

Praktikumsbericht

Institut für Raumfahrtssysteme
High Enthalpy Flow Diagnostics Group

Yan Schmidt

Betreuung: Stefan Löhle

24.10.2022 - 28.10.2022

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	2
1.1 Institut für Raumfahrtssysteme	2
1.2 High Enthalpy Flow Diagnostics Group	2
1.3 Plasmawindkanäle	3
2 Versuchsreihe zur Strahlungsmessung	5
2.1 Hypothese	5
2.2 Versuch 1 - Radiometriesonde mit Argon	5
2.3 Versuch 2 - Radiometriesonde mit Sauerstoff	7
2.4 Versuch 3 bzw. 4 - Enthalpiesonde mit Argon bzw. Sauerstoff . . .	9
3 Auswertung Thermographiedaten	11
4 Auswertung MetSpec	12

1 Einführung

1.1 Institut für Raumfahrtssysteme

Das Institut für Raumfahrtssysteme (IRS)¹ ist eines von 13 Instituten der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie der Universität Stuttgart. Die Forschungsgebiete des Institutes sind Astronautik und Raumstationen, Chemische Raumfahrtantriebe, Flugzeugastronomie und extraterrestrische Missionen, Raumtransporttechnologie und Satellitentechnik und Instrumente.



Quelle: <https://bit.ly/3z1E3Tw>

Abbildung 1: Logo des IRS

1.2 High Enthalpy Flow Diagnostics Group

Die High Enthalpy Flow Diagnostics Group (HEFDiG)² ist eine Arbeitsgruppe des IRS und wird dem Forschungsbereich der Raumtransporttechnologie zugeordnet. Ziel der Arbeitsgruppe ist es, den Wiedereintritt von Raumschiffen in die Atmosphären der Erde, des Mars oder des Neptun unter Laborbedingungen zu simulieren und damit unter anderem die Entwicklung von Hitzeschilden zu fördern. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Entwicklung von neuen Messtechniken im Gebiet der hochenthalpischen Strömungen. Während dem Eintritt in eine Atmosphäre wandeln Raumsonden eine sehr hohe kinetische Energie in thermische Energie um und werden dabei sehr stark erhitzt. Außerdem werden an der Spitze des Schiffes Atome in An- und Kationen gespalten, sprich die Luft wird ionisiert und es entsteht ein Plasma.



Quelle: <https://bit.ly/3DD2H4t>

Abbildung 2: Grafik Wiedereintritt

¹<https://www.irs.uni-stuttgart.de/>

²https://www.irs.uni-stuttgart.de/forschung/raumtransporttechnologie/diagnostik_hochenthalperstroemungen/

1.3 Plasmawindkanäle

Um dies nachzustellen verwendet die HEFDiG Gruppe sogenannte Plasmawindkanäle (PWKs), in welchen Sonden bzw. verschiedene Messinstrumente mit Plasma bestrahlt werden. Ein Plasmawindkanal ist ein großer Tank, welcher mit Pumpen evakuiert werden kann und in dem, mithilfe einer Düse, ein Plasma erzeugt werden kann. Plasma ist nichts anderes als ionisiertes Gas, sprich Gas, in welchem die Atome des Gases Elektronen abspalten und als geladene Teilchen zurückbleiben. Man spricht aufgrund von den vielen besonderen Eigenschaften des Plasmas auch von einem 4. Aggregatzustand. 99 Prozent der Materie im Universum liegt in diesem Aggregatzustand vor, da alle Sterne aus Plasma bestehen.³ Das Labor der HEFDiG Gruppe besitzt in 2 großen Hallen mehrere PWKs, alle mit einer etwas unterschiedlichen Düse ausgestattet.



