

**Untersuchung der Kühleigenschaften von Lachgas  
für regenerativ gekühlte Raketenbrennkammern  
mithilfe der Wärmeübergangsmessstrecke**

Investigation of cooling properties of nitrous oxide for  
regeneratively cooled rocket thrust chambers under assistance  
of the heat transfer measurement setup

Masterarbeit von  
cand. aer. Luca Becker  
IRS-22-S-002

**Betreuer:**

Prof. Dr.-Ing. Stefan Schleichriem  
Marius Wilhelm M. Sc.

Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart  
März 2022



### Aufgabenstellung Masterarbeit

für Herrn Luca Becker

### Untersuchung der Kühleigenschaften von Lachgas für regenerativ-gekühlte Raketenbrennkammern mithilfe der Wärmeübergangsmessstrecke

### Investigation of Cooling Properties of Nitrous Oxide for Regeneratively-Cooled Rocket Thrust Chambers under Assistance of the Heat Transfer Measurement Setup

#### Motivation:

Am DLR Institut für Raumfahrtantriebe sind alle Aktivitäten der Forschung sowie des Versuchsbetriebes von Raketenprüfständen zusammengefasst. Die Abteilung Satelliten- und Orbitalantriebe beschäftigt sich mit der Aufgabe neue, sicherere und umweltverträglichere Treibstoffe für Lage- und Bahnregelungstriebwerke zu erforschen und zur Anwendung zu bringen. Hierzu betreibt die Abteilung den Forschungsprüfstand M11, an dem Triebwerks- und Komponententests mit fortschrittlichen Treibstoffen an unterschiedlichen Testpositionen durchgeführt werden.

Treibstoffkombinationen aus Lachgas und Kohlenwasserstoffen (sog. HyNOx – Hydrocarbons and Nitrous Oxide) haben vielversprechende Eigenschaften, wie niedrige Life-Cycle-Kosten, hohe Leistung und spezifischer Impuls, Langzeitlagerbarkeit, Verfügbarkeit, geringe Toxizität, COTS etc. Lachgas-Ethan-Mischungen könnten zukünftig anstelle von den bisher üblichen, hydrazinbasierten Antrieben für Orbitalmissionen eingesetzt werden. Eine Herausforderung bei der Maturation dieser Technologie stellt die hohe Verbrennungstemperatur des Treibstoffgemischs dar. Im Gegensatz zu konventionellen, strahlungsgekühlten Thrustern, erfordern HyNOx-Triebwerke ein aktives Kühlverfahren zum Schutz von Injektor, Brennkammer und Düse. In Vorbereitung der Auslegung eines spezifischen Regenerativkühlsystems sollen zuvor die grundlegenden Kühleigenschaften von Lachgas unter triebwerksrelevanten Bedingungen an einer Wärmeübergangsmessstrecke (WUMS) untersucht werden.

#### Aufgabenstellung:

- Literaturrecherche zu Regenerativkühlsystemen und Wärmeübertragungsprozessen in Raketentriebwerken und Orbitalantrieben, relevanten Parametern und dimensionslosen Kennzahlen
- Einarbeitung in vorhandene Literatur und den bisherigen Resultaten zu HyNOx
- Modifikation des vorhandenen WUMS-Setups hinsichtlich thermischer Dauerfestigkeit und erweiterter/zuverlässigerer Messtechnik
- Aufstellen der Testmatrix anhand identifizierter Haupteinflussfaktoren
- Durchführen der Versuche anhand der Testmatrix
- Analyse und Interpretation der Versuchsergebnisse
- Erstellen der schriftlichen Arbeit

Betreuer/-in intern: Marius Wilhelm

Bearbeitungsbeginn: 01.11.2021

Einzureichen spätestens: 30.04.2022

#### Empfangsbestätigung:

Ich bestätige hiermit, dass ich die Aufgabenstellung sowie die rechtlichen Bestimmungen und die Studien- und Prüfungsordnung gelesen und verstanden habe.

Prof. Dr. S. Schlechtriem  
(Verantwortlicher Hochschullehrer)

Unterschrift des/der Studierenden

**Rechtliche Bestimmungen:** Der/die Bearbeiter/in ist grundsätzlich nicht berechtigt, irgendwelche Arbeits- und Forschungsergebnisse, von denen er/sie bei der Bearbeitung Kenntnis erhält, ohne Genehmigung des/der Betreuers/in dritten Personen zugänglich zu machen. Bezüglich erreichter Forschungsleistungen gilt das Gesetz über Urheberrecht und verwandete Schutzrechte (Bundesgesetzblatt I/ S. 1273, Urheberrechtsgesetz vom 09.09.1965). Der/die Bearbeiter/in hat das Recht, seine/ihre Erkenntnisse zu veröffentlichen, soweit keine Erkenntnisse und Leistungen der betreuenden Institute und Unternehmen eingeflossen sind. Die von der Studienrichtung erlassenen Richtlinien zur Anfertigung der Bachelorarbeit sowie die Prüfungsordnung sind zu beachten.

Professoren und Privatdozenten des IRS:

Prof. Dr.-Ing. Stefanos Fasoulas (Geschäftsführender Direktor) · Prof. Dr.-Ing. Sabine Klinkner (Stellvertretende Direktorin) · Prof. Dr. rer. nat. Alfred Krabbe · (Stellvertretender Direktor) · Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jens Eickhoff · Prof. Dr. rer. nat. Reinhold Ewald · PD Dr.-Ing. Georg Herdrich · Hon.-Prof. Dr. Volker Liebig · Hon. Prof. Dr. rer. nat. Christoph Nöldeke · Prof. Dr.-Ing. Stefan Schlechtriem · PD Dr.-Ing. Ralf Srama

## Erklärungen

Hiermit versichere ich, **Becker, Luca**, dass ich diese **Masterarbeit** 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 Urheberrecht fremder Beiträge entsprechend den Regeln guter wissenschaftlicher Praxis<sup>1</sup> 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.

Eppingen, den 24.03.2022

Ort, Datum, Unterschrift

Hiermit erkläre ich mich damit einverstanden, dass meine **Masterarbeit** zum Thema:

**Untersuchung der Kühleigenschaften von Lachgas für regenerativ-gekühlte Raketenbrennkammern mithilfe der Wärmeübergangsmessstrecke**

in der Institutsbibliothek des Instituts für Raumfahrtssysteme ohne Sperrfrist öffentlich zugänglich aufbewahrt und die Arbeit auf der Institutswebseite sowie im Online-Katalog der Universitätsbibliothek erfasst wird. Letzteres bedeutet eine dauerhafte, weltweite Sichtbarkeit der bibliographischen Daten der Arbeit (Titel, Autor, Erscheinungsjahr, etc.).

Nach Abschluss der Arbeit werde ich zu diesem Zweck meinem Betreuer neben dem Prüfaxemplar eine weitere gedruckte sowie eine digitale Fassung übergeben.

Der Universität Stuttgart übertrage ich das Eigentum an diesen zusätzlichen Fassungen und räume dem Institut für Raumfahrtssysteme an dieser Arbeit und an den im Rahmen dieser Arbeit von mir erzeugten Arbeitsergebnissen ein kostenloses, zeitlich und örtlich unbeschränktes, einfaches Nutzungsrecht für Zwecke der Forschung und der Lehre ein. Falls in Zusammenhang mit der Arbeit Nutzungsrechtsvereinbarungen des Instituts mit Dritten bestehen, gelten diese Vereinbarungen auch für die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Arbeitsergebnisse.

Eppingen, den 24.03.2022

Ort, Datum, Unterschrift

<sup>1</sup> Nachzulesen in den DFG-Empfehlungen zur „Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ bzw. in der Satzung der Universität Stuttgart zur „Sicherung der Integrität wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit Fehlverhalten in der Wissenschaft“

## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit einer Untersuchung der Kühleigenschaften des Fluids Lachgas ( $N_2O$ ) beim Einsatz in regenerativ gekühlten Raketenbrennkammern. Hierzu wurden Grundlagenversuche am Prüfstand M11.2 des DLR Instituts für Raumfahrtantriebe in Lampoldshausen durchgeführt. Eine Notwendigkeit der Untersuchung rührt daher, da einige aktuelle, lagerfähige Treibstoffe für Satelliten und Sonden aufgrund ihrer Toxizität unter Beobachtung stehen. Lachgas wird als alternative für diese Stoffe gehandelt und zählt mit seinen Eigenschaften zu den sogenannten Green Propellants.

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Edelstahlrohr mit  $6\text{mm}$  Außendurchmesser. Dieses Edelstahlrohr kann mithilfe keramischer Heizelemente erhitzt werden. Das Rohr wird durch das innere der Heizelemente geführt, sodass dieses von den Elementen umschlossen wird. Im ersten Schritt wurde der bestehende Aufbau grundlegend neugestaltet. Einerseits wurde die Länge der Messstrecke vergrößert, sodass der Beobachtungsbereich verlängert werden konnte. Andererseits wurde die Anzahl der Heizelemente und damit die maximale Heizleistung um ca. 66% erhöht. Dies machte es möglich die Temperaturen in einen kritischen Bereich anzuheben. Da die Temperaturen der Heizer auf bis zu  $1100^\circ\text{C}$  steigen können, wurde die Lagerung mittels keramischer Lagerelemente vorgenommen. Diese Lagerelemente wurden im Rahmen der Arbeit designt und unter Zuhilfenahme eines SLA 3D Druckers angefertigt. Nachdem die Optimierung des Versuchsaufbaus abgeschlossen war, wurde dieser in der Vakuumkammer des Prüfstands angebracht.

Im nächsten Schritt wurden Experimente durchgeführt. Um ein möglichst detailliertes Bild der Eigenschaften zu erlangen, wurden die Parameter Heizleistung, Fluiddruck und Fluidmassenstrom in allen möglichen Kombinationen miteinander gekreuzt. Damit kann auf eine Datenbasis von 80 Versuchen zugegriffen werden. Zur Auswertung der Messdaten wurden zunächst die Temperaturen analysiert. Anhand der Temperaturen konnte ein Bezug zur Kühlleistung und den resultierenden Wärmeströmen gezogen werden. Dabei konnten in Betriebspunkten mit geringen Lachgasmassenströmen Unstetigkeiten im Temperatur- und Wärmestromverlauf festgestellt werden. Diese Unstetigkeiten wurden zu einem späteren Zeitpunkt näher untersucht. Im Falle stetiger Temperaturverläufe wurde die Nußeltzahl anhand der Messdaten berechnet. Die Nußeltzahl wurde daraufhin mit Nußeltkorrelation nach Dittus-Boelter und Gnielinski abgeglichen. Hierbei ließ sich feststellen, dass die Korrelationen untereinander keine nennenswerte Abweichung lieferten. Bezogen auf die analytisch bestimmte Nußeltzahl gaben die Korrelationen einen um den Faktor 1,25 – 1,5 höheren Wert an. Eine Abschätzung der Nußeltzahl mithilfe der Dittus-Boelter beziehungsweise Gnielinski Korrelation ist daher möglich.

Im letzten Schritt wurden die Messdaten mit einem unstetigen Temperaturverlauf über die Lauflänge im Rohr näher betrachtet. Der unstetige Temperaturverlauf ist gekennzeichnet durch einen starken Temperaturanstieg im Fluid. Dieser Anstieg wird durch eine Zersetzung von Lachgas in seine Bestandteile Stickstoff ( $N_2$ ) und Sauerstoff ( $O_2$ ) hervorgerufen. Die Charakterisierung der Zersetzungsbedingungen konnte mangels Dichte an Temperaturmessstellen nicht eindeutig vorgenommen werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass dieser Effekt lediglich bei sehr geringen Massenströmen von  $\dot{m}_{N_2O} = 0,1\text{ g/s}$  einsetzte und in nachfolgenden Arbeiten näher untersucht werden muss.

## Abstract

The present work deals with an investigation of the cooling properties of the fluid nitrous oxide ( $N_2O$ ) when used in regeneratively cooled rocket combustion chambers. For this purpose, basic tests were carried out at the M11.2 test stand of the DLR Institute of Space Propulsion in Lampoldshausen. A necessity for the investigation stems from the fact that some current storable propellants for satellites and probes are under scrutiny due to their toxicity. Nitrous oxide is being traded as an alternative for these substances and its properties make it one of the so-called green propellants.

