der Dichte der Flüssig- und Feststoffphase wird linear interpoliert [5]:

$$\rho(\gamma) = (1 - \gamma) \rho_{\text{solid}} + \gamma \rho_{\text{liquid}} \quad \gamma \in [0, 1] \quad (2.27)$$

Die spezifische Wärmekapazität ergibt sich im Schmelzbereich durch eine Dichtegegewichtete Mischung [5]:

$$c_p(T) = \begin{cases} c_{p,\text{solid}}, & T < T_{\text{solid}}, \\ \frac{(1 - \gamma) \rho_{\text{solid}} c_{p,\text{solid}} + \gamma \rho_{\text{liquid}} c_{p,\text{liquid}}}{(1 - \gamma) \rho_{\text{solid}} + \gamma \rho_{\text{liquid}}}, & T_{\text{solid}} \leq T \leq T_{\text{liquid}}, \\ c_{p,\text{liquid}}, & T > T_{\text{liquid}}. \end{cases} \quad (2.28)$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ im Schmelzbereich hingegen lässt sich direkt berechnen [5]:

$$\lambda(\gamma) = (1 - \gamma) \lambda_{\text{solid}} + \gamma \lambda_{\text{liquid}} \quad (2.29)$$

Die Dynamische Viskosität η wird hier, anders als für Luft in der Vorauslegung 2.13, mittels eines empirischen Polynomfit [5] abhängig von der Temperatur berechnet:

$$\eta(T) = (9 \times 10^{-4} T^2 - 0.6529 T + 119.94) \times 10^{-3} \quad (2.30)$$

In der verwendeten Software ANSYS Fluent werden diese Gleichungen über die Finite-Volumen-Methode gelöst. Dabei werden die Erhaltungsgleichungen über diskrete Kontrollvolumina integriert, wodurch für jede Zelle ein algebraisches Gleichungssystem entsteht. Dieses wird iterativ gelöst, bis vorgegebene Konvergenzkriterien erfüllt sind.

3 Vorauslegung

Die Flugdaten kommen aus einer Trajektoriensimulation aus dem Simulationsprogramm OpenRocket, welche vom Triebwerk-Subsystem durchgeführt wurde. Diese Flugdaten (3.1) bilden eine Maximalabschätzung der Aerodynamischen Aufheizung und Flugdauer durch maximale Schubkraft und Dauer mit 8 kN für 43 s, die von BLAST erreicht werden können.

3.1 Anforderungen

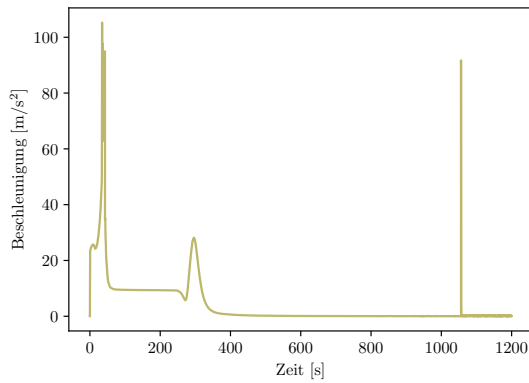
Da die Kühlung zeitgleich zu der Avionik entwickelt wurde, musste auf eine genaue Analyse aller Komponenten der Avionik verzichtet werden. Stattdessen wurde anhand des bereits festgelegten Microcontrollers STM32H743ZGT6, der auf den redundanten Flugcomputern verwendet wird, die Auslegung durchgeführt. Aus dem Datenblatt des Microcontrollers folg eine maximale Sperrschichttemperatur von $T_J = 125^\circ\text{C}$ [3] und ein Sperrschicht-Gehäuse Wärmeleitwiderstand von $\Theta_{JC} = 23,9^\circ\text{C W}^{-1}$ [3]. Mit einem konservativen Sicherheitsfaktor von 1.5, um bisher unbekannte Bauteile zu berücksichtigen, folgt daraus $\Theta_{JC,\text{safety}} = 35,85^\circ\text{C W}^{-1}$ und eine maximale Gehäusetemperatur von $T_C = 89,15^\circ\text{C}$. Im Kontext der Elektronik ist mit Gehäuse immer die Oberseite der elektronischen Komponente gemeint. Die Kühlung soll außerdem eine hohe Zuverlässigkeit haben, welche durch Verwendung von ausschließlich passiven Bauteilen gewährleistet wird. Dadurch kann aufwendiges und teures testen und verifizieren von aktiven Bauteilen mit mechanischer oder elektrischer Funktion vermieden werden und es besteht bei nicht nominalen Flügen eine geringere Ausfallwahrscheinlichkeit durch die inherent größeren Toleranzen passiver Bauteile.

Dem Energieerhaltungssatz nach haben der FCC, die Kameras und weitere Elektronik die keine Leistung abgibt, gegenüber etwa der Power Control and Delivery Unit (PCDU) und Funkplatine welche Leistung in Form von Strom und elektromagnetischer Strahlung abgeben, einen Wirkungsgrad von 0 %, da Logikoperationen physikalisch gesehen keine Arbeit sind. Resultierend wird der komplette Stromverbrauch in Wärme umgewandelt.

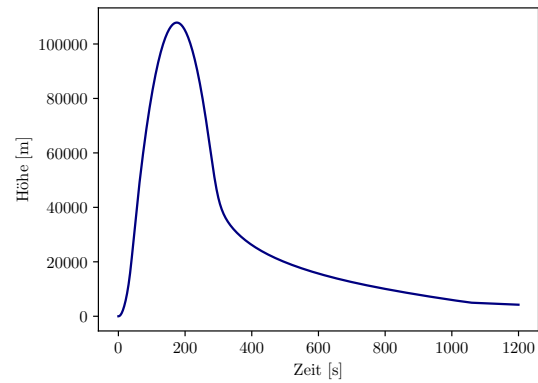
Tabelle 3.1: Leistung der Avionik

Komponente	Spannung & Strom	Wirkungsgrad	Wärmestrom
STM32H743ZGT6	$V_{DD} = 3,3 \text{ V},$ $I_{DD} = 536 \text{ mA}$ [3]	$\approx 0 \%$	1,769 W
\dot{Q}_{ges}			7,075 W
RunCam Split 4 V2	$V_{DD} = 5 \text{ V},$ $I_{DD} = 450 \text{ mA}$ [14]	$\approx 0 \%$	2,25 W
\dot{Q}_{ges}			9 W
Thebe-II	$V_{DD} = 3,6 \text{ V},$ $I_{DD} = 500 \text{ mA}$ [17]	$\approx 30 \%$ [17]	1,3 W
PCDU		$\approx 30 \%$	9,3 W
$\dot{Q}_{\text{ges, safety}}$			40 W

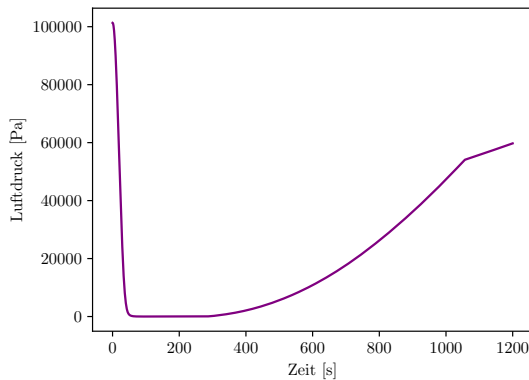
Die Leistung der Avionik in 3.1 ergibt sich durch den Maximalverbrauch der FCC mikrocontroller (STM32H743ZGT6) bei maximaler clock rate (400 MHz) und vollständig aktiver Peripherie, der Kameras und einer Abschätzung der restlichen Komponenten ohne Quellenangabe. Der aus 3.1 resultierende gesamten Wärmestrom der Avionik mit 40 W ist mit einem gewöhnlichen Laptop vergleichbar.



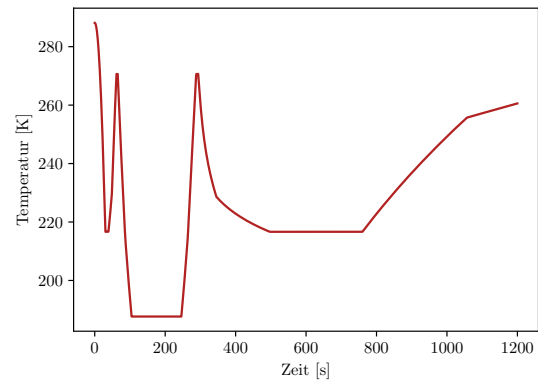
(a) Beschleunigung während Flug



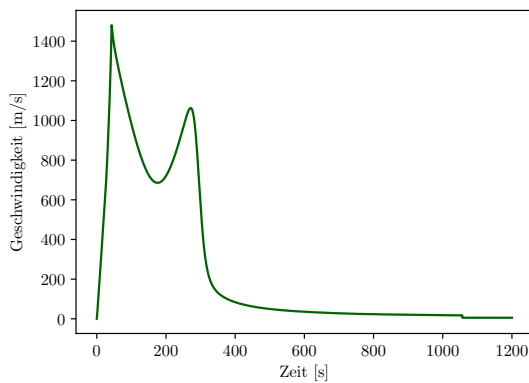
(b) Flughöhe



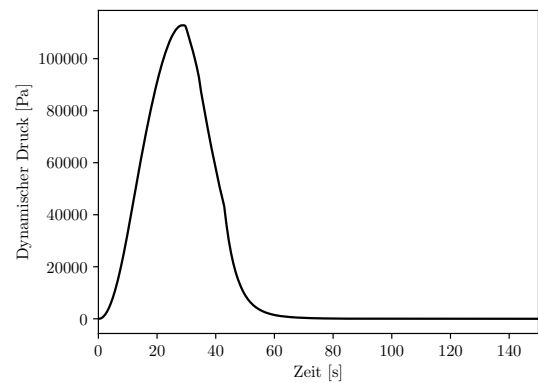
(c) Statischer Luftdruck während Flug



(d) Statische Lufttemperatur während Flug



(e) Geschwindigkeit während Flug



(f) Dynamischer Druck während Flug

Abbildung 3.1: Flugdaten der Trajektorienimulation

3.2 Thermale Schnittstelle

Um mit der Abwärme der Avionik umgehen zu können, muss sie effektiv gesammelt und abtransportiert werden. Oft werden in der Luft- und Raumfahrtindustrie Kühlkreisläufe mit einem Arbeitsfluid verwendet. Diese benötigen jedoch meist bewegliche Bauteile wie Pumpen, welche die Ausfallwahrscheinlichkeit erhöhen. Alternativ gibt

es auch Möglichkeiten durch erzwungene Konvektion ein Arbeitsfluid anzutreiben oder Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit zu verwenden. Beide Methoden bieten in Kombination eine günstige Integrierbarkeit und geringen Wärmeleitwiderstand, ohne Bewegliche Teile zu verwenden.

Das Thermale Interface wird auf Systemebene analysiert, da eine Entwicklung auf Printed Circuit Board (PCB) Ebene wie bereits erläutert nicht möglich ist, ohne vollständig entwickelte Elektronik.

3.2.1 Heatpipes

Heatpipes (Wärmerohre) sind eine Möglichkeit durch erzwungene Konvektion Wärme zu transportieren. Reguläre Heatpipes sind vollständig geschlossene Rohre mit einer Flüssigkeit im inneren und einer Kapillarstruktur an der Innenwand, so dass ein freier Kanal in der Mitte bleibt. Bei der Wärmequelle verdampft die Flüssigkeit aus der Kapillarstruktur und bei der Wärmesenke kondensiert es wieder, wodurch der resultierende Massenstrom einen Kreislauf bildet. Besonders effektiv sind Heatpipes durch die Nutzung der Verdampfungsenthalpie beim Flüssig-Gas Übergang an der Wärmequelle, wodurch sehr hohe Wärmestromdichten erreicht werden können. Eine Schematische Darstellung eines Wärmerohrs kann in [3.2](#) gesehen werden.

Eine Weiterentwicklung davon sind Loop Heatpipes die, wie der Namen bereits impliziert einen Kreislauf bilden, indem es eine separate Flüssig- und Dampfleitung gibt, welche jeweils am Verdampfer bzw. Kondensator miteinander verbunden ist. Besonders von Vorteil sind Loop Heatpipes, wenn größere Distanzen überbrückt werden müssen, oder eine relativ zuverlässige Funktion unabhängig von Orientierung und Gravitation gebraucht wird. Aufgrund der erhöhten Komplexität von Loop Heatpipes, der Möglichkeit die Orientierung frei zu bestimmen, den relativ geringen Distanzen innerhalb der Avionik-sektion und dem Mangel an Kommerziell erhältlichen Loop Heatpipes wird eine reguläre Heatpipe gewählt.