Abbildung 3: Foto vom Labor der HEFDiG Gruppe

³<https://www.mpg.de/plasmaphysik>

Für folgende Versuche wird lediglich PWK4 genutzt. Seine Düse besteht aus einer kleinen Wolframkathode und einer größeren Kupferanode. Besonders an PWK4 ist, dass die gesamte Brennkammer aus Kupfer besteht und somit als Anode dient. Erzeugt man mithilfe des hauseigenen Stromkraftwerks eine Hochspannung zwischen Kathode und Anode, entsteht ein Lichtbogen, welcher für eine Entladung der Elektroden sorgt. Da in besagtem Lichtbogen freie Elektronen durch die Luft springen, ist er per Definition schon ein Plasma. Um einen lenkbaren und konstanten Plasmastrahl zu erzeugen, welcher auch durch die Expansionsdüse aus der Brennkammer austreten kann, wird hinter der Kathode Stickstoffgas ausgelassen, welches den Lichtbogen passiert, anschließend auf Sauerstoff trifft und dort gezündet wird. Durch die hohe Temperatur nach der Zündung wird das Gas ebenfalls ionisiert und es entsteht ein Plasmastrahl. Dieser kann jetzt durch Veränderung des Gasauslasses, der Stromstärke und der Spannung geregelt werden und damit Sonden auf unterschiedliche Weise bestrahlt werden.

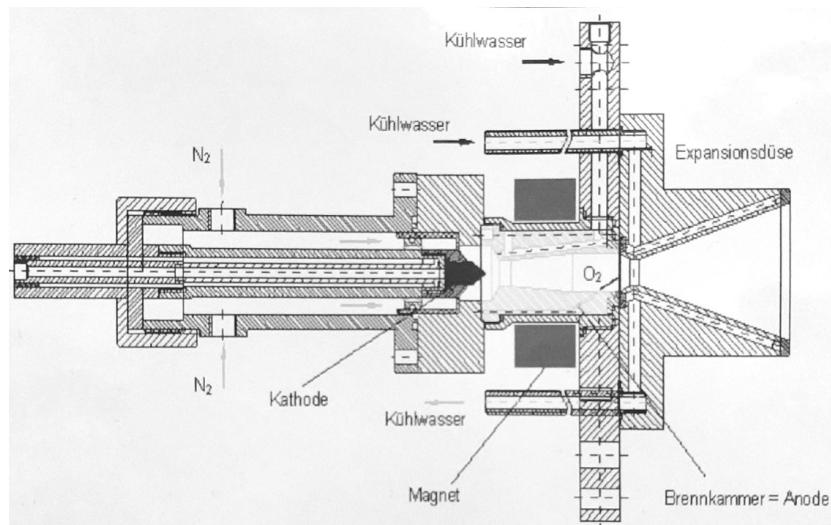


Abbildung 4: Grafik der Düse von PWK4

2 Versuchsreihe zur Strahlungsmessung

2.1 Hypothese

Ziel der Versuchsreihe ist es, mit einer Enthalpiesonde, welche eigentlich zur Messung von Wärmeströmen genutzt wird, ebenfalls Strahlung zu messen, wofür im Normalfall eine zusätzliche Radiometriesonde benötigt wird. Dies sollte in der Theorie möglich sein, indem man die Messung mit 2 verschiedenen Gasen durchführt, welche aus der Sonde entgegen des Plasmastrahls ausgeblasen werden. Man führt den Versuch einmal mit Argon und einmal mit Sauerstoff durch. Argon ist ein atomares Edelgas der 8. Hauptgruppe und kann Strahlung nur auf diskreten Wellenlängen absorbieren und zwar genau auf den Wellenlängen, welche durch Ionisation bzw. durch Elektronensprünge auf den Argonschalen entstehen. Sauerstoff hingegen ist molekular und absorbiert unter einer bestimmten Wellenlänge kontinuierlich jegliche Strahlung. Misst man also einmal die Enthalpie unter Verwendung von Argon und einmal unter Verwendung von Sauerstoff und bildet anschließend die Differenz beider Versuchsergebnisse, kann die einzige verbleibende Energie nur die Strahlungsenergie, welche normalerweise mit der Radiometriesonde gemessen wird, sein. Um dies zu überprüfen, muss der Versuch insgesamt 4 mal durchgeführt werden: Je Gas (Argon und Sauerstoff) einmal mit der Radiometriesonde und einmal mit der Enthalpiesonde. Erhält man mit beiden Sonden die gleichen Messergebnisse für die Strahlungsenergie, ist die Hypothese bestätigt.