The experimental setup consists of a stainless steel tube with an outer diameter of  $6\text{mm}$ . This stainless steel tube can be heated with the aid of ceramic heating elements. The tube is guided through the inside of the heating elements so that it is enclosed by the elements. In the first step, the existing setup was fundamentally redesigned. On the one hand, the length of the measuring section was increased so that the observation area could be extended. On the other hand, the number of heating elements and thus the maximum heating power was increased by approx. 66%. This made it possible to raise the temperatures into a critical range. Since the temperatures of the heaters can rise up to  $1100^\circ\text{C}$ , ceramic holders were used to support them. These holders were designed as part of the work and manufactured with the aid of an SLA 3D printer. After the optimization of the experimental setup was completed, it was mounted in the vacuum chamber of the test rig.

In the next step, experiments were carried out. In order to obtain as detailed a picture as possible of the properties, the parameters heating power, fluid pressure and fluid mass flow were crossed with each other in all possible combinations. Thus, a data base of 80 experiments can be accessed. To evaluate the measured data, the temperatures were first analyzed. On the basis of the temperatures, a reference to the cooling capacity and the resulting heat flows could be drawn. At operating points with low nitrous oxide mass flows, discontinuities were found in the temperature and heat flow curves. These discontinuities were investigated in more detail at a later stage. In the case of steady temperature curves, the Nußelt number was calculated on the basis of the measured data. The Nußelt number was then compared with Nußelt correlation according to Dittus-Boelter and Gnielinski. It was found that the correlations did not deviate significantly from each other. In relation to the analytically determined Nusselt number, the correlations gave a higher value by a factor of 1.25 – 1.5. It is therefore possible to estimate the Nusselt number using the Dittus-Boelter and Gnielinski correlations.

In the final step, the measurement data with a discontinuous temperature curve over the run length in the pipe were examined in more detail. The discontinuous temperature curve is characterized by a sharp rise in temperature in the fluid. This increase is caused by a decomposition of nitrous oxide into its components nitrogen ( $N_2$ ) and oxygen ( $O_2$ ). The characterization of the decomposition conditions could not be clearly performed due to the lack of density of temperature measuring points. However, it remains to be stated that this effect only set in at very low mass flows of  $\dot{m}_{N_2O} = 0,1 \text{ g/s}$  and must be investigated in more detail in subsequent work.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Erklärung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Nomenklatur</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. Motivation.....	1
1.2. Ziele der Arbeit.....	1
<b>2. Theoretische Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1. Wärmetransport .....	3
2.1.1. Wärmeleitung.....	3
2.1.2. Konvektion .....	4
2.1.3. Wärmestrahlung.....	8
2.2. Kühlmethoden .....	10
2.2.1. Passive Kühlmethoden.....	11
2.2.2. Aktive Kühlmethoden .....	12
2.3. Messmethoden.....	14
2.3.1. Temperaturmessung .....	14
2.3.2. Druckmessung .....	16
2.4. Additive Fertigung .....	17
2.4.1. Schmelzschichtung (FDM) .....	18
2.4.2. Stereolithographie (SLA) .....	18
2.4.3. Selektives Lasersintern (SLS) .....	19
<b>3. Experimenteller Aufbau</b> .....	<b>21</b>
3.1. Der Prüfstand M11.2 .....	21
3.2. Temperaturmessung .....	22
3.2.1. Position und Nomenklatur .....	22
3.3. Druckmessung .....	23
3.3.1. Position und Nomenklatur .....	24
3.4. Keramische Heizelemente.....	25
3.5. Keramische Lagerelemente.....	25
3.5.1. Anforderungen .....	25
3.5.2. Herstellung.....	25
3.6. Versuchsaufbau .....	28
<b>4. Durchführung</b> .....	<b>30</b>
4.1. Variierte Parameter .....	30
<b>5. Auswertung</b> .....	<b>33</b>
5.1. Temperaturen.....	33
5.2. Wärmeströme.....	36
5.3. Wärmeübergangskoeffizient und Nußeltzahl .....	40

5.4. Zersetzung von Lachgas .....	44
5.5. Einflussgrößen .....	47
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>49</b>
6.1. Handlungsempfehlung für zukünftige Forschungsarbeiten .....	50
<b>Anhang A .....</b>	<b>51</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>53</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Schematische Darstellung von parallel und in reihe geschalteten Materialien [4, p. 7].....	3
Abbildung 2-2: Stationäre Wärmeleitung in einer Rohrwand [4, p. 8].....	4
Abbildung 2-3: Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils einer Rohrströmung [4, p. 97].....	5
Abbildung 2-4: Planck'sches Strahlungsspektrum [39].....	8
Abbildung 2-5: Darstellung des abführbaren Wärmestroms unterschiedlicher Kühlmethoden [12, p. 8].....	10
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Ablationskühlung [12, p. 12].....	12
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Filmkühlung [12, p. 15].....	13
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Regenerativkühlung am Beispiel des Vulcain 2 Triebwerks [12, p. 23].....	14
Abbildung 2-9: Thermoelektrische Spannung gegen Platin bei einer Temperaturdifferenz von 100K [17, p. 21].....	15
Abbildung 2-10: Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Temperatur von Platin [17, p. 12].....	16
Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der FDM Methode [40].....	18
Abbildung 2-12: Schematische der SLA Methode [40].....	18
Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der SLS Methode [40].....	19
Abbildung 3-1: Die Vakuumkammer des M11.2 [22].....	21
Abbildung 3-2: Thermoelement vom Typ K ohne Anschlussstecker [41].....	22
Abbildung 3-3: Position der Messtellen bis Versuchsnummer 65.....	23
Abbildung 3-4: Drucksensor von STS Sensors [37].....	24
Abbildung 3-5: Fehlgeschlagener Keramikbrand im inneren des Brennofens aufgrund zu hohen Polymeranteils im Werkstück.....	27
Abbildung 3-6: Deutlich verformtes Bauteil nach Brand im Ofen.....	28
Abbildung 3-7: Finaler Versuchsaufbau montiert am Deckel des Vakuumtanks. Grün eingezeichnet die Drucksensoren, rot eingezeichnet der Differenzdrucksensor.....	29
Abbildung 3-8: Detailansicht der montierten Heizelemente.....	29
Abbildung 4-1: Dampfdruckkurve von Lachgas.....	31
Abbildung 5-1: Fluidtemperatur TF4 über die eingestrahelte Leistung für verschiedene Drücke bei konstantem Massenstrom von 0,5 <i>gs</i> .....	33
Abbildung 5-2: Fluidtemperatur TF4 über die eingestrahelte Leistung für verschiedene Massenströme bei konstantem Druck von 20 <i>bar</i> .....	34
Abbildung 5-3: Fluidtemperatur und Oberflächentemperatur des Rohrs über die Lauflänge im System bei einem Druck von 20 <i>bar</i> und einer elektrischen Leistung des Heizsystems von ca. 5000 <i>W</i> .....	35
Abbildung 5-4: Selbstersetzungstemperaturen von <i>N2O</i> für unterschiedliche Druckniveaus und in Anhängigkeit der Aufenthaltsdauer [32].....	37
Abbildung 5-5: Flächenspezifische Kühlleistung des Fluids bezogen auf die Rohroberfläche des betrachteten Intervalls für unterschiedliche Massenströme bei 20 <i>bar</i> und ca. 5000 <i>W</i> Heizleistung.....	38



Abbildung 5-6: Idealierte Darstellung des Verlaufs des spezifischen Wandwärmestroms des Rohrs über die gesamte Lauflänge des Versuchsaufbaus. Konstanter Eintrag aufgrund der beheizten Bereiche der Keramischen Heizer. Austrag aufgrund der Abstrahlung des Rohrs über die unbeheizten Stellen. ....	41
Abbildung 5-7: Verlauf der Fluidtemperatur über die Lauflänge des Rohrs für die Fälle einer Zersetzung (Auszug) .....	46
Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Zustandsänderung von einem metastabilen in einen stabilen Zustand [42].....	47

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Koeffizienten für Formel (2.11) und (2.14) [6].....	7
Tabelle 3-1: Übersicht über Temperaturmesstechnik und deren Position .....	23
Tabelle 3-2: Übersicht über Druckmesstechnik und deren Position .....	24
Tabelle 3-3: Technische Daten eines Heizelements .....	25
Tabelle 3-4: Temperaturverlauf Brennvorgang .....	26
Tabelle 4-1: Parametermatrix des Massenstroms, der Spannung und des Drucks .....	31
Tabelle 5-1: Vergleich der Nußeltzahlen bei 20bar Fluiddruck und maximaler Heizleistung .	42
Tabelle 5-2: Vergleich der Nußeltzahlen bei maximaler Heizleistung, unterschiedlichen Drücken und Massenströmen ohne Zersetzung des Fluids .....	43
Tabelle 5-3: Vergleich der Nußeltzahlen bei 20bar Fluiddruck, unterschiedlichen Heizleistungen und Massenströmen ohne Zersetzung des Fluids .....	44
Tabelle 5-4: Übersicht der Versuche bei denen eine Zersetzung von Lachgas auftrat.....	45

## Nomenklatur

### Abkürzungen

CAD	Computer-aided design
CFD	Computational Fluid Dynamics (numerische Strömungsmechanik)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FDM	Fused Deposition Modelling (Schmelzschichtung)
PID	Proportional-Integral-Derivative
SLA	Stereolithographie
SLS	Selektives Lasersintern

### Griechische Schriftsymbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bezeichnung</i>
$\alpha$	$W m^{-2} K^{-1}$	Wärmeübergangskoeffizient
$\varepsilon$	–	Emissionsgrad
$\eta$	$N s m^{-2}$	Dynamische Viskosität
$\lambda$	$W m^{-1} K^{-1}$	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda$	$m$	Wellenlänge
$\nu$	$m^2 s^{-1}$	Kinematische Viskosität
$\rho$	$kg m^{-3}$	Dichte
$\rho$	–	Reflexionsgrad
$\sigma$	$W m^{-2} K^{-4}$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$\tau$	–	Transmissionsgrad
$\varphi$	–	Sichtfaktor zwischen Oberflächen

## Lateinische Schriftsymbole

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Bezeichnung</i>
$A$	$m^2$	Fläche
$c_p$	$J\ kg^{-1}\ K^{-1}$	Spezifische Wärmekapazität
$d$	$m$	Wandstärke
$d_h$	$m$	Hydraulischer Durchmesser
$I$	$A$	Stromstärke
$l$	$m$	Länge
$M$	$g\ mol^{-1}$	Molare Masse
$\dot{m}$	$kg\ s^{-1}$	Massenstrom
$Nu_m$	–	Mittlere Nußeltzahl
$P$	$W$	Leistung
$Pr$	–	Prandtlzahl
$p$	$bar$	Druck
$\dot{Q}$	$W$	Wärmestrom
$\dot{q}$	$W\ m^{-2}$	Flächenspezifische Wärmestromdichte
$R$	$m^2\ K\ W^{-1}$	Wärmedurchgangswiderstand
$Re_d$	–	Reynoldszahl
$R_{el}$	$\Omega$	Elektrischer Widerstand
$r$	$m$	Radius
$T$	$K$	Temperatur
$\Delta T$	$K$	Temperaturdifferenz
$\nabla T$	$K$	Temperaturgradient
$t$	$s$	Zeit
$U$	$m$	Umfang
$U_{el}$	$V$	Spannung
$u$	$m\ s^{-1}$	Strömungsgeschwindigkeit

## Chemische Formelzeichen

---

$H_2$  Wasserstoff

---

$LH_2$  Flüssiger Wasserstoff

---

$LO_2$  Flüssiger Sauerstoff

---

$N_2$  Stickstoff

---

$N_2H_4$  Hydrazin

---

$N_2O$  Distickstoffmonoxid (Lachgas)

---

$O_2$  Sauerstoff

---

## 1. Einleitung

In diesem Kapitel soll ein Überblick sowohl über die Motivation als auch die Ziele der Arbeit gegeben werden. Außerdem wird eine Übersicht über die Arbeiten des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) auf dem Gebiet der lachgasbasierten Treibstoffforschung gegeben.