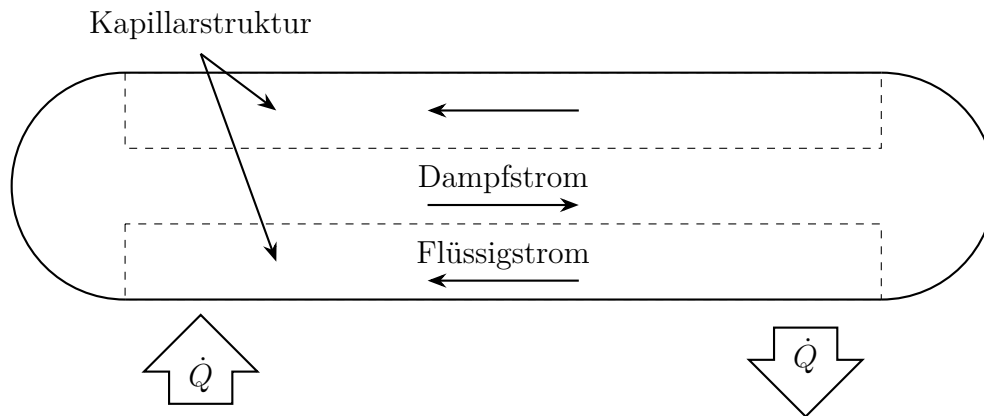


Abbildung 3.2: Wärmerohr Aufbau und Funktionsweise

Ein wichtiger Aspekt von Heatpipes ist, dass der Wärmeleitwiderstand durch Biegungen und Anbindung von mehreren Quellen um bis zu 100 % steigen kann [10]. Des weiteren hängt besonders bei regulären Heatpipes der Wärmeleitwiderstand von der effektiven Beschleunigung ab, da die höhere Dichte der Flüssigphase eine beschleunigende Wirkung auf die Konvektion hat, wenn die Wärmequelle unten orientiert ist. Sollte die Heatpipe jedoch „überkopf“ arbeiten, sodass die Wärmequelle oben orientiert ist, muss die Konvektion gegen die Beschleunigung arbeiten und verliert Leistung bzw. hat einen erhöhten Wärmeleitwiderstand.

Ausgewählt wurde die QG-SHP-D5-400MN Heatpipe von Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH aus Kupfer mit Mesh-Gewebe als Kapillarstruktur von 400 mm Länge und 5 mm Durchmesser. Diese Heatpipe kann eine Leistung von 40 W übertragen.

Weiterhin wird die Heatpipe als ROM mit einem einfachen Widerstand ersetzt, der dem Wärmeleitwiderstand von $R_{\text{Heatpipe}} = 0,3 \text{ K W}^{-1}$ der Heatpipe aus dem Datenblatt [13] entspricht. Dadurch wird eine sehr komplexe Modellierung abhängig von Temperaturen, Biegungen, Ausrichtung, Beschleunigung und Anzahl an Wärmequellen sowie deren Leistung und Positionen vermieden.

3.2.2 Wärmeleitbänder

Um die PCB mit dem Wärmerohr zu verbinden werden Wärmeleitbänder aus verschiedenen Materialien analysiert. Wärmeleitbänder sind flexible Verbindungsteile mit hoher Wärmeleitfähigkeit die Wärmebrücken zwischen mehreren Bauteilen gewährleisten. PGS ist gegenüber herkömmlichen Materialien besonders interessant durch die extrem hohe Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Ebene, da diese der Ebene von der Molekülstruktur des Graphit entspricht. Außerdem ist es ein relativ flexibles Material, bei einer üblichen Dicke von $\approx 10 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$. Ein Nachteil von PGS ist

die im Kontrast zur Ebene sehr niedrige Wärmeleitfähigkeit durch die Ebene, infolge von wenigen molekularen Brücken zwischen den Gitterstrukturen. Dementsprechend wird [PGS](#) und andere Arten von Graphit Folien hauptsächlich zur Wärmeverteilung auf der Oberfläche von Bauteilen verwendet um Wärmestromdichten zu verringern und homogenere Temperaturverteilungen zu erreichen.

Das effektive erhöhen des Querschnitts von [PGS](#) durch Schichtung mehrerer Folien aufeinander ermöglicht es jedoch die hohe Wärmeleitfähigkeit in der Ebene auch zum thermischen koppeln mehrerer Bauteile zu verwenden. Diese Anwendung hat besonders in der Raumfahrt durch ermöglichte Masseneinsparungen Halt gefunden. Eine Kommerzielle Reihe an solchen Wärmeleitbändern aus gängigen Materialien sieht man in [3.3](#). Der Tabelle [3.2](#) nach ist [PGS](#) das beste Kompromiss für die geforderten Eigenschaften. Um jedoch zu vermeiden, dass bei starken Vibrationen aufgrund der Flexibilität des [PGS](#) Kontakt mit der Elektronik und mögliche Kurzschlüsse entstehen, muss das Wärmeleitband mit einer elektrisch isolierenden Ummantlung versehen werden.

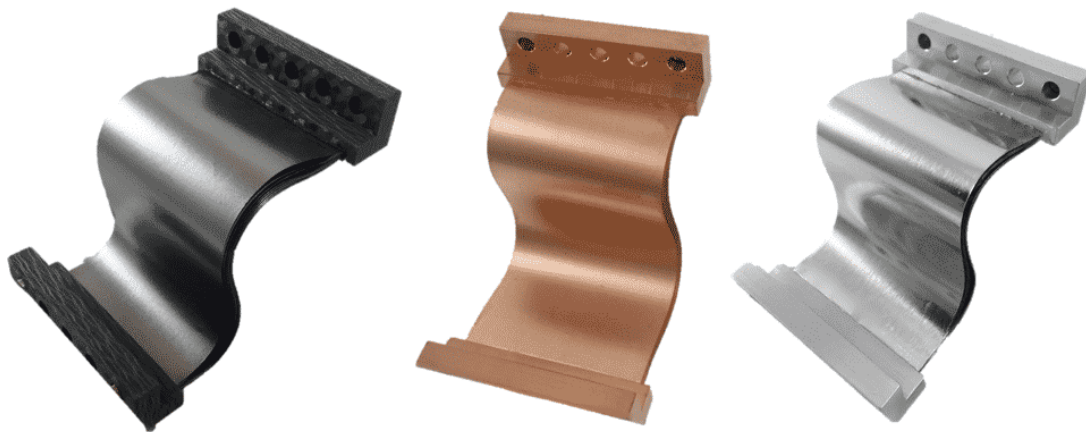


Abbildung 3.3: Kommerziell erhältliche Wärmeleitbänder aus [PGS](#) (links), Kupfer und Aluminium [\[4\]](#)

Tabelle 3.2: Ampelbewertung von Materialien für Wärmeleitbänder.

Eigenschaft	Kupfer[16]	Aluminium[16]	PGS (Graphit)[8]
Wärmeleitfähigkeit in Ebene	397,48 W m ⁻¹ K ⁻¹	225,94 W m ⁻¹ K ⁻¹	1050 W m ⁻¹ K ⁻¹ bis 1800 W m ⁻¹ K ⁻¹
Wärmeleitfähigkeit durch Ebene	397,48 W m ⁻¹ K ⁻¹	225,94 W m ⁻¹ K ⁻¹	10 W m ⁻¹ K ⁻¹ bis 26 W m ⁻¹ K ⁻¹
Dichte	8940 kg m ⁻³	2698 kg m ⁻³	1500 kg m ⁻³ bis 2100 kg m ⁻³
Elektrische Isolation	Schlecht	Schlecht	Schlecht

Aufgrund der höchsten Wärmeleitfähigkeit in der Ebene vom **PGS** HGS-012 der Firma HPMS Graphite [8] wurde dieses ausgewählt. Um ein verwendbares Wärmeleitband zu konstruieren, soll dieses aus 32 Schichten bestehen, 4 cm breit sein und 10 cm lang sein, wodurch es ermöglicht werden soll, dass die Heatpipe keine Biegungen hat. Die Anbindung bzw. Endstücke der Wärmeleitbänder werden ignoriert, sowie Kontaktwiderstände durch Klebstoffe oder ähnliche Verbindungsmethoden. Der Wärmeleitwiderstand ergibt sich durch einsetzen von Gleichung 2.5 in 2.6:

$$R_{\text{Wärmeleitband}} = \frac{\Delta x}{\lambda A}$$

Mit $\Delta x = 10 \text{ cm}$, $\lambda = 1800 \text{ W m}^{-1} \text{ K}$ und $A = 32 \cdot 0,012 \text{ mm} \cdot 4 \text{ cm} = 15,36 \text{ mm}^2$ ergibt sich $R_{\text{Wärmeleitband}} = 3,617 \text{ K W}^{-1}$

3.2.3 Gesamte Schnittstelle

Mittels einer Kombination von **PGS** und Heatpipe kann eine leicht integrierbare Wärmebrücke gebildet werden, die den Wärmeleitwiderstand minimiert. Eine Schematische Darstellung der Thermalen Schnittstelle ist in 3.4 zu sehen.

Wenn angenommen wird, dass die Avionik aus vier separaten **PCB** mit einer Gesamtleistung von 40 W (3.1) besteht, müssen pro Wärmeleitband 10 W übertragen werden. Dabei entsteht nach Gleichung 2.6 eine Temperaturerhöhung über das Wärmeleitband von $10 \text{ W} \cdot 3,617 \text{ W K}^{-1} = \Delta T_{\text{Wärmeleitband}} = 36,17 \text{ K}$. Die Heatpipe

überträgt den vollständigen Wärmestrom und hat eine Temperaturerhöhung von $40 \text{ W} \cdot 0,3 \text{ W K}^{-1} = \Delta T_{\text{Heatpipe}} = 12 \text{ K}$.

Von der Quelle bis zur Senke ergibt sich also ein Temperaturgradient von $\Delta T_{\text{Heatpipe}} + \Delta T_{\text{Wärmeleitband}} = \Delta T_{\text{ges}} = 48,17 \text{ K}$. Eine Schematische Darstellung der Schnittstelle sieht man in 3.4. Für die Nötige Temperatur an der Senke erhält man $T_{\text{Senke}} = T_C - \Delta T_{\text{ges}} = 314,13 \text{ K}$.

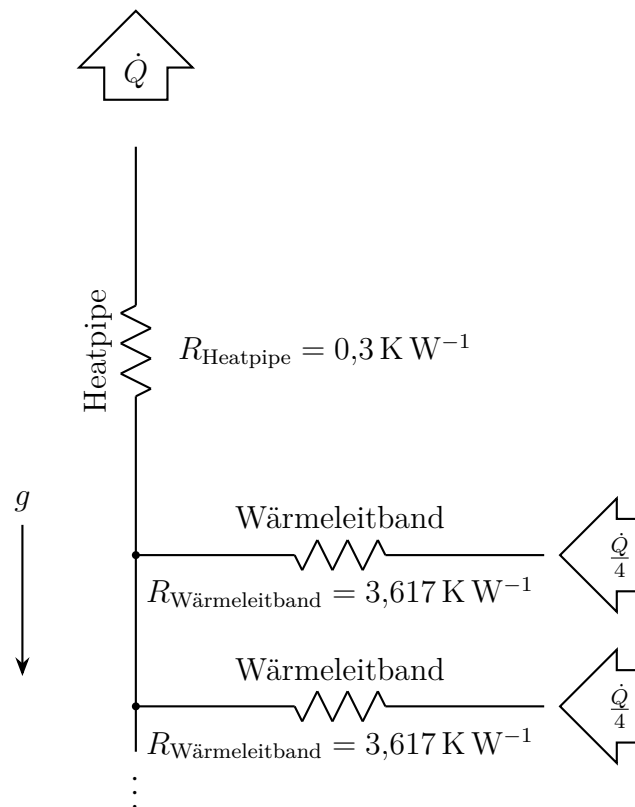


Abbildung 3.4: ROM der Thermalen Schnittstelle aus Heatpipe und Wärmeleitbändern. Hier sind nur 2 von 4 Wärmeleitbändern dargestellt.

3.3 PCM

Nutzung eines PCM mit Fest-Flüssig Übergang ist eine weit verbreitete Lösung in der Luft- und Raumfahrtindustrie um für begrenzte Zeiträume Elektronik in einem akzeptablen Temperaturbereich zu halten. Auch wenn PCM Lösungen generell eine hohe Masse haben, wird das oft aufgrund der ansonsten idealen Eigenschaften in Kauf genommen: Durch die hohe spezifische Schmelzenthalpie, kann rein passiv eine große Wärmemenge, bei einem isothermen Prozess, absorbiert werden. Aufgrund dessen kann ein von der Umwelt isoliertes ATM entwickelt werden, das nicht mit stark schwankenden Zuständen der Sonneneinstrahlung und Lufttemperatur zurecht

kommen muss. Auch wenn ein PCM mit Flüssig-Gas Übergang meist eine etwa 10-fach höhere Verdampfungsenthalpie hat, wird diese Art generell nicht verwendet, da der Dichteunterschied zwischen Flüssig- und Gasphase zu extremen Drücken führen würden, falls Wiederverwendbarkeit verlangt wird und somit ein Druckkörper nötig ist. Alternativ kann die Gasphase auch aus dem Fahrzeug abgelassen werden in einem Prozess der Vapour Venting genannt wird. Hierbei geht jedoch die Wiederverwendbarkeit verloren, da vor jedem Start die Flüssigphase neu getankt werden muss. Weiter kann das Vapour Venting trotz der geringen Massenströme zu Momenten führen, die das Fahrzeug destabilisieren; besonders im Überschallbereich können unintuitive Kräfte durch Interaktionen mit dem Überschallstrom entstehen [7], die aufwendige CFD-Simulationen oder Tests benötigen. Dementsprechend wird nur ein Fest-Flüssig PCM analysiert.

Für die Auswahl eines geeigneten PCM sind spezifische Schmelzenthalpie und Schmelztemperatur entscheidend. Die Wärmeleitfähigkeit ist zwar auch sehr relevant, ist jedoch für alle Materialien zu schlecht und muss durch Lamellen oder ähnliche Wärmetauschende Strukturen verbessert werden, wobei dabei PCM Masse mit Strukturmasse ersetzt wird und somit die Wärmekapazität sinkt. Das Volumen der Wärmeleitenden Struktur welches PCM ersetzt wird Void Fraction genannt, da es gewissermaßen eine Leerstelle im PCM bildet, die wie gesagt keine latente Wärmeaufnahme hat. Hier wird ein Void Fraction von $F = 0.1$ gewählt. Eine Optimierung der Lamellenstruktur kann bei gleich bleibender Masse in einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit resultieren, was jedoch in dieser Arbeit nicht durchgeführt wird. Abbildung 4.1a zeigt ein Drahtmodell der Struktur.