2.2 Versuch 1 - Radiometriesonde mit Argon

Zur Vorbereitung des ersten Versuchs, muss zuerst die Radiometriesonde in den Kanal eingebaut werden.



Abbildung 5: Foto der eingebauten Radiometriesonde

Um den Tank für die Messung bereitzustellen, müssen Gas und Wasser angegeschlossen, alle Not-Aus-Schalter scharfgestellt, der Tank mit der hauseigenen Vakuumpumpe evakuiert und anschließend der Strom bei den Technikern des Hauskraftwerks bestellt werden. Um zu zünden müssen aus Sicherheitsgründen immer mindestens zwei Personen anwesend sein. Nach der Zündung können die ersten Messungen aufgenommen werden, in diesem Fall Daten zur Strahlung und der Vollständigkeit halber auch zu Druck, Temperatur, Massenstrom des Gases, Stromstärke und Spannung.



Abbildung 6: Foto der Messstation von PWK4

Nach längerer Bestrahlung der Sonde wurden die Fenster des Tanks sehr heiß und der Versuch musste abgebrochen werden. Zu diesem Zeitpunkt waren allerdings schon genug Messdaten vorhanden und der Versuch war somit erfolgreich. Die Erhitzung der Fenster kommt durch einen sehr breit gefächerten Plasmastrahl zustande. Die Fächerung entsteht durch sogenannte verbotene Übergänge. Als solche bezeichnet man sehr unwahrscheinliche Elektronensprünge von einer äußeren Schale auf eine andere ebenfalls außen liegende Schale, welche ohne äußere Einflüsse quasi nie wesentlich auftreten würden.

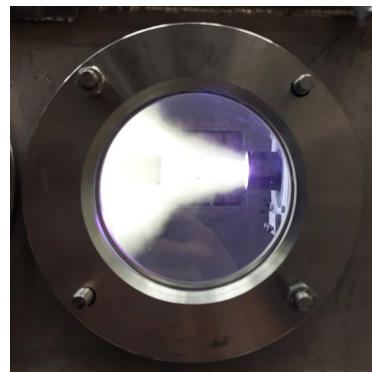


Abbildung 7: Foto des Plasmastrahls mit breiter Fächerung

2.3 Versuch 2 - Radiometriesonde mit Sauerstoff

Um den gleichen Versuch nun noch einmal mit Sauerstoff durchzuführen, muss der Versuchsaufbau etwas umgebaut werden. Zum einen muss ein Sauerstofftank, anstatt des Argontanks ans System angeschlossen werden und zum anderen muss der Massenflussregler neu auf Sauerstoff kalibriert werden. Ein Massenflussregler kontrolliert die Durchflussmenge eines Gases und ist per Spannung digital einstellbar. Zur neuen Kalibrierung werden bei verschiedenen Spannungen (zwischen 0 und 5 Volt) Messwerte zum Massenstrom aufgenommen, anschließend eine Ausgleichskurve bestimmt und deren Steigung als Parameter ins System eingegeben.

U in [% von 5V]	U in [V]	$m'(t)$ in [mg/s]
9,8	0,49	81,2
20,1	1,005	164,4
29,9	1,495	243,4
40	2	322,4
49,8	2,49	399,7
59,9	2,995	479,2
69,8	3,49	556,3
79,7	3,985	635,8
89,7	4,485	717,6
99,9	4,995	803,7