### 1.1. Motivation

Bereits seit Beginn der Raumfahrt wird der Auswahl und Zusammensetzung der Treibstoffe eine zentrale Rolle zugesprochen. Abhängig vom betrachteten Projekt und der Mission ist es notwendig eine passende Treibstoffkombination auszuwählen. Hierfür sind fundierte Kenntnisse über die relevanten Eigenschaften wie die Dichte, Entzündbarkeit, Verbrennungstemperatur, Abgaszusammensetzung, aber auch die Kühleigenschaften notwendig. Zudem muss, je nach Dauer der Mission, ebenfalls die Lagerfähigkeit des verwendeten Stoffs bekannt sein. Abgesehen von den Leistungsdaten des Treibstoffs, spielen Einflussgrößen wie, Kosten, Handhabung, Verfügbarkeit und Toxizität eine entscheidende Rolle.

Für den Betrieb von Sonden oder Satelliten ist die Nutzung eines lagerfähigen und zuverlässigen Treibstoffes von zentraler Bedeutung. Die Treibstoffe sind dabei für die Bahn- und Lageregelung des Raumflugkörpers notwendig und müssen über deren gesamte Lebensdauer geschützt gelagert werden und zu jedem Zeitpunkt einsatzbereit sein. Hierfür hat sich der Stoff Hydrazin ( $N_2H_4$ ) und seine Varianten bewährt. Als gutes Beispiel hierfür lässt sich die Sonde Voyager 1 nennen, diese ermöglichte es ihren Hydrazin Antrieb 2017, und damit nach über 37 Jahren, zu zünden und einen Steuerimpuls zu generieren. Zudem lässt sich Hydrazin als Monopropellant verwenden und liefert dabei einen spezifischen Impuls von bis zu 240s [1]. Im Betrieb mit Distickstofftetroxid ( $NTO$ ) als Bipropellant sind höhere spezifische Impulse bis zu 320s möglich, jedoch steigert dies die Systemkomplexität [1].

Hydrazin scheint damit der optimale Treibstoff für die Verwendung in Satelliten und Sonden zu sein. Jedoch bringt der Stoff vor allem unter dem Aspekt der Handhabung negative Eigenschaften mit sich. Aufgrund der hohen Toxizität und seiner karzinogenen Eigenschaften, zählt man ihn zu den krebserzeugenden, erbgutverändernde und fruchtbarkeitsgefährdenden, kurz CMR, Stoffen [2, p. 74ff]. Zudem wurde Hydrazin im Zuge der europäischen REACH-Verordnung im Jahr 2007 auf die Kandidatenliste der Stoffe gesetzt, deren Verwendung in näherer Zeit unter Umständen europaweit verboten werden soll. Aus diesem Grund bedarf es der Forschung an alternativen, ungiftigen und lagerfähigen, sogenannten grünen Treibstoffen. Das Ziel der fortschrittlichen Treibstoffe ist es einerseits keine Gefährdung von Lebewesen und der Umwelt hervorzurufen, sowie andererseits vergleichbare Leistungseigenschaften zu erbringen. [3]

### 1.2. Ziele der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, die Kühleigenschaften von Distickstoffmonoxid ( $N_2O$ ) für eine regenerative Kühlung zu charakterisieren und mögliche Grenzen des Kühlfluids aufzudecken. Hierfür werden die Erkenntnisse aus vorangegangenen Arbeiten verwendet, um einen

optimierten Versuchsaufbau aufzustellen. Der Versuchsaufbau besteht, vereinfacht gesprochen, aus keramischen Heizelementen die ein mit Lachgas durchströmtes Rohr umschließen. Um dem Einfluss von konvektiven Wärmeverlusten entgegenzuwirken, findet die gesamte Versuchsdurchführung in der Vakuumprüfkammer des Prüfstands M11.2 des DLR in Lampoldshausen statt. Bei Betrachtung des Versuchsaufbaus ist zwei Aspekten besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Einerseits soll die Summe der Heizleistung sowie der Emissionsgrad der beheizten Elemente deutlich erhöht werden um den Energieeintrag auf das Fluid zu vergrößern. Zum anderen soll die Robustheit des Aufbaus erhöht und für zeitlich ausgedehnte Versuchsreihen ertüchtigt werden. Hierzu werden 3D gedruckte, keramische Bauteile verwendet die zur Lagerung der Heizelemente dienen. Die Konstruktion und Herstellung wird im Rahmen dieser Arbeit mit einem Stereolithographie Drucker durchgeführt. Eine Messdatenauswertung soll klären inwiefern sich der Wärmeübergang vom beheizten Rohr auf das Lachgas mithilfe von empirischen Gleichungen beschreiben lässt und ob eine Berechnung ohne detaillierte Messdatenaufzeichnung möglich ist. Zudem soll eine Untersuchung des, in der Literatur wenig beschriebenen, Zersetzungsvorgangs von Lachgas vorgenommen werden. Diese ist notwendig, um die Grenzen der Kühlkapazität zu beschreiben.

## 2. Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden die theoretischen Grundlagen beschrieben. Diese dienen zum Verständnis der Überlegungen, der Berechnung und der Auswertung.

### 2.1. Wärmetransport

Der Wärmetransport spielt in nahezu jedem Vorgang eine wichtige Rolle. Bei Wärmetransportvorgängen wird unterschieden zwischen stoffgebundenem Wärmetransport durch Konduktion und Konvektion und nicht stoffgebundenem Transport durch Strahlung.

#### 2.1.1. Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den Energietransport infolge molekularer und atomarer Wechselwirkung bei ungleichmäßiger Temperaturverteilung. Diese Art von Energietransport findet aufgrund der Berührung von Teilchen statt, darum spricht man hierbei von zwischenmolekularem Stofftransport [4, p. 1]. Da dieser Transportmechanismus in allen wärmebezogenen Problemstellungen auftritt, stellt die Wärmeleitung einen grundlegenden Mechanismus dar. Der Wärmestrom  $\dot{Q}$  beschreibt den Energietransport in Joule pro Zeiteinheit und tritt nach dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik immer in Richtung der niedrigeren Temperatur auf. [5, p. 29]

Der Wärmestrom kann zudem bezogen auf seine Wirkungsfläche ausgedrückt werden, der sogenannten flächenspezifischen Wärmestromdichte. Diese kann mithilfe der allgemeinen Gleichung (2.1) beschrieben werden. Für den eindimensionalen Fall gilt Gleichung (2.2). Dabei beschreibt  $\dot{q}$  die Wärmestromdichte,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials,  $d$  die Wandstärke des Materials und  $\nabla T$  den Temperaturgradienten an der auszuwertenden Stelle. Das Minuszeichen gibt an, dass die Wärme von der Quelle abfließt. [4, p. 2]

$$\dot{q} = -\lambda \nabla T \quad (2.1)$$

$$\dot{q} = -\frac{\lambda}{d} (T_1 - T_2) \quad (2.2)$$

Die Wärmeleitfähigkeit ist ausschließlich von den Stoffeigenschaften abhängig und kann in geeigneten Nachschlagwerken für nahezu jedes Material ermittelt werden. Sie ist für Gase am

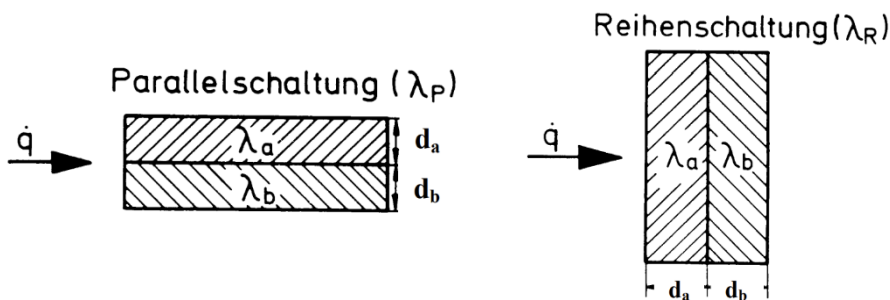


Abbildung 2-1: Schematische Darstellung von parallel und in reihe geschalteten Materialien [4, p. 7]

niedrigsten und für Feststoffe am größten. Der Wert für Flüssigkeiten liegt dazwischen. Daraus lässt sich ableiten, dass bei Bauteilen, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit fordern, nahezu ausschließlich Feststoffe verwendet werden können.

Für geschichtete Körper lässt sich der Wärmedurchgangswiderstand  $R$  bestimmen. Die Wärmeleitung normal zur Schichtung berechnet sich nach Gleichung (2.3). Für Wärmeleitungsvorgänge parallel zu Schichtung des Materials kann die Formel zu Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstands in geeigneter Literatur nachgeschlagen werden. [4, p. 3ff]

$$R = \frac{d_{ges}}{\lambda} = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{\lambda_n} \quad (2.3)$$

Für ein, wie in Abbildung 2-2 dargestelltes, Rohr gilt im stationären Fall der in Gleichung (2.4) beschriebene Zusammenhang für den Wärmestrom  $\dot{Q}$ . Die Länge des Rohrs wird mit  $l$  angegeben, die Wärmeleitfähigkeit mit  $\lambda$  und der innere beziehungsweise äußere Radius des Rohres mit  $r_1$  und  $r_2$ . [4, p. 8]

$$\dot{Q} = 2 \pi l \lambda \frac{T_1 - T_2}{\ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.4)$$

Der gesamte Wärmedurchgang von Rohraußenseite bis hin zur Fluidtemperatur im Rohr kann mit Gleichung (2.5) berechnet werden. Dabei beschreibt  $l$  wiederum die Länge des Rohres,  $r_1$  und  $r_2$  die Radien des Rohrs,  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials und  $\alpha$  den Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite des Rohrs. [4, p. 11]

$$\dot{Q} = \frac{2 \pi l (T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1 \alpha_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2.5)$$

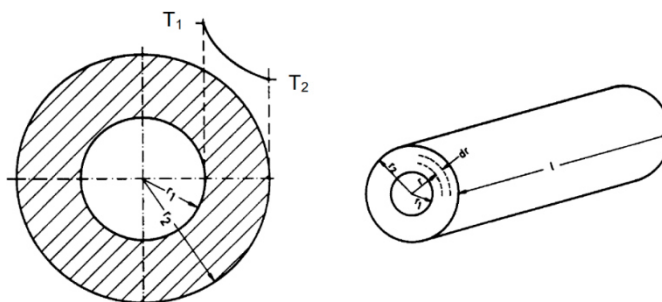


Abbildung 2-2: Stationäre Wärmeleitung in einer Rohrwand [4, p. 8]

### 2.1.2. Konvektion

Im Gegensatz zur Wärmeleitung, bei der die Teilchen sich in Ruhe befinden, findet der Wärmetransport im Fall der Konvektion aufgrund von makroskopischen Teilchenbewegungen statt [4, p. 1]. Dabei werden zwei Arten der Konvektion unterschieden. Zum einen die freie Konvektion und zum anderen die erzwungene Konvektion. Im Folgenden wird lediglich die erzwungene Konvektion für durchströmte Rohre oder Kanäle näher betrachten. Als



Nachschlagwerk für den Fall der freien Konvektion kann das Skriptum von Weigand und von Wolfersdorf [4] verwendet werden.