Tabelle 3.3: Ampelbewertung für Alkane als PCM [12].

Eigenschaft	n-Hexadecan	n-Octadecan	n-Eicosan
Schmelzpunkt	291 K	301 K	310 K
Schmelzenthalpie	230 400 J kg ⁻¹	239 300 J kg ⁻¹	240 999 J kg ⁻¹

Die Auswahltabelle 3.3 zeigt die drei gängigsten Organischen Alkane, welche als PCM verwendet werden im Vergleich. Demnach hat n-Eicosan die besten Eigenschaften, mit insbesondere einem perfekten Schmelzpunkt kurz unter den 314,13 K der Senke, wie in 3.2 berechnet. Um die Masse und Dimension des PCM zu berechnen wurde das in 3.1 dargestellte Python-Programm verwendet. Das PCM wird dort als isobar und isotherm angenommen und hat eine unendliche Wärmeleitfähigkeit. Des weiteren befindet es sich in einer Aluminium-Box mit 1 mm Wanddicke und einem der Void Fraction entsprechenden internen Aluminium Volumenanteil von $F = 0.1$. Die Dimensionen der Breite und Tiefe der Box wurden gleich gesetzt; die Höhe der Box bildet die zweite Variable. Kapazitäts- und Massenkonturen abhängig von Seitenlänge


```

1 rho_alu = 2700      # aluminium density [kg*m^-3]
2 rho_pcm = 788       # pcm density [kg*m^-3]
3 h        = 240998.9 # pcm latent heat [J*kg^-1]
4 F        = 0.1      # void fraction
5 t        = 0.001    # wall thickness [m]
6
7 def total_mass(L, H): # pcm mass including case and fins
8     return (rho_alu * (L**2 * H - (L - 2*t)**2 * (H - 2*t))
9           + (F * rho_alu + (1 - F) * rho_pcm) * (L - 2*t)
10          **2 * (H - 2*t))
11
12 def total_heat(L, H): # pcm latent heat capacity
13     # ...#
14     pcm_heat = (1 - F) * rho_pcm * (L - 2*t)**2 * (H - 2*t)
15     * h
16     return pcm_heat

```

Listing 3.1: Berechnung der Masse und Latenten Wärmekapazität des **PCM** in der pcm.py

und Höhe können in 3.10 gesehen werden.

Bei einer Flugdauer von 1200s und einem Wärmestrom von 40 W ergibt sich eine nötige latente Wärmekapazität von 48 000 J, eine Seitenlänge der Aluminium-Box von 6,749 cm und eine Gesamtmasse von 346,610 g. Da ein Würfel von allen Quadern das größte Volumen-Oberflächenverhältnis hat, sind alle Kanten gleich lang.

3.4 Radiator

Bei Radiatoren ist ein hoher Emissions- und niedriger Absorptionsgrad nach Gleichung 2.3 dimensionierend, da die Temperatur den Anforderungen nach limitiert ist und die Fläche minimiert werden muss, weil diese proportional zu eingehenden Wärmeströmen aus der Umgebung ist, wie etwa die Sonneneinstrahlung oder die Luft, welche auch möglichst gering gehalten werden sollen.

Als Beschichtung wurde AZ-93 der Firma AZ Technology LLC. [1] ausgewählt. Dabei handelt es sich um eine in der Raumfahrt weit verbreitete inorganische Farbe mit günstigen Eigenschaften, welche Tabelle 3.4 entnommen werden können. Abbildung 6.1 ist eine Visualisierung der Gleichung 2.3 und zeigt Leistungskonturen eines Radiators mit den Eigenschaften aus Tabelle 3.4 je nach Fläche und Temperatur.

```

1  {
2      #...#
3      "avionics_power": 40,
4      "target_temperature": 36.85,
5      "emittance": 0.91,
6      "absorptance": 0.15,
7      "solar_flux": 1000,
8  }

```

Listing 3.2: Setup Werte aus der setup.json

```

1  #...#
2  avionics_power = data["avionics_power"]
3  e = data["emittance"]
4  a = data["absorptance"]
5  solar_flux = data["solar_flux"]
6  target_temperature = data["target_temperature"]
7
8  def radiator_area(avionics_power, target_temperature, e, a,
9                    solar_flux): # radiator area
10     return (avionics_power / (e * Stefan_Boltzmann *
11                               target_temperature**4 - 0.5 * solar_flux * a))

```

Listing 3.3: Berechnung der Radiatorfläche in der radiator.py

Tabelle 3.4: AZ-93 Spezifikationen [1]

ε_t	0.91 ± 0.02
α_s	0.15 ± 0.02
Temperaturbereich	-180°C bis 1400°C

Für eine rein radiative Kühlung der Avionik ergibt sich für 40 W der Avionik und einen spezifischen Wärmestrom der Sonne von 1 kW m^{-2} bei einem 50 % Dutycycle durch die Rotation der Rakete, den Eigenschaften aus 3.4 und einer Temperatur von $T_{\text{senke}} = 314,13 \text{ K}$ eine Fläche von $996,163 \text{ cm}^2$. Der Radiatorleistung ergibt sich demnach zu $\dot{Q}_{\text{Radiator}} = 47,471 \text{ W}$. In 3.2 und 3.3 ist der Programmcode der zur Berechnung verwendet wurde zu sehen.

3.5 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. Für die Vorauslegung wird die Außenkontur der Rakete von Spitze bis Avionik-Sektion, mit Hilfe der Nußelt-Beziehungen, als Längsangeströmte ebene Platte angesehen, wie in Abbildung 3.7 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 (2.12, 2.11) überprüft werden. Mittels der Nußelt-Beziehung wird der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt und dann in Gleichung 2.17 eingesetzt, um auf den spezifischen Wärmestrom zu schließen.

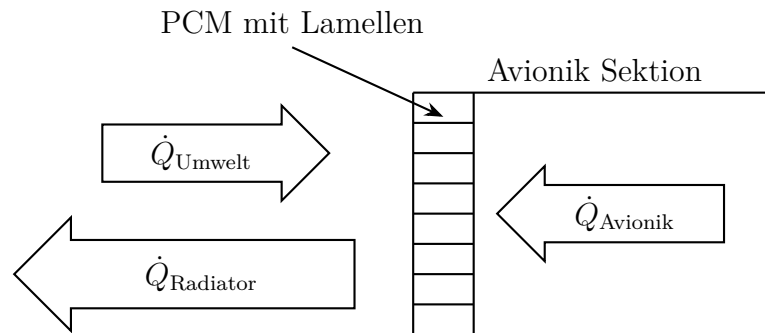


Abbildung 3.5: PCM Wärmestrom ohne aerodynamische Aufheizung

In Abbildung 3.5 sieht man eine Schematische Darstellung der Konstruktion und speziell die Wärmeströme für den Fall, dass das System am Solidus-Punkt im Gleichgewicht steht. Hingegen kann man in Abbildung 3.6 den Zustand sehen, in dem der Umweltwärmestrom durch aerodynamische Aufheizung gestiegen ist und somit das PCM anfängt zu schmelzen. Wegen des PCM und der Annahme, dass alle Wärmeleitkoeffizienten unendlich groß sind, wird das System als isotherm modelliert und die Avionik-Sektion als adiabat.

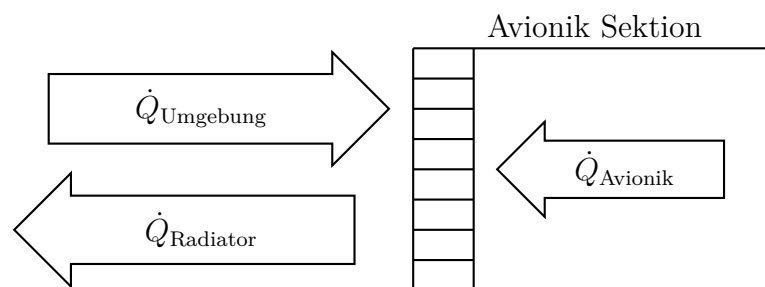


Abbildung 3.6: PCM Wärmestrom bei aerodynamischer Aufheizung

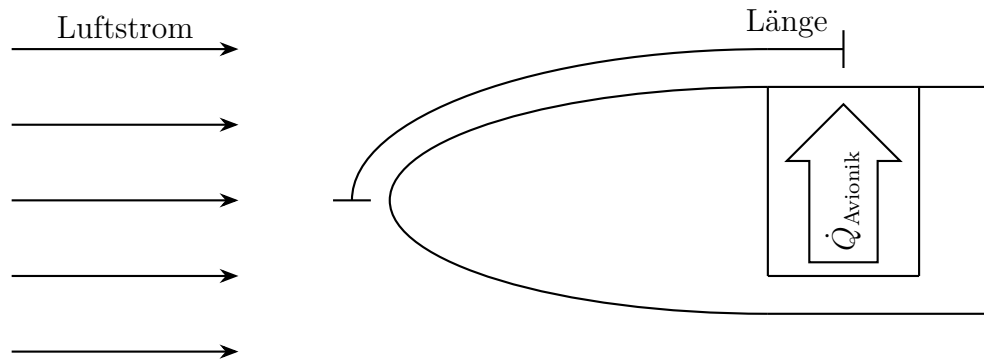


Abbildung 3.7: Kontourlänge vom Staupunkt der Rakete bis zum Mittelpunkt des Radiators

Die Software zur Berechnung aller Bilanzgleichungen für Dimensionen und Massen besteht aus einer Reihe an Python Programmen und Datenstrukturen, wobei eingeklammerte Programme nicht an der Berechnung beteiligt waren aber zu Zwecken des nachbearbeiten und Plotten verwendet wurden:

- setup.json
- results.json
- main.py
- radiator.py
- hybrid.py
- pcm.py
- (pcmProperty.py)
- (post.py)

Das Programm main.py ist das Hauptprogramm das alle Unterprogramme in der richtigen Reihenfolge aufruft; zuerst die radiator.py zur Berechnung der Radiator Dimension mithilfe der Randbedingungen aus der setup.json. Danach wird die hybrid.py aufgerufen um die Aerodynamischen Wärmeströme mittels der Nußelt-Beziehung zu bestimmen. Die Ergebnisse werden anschließend in die pcm.py geladen, um abhängig von der Radiatorfläche und den Wärmeströmen die Kapazität und Masse des [PCM](#) zu bestimmen. In [Abbildung 3.8](#) sieht man schematisch wie die Dimensionierung in der Software abläuft.

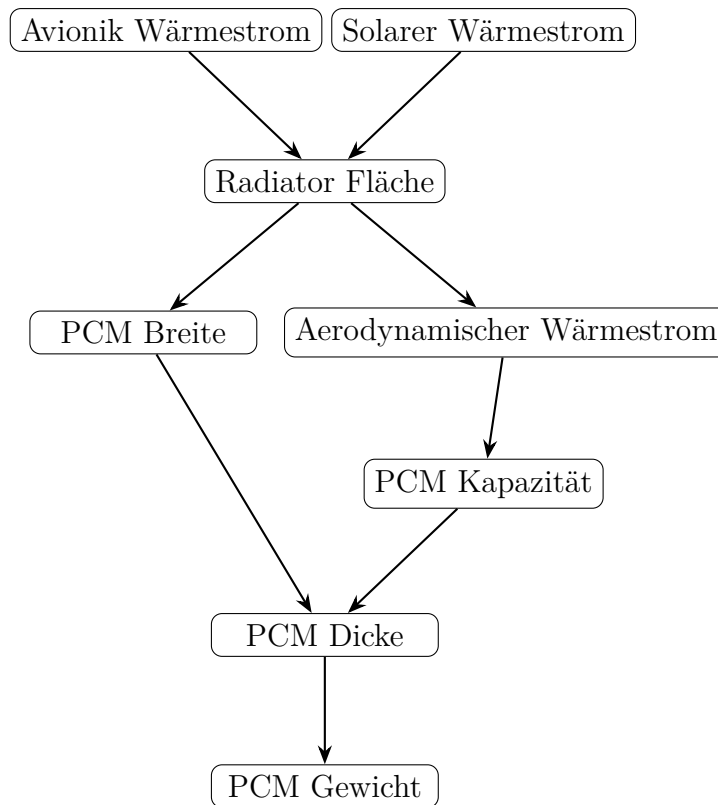


Abbildung 3.8: Dimensionierungs-Ablauf in der Vorauslegung

Wie in Abbildung 3.9 dargestellt, liegt die Prandtl-Zahl im Gültigkeitsbereich sowohl für die turbulente als auch für die laminare Grenzschicht. Die Reynolds-Zahl überschreitet jedoch zeitweise mit Werten bis zu $2,4 \cdot 10^7$ die üblichen Gültigkeitsbereiche. Aufgrund fehlender alternativer analytischer Methoden wurde dennoch die Nußelt-Beziehung für turbulente Grenzschichten angewendet.

Das Ergebnis der Berechnung ist in Abbildung 3.10 zu sehen, mit der Radiatorleistung $\dot{Q}_{\text{Radiator}} = 47,471 \text{ W}$ aus 3.4 und dem Wärmestrom aus der Umwelt \dot{Q}_{Umwelt} , der aus Sonneneinstrahlung wie in 3.4 modelliert und der aerodynamischen Aufheizung besteht. Der Wärmestrom \dot{Q}_{Rein} ist die Summe aus Avionik Wärmestrom \dot{Q}_{Avionik} und dem Umwelt Wärmestrom \dot{Q}_{Umwelt} .