Tabelle 1: Messwerttabelle der Kalibrierung

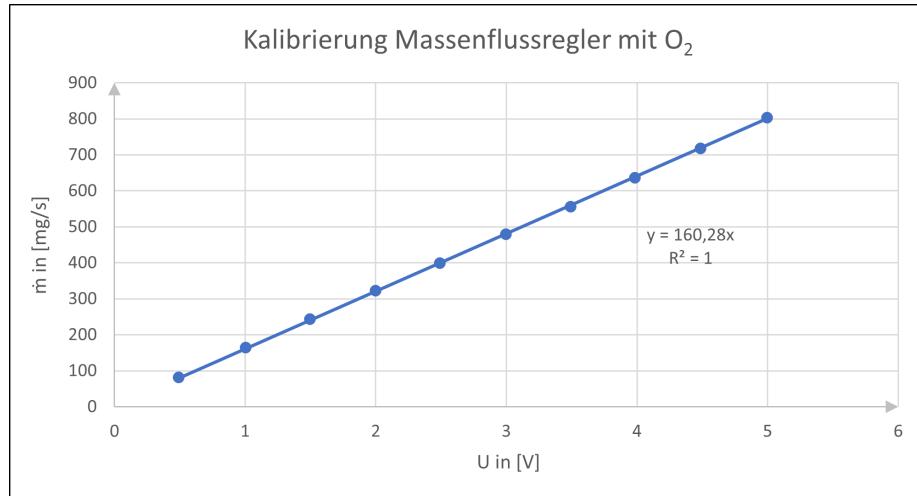


Abbildung 8: Diagramm der Kalibrierung

Nachdem der Versuch umgebaut und der Massenflussregler kalibriert ist, kann das Experiment mit Sauerstoff gestartet werden. Nahezu alle Messungen können erfolgreich durchgeführt werden, allerdings zeigt unmittelbar nach der Zündung einer der Sensoren konstant den Maximalwert an. Die Sonde muss ausgebaut werden und das für den Sensorausschlag verantwortliche Bauteil, das sogenannte Thermopile, auf Fehler untersucht werden. Ein Thermopile ist ein elektrisches Bauelement, welches thermische Energie in elektrische Energie umwandelt und somit eine präzise Temperaturmessung ermöglicht.⁴ Nach Ausbau des Thermopiles wird es außerhalb des Tanks getestet. Angeschlossen an einen Oszillator wird der Sensor mit einer Infrarot Wärmelampe bestrahlt, welche für eine Erwärmung und somit für einen Ausschlag am Oszillator sorgt.



Abbildung 9: Foto des Versuchsaufbaus zum Testen des Thermopiles

In dem Testversuch funktioniert der Thermopile einwandfrei. Da er allerdings, im PWK nicht funktioniert, liegt die Vermutung nahe, dass die eingegebauten Platinen einen Wackelkontakt haben könnte.

⁴<https://bit.ly/3fi5Xcj>



Abbildung 10: Foto der Untersuchung im Elektroniklabor

Die Elektrotechnikabteilung kann jedoch auch keinen Fehler finden, weshalb das Problem etwas mit dem Anschluss an den Tank oder den Vakuumbedingungen im Tank zu tun haben muss. Auch unter einem Mikroskop sind keine Beschädigungen am Sensor zu erkennen.

2.4 Versuch 3 bzw. 4 - Enthalpiesonde mit Argon bzw. Sauerstoff

Nachdem der Versuch zweimal mit der Radiometriesonde durchgeführt wurde, müssen die gleichen Messungen nun noch mit der Enthalpiesonde erfolgen. Die Enthalpiesonde misst in zwei Wasserschläuchen, mithilfe von Pt100 Sensoren, die Temperatur und zieht damit Rückschlüsse auf die Enthalpie. Pt100 bzw. Platin-Messwiderstände haben einen Ohm'schen Widerstand, welcher abhängig von der Temperatur ist. Um nur den Platin-Widerstand und nicht den der Kabel zu messen, führt der Sensor eine Vierleitermessung durch, sprich einmal wird der Widerstand von Kabel über Platin über Kabel und einmal von Kabel über Kabel gemessen und anschließend die Differenz gebildet. Der Versuch mit der Enthalpiesonde funktioniert reibunglos, sowohl mit Argon als auch mit Sauerstoff. Um zu einem abschließenden Ergebnis der Versuchsreihe und einer Verifizierung bzw. Falsifizierung der Hypothese zu kommen, müssen nun noch alle Versuchsdaten ausgewertet werden.