Häufig werden in der Technik Wärmetauscher, bestehend aus durchströmten Rohren oder Kanälen verwendet. Folgend wird ausschließlich die Rohrströmung betrachtet, da der Wärmeübergang des in dieser Arbeit verwendeten Modells mit ebendiesem durchströmten Rohr gleichgesetzt werden kann. Bei der Durchströmung kommt es zu Wechselwirkungen zwischen der Kernströmung und den Wandgrenzschichten. Diese, sich an der Rohrwand bildende, Strömungsgrenzschicht wächst mit der Lauflänge so weit an, bis sie zusammenwachsen. Damit lässt sich von einer hydrodynamisch voll ausgebildeten Strömung sprechen. Analog hierzu entwickelt sich die Temperaturverteilung im Rohr. Sobald sich diese beiden Profile gemeinsam entwickeln, lässt sich von einer hydrodynamischen und thermischen Anlaufströmung sprechen. Falls das Geschwindigkeitsprofil bereits voll ausgebildet ist und gleichzeitig Wärme übertragen wird, nennt man diese eine thermische Anlaufströmung. Eine Visualisierung dieses Vorgangs ist in Abbildung 2-3 dargestellt. [4, p. 97]

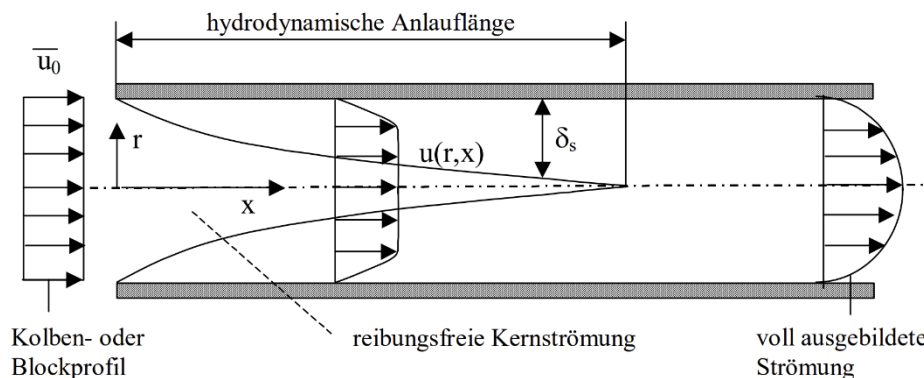


Abbildung 2-3: Entwicklung des Geschwindigkeitsprofils einer Rohrströmung [4, p. 97]

Die Temperatur der Fluids ändert sich bei der Durchströmung aufgrund der Wärmebeziehungsweise abfuhr. Damit man die Wärmeübertragungsvorgänge von Rohrströmungen charakterisieren und untersuchen kann ist eine Kenntnis des Wärmeflusses notwendig. Die Entwicklung der Temperatur ist abhängig von den Randbedingungen an der Grenzfläche zwischen Kanal und Fluid. Hierbei wird zwischen zwei speziellen Fällen von Randbedingungen unterschieden. Zum einen einer konstanten Wandwärmestromdichte  $\dot{q}_w$  und zum anderen einer konstanten Wandtemperatur  $T_w$ . Für den hier vorliegenden ersten Fall lässt sich die Fluidtemperatur  $T_F$  für einen Kanal konstanten Umfangs  $U$  mithilfe von Gleichung (2.6) bestimmen. [4, p. 98]

$$T_F(x) = T_0 + \frac{\dot{q}_w U}{\dot{m} c_p} x \quad (2.6)$$

Analog hierzu lässt sich die Wandtemperatur  $T_w$  mithilfe von Gleichung (2.7) bestimmen. Hierbei beschreibt  $\alpha_m$  den mittleren Wärmeübergangskoeffizienten.

$$T_w(x) = T_0 + \frac{\dot{q}_w}{\alpha_m} + \frac{\dot{q}_w U}{\dot{m} c_p} x \quad (2.7)$$

Es ist erkennbar, dass beide Temperaturen einem linearen Verlauf folgen. Dieser lineare Verlauf zeigt sich in parallel zueinander verlaufenden Geraden. Eine Kombination der beiden

Gleichungen liefert eine, wie in Gleichung (2.8) dargestellte, Abhängigkeit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  von der mittleren Wandwärmestromdichte  $\dot{q}_m$  und des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_m$ . Unter Kenntnis der Fluid- und Wandtemperatur sowie der Wandwärmestromdichte lässt sich damit der Wärmeübergangskoeffizienten bestimmen.

$$T_W(x) - T_F(x) = \Delta T = \frac{\dot{q}_W}{\alpha_m} \quad (2.8)$$

Zur Bestimmung des Wärmeübergangs muss der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  vorliegen. Falls dieser nicht vorliegt und ebenfalls nicht aus den vorliegenden Werten über die oben genannte Beziehung bestimmt werden kann, wird eine alternativer Weg über Nußelt-Korrelationen genutzt. Diese Korrelationen sind jedoch ausschließlich als Näherungslösung zu verstehen.

Die Strömung in Rohren oder Kanälen kann sowohl laminar als auch turbulent sein [4, p. 100]. Zur Charakterisierung der Strömung wird die Reynoldszahl, eine dimensionslose Ähnlichkeitszahl um Strömungen miteinander zu vergleichen, verwendet. Diese Bestimmt sich, wie in Gleichung (2.9) zu erkennen, mithilfe der Strömungsgeschwindigkeit  $u$ , des hydraulischen Durchmessers  $d_h$ , der Dichte  $\rho$  und der dynamischen Viskosität  $\eta$ .

$$Re_d = \frac{u d_h \rho}{\eta} \quad (2.9)$$

In Gleichung (2.10) ist die Berechnung des hydraulischen Durchmessers  $d_h$  zunächst allgemein und dann für ein Rohr dargestellt. Mithilfe der in Gleichung (2.11) dargestellten Formel und den in Tabelle 2-1 genannten Koeffizienten lässt sich die dynamische Viskosität von Lachgas bestimmen [6]. Hierbei steht  $T_F$  für die Temperatur des Fluids und  $T_C$  für die kritische Temperatur von 309,57K. [6]

$$d_h = 4 \frac{A}{U} = 2 r_i \quad (2.10)$$

$$\eta = a_1 + a_2 \frac{T_F}{T_C} + a_3 \left(\frac{T_F}{T_C}\right)^2 + a_4 \left(\frac{T_F}{T_C}\right)^3 \quad (2.11)$$

Messungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, bewegen sich ausschließlich im turbulenten Bereich von  $Re_d > 2300$ . Daher wird im Folgenden ausschließlich dieser Fall betrachtet. Unter dieser Annahme lässt sich die Nußeltzahl  $Nu_m$  mithilfe der vereinfachten Dittus-Boelter-Beziehung für ein beheiztes Fluid, siehe Gleichung (2.12), bestimmen.

$$Nu_{m,DB} = 0,023 Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \quad (2.12)$$

Die Dittus-Boelter Korrelation ist gültig für die folgenden Reynoldszahlen  $Re$ , Prandtlzahlen  $Pr$  und das Längen zu Durchmesser Verhältnis  $l_{Rohr}$  zu  $d_h$ .

$$10^4 \leq Re$$

$$0,7 \leq Pr \leq 160$$

$$10 \leq \frac{l_{Rohr}}{d_h} \leq \infty$$

Die Prandtlzahl berechnet sich nach Gleichung (2.13) mithilfe der dynamischen Viskosität  $\eta$ , der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$ . Anhand von Gleichung (2.14) und den Koeffizienten aus Tabelle 2-1 lässt sich die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bestimmen.

$$Pr = \frac{\eta c_p}{\lambda} \quad (2.13)$$

$$\lambda = b_1 + b_2 \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right) + b_3 \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right)^2 + b_4 \left(1 - \frac{T_F}{T_C}\right)^3 \quad (2.14)$$

Tabelle 2-1: Koeffizienten für Formel (2.11) und (2.14) [6]

$a_1$	-0,955565	$b_1$	18,32
$a_2$	18,8315	$b_2$	-24,84
$a_3$	-2,34589	$b_3$	-0,09
$a_4$	0,164927	$b_4$	0,06

Unter Zuhilfenahme der Werte der Tabelle lässt sich der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_m$  mit den oben berechneten Größen sowie Gleichung (2.15) bestimmen.

$$Nu_m = \frac{\alpha_m d_h}{\lambda} \quad (2.15)$$

Neben der in Gleichung (2.12) dargestellten Näherung zur Berechnung der Nußeltkorrelation existieren in der Literatur noch weitere Näherungslösungen. Eine mögliche Lösung stellt die in Gleichung (2.16) beschriebene Formel von Gnielinski dar [7]. Hier wird zusätzlich der hydraulische Durchmesser  $d_h$  sowie die Länge des Rohrs  $l_{Rohr}$  berücksichtigt.

$$Nu_{m,Gn} = \frac{\frac{\xi}{8} (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 \sqrt{\frac{\xi}{8}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \left[1 + \left(\frac{d_h}{l_{Rohr}}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \quad (2.16)$$

Der Parameter  $\xi$  berechnet sich nach Gleichung (2.17).

$$\xi = (1,82 \log(Re) - 1,64)^{-2} \quad (2.17)$$

Die Korrelation von Gnielinski ist gültig für die folgenden Reynoldszahlen  $Re$ , Prandtlzahlen  $Pr$  und das Längen zu Durchmesser Verhältnis  $l_{Rohr}$  zu  $d_h$ .

$$10^4 \leq Re \leq 10^6$$

$$0,1 \leq Pr \leq 1000$$

$$l_{Rohr}/d_h \geq 1$$

Die Stoffwerte, sowie Prandtl und Reynoldszahlen werden immer bei einer mittleren Fluidtemperatur  $T_m$  bestimmt. Diese mittlere Temperatur berechnet sich aus dem Mittelwert der Fluidtemperaturen von Einlass  $T_{in}$  und Auslass  $T_{out}$  der Messstrecke.

### 2.1.3. Wärmestrahlung

Der Wärmetransportmechanismus der Wärmestrahlung unterscheidet sich grundlegend vom Mechanismus der Wärmeleitung und Konvektion. Denn der Transport im betrachteten Fall findet unter Ausschluss von Molekülen statt. Daher stellt diese Art von Transport keine Wechselwirkung benachbarter Moleküle dar und ist deshalb nicht auf eine Atmosphäre oder andere Trägermedien angewiesen. Aus makroskopischer Sicht kommt es somit zu einem Wärmeaustausch von Körpern, welche nicht miteinander in Kontakt stehen und keiner Bewegung unterliegen müssen. [5, p. 145]

Hierfür sind elektromagnetische Wellen verantwortlich. Diese werden mithilfe der Wellenlänge  $\lambda$  charakterisiert und bewegen sich im relevanten Bereich zwischen  $0,1\mu\text{m}$  und  $1000\mu\text{m}$ . Die Fähigkeit Wärme außerhalb dieses Bereichs zu übertragen, lässt sich als vernachlässigbar klassifizieren. [5, p. 145f]

Materialien lassen sich grundsätzlich anhand ihrer optischen Eigenschaften beschreiben. Sobald Strahlung auf einen Körper auftrifft, dringt ein Teil davon ein, der verbleibende Anteil wird zurück in den Raum geworfen. Man bezeichnet dies als Absorptionsgrad  $\alpha$  und Reflexionsgrad  $\rho$ . Für Materialien, welche eine gewisse Teildurchlässigkeit besitzen lässt sich ein Transmissionsgrad  $\tau$  bestimmen. Grundsätzlich gilt für den Zusammenhang dieser drei Eigenschaften das in Gleichung (2.18) dargestellte Gesetz. [8, p. 333]

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.18)$$

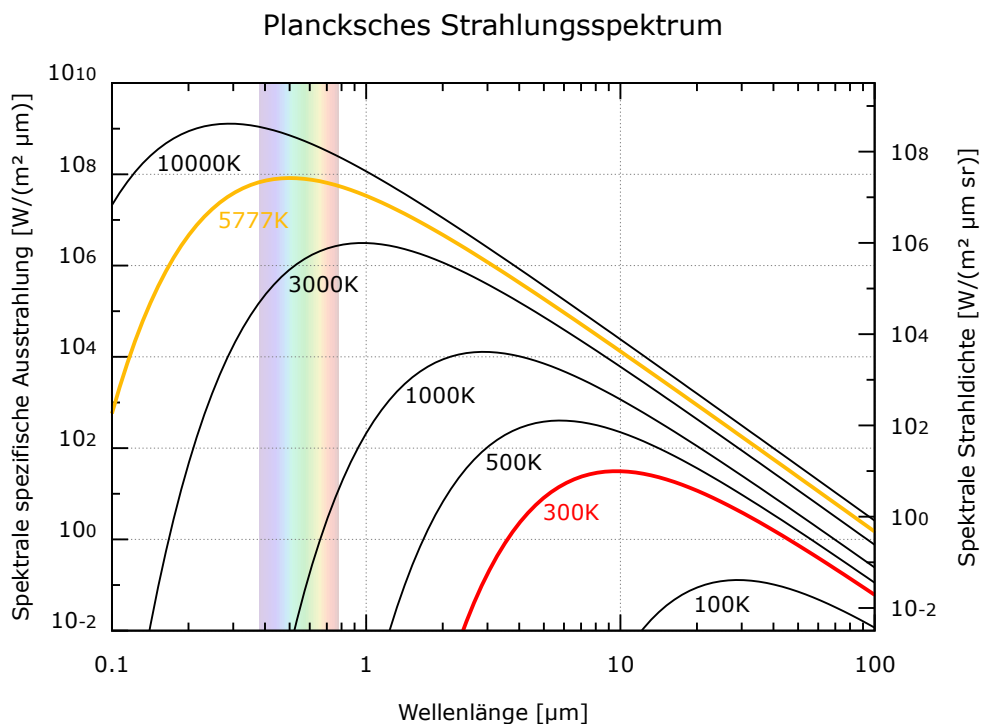


Abbildung 2-4: Planck'sches Strahlungsspektrum [39]