Erkennbar ist, dass mit bis zu 20 kW ein extrem hoher Wärmestrom durch die aerodynamisch Aufheizung entsteht. Auch wenn dieser nur etwa 100 s andauert, ist er ausreichend um die notwendige Masse des PCM (inklusive der Aluminium Struktur) auf 4,256 kg zu erhöhen.

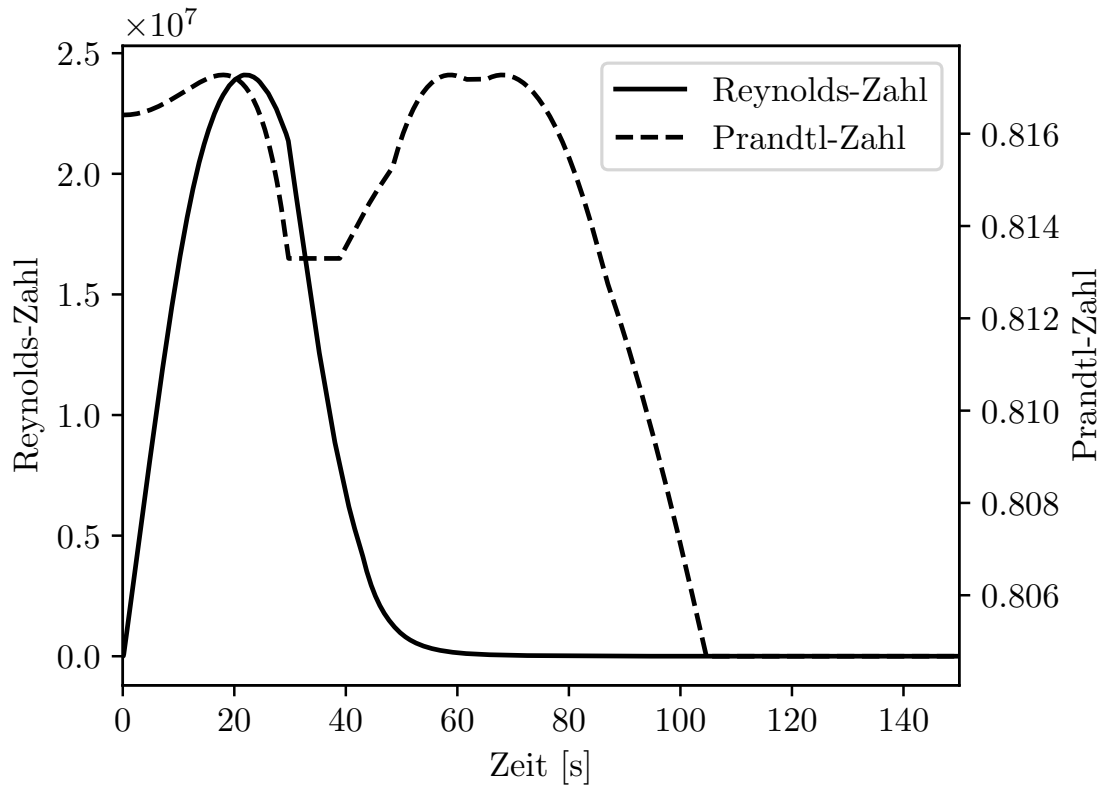


Abbildung 3.9: Reynolds- und Prandtlzahl während kritischer Phase im Flug

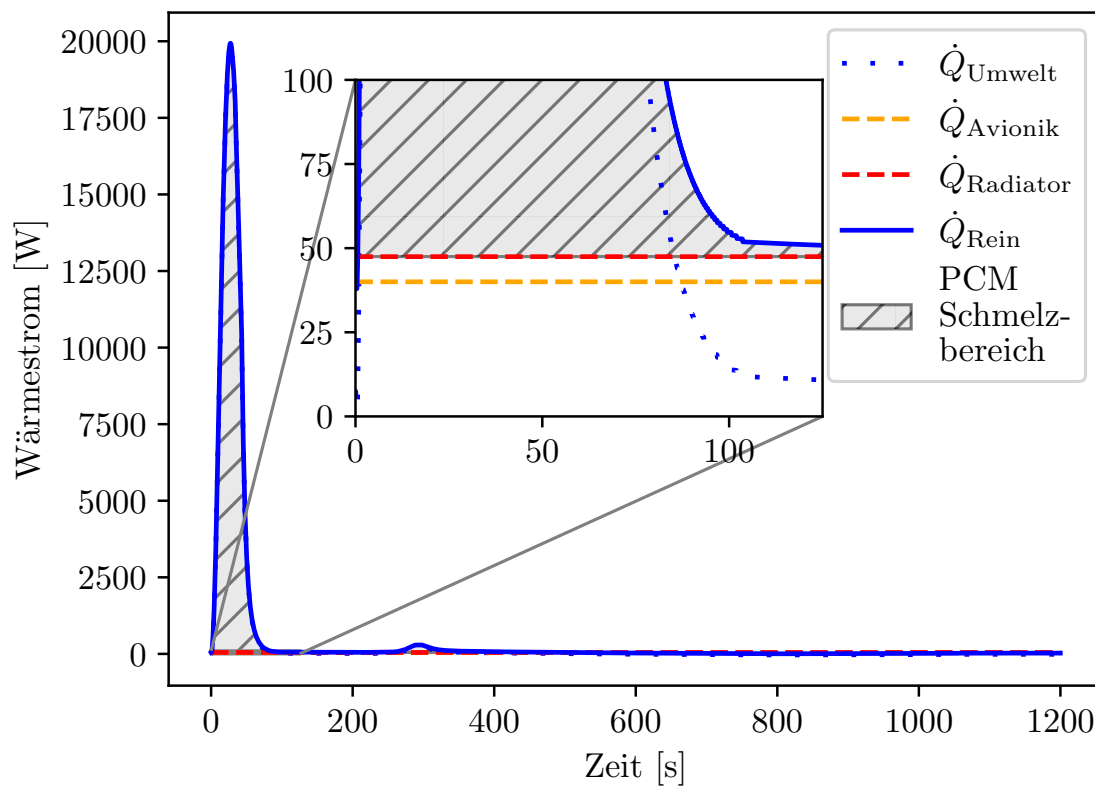


Abbildung 3.10: PCM Wärmestrom während Flug

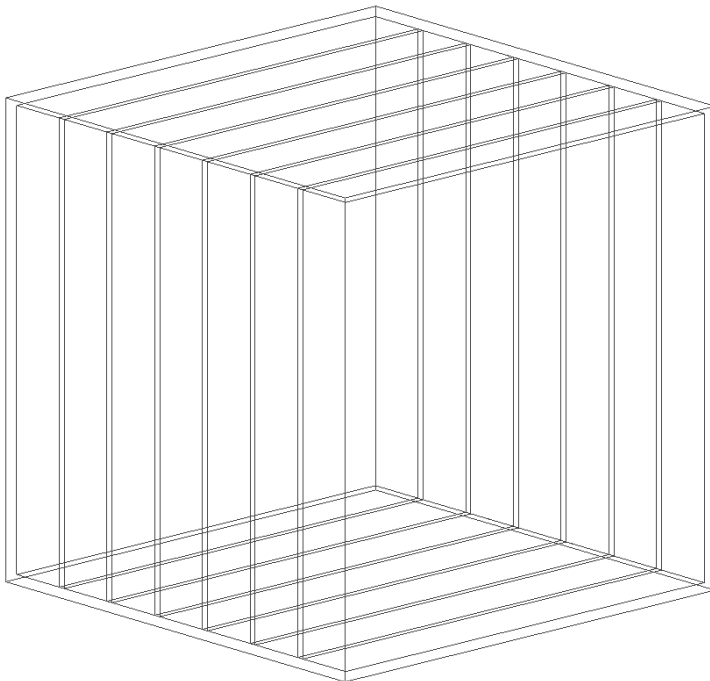
4 Simulation

Um die Ergebnisse der Vorauslegung zu verifizieren wurde mithilfe ANSYS Fluent sowohl das Verhalten des PCM, als auch die aerodynamische Aufheizung simuliert.

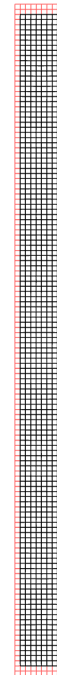
4.1 PCM

Für die Simulation des PCM

Stoffdaten für die Simulation Die Thermodynamischen Eigenschaften von n-Eicosan, aufgeführt in Tabelle 4.1, wurden aus verschiedenen Quellen entnommen.



(a) PCM Struktur



(b) PCM Mesh

Abbildung 4.1: PCM Struktur und vereinfachtes Mesh

Tabelle 4.1: Stoffdaten für n-Eicosan

Solidus Temperatur	T_{solidus}	309 K [12]
Liquidus Temperatur	T_{liquidus}	311 K [12]
Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck der Flüssigphase	$c_{p,\text{liquid}}$	2350,05 J kg ⁻¹ K ⁻¹ [12]
Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck der Feststoffphase	$c_{p,\text{solid}}$	2132,4 J kg ⁻¹ K ⁻¹ [12]
Dichte der Flüssigphase	ρ_{solid}	910 kg m ⁻³ [11]
Dichte der Feststoffphase	ρ_{liquid}	769 kg m ⁻³ [11]
Wärmeleitfähigkeit der Flüssigphase	λ_{liquid}	0,1505 W m ⁻¹ K ⁻¹ [6]
Wärmeleitfähigkeit der Feststoffphase	λ_{solid}	0,4248 W m ⁻¹ K ⁻¹ [15]
Wärmeausdehnungskoeffizient	β	0,0009 K ⁻¹ [6]
Spezifische Schmelzenthalpie	h_{fus}	240 998,86 J kg ⁻¹ [12]

Um in ANSYS Fluent Temperaturabhängige Stoffeigenschaften zu implementieren müssen UDF verwendet werden. Zu der in 2.3.3 behandelten Bossinesq-Approximation 2.24 kommen noch