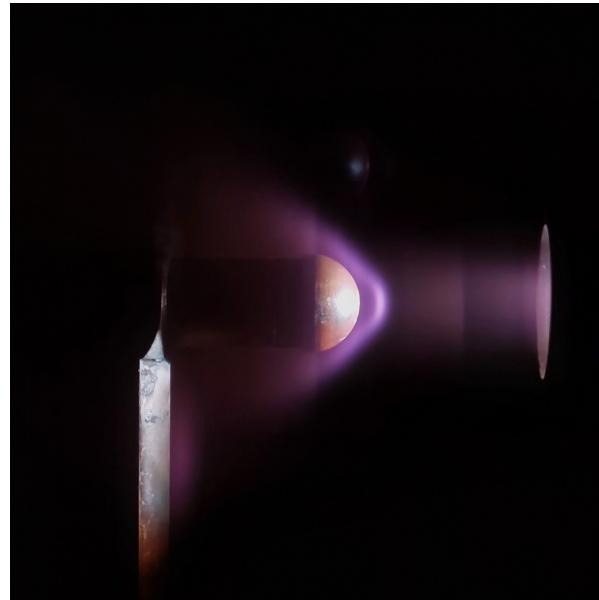


Abbildung 11: Foto der Bestrahlung der Enthalpiesonde mit Plasma

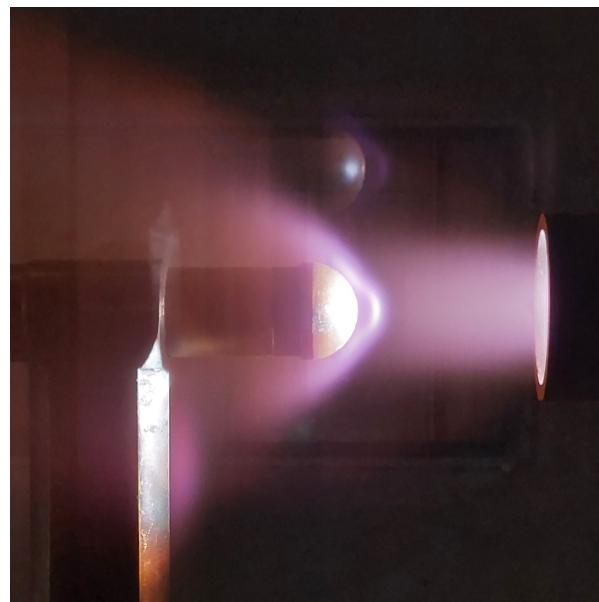


Abbildung 12: Foto der Bestrahlung mit Plasma höherer Intensität

3 Auswertung Thermographiedaten

In einer anderen Versuchsreihe werden verschiedene Materialien in einem PWK montiert und unter Plasmabestrahlung zum Schmelzen gebracht. Mithilfe einer Wärmebildkamera werden Thermographiedaten aufgenommen, welche ausgewertet werden müssen. Die Thermographie ist ein Verfahren, bei dem mithilfe von speziellen Kameras die Wärmestrahlung sichtbar gemacht wird, die von Körpern ausgeht. Da die Intensität und Zusammensetzung der Wärmestrahlung temperaturabhängig ist, ermöglicht eine thermographische Aufnahme die Temperaturverteilung bei dem betreffenden Körper zu erkennen und daraus Folgerungen abzuleiten.⁵

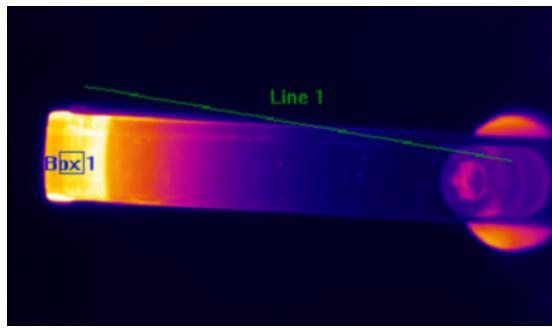


Abbildung 13: Wärmebildaufnahme einer Probe

Mithilfe der Software FLIR, können die aufgezeichneten Videos skaliert und die zeitlichen Verläufe der Temperatur dargestellt werden. Da die Temperatur sich nicht homogen über den gesamten Körper verteilt, wählt man gewisse Points of Interest aus, in diesem Fall Box 1 und Line 1, in welchen dann die mittlere Temperatur berechnet wird.