Der reflektierte Anteil der Strahlung kann diffus, beispielsweise von einer matten Oberfläche, oder gerichtet, von einer blanken Oberfläche, zurückgeworfen werden. Zusätzlich lässt sich festhalten, dass der Absorptionsgrad laut Kirchhoff'schen Gesetz dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  entspricht. Bei idealisierten Betrachtungen wird das Konzept des schwarzen Strahlers

verwendet, dieser besitzt einen Emissionsgrad  $\varepsilon$  von 1. Der schwarze Strahler strahlt den Maximalwert der emittierbaren Strahlung eines Körpers für jede Temperatur und Wellenlänge ab. Der genannte Maximalwert ist durch das Planck'sche Strahlungsgesetz definiert. [8, p. 331ff]

Abbildung 2-4 stellt die spektrale spezifische Ausstrahlung über die Wellenlänge in Abhängigkeit der Temperatur dar. Sie gibt an, welche Wellenlänge und in welcher Intensität ein Körper bestimmter Temperatur Strahlung aussendet. Die Verbindungslinie zwischen den Maxima der einzelnen Temperaturen wird Wien'sches Verschiebungsgesetz genannt und folgt Gleichung (2.19). Damit lässt sich unter Kenntnis der Wellenlänge der maximalen spezifischen Ausstrahlung die Oberflächentemperatur des schwarzen Strahlers bestimmen [9].

$$\lambda_{max} T = 2,898 \mu m K \quad (2.19)$$

Das Konzept des schwarzen Strahlers ist jedoch, wie bereits genannt, eine idealisierte Darstellung eines Körpers. Technische Oberflächen hingegen weisen eine wellenlängenabhängige Emissionszahl kleiner eins auf. Unter dem Sonderfall eines grauen Strahlers versteht man eine technische Oberfläche mit temperaturunabhängiger, also konstanter, Emissionszahl kleiner eins. [8, p. 334]

Da kein Material oder kein Körper existiert, welcher einen Absorptions- oder Emissionsgrad von 0 besitzt, strahlt jeder Körper, dessen Temperatur höher als die Temperatur des absoluten Nullpunkts liegt Wärmestrahlung aus. Die abgestrahlte thermische Leistung wird durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz angegeben. Wie in Gleichung (2.20) zu erkennen ist, ist diese von der Temperatur des Körpers  $T$  in Kelvin, der Oberfläche des Körpers  $A$ , dem temperaturabhängigen Emissionsgrad  $\varepsilon(T)$ , sowie der Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma$  abhängig. [10]

$$\dot{Q} = \varepsilon(T) \sigma A T^4 \quad (2.20)$$

$$\sigma = 5,670374 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Für einen schwarzen Strahler entfällt der Emissionsgrad in der oben genannten Formel, sodass die abgestrahlte Wärme nur von der Temperatur des Körpers und der Oberfläche abhängt.

Zur Bestimmung der eingestrahlten Leistung von sich gegenseitig umschließenden Zylindern wird das Konzept des Sichtfaktors  $\varphi$  verwendet. Sichtfaktoren geben an welcher von einer Fläche abgegebene Teil der Strahlung auf einer anderen, angestrahlten, Fläche auftrifft. Diese sind in einfachen Fällen analytisch berechenbar, für komplexere Fälle muss auf numerische Berechnungen zurückgegriffen werden. Im vorliegenden Fall wird zur Vereinfachung der Sichtfaktor für zwei unendlich lange Zylinder bestimmt, dieser kann näherungsweise für die vorliegende Anwendung verwendet werden. Für den Sichtfaktor  $\varphi_{H \rightarrow R}$  von Heizer nach Rohr, gilt der in Gleichung (2.21) dargestellte Zusammenhang. [11]

$$\varphi_{H \rightarrow R} = \frac{A_R}{A_H} = \frac{r_{R,a}}{r_{H,i}} = \frac{6mm}{23,4mm} = 0,25641 \quad (2.21)$$

Unter der Annahme, dass die gesamte eingebrachte elektrische Energie in Strahlung umgewandelt wird ergibt sich die Strahlungsleistung des Heizers  $\dot{Q}_H$  mit einem Emissionsgrad der Heizeroberfläche  $\varepsilon_H$  von 0,95 nach Gleichung (2.22). Die elektrische Leistung der Heizer  $P_{el}$  kann aus den aufgezeichneten Messdaten entnommen werden.

$$\dot{Q}_H = P_{el} \varepsilon_H \quad (2.22)$$

Die nach innen abgestrahlte Leistung  $\dot{Q}_{H,i}$  wird mithilfe des Flächenverhältnisses von gesamter Heizerfläche  $A_H$  zu innerer Heizerfläche  $A_{H,i}$  bestimmt.

$$\dot{Q}_{H,i} = \frac{A_{H,i}}{A_H} \dot{Q}_H = \frac{r_{H,i}}{r_{H,a} + r_{H,i}} \dot{Q}_H = 0,448276 \dot{Q}_H \quad (2.23)$$

Damit lässt sich die gesamte vom Rohr aufgenommene Leistung mithilfe von Gleichung (2.24) berechnen. Dabei wird die Annahme getroffen, dass das Rohr aufgrund seiner schwarzen, matten Oberfläche als schwarzer Strahler behandelt werden darf. Daher wird für den Emissionsgrad des Rohres  $\varepsilon_R$  ein Wert von 1 verwendet.

$$\dot{Q}_{Rohr,in} = \dot{Q}_{H,i} \varphi_{H \rightarrow R} \varepsilon_R = 0,114943 \dot{Q}_H \quad (2.24)$$

## 2.2. Kühlmethoden

Bei der Verbrennung von Treibstoffen in Raketenbrennkammern können sehr hohe Temperaturen von über  $3000K$  entstehen. Zum Schutz der Struktur ist daher eine Kühlung der Brennkammer und der Düse notwendig. In Abbildung 2-5 ist eine Übersicht der abführbaren Wärmeströme, klassifiziert nach Kühlmethode, dargestellt. Diese können in beliebiger Form miteinander kombiniert werden. Es wird unterschieden in die passiven Kühlmethoden, hierzu zählen unter anderem die Kapazitiv-, Strahlungs- und Ablationskühlung, sowie die aktiven Kühlmethoden, hierzu zählen die Film-, Verlust- und Regenerativkühlung. Die passiven Kühlmethoden benötigen, im Gegensatz zu den aktiven Methoden, kein zusätzliches Medium sowie keine Regelung der Kühlleistung. [12]

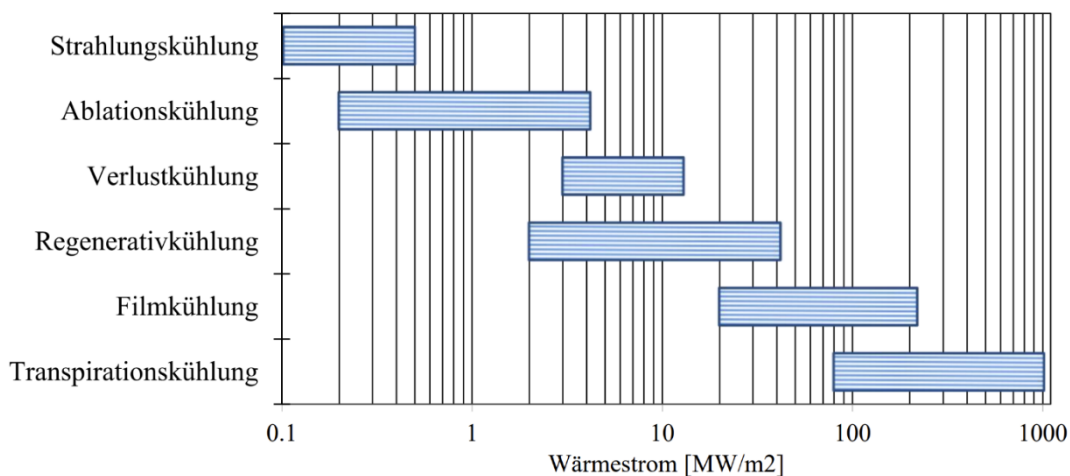


Abbildung 2-5: Darstellung des abführbaren Wärmestroms unterschiedlicher Kühlmethoden [12, p. 8]

### 2.2.1. Passive Kühlmethoden

Die Passiven Kühlmethoden stellen eine unkomplizierte Möglichkeit dar Brennkammern und Düsen von Raketentriebwerken zu kühlen. Sie sind zumeist einfach zu implementieren und erfordern einen moderaten Integrationsaufwand.

#### Kapazitivkühlung

Eine Kühlung von Brennkammern mithilfe der Methode der Kapazitivkühlung wird in der Praxis äußerst selten eingesetzt. Im Gegensatz dazu ist dies bei Entwicklungsbrennkammern, bei denen kein komplexes Kühlsystem entworfen werden soll, verhältnismäßig oft der Fall. Dabei wird die freigesetzte Wärme ausschließlich vom verwendeten Werkstoff aufgenommen und gespeichert. Die Kühlleistung ist damit stark eingeschränkt und abhängig von der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$ , der Dichte  $\rho$  sowie der maximal zulässigen Materialtemperatur  $T_{max}$ . Je größer die genannten Werte, desto höher ist auch die Kühlwirkung des Materials. Die Betriebsdauer der Brennkammer ist stark eingeschränkt, selbst unter Verwendung geeigneter Materialien wie beispielsweise Kupfer oder Graphit. [12, p. 9]

#### Strahlungskühlung

Die Methode der Strahlungskühlung verwendet zum Abführen der Wärme das Prinzip der thermischen Emission. Diese zählt zu den einfachsten Kühlmethoden da hierfür keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden müssen. Der Kühlkörper sollte in jedem Fall aus dem Raumfahrzeug herausragen, nur so ist ein idealer Abtransport der Wärme möglich [13, p. 288]. Wie in Abbildung 2-5 zu erkennen ist, lassen sich jedoch nur geringe spezifische Wärmeströme  $\dot{q}_w$  abführen. Diese liegen im Bereich von 0,1 bis 0,3  $MW/m^2$  und berechnen sich nach Gleichung (2.25).

$$\dot{q}_w = \sigma \varepsilon (T_{W,A}^4 - T_A^4) \quad (2.25)$$

Dabei stellt  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante,  $\varepsilon$  den Emissionsgrad,  $T_{W,A}$  die Außentemperatur der Wand und  $T_A$  die Umgebungstemperatur dar. Anhand von Gleichung (2.25) ist gut zu erkennen, dass der Emissionsgrad einen großen Einfluss auf den Wärmestrom hat. Der Emissionsgrad ist abhängig vom verwendeten Brennkammermaterial und bewegt sich beispielsweise für Nickel von 0,05 bis hin zu oxidiertem Kupfer von 0,9. Da die spezifischen Wärmeströme, wie oben bereits beschrieben, sehr gering sind, lässt sich die Brennkammer eines Großtriebwerkes, welche spezifische Wärmeströme von 5 bis hin zu 100  $MW/m^2$  abzuführen hat nicht ausreichend kühlen. Daher muss hierfür auf eine andere Methode zurückgegriffen werden. [12, p. 10f]