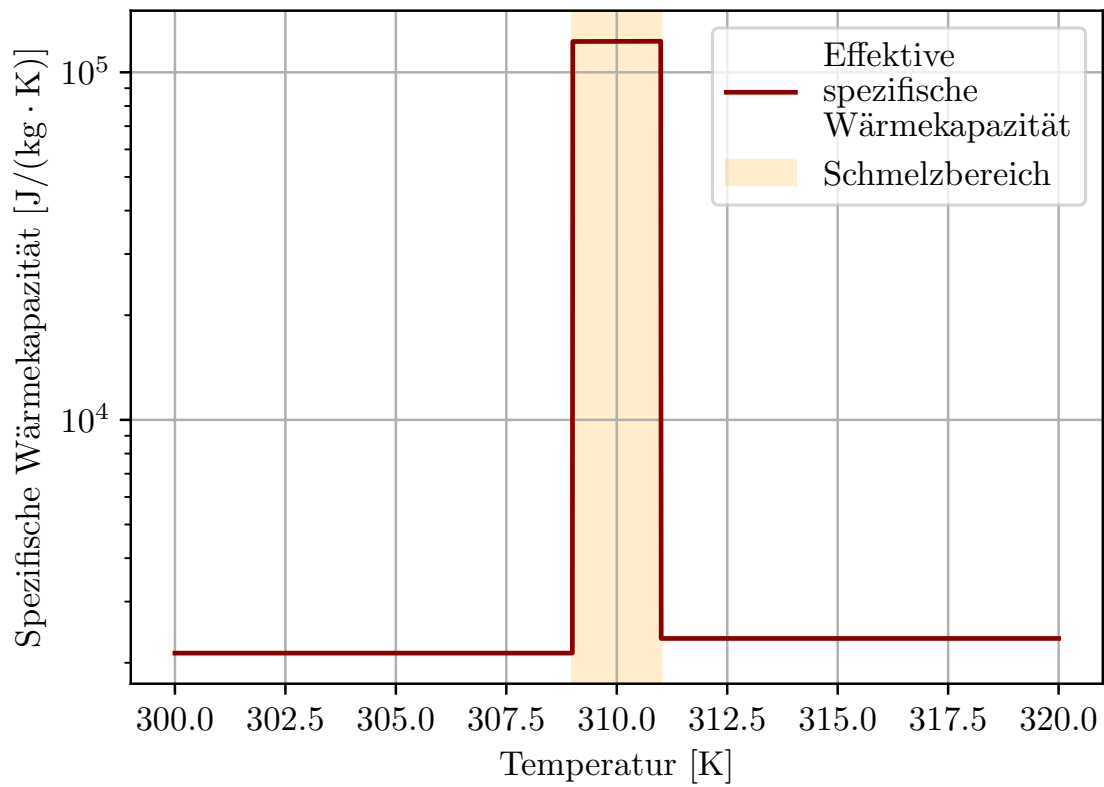


Abbildung 4.2: Effektive spezifische Wärmekapazität von n-Eicosan

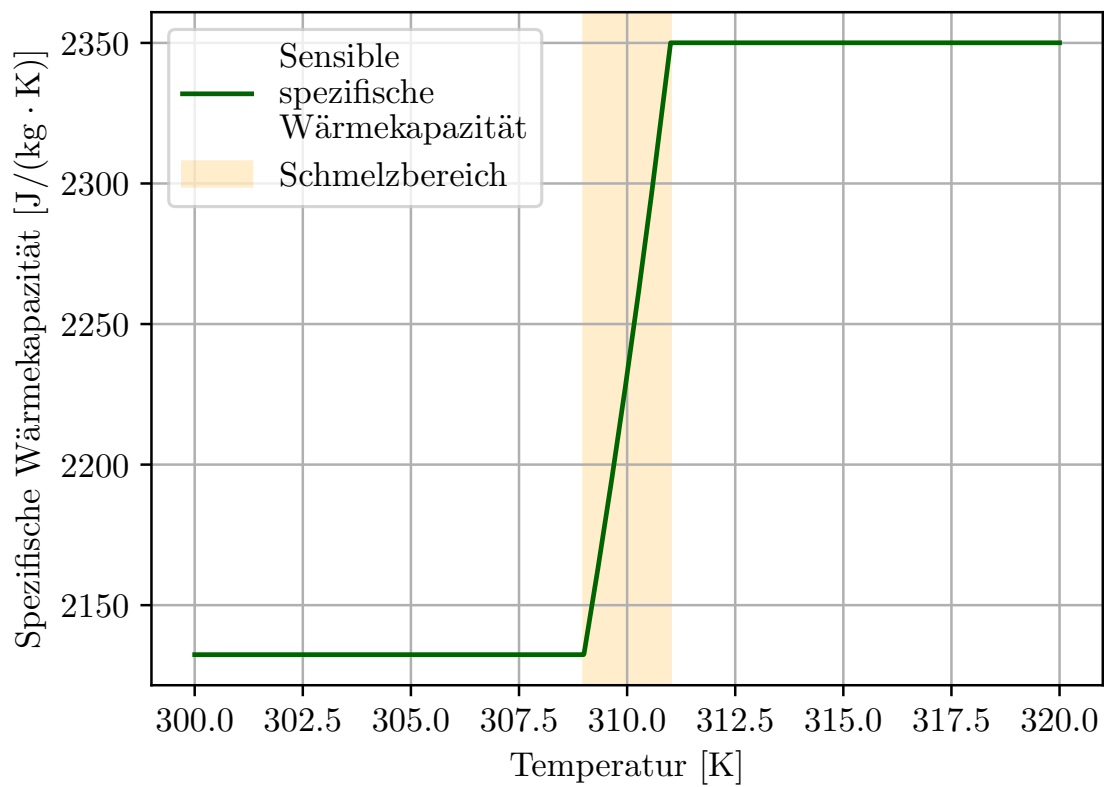


Abbildung 4.3: Sensible spezifische Wärmekapazität von n-Eicosan

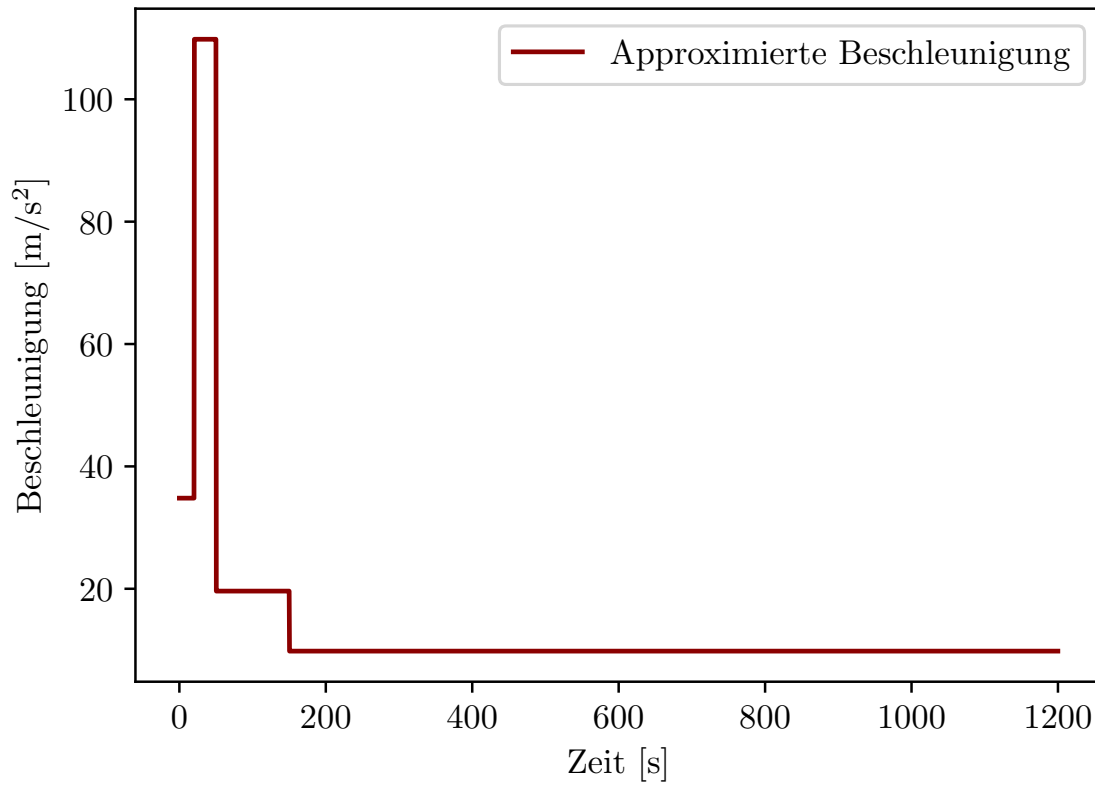


Abbildung 4.4: Approximiertes Beschleunigungsprofil

4.4 zeigt das Beschleunigungsprofil, welches in der Simulation verwendet wurde. Zu beachten ist, dass Beschleunigungsspitzen durch den Fallschirm, wie sie in 3.1a gesehen werden können, ignoriert werden, da diese in einer Überschätzung der Beschleunigung und der Konvektionsvorgänge resultieren würden.

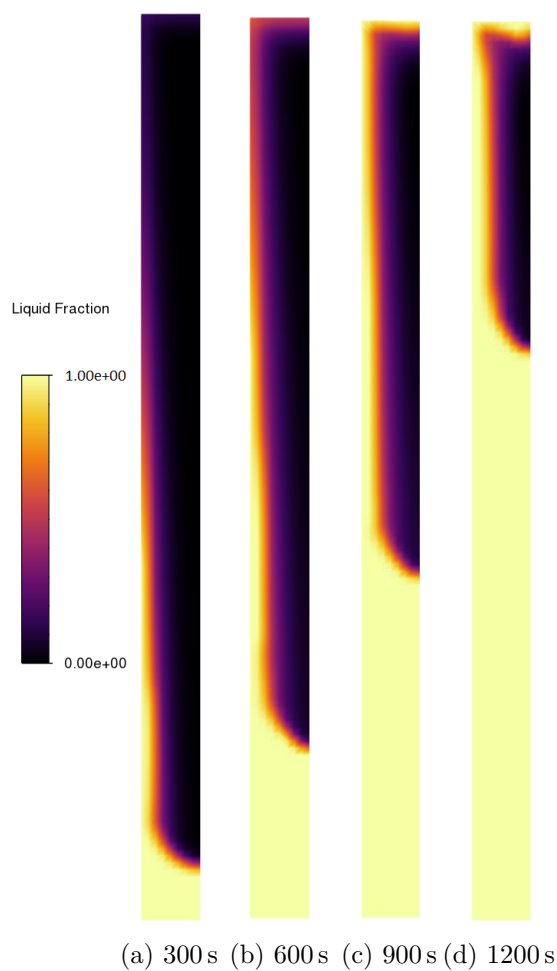


Abbildung 4.5: Flüssigkeitsanteil Konturen.
Die Legende bezieht sich auf [4.5d](#)

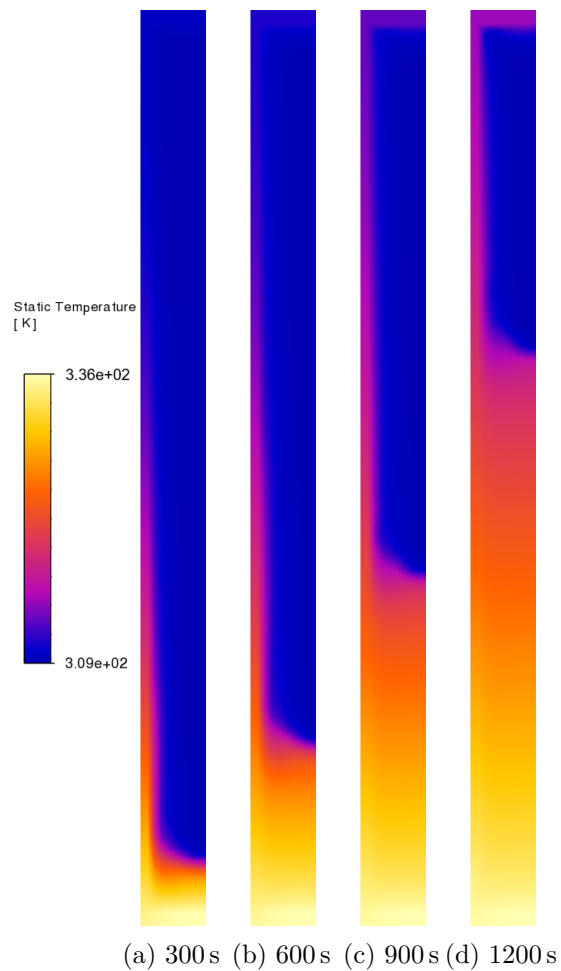


Abbildung 4.6: Konturen der statischen Temperatur.
Die Legende bezieht sich auf [4.6d](#)

```

1 //Y-momentum source
2 DEFINE_SOURCE(Boussinesq_momentum_source,cell,thread,dS,eqn)
3 {
4     double Temp, source, acc;
5     Temp=C_T(cell,thread);
6
7     double t = CURRENT_TIME;
8
9     if (t < 20)
10         acc = 34.81;
11     else if (t < 50)
12         acc = 109.81;
13     else if (t < 150)
14         acc = 19.62;
15     else
16         acc = 9.81;
17
18     source=-Rol_pcm*acc*TEC*(Temp-Tr); //negative for -Y
19     down                                     //
20     dS[eqn]=-Rol_pcm*acc*TEC;
21     negative for -Y down
22     return source;
23 }

```

Listing 4.1: Boussinesq-Approximation des Auftriebs im PCM in der UDF eicosane.c

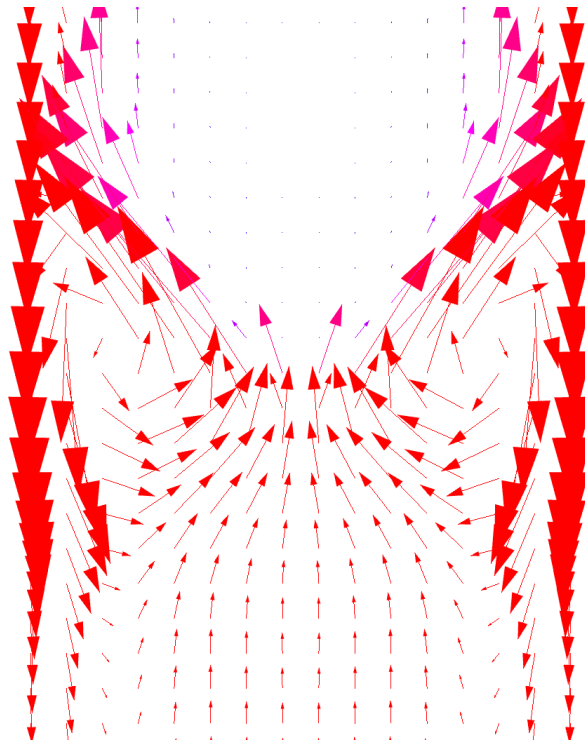


Abbildung 4.7: Geschwindigkeitsvektoren der Konvektionswirbel einer, durch Nachbearbeitung, vervollständigten Zelle bei 900 s. Darstellung der weiteren Zeitschritte ist in 6.5 zu finden.

4.2 Aerodynamische Aufheizung

Basiert größtenteils auf [9]

Die Außenstruktur der Rakete besteht aus dem zylindrischen Hüllensegment und einem von-Kármán-Nasenprofil das analytisch beschrieben wird:

$$x(t) = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\cos^{-1}\left(1 - \frac{2t}{L}\right) - \frac{1}{2} \cdot \sin\left(2 \cdot \cos^{-1}\left(1 - \frac{2t}{L}\right)\right)} \quad \text{für } t \in [0, L]$$

Hierbei ist $x(t)$ der Radiusverlauf des rotationssymmetrischen Nasenprofils entlang der Längskoordinate t , beginnend an der Spitze ($t = 0$) bis zur Basis ($t = L$). Der maximale Radius an der Basis beträgt $R = 125 \text{ mm}$ und die Gesamtlänge der Nase $L = 1250 \text{ mm}$. Dies entspricht dem Gesamtdurchmesser der Rakete von $D = 250 \text{ mm}$.

Die Vorauslegung wurde mit folgenden Werten durchgeführt:

- Isotherm auf: 38°C
- Avionik Abwärme: 40 W
- 1 m Kontourlänge
- Radiator Emissionsgrad: $0,91$ (AZ-93)
- Radiator Absorptionsgrad: $0,15$ (AZ-93)
- Icosane PCM
- Trajektorien simulation
- 1 kW m^{-2} mit 50% duty cycle durch Rotation der Rakete

Zu beachten ist, dass die Radiatorleistung konstant bleibt, da das System als isotherm mit einer infinitesimalen Temperaturerhöhung über den Schmelzpunkt hinweg angenommen wird.