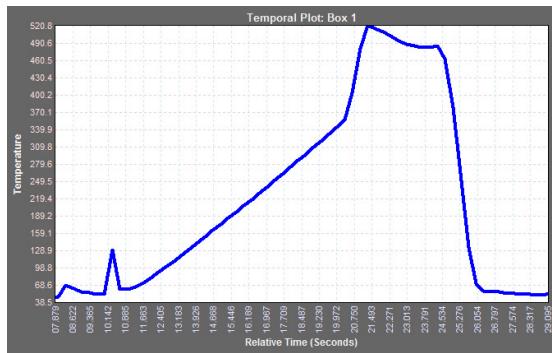


Abbildung 14: Diagramm zum zeitlichen Verlauf der Temperatur in Box 1

⁵<https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik/artikel/thermografie>

4 Auswertung MetSpec

Die HEFDiG Gruppe erhielt im März 2022 einen Auftrag der ESA. Sie sollte unter dem Namen der MetSpec-Mission von der ESA erhaltene Meteoritenbrocken mit Plasma bestrahlen und untersuchen. Während der Bestrahlung wurden mit einer Digitalkamera Bilder aufgenommen, aus denen über einen Umweg Rückschlüsse auf die Temperatur der Meteoriten gezogen werden können.

Eine Digitalkamera nimmt Farben über Sensorpixel auf. Jeder Sensorpixel reagiert entweder auf Photonen mit Wellenlängen im roten, im grünen oder im blauen Bereich. Anschließend wird durch Vergleich mit benachbarten Pixeln ein Mittelwert gebildet und somit "Farben gemischt".⁶

Ein Schwarzer Körper bzw. ein Schwarzer Strahler ist in der Physik eine idealisierte Vorstellung einer thermischen Strahlungsquelle. Er absorbiert Strahlung jeglicher Wellenlänge vollständig und sendet Wärmestrahlung aus, welche lediglich von der Temperatur und nicht von der Beschaffenheit des Körpers abhängt.⁷

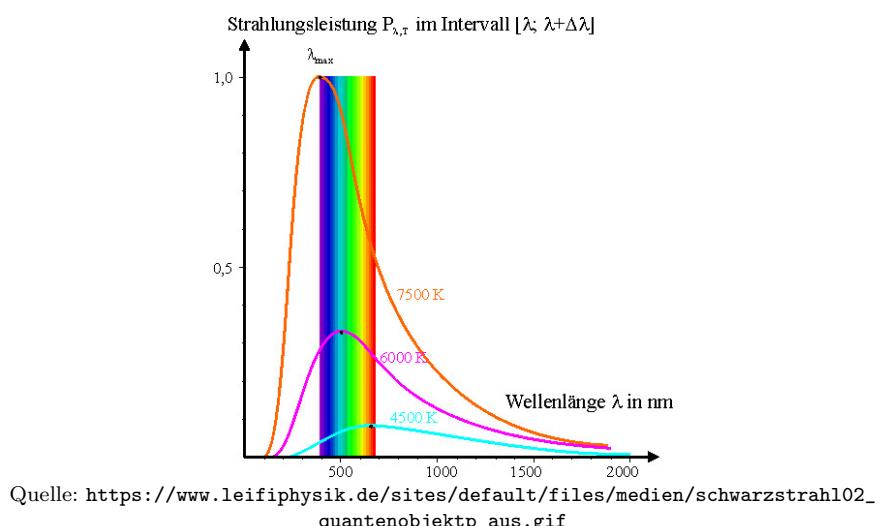


Abbildung 15: Diagramm zum Verhalten eines Schwarzen Strahlers

Nimmt man näherungsweise an, dass die Meteoriten sich wie Schwarze Strahler verhalten und man aus den digitalen Kamerafotos die Intensität der RGB Farben bezieht, erhält man 3 Punkte aus obigem Graphen und kann somit Rückschlüsse auf die charakteristische Temperatur ziehen. Mithilfe von Matlab wird dieses Verfahren nun für die 3 Meteoriten KOS_3, NWA_1R und LAN durchgeführt und anschließend nach Auffälligkeiten in den Temperaturdaten gesucht.