#### Ablationskühlung

Die Ablationskühlung, auch Abnutzungskühlung genannt, basiert auf dem Prinzip des Materialabtrags. Hierbei absorbiert ein Verlustmaterial Wärme, wird dadurch langsam abgetragen und verliert an Volumen [14, p. 3]. Diese Methode erweist sich ebenso als simpel wie auch kostengünstig in der Anwendung und Herstellung. Wie in Abbildung 2-6 zu erkennen ist, bildet sich oberhalb der Pyrolysezone eine Koksschicht. Diese verringert den durchtretenden Wärmestrom und wirkt als eine Art Isolator, ebenso wie die durch Pyrolysegase aufgedickte Wandgrenzschicht. Jedoch werden auch Materialien verwendet, die

keine Koksschicht bilden. Zu beachten ist allerdings, dass der Abtrag zu einer Änderung der Brennkammergeometrie, besonders im Bereich des Düsenhalses, führt. Der Abtrag hat einen starken Einfluss auf den generierten Schub da mit steigendem Düsenhalsdurchmesser bei konstantem Massenstrom der Schub sinkt. Mithilfe von Einbauten im Düsenhals, beispielsweise aus einem Wolfram-Molybdän-Gemisch lässt sich diese Aufweitung verhindern. Als geeignet erweist sich diese Art von Kühlung besonders bei Feststofftriebwerken, da hier kein Kühlmittelstrom verfügbar ist. [12, p. 12f]

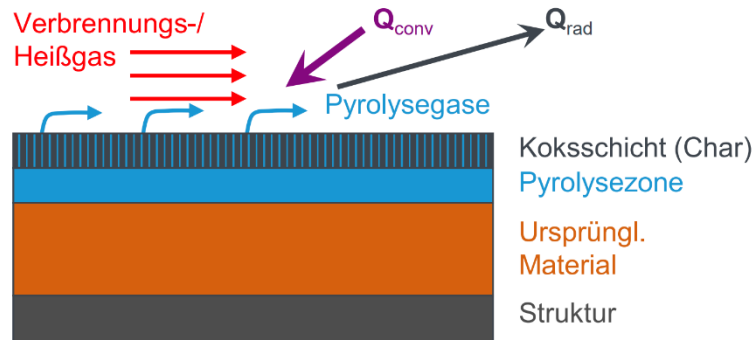


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung der Ablationskühlung [12, p. 12]

### 2.2.2. Aktive Kühlmethoden

Im Folgenden wird ein Überblick über die aktiven Kühlmethoden gegeben. Diese zeichnen sich einerseits durch eine erhöhte Kühlleistung verglichen mit den passiven Methoden und andererseits durch einen vergrößerten Integrations- und Regelaufwand aus.

#### Filmkühlung

Mit der Filmkühlung kommt man zur ersten, in dieser Arbeit vorgestellten, Methode, die eine aktive Kühlung verfolgt. Diese Methode verwendet das Prinzip der Wärmeabfuhr durch Stofftransport. Dabei wird durch Bohrungen in der Brennkammerwand, dargestellt in Abbildung 2-7, ein Fluid eingebracht, das einen Film auf die Bauteiloberfläche legt. Damit ist es sowohl möglich die Grenzschicht aufzudicken und einen verringerten Wärmetransport in die Oberfläche zu generieren, als auch die Brennkammerwand durch Oberflächenverdampfungskühlung zu kühlen. Das verwendete Kühlmedium ist zumeist eine Komponente des Treibstoffes, sodass kein zusätzlicher Stoff mitgeführt werden muss. Besonders geeignet aufgrund seiner geringen Molaren Masse  $M$  und der hohen spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  ist dabei flüssiger Wasserstoff  $LH_2$ . Die Fließrichtung im Kühlkanal hinter der Brennkammerwand kann sowohl als Gleichstrom wie auch Gegenstrom relativ zum Ausströmenden Heißgas ausgeführt werden. Mit einer Anordnung im Gegenstromprinzip wird eine höhere Kühleffizienz erreicht. Hierbei ist zu beachten, dass die Kühlwirkung mit dem Abstand zur Bohrung schnell abnimmt, sodass keine homogene Kühlung ermöglicht wird [12, p. 14ff]. Der maximal abführbare spezifische Wärmestrom ist wie in Abbildung 2-5 zu erkennen erhöht. Damit eignet sich das System für den Einsatz in Kleintriebwerken aber auch zur Unterstützung in Großtriebwerken [15].



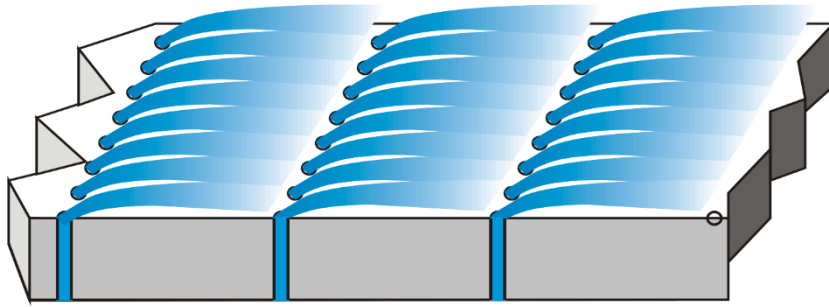


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Filmkühlung [12, p. 15]

### Transpirationskühlung

Die Methode der Transpirationskühlung folgt dem gleichen Prinzip wie die Methode der Filmkühlung. Sie unterscheiden sich jedoch darin, dass das Kühlmittel flüchtig, beispielsweise durch eine poröse Brennkammerwand eingebracht wird und damit eine gleichmäßigere Kühlwirkung erzielt werden kann. Auch hier wird das Kühlmedium hinter der Brennkammerwand in Kühlkanälen bis zum Bestimmungsort transportiert. In Abbildung 2-5 ist zu erkennen, dass hierdurch der maximal abführbare Wärmestrom im Vergleich zur Filmkühlung deutlich gesteigert werden kann. [12, p. 14ff]

### Regenerativkühlung

Beim Konzept der Regenerativkühlung wird Treibstoff in den Kühlkanälen der Brennkammer beziehungsweise der Düse geführt und nimmt die dort entstehenden Wärme auf. Es handelt sich hierbei um ein sehr effektives Verfahren, da ein geschlossener Kreislauf vorliegt und keine Treibstoffverluste erzeugt werden. Falls ein offener Kreislauf mit Verlusten vorliegt, handelt es sich um eine Verlustkühlung. Das Kühlmedium kann sowohl der Oxidator oder der Brennstoff sowie eine Mischung der vorliegenden Kombination sein. Der gesamte Kühlmassenstrom wird in der Brennkammer verbrannt, jedoch kommt es zu erhöhten Druckverlusten in den Kühlkanälen und die Kühlmethode erfordert daher einen höheren Pumpendruck und druckfeste Kühlkanäle [16, p. 54]. Wie auch bei der Filmkühlung kann die Fließrichtung in den Kühlkanälen im Gleichstrom, Gegenstrom oder einer Kombination ausgeführt werden. In Abbildung 2-8 ist der Aufbau der Vulcain 2 Schubkammer dargestellt. Der Brennkammerliner besteht aus einer Kupferlegierung, in welche die Kühlkanäle eingefräst und mit elektrisch leitendem Wachs verschlossen wurden. Anschließend wurde Nickel aufgalvanisiert um der Brennkammer Stabilität und den Kühlkanälen ihre Außenwand zu geben. Daraufhin wird das Wachs durch Erwärmung aus den Kühlkanälen entfernt. Die resultierende Wärmestrombilanz der Regenerativkühlung ist in Gleichung (2.26) dargestellt.

$$\dot{Q} = \alpha_{HG} \pi r_{HG}^2 (T_{HG} - T_{W,HG}) = \alpha_{KK} \pi r_{KK}^2 (T_{W,KK} - T_{KK}) \quad (2.26)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient für die Heißgasseite  $\alpha_{HG}$  ist wie auch der Koeffizienten für die Kühlkanalseite  $\alpha_{KK}$  durch beispielsweise die Materialeigenschaften oder die Drücke beeinflussbar. Die Temperaturen des Heißgases  $T_{HG}$  sowie des Kühlmediums  $T_{KK}$  sind durch die Verbrennungstemperatur beziehungsweise Eintrittstemperatur des Kühlmediums festgelegt. In Gleichung (2.26) lässt sich erkennen, dass eine Erhöhung des Kühlkanalseitigen

Wärmeübergangskoeffizienten eine Erhöhung des abgeführten Wärmestroms und damit eine bessere Kühlung zu erreichen ist. Insgesamt eignet sich diese Methode aufgrund des mittelhohen abführbaren spezifischen Wärmestroms sowohl für kleinere als auch größere Brennkammern. [12, pp. 21-28]

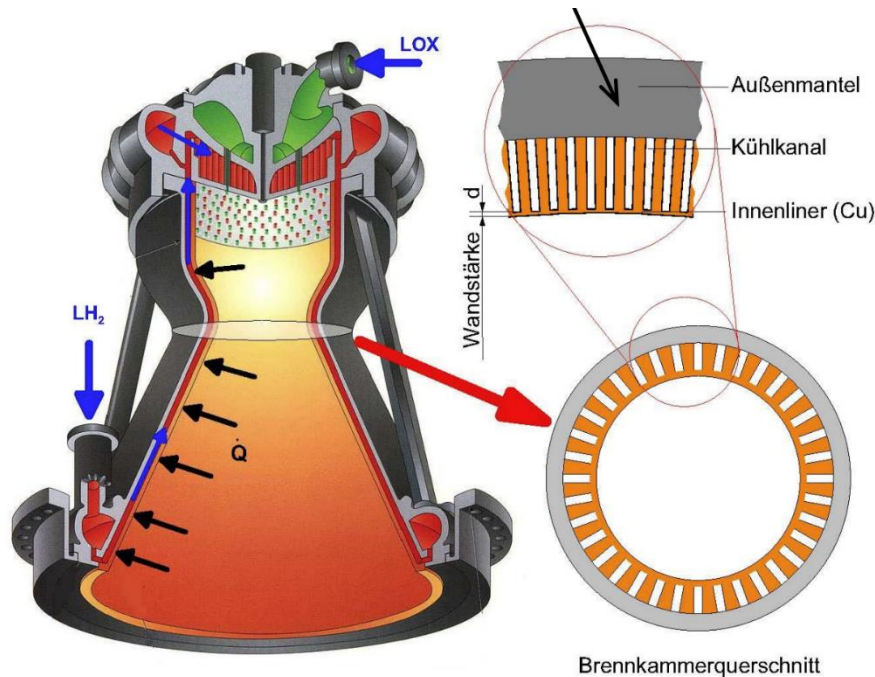


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Regenerativkühlung am Beispiel des Vulcain 2 Triebwerks [12, p. 23]

### Verlustkühlung

Unter der Verlustkühlung versteht man eine offene Regenerativkühlung. Anstelle der Zuführung des aufgeheizte Kühlmediums zur Verbrennung wird das Medium dabei über einen separaten Auslass entspannt und steht der Verbrennung damit nicht mehr zur Verfügung. Eingesetzt wird dieses Konzept häufig zur Kühlung von Düsenenerweiterung. Ein großer Vorteil sind die geringeren Drücke im Kühlkanal und der Pumpe, welche damit zu Gewichtseinsparungen führen. [12, p. 17]

## 2.3. Messmethoden

Messdaten und deren Aufzeichnung stellen die Basis der Auswertung von Versuchen dar. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die Messmethoden der aufgezeichneten Messgrößen gegeben.

### 2.3.1. Temperaturmessung

Die Messung von Temperaturen kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Dabei wird zwischen berührungsbehafteter und berührungsfreier Messung unterschieden. Im Zuge dieser Arbeit wurden lediglich berührungsbehaftete Messungen durchgeführt. Diese Art von Messung unterscheidet zwischen Thermoelementen und der Messung mit Widerstandsthermometern.

Thermoelemente

Thermoelemente bestehen aus zwei Drähten unterschiedlichen Materials. Diese werden an der sogenannten Messspitze miteinander verbunden. Die Verbindung kann dabei durch bloßen Kontakt oder durch dauerhaftes Verschweißen hergestellt werden. Falls an der Messspitze und den anderen beiden Enden der Drähte unterschiedliche Temperaturen anliegen, lässt sich eine Spannung messen. Das Auftreten einer Spannung basiert auf dem Seebeck Effekt. Mithilfe der Spannung lässt sich eine Temperatur bestimmen, welche die Differenz zwischen der Temperatur der Messspitze und der Klemmstelle angibt. Damit fällt diese Messmethode unter die Methoden der Differenzmessungen. [17, p. 19]

Der Seebeck Effekt basiert auf der thermoelektrischen Spannungsreihe. Wie in Abbildung 2-9 zu erkennen, ergeben sich aus unterschiedlichen Materialpaarungen unterschiedliche thermoelektrische Spannungen.