Als nächstes sieht man die Flugdaten

Speziell für die Strömungssimulationen welche keine Koppelung mit Festkörpern haben, wurde der Density-Based Solver ausgewählt und die Simulation als 2D Steady State durchgeführt. Das Energiemodell wurde aktiviert und für das Viskositätsmodell [9]

Die Umströmungssimulationen der Rakete wurden an $\max Q$ orientiert, da es als Richtwert für Aerodynamische Aufheizung genommen werden kann. Desweiteren ist der Wert unanhängig von der Vorauslegung, wodurch Ungenauigkeiten von dort getroffenen Annahmen vermieden werden.

als nächstes habe ich geschaut wo der maximale dynamische Druck erreicht wurde in der Vorauslegung. Die korrespondierenden Werte des Flugzustandes habe ich dann als Boundary Conditions in der CFD Simulation genommen. Um zu verifizieren, dass dort auch die maximale Aufheizung stattfindet, habe ich 1 Sekunden vorher und nachher im Flug die BC's auch verwendet und einen Vergleich gezogen.

Maximaler dynamischer Druck: 112901.25708461029 Pa at 28.691 s

Entsprechender Flugzustand: 10244.138 m, 750.704 m/s, -51.587°C, 254.783 hPa mit entsprechender Luft Dichte 0,4006 kg/m³

Flugzustand bei 18.691 s **max Q** - 10 s: 4274.387 m, 461.355 m/s, -12.784, 594.935 hPa mit entsprechender Luft Dichte 0,7960 kg/m³

Flugzustand bei 38.691 s **max Q** + 10 s: 19758.652 m, 1189.968 m/s, -56.5°C, 56.93 hPa mit entsprechender Luft Dichte 0,0915 kg/m³

Flugzustand bei 48.7 s **max Q** + 20 s: 32439.616 m, 1393.377 m/s, -43.269°C, 8.136 hPa mit entsprechender Luft Dichte 0,012 330 01 kg/m³

Da wie in 4.10 zu sehen ist, der Zeitpunkt des maximalen dynamischen Druckes nicht im größten spezifischen Wärmestrom resultiert, wurde mit der Simulation die den höheren spezifischen Wärmestrom ergeben hat, eine Lösungsfortsetzung durchgeführt um das Maximum zu finden.

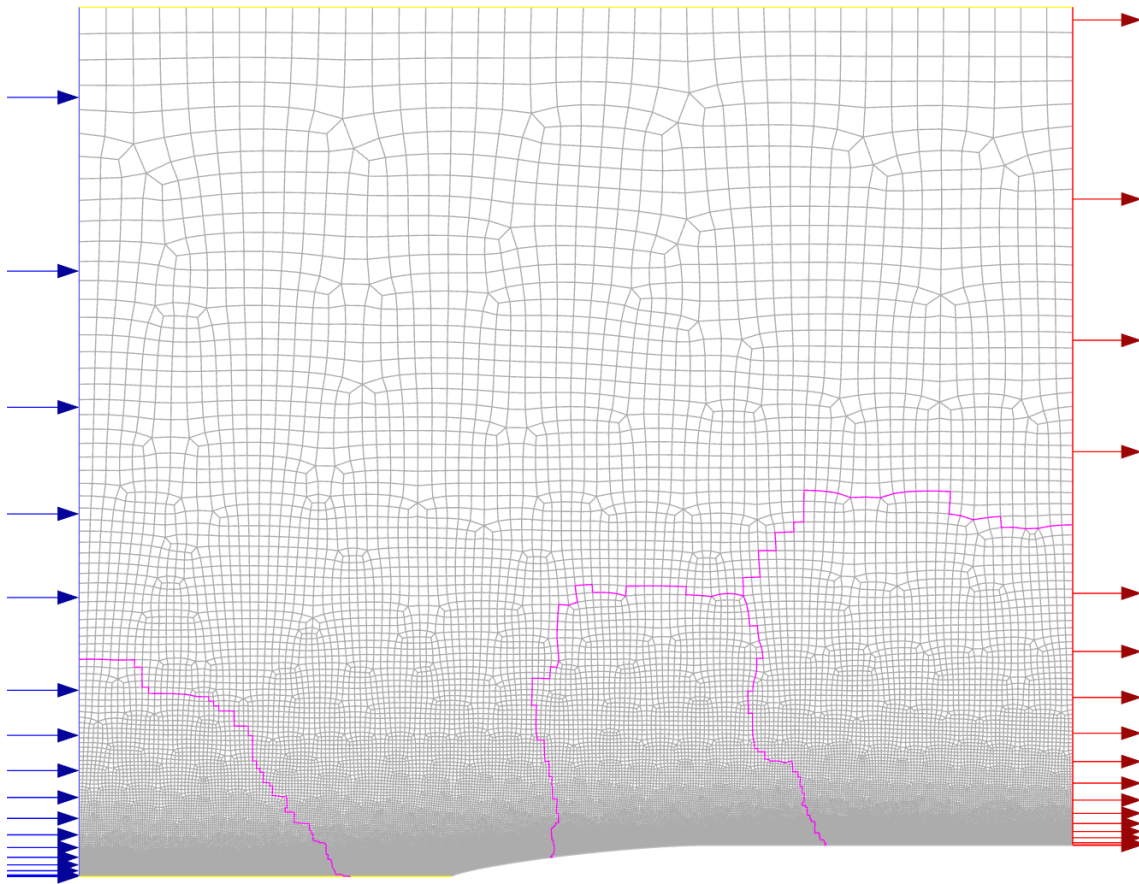


Abbildung 4.8: Darstellung der Außensströmungssimulation mit Meshstruktur in grau, velocity inlet in blau, pressure outlet in rot, Symmetrien in gelb und Partitionen der parallelisierung in lila

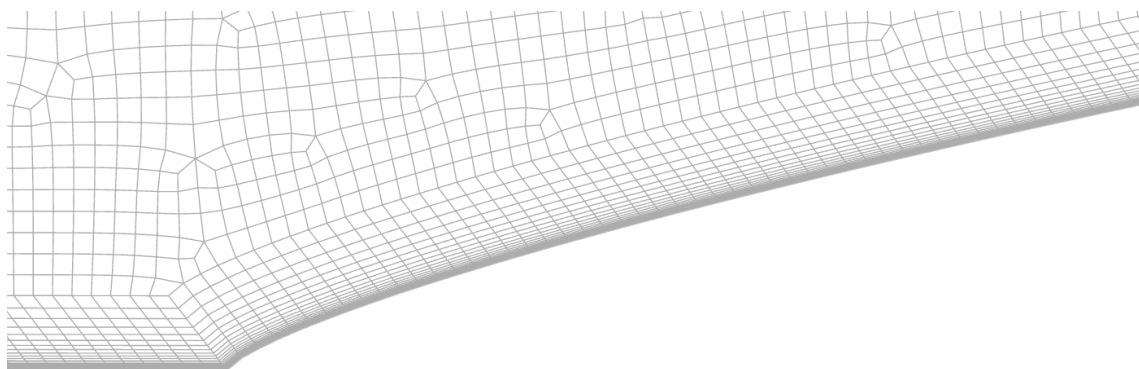


Abbildung 4.9: Schichtaufdickungen des Mesh an der Rakete

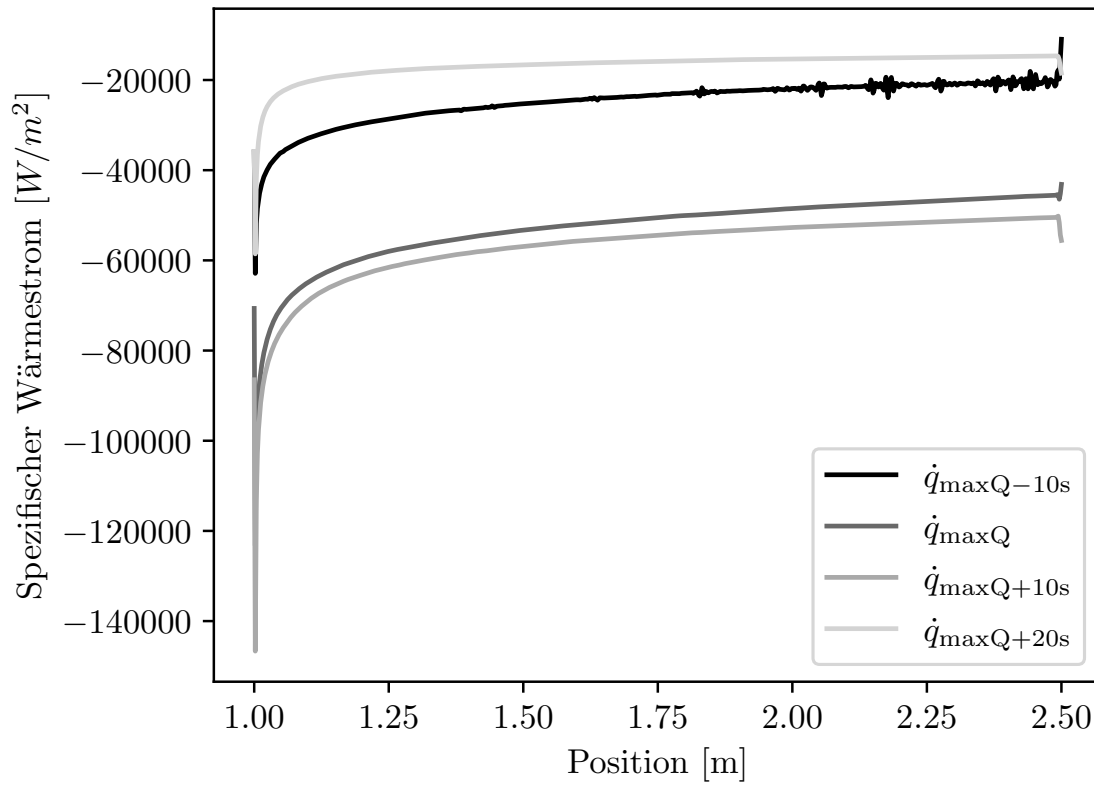


Abbildung 4.10: Spezifischer Wärmestrom an der Außenhaut bei maximalem dynamischen Druck, sowie 10 s davor, danach und 20 s danach

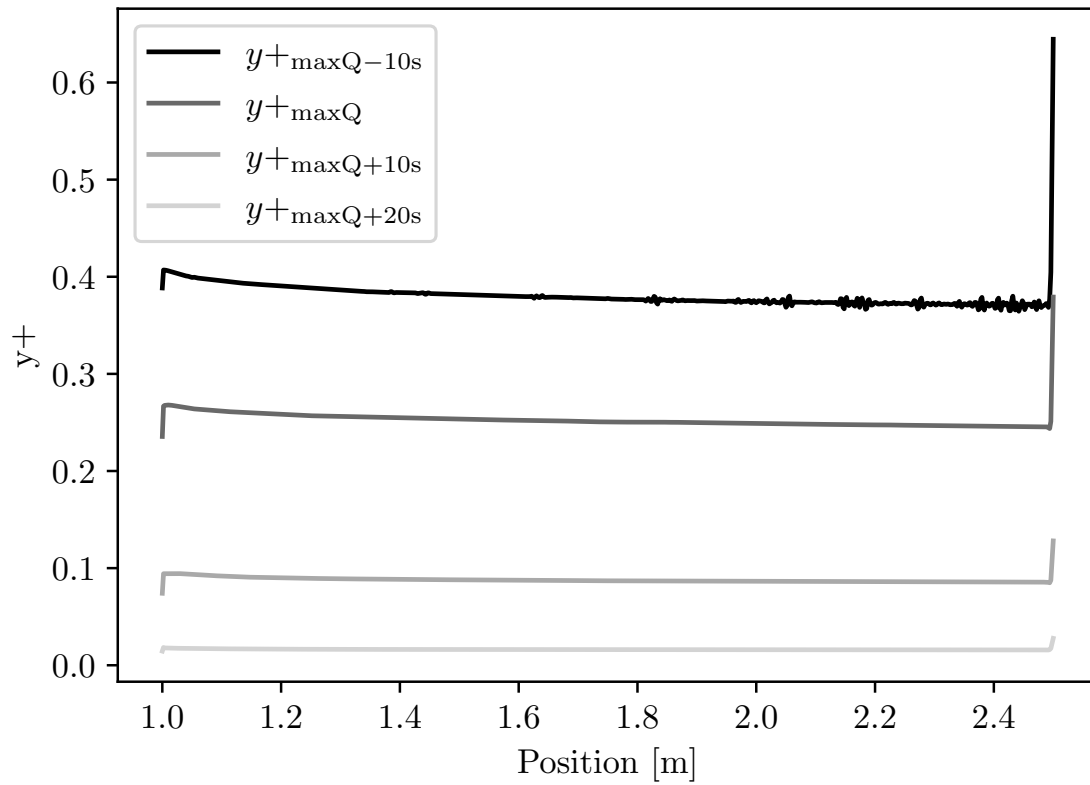


Abbildung 4.11: y^+ Wert an der Außenhaut bei $\max Q$, sowie 10 s davor, danach und 20 s danach