⁶<https://bit.ly/3DgVRjR>

⁷<https://bit.ly/3NetYNT>



Abbildung 16: Foto von KOS_3 unter Plasmabestrahlung

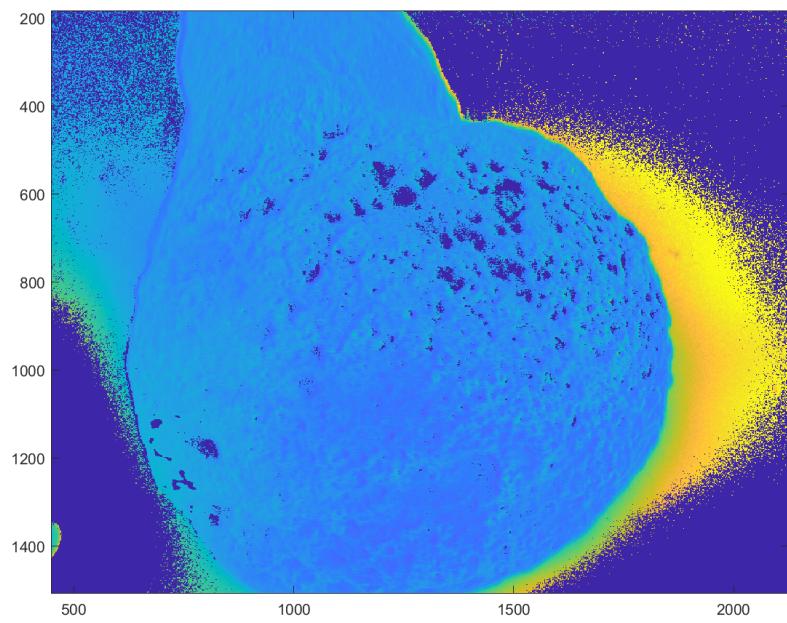


Abbildung 17: Diagramm zur Temperatur von KOS_3

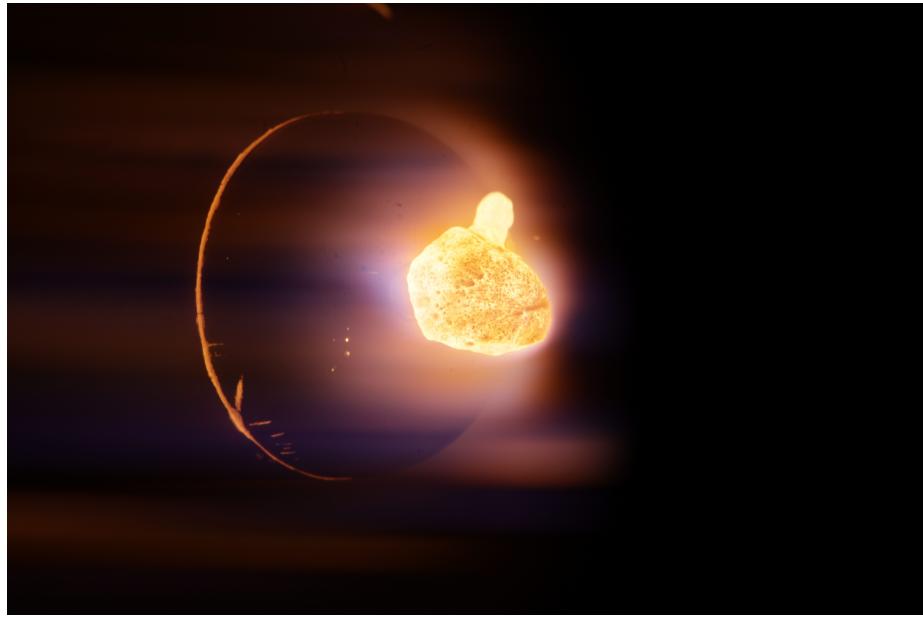


Abbildung 18: Foto von NWA_1R unter Plasmabestrahlung

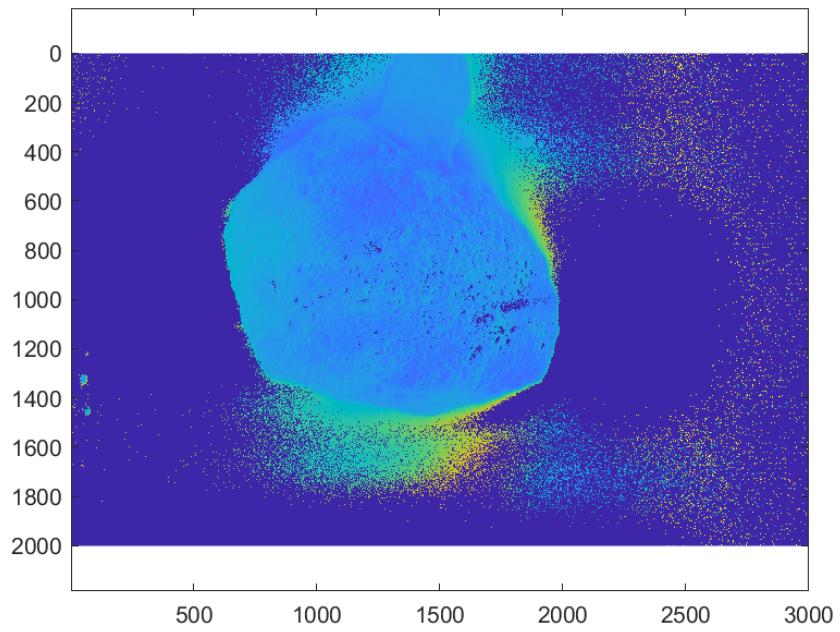


Abbildung 19: Diagramm zur Temperatur von NWA_1R

Meteorit			KOS_3	NWA_1R	LAN
Frame			15	15	10
Gesamt		Intervall	1916-2633	1700-2630	1850-2600
		Avg	2274,5	2030	2225
		Max	2633	2630	2600
		Min	1916	1600	1850
Vorne	Oberfläche	Intervall	2100-2600	2150-2250	2300-2600
		Avg	2350	2200	2450
	Poren	Intervall	1950-2050	1900-2150	2100-2300
		Avg	2000	2025	2200
Mitte	Oberfläche	Intervall	2350-2450	2400-2600	2250-2350
		Avg	2400	2500	2300
	Poren	Intervall	1900-2000	1600-2000	1950-2050
		Avg	1950	1800	2000
Hinten	Oberfläche	Intervall	2100-2300	2250-2600	2450-2600
		Avg	2200	2425	2525
	Poren	Intervall	-	-	2000-2200
		Avg	-	-	2100
Geschm. St.		Intervall	-	2100-2300	2950-3150
		Avg	-	2200	3050

Tabelle 2: Messwerttabelle der Temperaturdaten der Meteoriten in Kelvin

An den Messwerten lassen sich einige Auffälligkeiten erkennen. Alle 3 Meteoriten haben eine ähnliche maximale Temperatur, allerdings hat NWA_1R eine besonders niedrige minimale Temperatur. Demnach weicht auch die