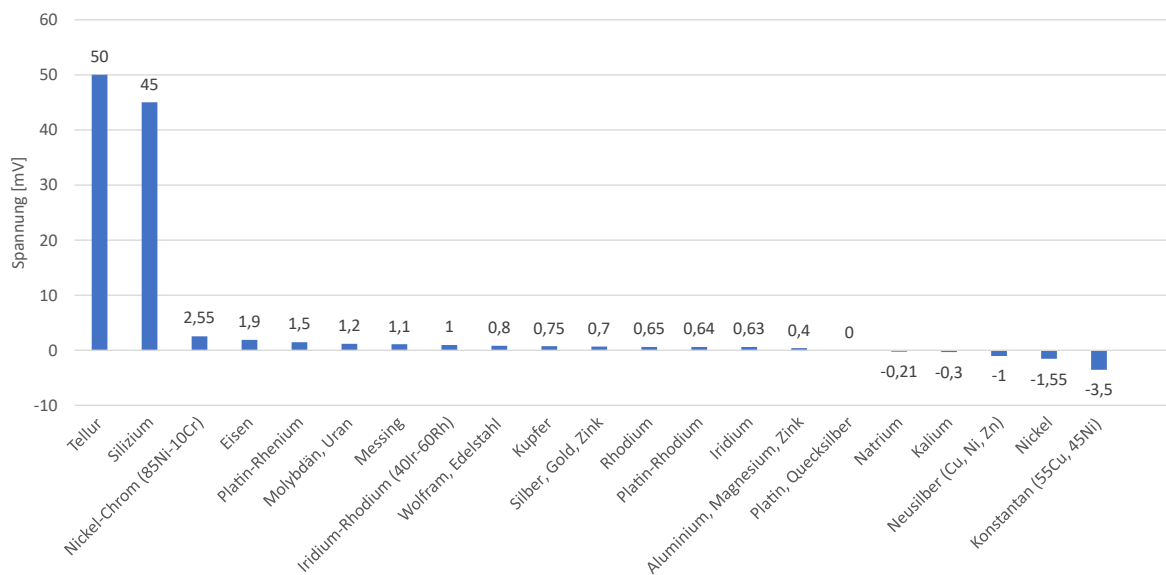


Abbildung 2-9: Thermoelektrische Spannung gegen Platin bei einer Temperaturdifferenz von 100K [17, p. 21]

Im Handel sind unterschiedliche Typen von Thermoelementen erhältlich. Diese besitzen normierte Farben, sodass zwischen den Typen differenziert werden kann. Im hier vorliegenden Fall wurde ausschließlich auf Thermoelemente vom Typ K zurückgegriffen, bei diesem werden die Materialien Chrom-Nickel und Nickel verwendet [18]. Zusätzlich zu den Typen der Thermoelemente wird die Grenzabweichung in DIN EN 60584-2 angegeben. Die Grenzabweichung wird in drei Klassen angegeben und liefert Auskunft über die Abweichung des Thermoelements klassifiziert nach Typ. In dieser Arbeit wurden ausschließlich Klasse 1 Thermoelemente verwendet, diese liefern eine Abweichung von  $\pm 1,5K$  vom realen Wert. [19]

Die Spannungswerte für Temperaturdifferenzen sind genormt und lassen sich in geeigneten Nachschlagwerken nachlesen. Wie in Abbildung 2-9 zu erkennen, sind die auftretenden Spannungen sehr klein, sodass äußerst genau Messgeräte verwendet werden müssen. Da es sich bei Thermoelementen um eine Differenzmessung handelt muss die Temperatur der Klemmstelle, die sogenannten Klemmentemperatur bekannt sein. Des Weiteren muss die Verbindung der Drähte ordnungsgemäß ausgeführt sein, sowie eine Abschirmung der Drähte gegenüber einander realisiert werden. Als großer Vorteil der Thermoelemente erweisen sich

die selbstangetriebene Funktionsweise, die Robustheit, sowie die geringen Kosten. [17, p. 21ff]

### Widerstandsthermometer

Die Messung mit Widerstandsthermometern ist eine Absolutmessung. Dabei wird sich das Prinzip der temperaturabhängigen Änderung des elektrischen Widerstands von Leitern zunutze gemacht. Üblicherweise werden in der Industrie Widerstände aus Platin eingesetzt, dessen Widerstand bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  auf  $100\Omega$  festgelegt wird. Man spricht dabei von einem *PT100* Widerstandsthermometer. Platin wird verwendet, da es ein nahezu lineares Verhalten von Widerstand zu Temperatur besitzt, dieses ist in Abbildung 2-10 dargestellt. [17, p. 10]

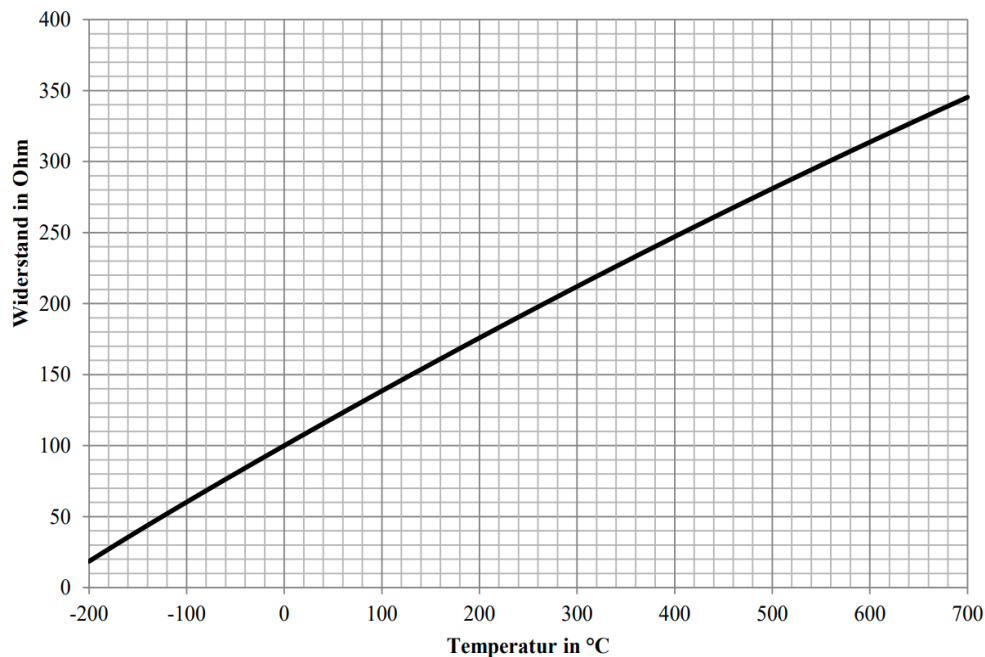


Abbildung 2-10: Zusammenhang zwischen dem elektrischen Widerstand und der Temperatur von Platin [17, p. 12]

Neben Materialien deren Widerstand mit steigender Temperatur ansteigt, sogenannte Heißeleiter, existieren auch Materialien deren Widerstand mit steigender Temperatur sinkt, sogenannte Kaltleiter. Ungeachtet ob Heiße- oder Kaltleiter, lässt sich durch Messung des Widerstands anhand geeigneter Kalibrierkurven die Temperatur bestimmen. [17, p. 11ff]

Widerstandsthermometer lassen sich auf unterschiedliche Art und Weise verschalten um Messfehler, wie beispielsweise die Messung des Leitungswiderstandes zu vermeiden. Dies lässt sich in einschlägiger Literatur nachschlagen. Messfehler können zudem aufgrund der Eigenwärmung der Leitung oder dem Widerstand an der Klemmstelle auftreten. [17, p. 16f]

### 2.3.2. Druckmessung

Die Messung von Druck kann in drei Arten klassifiziert werden, dem Absolutdruck, dem Relativdruck und dem Differenzdruck. Der Absolutdruck beschreibt die Druckmessung gegen das Vakuum, die Relativdruckmessung die Druckmessung gegen den Umgebungsdruck und der Differenzdruck die Druckmessung gegen einen zweiten, beliebigen Druck. Als Beispiel für die Messung des Differenzdrucks kann an dieser Stelle der Druck zwischen dem Einlass und

dem Auslass eines Rohrsystem zur Messung des Druckverlustes über die Messstrecke genannt werden. Zur Bestimmung des Wertes können zwei unterschiedliche Messprinzipien angewandt werden, die unmittelbaren Verfahren und die mittelbaren Verfahren. Als unmittelbare Verfahren gelten die Flüssigkeitsdruckmessgeräte, die Druckwaage und das Kolbendruckmessgerät. Druckwaagen beispielsweise zeichnen sich durch eine sehr hohe Genauigkeit aus und werden daher als Präzisionskalibriergeräte verwendet. Zu den mittelbaren Verfahren zählen ebenso mechanische wie auch elektrische Druckmessgeräte beziehungsweise Sensoren [20, p. 4f].

In der Klasse der elektrischen Drucksensoren sind die Sensoren, die nach dem piezoelektrischen Effekt arbeiten besonders hervorzuheben, da es sich dabei um das Wirkprinzip der in dieser Arbeit verwendeten Sensoren handelt. Bei einem piezoelektrischen Sensor verwendet das Druckmodul einen Kristall. Dieser Kristall erzeugt eine zum aufgetragenen Druck proportionale elektrische Ladung. Der Fachausdruck für diesen Effekt lautet piezoelektrische Effekt. Die erzeugte Ladung liegt in der Größenordnung eines Picocoulomb. Mithilfe eines elektronischen Schaltkreises wird diese Ladung in ein Spannungssignal gewandelt und von einem Messdatenerfassungssystem verarbeitet. Das Messdatenerfassungssystem wandelt das Spannungssignal anhand von Kalibrierpolynomen in den gemessenen Druck um. [21]

### 2.4. Additive Fertigung

Die additive Fertigung, umgangssprachlich auch 3D-Druck genannt, erfreut sich sowohl im privaten als auch industriellen Einsatz immer größerer Beliebtheit und Relevanz [22]. Zudem soll das Marktvolumen laut Prognosen in einzelnen Bereichen bis zum Jahr 2030 um das 20-fache ansteigen [23]. Das Fertigungsverfahren unterscheidet sich von konventionellen Herstellungsmethoden grundlegend. Das zu fertigende Bauteil wird Schicht für Schicht aufgetragen und wächst mit der Zeit zum finalen Bauteil an. Diese flexible Fertigungsweise benötigt keine Formen und ist damit ideal zur Herstellung von Prototypen geeignet. Der Herstellungsprozess wird auch zunehmend zur Fertigung von Kleinserien genutzt. [24]

Additive Verfahren lassen sich mit unterschiedlichsten Materialien durchführen. Die am weitest verbreiteten Materialien sind Kunststoffe und Metalle, aber auch die Verwendung von Keramiken ist heutzutage möglich. Ein großer Nachteil aller Materialien und Druckverfahren ist die Notwendigkeit der aufwendigen Nachbearbeitung. Da alle Bauteile eine erhöhte Oberflächenrauigkeit aufweisen muss je nach Anwendungsfall eine Nachbehandlung der Oberfläche stattfinden. Das Material wird je nach Verfahren als Pulver, Granulat, Filament, Flüssigkeit oder Draht verarbeitet. [25]

### 2.4.1. Schmelzschichtung (FDM)

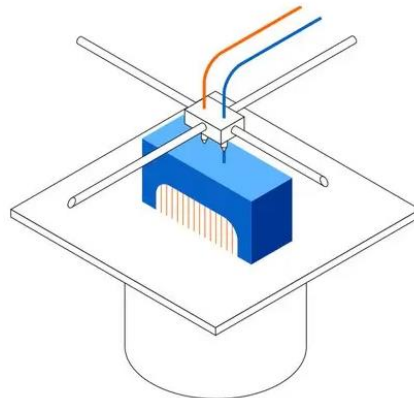


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der FDM Methode [40]