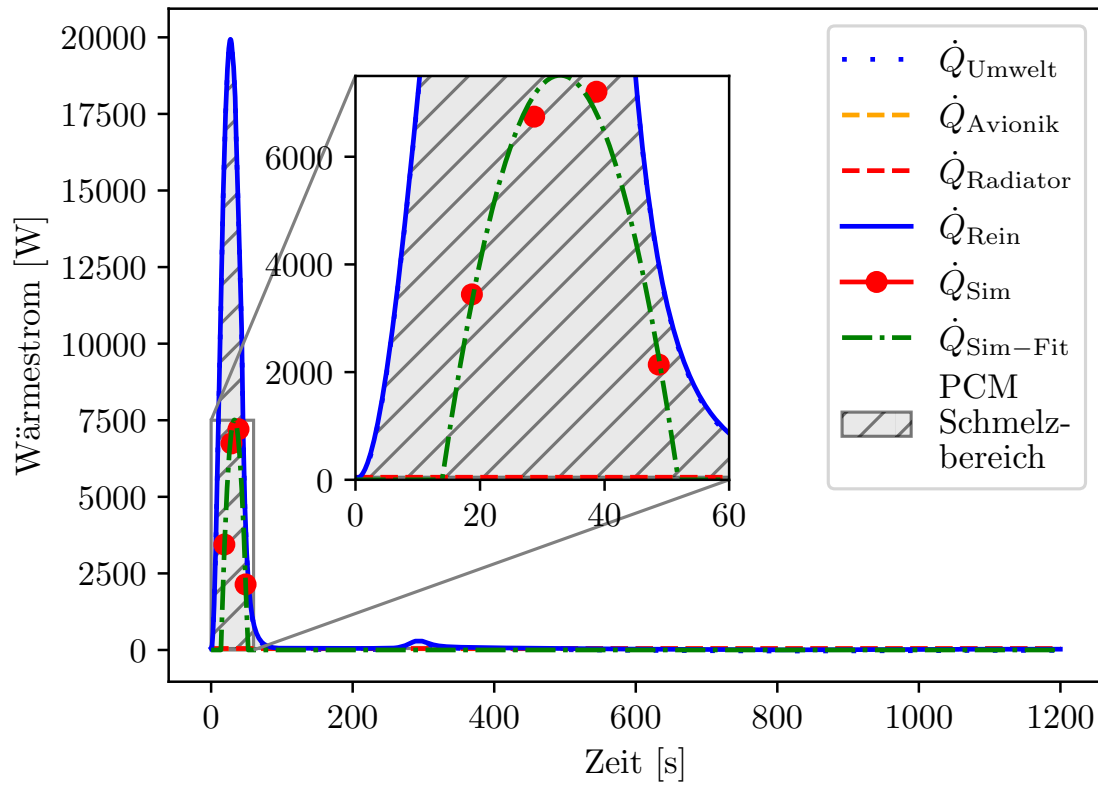


Abbildung 4.12: PCM Wärmestrom während Flug mit Simulationsergebnissen und Fit Kurve

Fitted Gaussian parameters: $a=12454028.32$, $b=32.87$, $c=550.50$, $d=-12446646.16$



(a) Statische Temperaturkontur der Luft



(b) Machzahlkontur der Luft

Abbildung 4.13: $\max Q$ Konturen der Luft

5 Discussion and conclusions

Vor der Implementierung des [PCM](#) in Hardware, sollten die Eigenschaften des vorhandenen n-Eicosan nochmal analysiert und die Ergebnisse überprüft werden.

5.1 Discussion about including pictures

6 Zusammenfassung und Ausblick

Beispielliteraturverweise:

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

Anmerkung: Es gibt verschiedene Referenzierungsstile

- Es muss bei der Strukturentwicklung stark auf das Wärmerohr geachtet werden, dass möglichst wenig Biegungen vorhanden sind und Die Wärmequellen möglichst nah beieinander sind.

Literaturverzeichnis

- [1] Az technology llc. VII, 19, 20
- [2] Enthalpy of fusion and enthalpy of vaporization. [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/ChemPRIME_\(Moore_et_al.\)/10%3A_Solids_Liquids_and_Solutions/10.10%3A_Enthalpy_of_Fusion_and_Enthalpy_of_Vaporization](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/General_Chemistry/ChemPRIME_(Moore_et_al.)/10%3A_Solids_Liquids_and_Solutions/10.10%3A_Enthalpy_of_Fusion_and_Enthalpy_of_Vaporization). 4
- [3] Stm32h743zgt6-datasheet. 10, 11
- [4] Thermal space and thermal straps. V, 15
- [5] AKAM CAE. Phase change material simulation in ansys fluent (tutorial), 2023. Online tutorial. 8, 9
- [6] M. Benbrika, M. Teggat, M. Benbelhout, and K. A. R. Ismai. Numerical study of n-eicosane melting inside a horizontal cylinder for different loading rates. *International Journal of Heat and Technology*, 38, 2020. 26
- [7] Karen A. Deere, S. Paul Pao, and Khaled S. Abdol-Hamid. Computational analysis of ares i roll control system jet interaction effects on rolling moment. In *Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Orlando, FL, January 2011. American Institute of Aeronautics and Astronautics. AIAA Paper 2011-0172. 18
- [8] HPMS Graphite. Pyrolytic graphite sheet (pgs) – thermally conductive graphite sheets. <https://hpmsgraphite.com/pyrolyticgraphitesheet>. In-plane thermal conductivity up to $1800 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, density $1.5\text{--}2.1 \text{ g/cm}^3$ depending on thickness ($12 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$). 16
- [9] Hugh Irving. An external CFD study of the HyEnD N2ORTH rocket. Master’s thesis, University College Dublin, School of Mechanical & Materials Engineering, Dublin, Ireland, April 2021. Master’s thesis. 31
- [10] Joseph P. Mooney, Vanessa Egana, Ruairi Quinlan, and Jeff Punch. Effect of multiple heat sources and bend angle on the performance of sintered wicked heat pipes. In *19th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical*

Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Orlando, FL, USA, 2020. IEEE. 14

- [11] V. M. Nazarychev, M. V. Subbotin, A. A. Ermakov, D. A. Khrustalev, A. N. Frolov, S. G. Ovchinnikov, A. V. Knyazev, A. V. Churakov, and A. V. Novikov. Cooling-rate computer simulations for the description of crystallization of organic phase-change materials. *International Journal of Molecular Sciences*, 23, 2022. 26
- [12] U.S. Secretary of Commerce. Nist chemistry webbook, 2025. VII, 18, 26
- [13] Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH. Mesh heatpipe 5×400 mm (qg-shp-d5-400mn), 2025. Heatpipe product page. 14
- [14] RunCam Technology Co., Ltd. Runcam split 4 v2 user manual, 2020. Product manual (PDF). 11
- [15] P. C. Stryker and E. M. Sparrow. Application of a spherical thermal conductivity cell to solid n-eicosane paraffin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 1990. 26
- [16] Thermtest Inc. Materials thermal properties database. <https://thermtest.com/thermal-resources/materials-database>, 2025. Includes thermal conductivity and density data for copper and aluminium. 16
- [17] Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. User manual: Thebe-ii (order code 2609031181000), version 1.14, 2024. Radio module 868 MHz, up to +27 dBm TX power. 11

Appendix

Appendix A: Vorauslegung

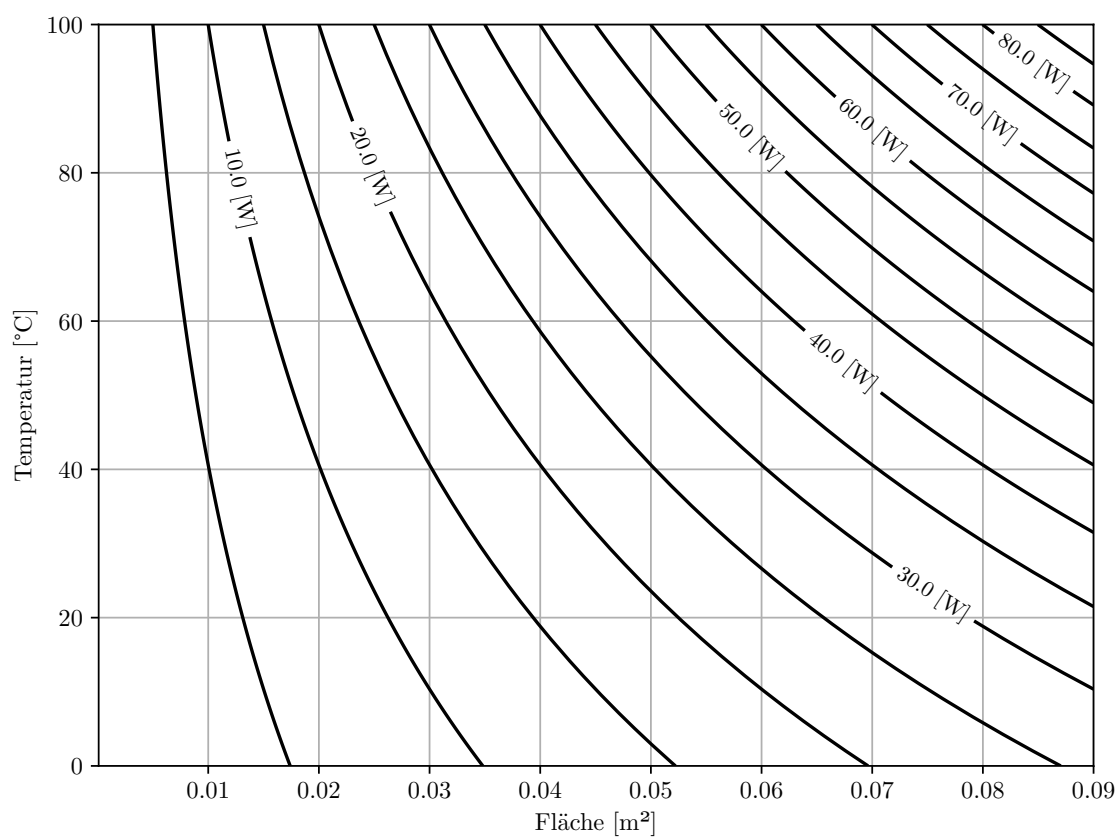
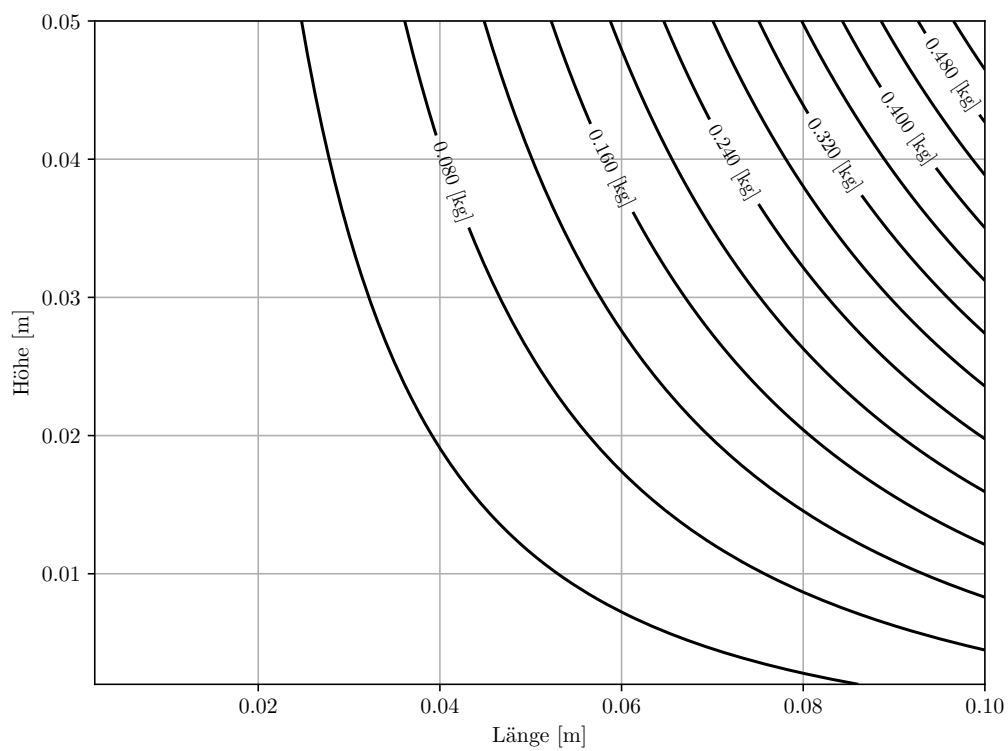
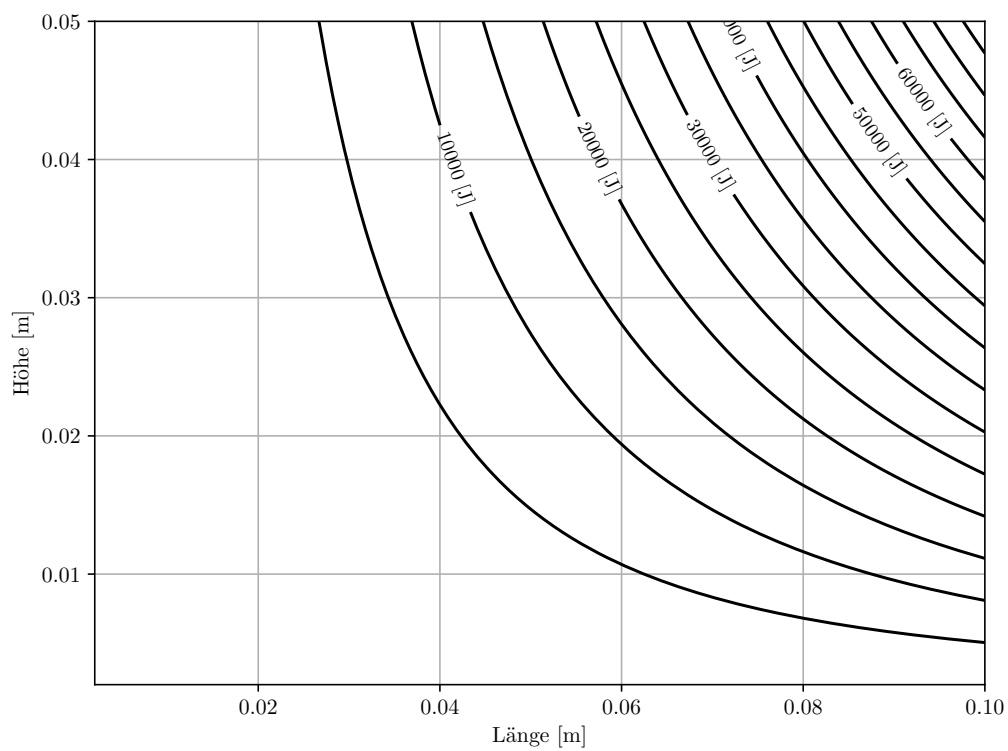