durchschnittliche Temperatur von NWA_1R von den anderen beiden ab. Bei allen Meteoriten, aber insbesondere bei NWA_1R, ist die Temperatur im hinteren Bereich teilweise höher als im vorderen, obwohl das Plasma vorne auf die Meteoriten trifft. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die besonders heißen Schichten der Oberfläche vorne abschmelzen und nach hinten fließen, wobei vorne kühtere Schichten frei werden. Dies wird auch dadurch gestützt, dass an den hinteren Seiten der Meteoriten nur wenige oder gar keine Poren erkennbar sind, da diese durch die von vorne abgeschmolzenen flüssigen Schichten ausgefüllt werden. Eine weitere Auffälligkeit ist, dass die Temperaturen in den Poren bei KOS_3 und NWA_1R ähnlich sind, bei LAN allerdings, insbesondere die vorderen Poren, deutlich heißer sind. Interessant sind auch die abgeschmolzenen Stücke: Beim Meteoriten KOS_3 ist kein abgeschmolzenes Stück erkennbar, dafür aber bei NWA_1R und LAN. Von NWA_1R schmilzt zum Zeitpunkt von Frame 15 ein großes Stück nach oben ab, welches aber noch mit dem Meteoriten verbunden ist, weshalb dessen Temperatur noch der des Meteoriten ähnelt. Bei LAN hingegen ist zum Zeitpunkt von Frame 10 bereits ein kleines Stück vollständig nach hinten abgeschmolzen, was sich auch in seiner deutlich höheren Temperatur veräußert.