Abbildung 6.1: Radiator Leistung nach Fläche und Temperatur



(a) PCM Masse



(b) PCM Wärmeaufnahme

Abbildung 6.2: PCM Auslegung

```
1 //Modified UDF of the original source: https://akamcae.com/
   tutorials/phase-change-material-simulation-in-ansys-fluent
   /
2 #include "udf.h"
3 #include "mem.h"
4
5 //n-eicosane constant properties in solid phase
6 #define Ros_pcm 910.0
7 #define Cps_pcm 2132.4
8 #define Ks_pcm 0.4248
9
10 //n-eicosane constant properties in fluid phase
11 #define Rol_pcm 769.0
12 #define Cpl_pcm 2350.05
13 #define Kl_pcm 0.1505
14
15 //thermal expansion coefficient
16 #define TEC 0.0009
17
18 //solidus and liquidus temperatures of n-eicosane
19 #define Ts 309.0
20 #define Tl 311.0
21
22 //reference temperature for Boussinesq's approximation
23 #define Tr 310.0 //Fluent Tref must be equal
   to Tr
24
25 //density of PCM
26 DEFINE_PROPERTY(Ro_var_PCM, cell, thread)
27 {
28     double Gama, Ro_pcm;
29     #if !RP_HOST
30         Gama=C_LIQF(cell, thread);
31         Ro_pcm=(1-Gama)*Ros_pcm+Gama*Rol_pcm;
32     #endif
33     return Ro_pcm;
34 }
35
36 DEFINE_SPECIFIC_HEAT(Cp_var_PCM, T, Tref, h, yi)
37 {
38     double Gama, Cp_pcm;
39     #if !RP_HOST
```

```

40         if (T<Ts) { Cp_pcm=Cps_pcm; } else if (T>=Ts
41             &&T<=Tl)
42         {
43             Gama=(T-Ts)/(Tl-Ts);
44             Cp_pcm=((1-Gama)*Ros_pcm*Cps_pcm+Gama
45                 *Rol_pcm*Cpl_pcm)/((1-Gama)*
46                 Ros_pcm+Gama*Rol_pcm);
47         }
48         else
49         {
50             Cp_pcm=Cpl_pcm;
51         }
52         *h=Cp_pcm*(T-Tref);
53     #endif
54     return Cp_pcm;
55 }
56
57 //thermal conductivity of n-eicosane
58 DEFINE_PROPERTY(K_var_PCM,cell,thread)
59 {
60     double Gama, K_pcm;
61     #if !RP_HOST
62         Gama=C_LIQF(cell,thread);
63         K_pcm=(1-Gama)*Ks_pcm+Gama*Kl_pcm;
64     #endif
65     return K_pcm;
66 }
67
68 //dynamic viscosity of PCM with fit
69 DEFINE_PROPERTY(Mu_var_PCM,cell,thread)
70 {
71     double Temp,Mu_pcm;
72     #if !RP_HOST
73         Temp=C_T(cell,thread);
74         Mu_pcm=(9*pow(10.,-4)*pow(Temp,2)-0.6529*Temp
75             +119.94)*pow(10.,-3);
76     #endif
77     return Mu_pcm;
78 }
79
80 DEFINE_SOURCE(Boussinesq_momentum_source,cell,thread,dS,eqn)
81 {
82     double Temp, source, acc;

```

```
79      Temp=C_T(cell,thread);
80
81      double t = CURRENT_TIME;
82
83      if (t < 20)
84          acc = 34.81;
85      else if (t < 50)
86          acc = 109.81;
87      else if (t < 150)
88          acc = 19.62;
89      else
90          acc = 9.81;
91
92      source=-Rol_pcm*acc*TEC*(Temp-Tr); //negative for -Y
          down
93      dS[eqn]=-Rol_pcm*acc*TEC; //negative for -Y down
94      return source;
95  }
```

Listing 6.1: Vollständige [PCM UDF](#) eicosane.c

Appendix B: Simulation

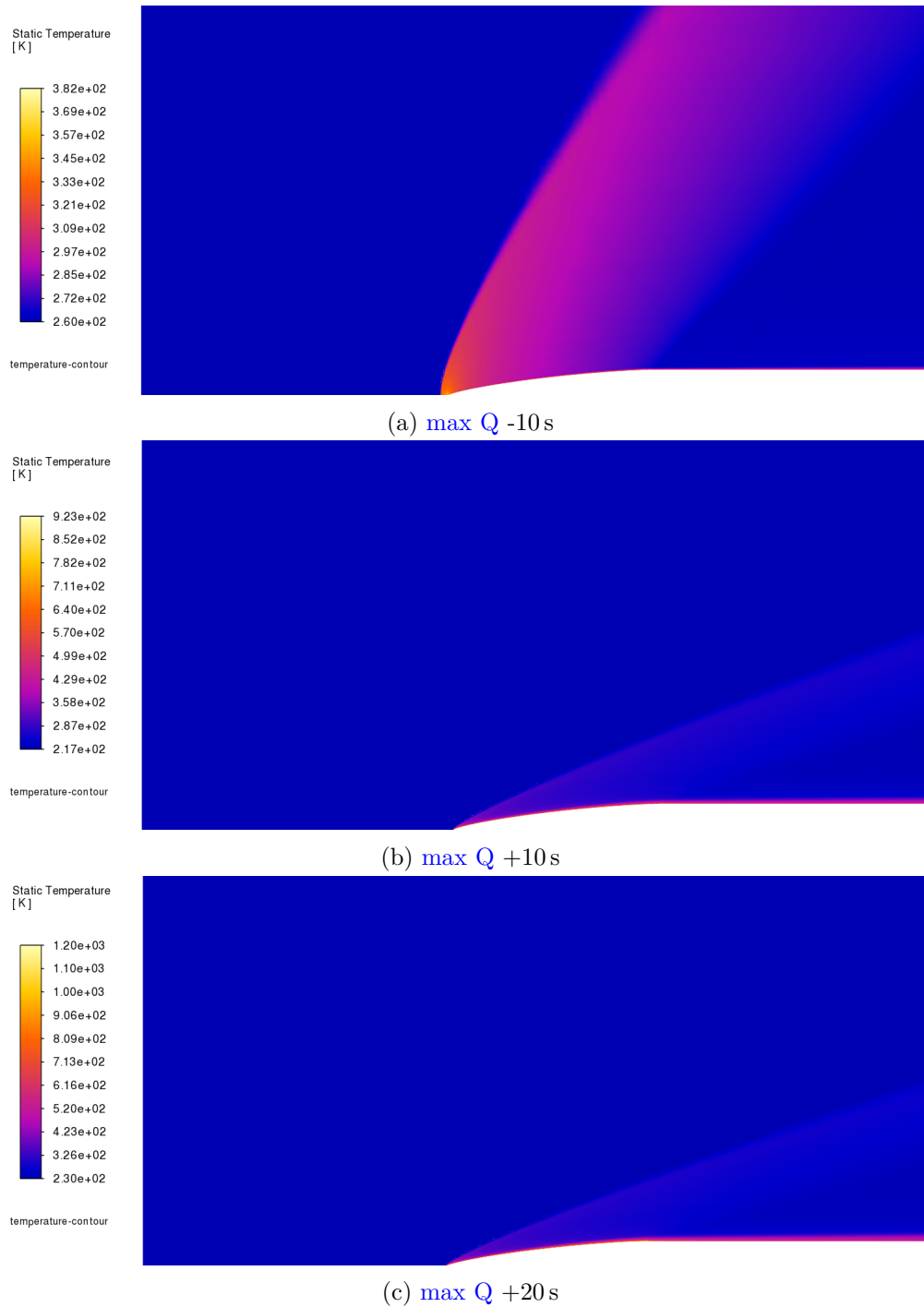


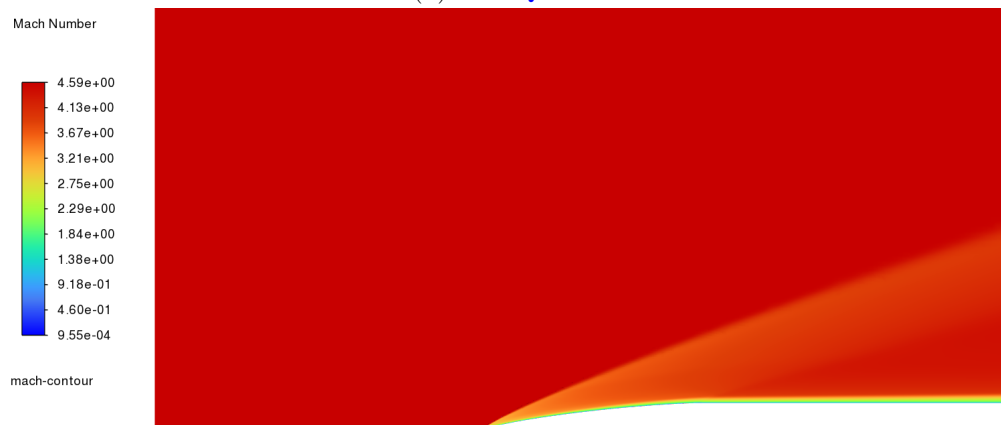
Abbildung 6.3: Statische Temperaturkontur der Luft



(a) max Q -10 s



(b) max Q +10 s



(c) max Q +20 s

Abbildung 6.4: Machzahlkontur der Luft

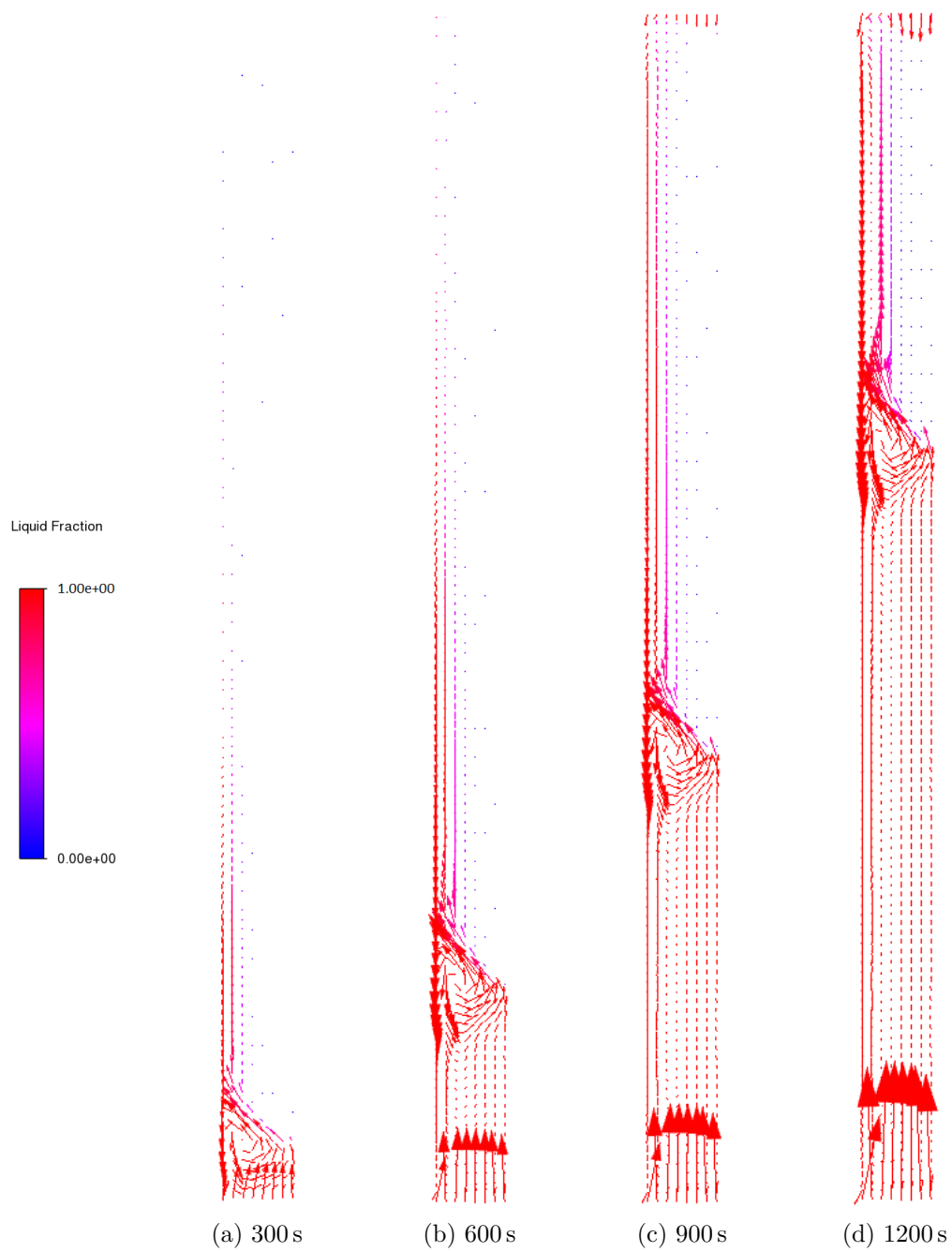


Abbildung 6.5: Konturen der statischen Temperatur. Die Legende bezieht sich auf [4.6d](#)