Die Schmelzschichtung, auch FDM genannt, ist eines der beliebtesten und kostengünstigsten Verfahren, welches derzeit angeboten wird. Das Verfahren verwendet ein Kunststoff Filament, welches auf einer Rolle gelagert wird. Diese Rolle versorgt den Drucker mit Werkstoff. Das Filament wird in eine beheizte Düse geführt. Die Düse schmilzt das Filament auf und trägt es Schicht für Schicht zuerst auf das Druckbett, dann auf die vorhergehende Schicht auf. Das Prinzip ähnelt einer Heißklebepistole, die in drei Dimensionen bewegt werden kann. Ein beheiztes Druckbett besitzt hierbei eine essenzielle Funktion, denn nur so haftet die erste Schicht auf dem Druckbett und bildet eine stabile Grundlage für die darauffolgenden Schichten. Enthält das zu druckende Bauteil Überhänge, ist es notwendig Stützstrukturen, in Abbildung 2-11 orange dargestellt, vorzusehen. Ansonsten gäbe es keine darunter liegende Sicht, auf welche der Druckkopf das verflüssigte Filament aufbringen kann. Die Qualität des Druckes ist maßgeblich von der Druckgeschwindigkeit, der Schichtstärke und der Auflösung der Fahrachsen abhängig. [26]

### 2.4.2. Stereolithographie (SLA)

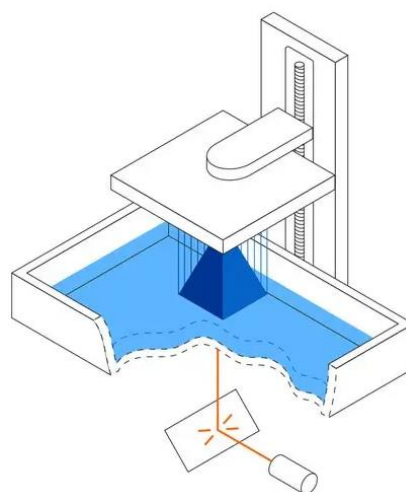


Abbildung 2-12: Schematische der SLA Methode [40]

Die Stereolithographie auch SLA Verfahren genannt, verwendet als Basis einen Werkstoff in flüssiger Form. Dieser wird auch Photopolymer genannt. Das grundsätzliche Prinzip basiert auf der Aushärtung von Stoffen unter Einfluss von UV-Strahlung. Die meisten Photopolymere



reagieren auf eine Wellenlänge von  $\sim 405\text{nm}$ . Hierbei wird der Werkstoff in ein Becken eingefüllt. Dieses Becken besitzt einen transparenten Boden, sodass es von Licht durchdrungen werden kann. Die Platte auf der das Bauteil hergestellt wird fährt in das Becken und stoppt nur wenige Mikrometer über dem Boden des Beckens. Durch gezielte Belichtung des Beckenbodens härtet das Photopolymer aus und haftet an der Platte an. Danach fährt die Platte wieder die Strecke einer Schichtdicke nach oben und der Belichtungsvorgang startet erneut, sodass das Polymer aushärtet und an der vorherigen Schicht anhaftet. Hierdurch entsteht das Bauteil und wird immer weiter aus dem Bad herausgehoben. Das hierfür benötigte Licht kann entweder von einem Monochromatischen LC-Display oder von einem Laser, der über einen Spiegel gezielt abgelenkt wird, eingebracht werden. Dieses Verfahren ist im Vergleich zu FDM zwar geringfügig teurer, jedoch ist die Druckqualität deutlich erhöht. Vergleichbar mit FDM ist auch hier die Verwendung von Stützstruktur notwendig. Nach Beendigung des Drucks wird das Bauteil von der Platte entfernt und mit Isopropanol gereinigt. Nach der Reinigung folgt das Härten in einer UV-Station. Dabei wird das Bauteil von außen mit intensivem UV-Licht bestrahlt. Im Falle eines Kunststoffdruckes werden die Stützstrukturen vor dem Härten entfernt. Verwendet man jedoch eine Mischung aus Keramik und Photopolymer, folgt nach dem Härten das Brennen in einem Brennofen um die Rückstände des Polymers aus dem hergestellten Bauteil zu entfernen. Um die Form des Bauteils beizubehalten ist es notwendig die Stützstruktur erst nach Beendigung des Brennvorgangs zu entfernen (vgl. Kapitel 3.5.2). [27]

### 2.4.3. Selektives Lasersintern (SLS)

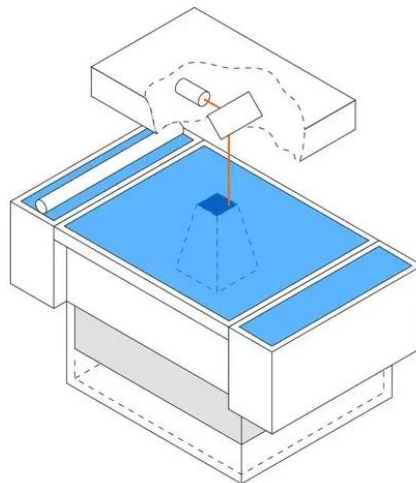


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der SLS Methode [40]

Das Selektive Lasersintern, auch SLS genannt, ist dazu in der Lage unterschiedliche Materialien unter Zuhilfenahme eines Lasers zu verbinden. Hierbei ist es möglich Polymere, Metalle aber auch Keramiken und Sand zu verarbeiten. Mithilfe einer Walze wird ein Pulverbett erstellt. Dieses Pulverbett bildet den Bauraum. Der Laser verschmilzt das verwendete Material an den gewünschten Stellen miteinander. Der Bauraum wird Schicht für Schicht immer weiter abgesenkt, sodass das Bauteil inmitten des Betts entsteht. Hierbei ist es üblich, dass der Bearbeitungsbereich bereits bis knapp unter die Schmelztemperatur des Werkstoffs vorgeheizt ist, sodass der Laser das Material lediglich um wenige Kelvin erhitzen muss. Nachdem der Druck beendet ist, muss das Pulverbett abkühlen, dies kann unter Umständen mehrere Tage andauern, da bei zu schneller Abkühlung ein Verzug der Bauteile auftreten

kann. Daraufhin werden die unversinterten Pulverreste entfernt und das Bauteil kann entnommen werden. Überschüssiges Pulver kann zumeist wiederverwendet werden. Auch hier ist eine Nachbearbeitung notwendig. Da häufig noch Reste des Pulvers am Bauteil anhaften, müssen diese mithilfe eines Sandstrahlers entfernt werden. [28]



### 3. Experimenteller Aufbau

Die Untersuchung der Kühleigenschaften von Lachgas erfordert einen geeigneten experimentellen Aufbau. Dieser muss eine Aufzeichnung der Messdaten, eine möglichst störungsfreie Versuchsdurchführung, sowie eine hohe Ergebnisqualität gewährleisten. Die hierfür notwendigen Bestandteile werden auf den folgenden Seiten näher erläutert.

#### 3.1. Der Prüfstand M11.2

Der Prüfstand M11.2 stellt die Basis der Versuchsreihe dar. Dieser nimmt den Versuchsaufbau während der Durchführung auf und versorgt den Aufbau mit den notwendigen Medien. Zur Vermeidung von Wärmeverlusten durch freie Konvektion verfügt der Prüfstand über eine, in Abbildung 3-1 zu erkennende, Vakuumkammer. Diese besitzt ein Volumen von  $4,2\text{m}^3$  und lässt sich auf einen Druck von bis zu einem Millibar evakuieren. Hierzu werden zwei Vakuumpumpen betrieben.

Des Weiteren verfügt der Prüfstand über eine Echtzeit-Messsystem sowie eine zweistufige Ejektoranlage, die jedoch für die folgenden Versuche nicht benötigt wird. Abbildung 3-1 veranschaulicht den Innerraum der Vakuumkammer. Die hier verbauten Prüflinge lassen sich mithilfe der bereits vorhandenen Gasinfrastruktur mit  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{HC}$  Gasen und Druckluft mit einem Druck von bis zu  $200\text{ bar}$  versorgen. Für den Fall von Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch zu beachten, dass der zur Verfügung stehenden Druck sehr stark von der Temperatur des Mediums abhängt. Bei Standardumgebungsbedingungen beträgt der maximal verfügbare Druck aufgrund der direkten Versorgung aus einer Gasflasche ca.  $50\text{ bar}$ .



Abbildung 3-1: Die Vakuumkammer des M11.2 [22]

## 3.2. Temperaturmessung

Zur Bestimmung der Temperatur, sowohl auf den Rohren als auch im Medium werden Thermoelemente verwendet. Diese folgen dem in Kapitel 2.3.1 erläuterten Wirkprinzip. Für die Messung der Medientemperatur wurden vorkonfektionierte Thermoelemente mit gekapselter Messspitze vom *Typ K* verwendet. Dieses ist beispielhaft in Abbildung 3-2 zu erkennen. Zur Messung werden diese über handelsübliche Einschraubelemente in Swagelok® Rohrverbinder eingeschraubt. Damit wird klar, dass die Fluidtemperatur nicht an willkürlichen Stellen aufgenommen werden kann. Bei Verwendung des genannten Systems ist dies ausschließlich an den Verbindungsstellen der Rohre, welche sich außerhalb der keramischen Heizelemente befinden, möglich.

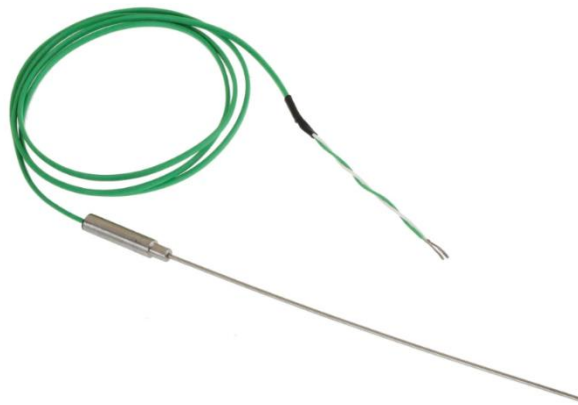


Abbildung 3-2: Thermoelement vom Typ K ohne Anschlussstecker [41]

Für die Bestimmung der Oberflächentemperatur des Rohrs werden Thermoleitungen verwendet. Die dabei verwendete Materialpaarung entspricht ebenfalls dem *Typ K*. Damit die Thermoleitung zur Verwendung als Thermoelement eingesetzt werden kann ist es notwendig die beiden Adern der Leitung zu einer sogenannten Messspitze zu verbinden. Hierfür wird ein Thermoelement-Schweißgerät verwendet. Das andere Ende der Leitung wird mit einem Thermoelementstecker ausgestattet und kann damit als Sensor eingesetzt werden.

In vorangegangenen Arbeiten wurden zur Bestimmung der Rohroberflächentemperatur stets vorkonfektionierte Thermoelemente verwendet. Dabei wurde die Messspitze mit speziellen Hochtemperaturklebern auf der Oberfläche des Rohres angebracht. Dies stellte sich jedoch als unzuverlässig dar, denn die Einsatztemperaturen des Klebstoffes unterschritten die maximalen Oberflächentemperaturen deutlich. Dies führte zur Ablösung des Thermoelements und damit zu einem Ausfall der Messstelle. Für diesen Anwendungsfall bietet ein Thermoelement-Schweißgerät einen entscheidenden Vorteil. Die hergestellten Thermoelemente können hiermit auf die Oberfläche aufgeschweißt werden. Damit wird einerseits die direkte Oberflächentemperatur gemessen und andererseits verbessert sich die Widerstandsfähigkeit gegenüber Ablösen bei hohen Temperaturen deutlich.

### 3.2.1. Position und Nomenklatur

Die Position und Nomenklatur der Messtellen ist in Abbildung 3-3 dargestellt. Die Medientemperaturen werden jeweils an den Rohrverbindern aufgenommen und sind als *TF1* bis *TF4*, aufsteigend in Strömungsrichtung benannt. Die Oberflächentemperaturen des Rohres werden sowohl zu Beginn als auch am Ende jedes Heizers aufgenommen. Hierbei wird für die

Bezeichnung des Schema  $TX.Y$  gewählt. Der Buchstabe  $X$  steht dabei für die Nummer des Heizers und der Buchstabe  $Y$  steht für die Position im Heizer, wobei 1 für Beginn und 2 für das Ende steht. Damit ist die Messstelle  $T3.2$  die Temperatur am Ende des dritten Heizers, in Strömungsrichtung. Einen Überblick über die eingesetzte Temperaturmesstechnik liefert Tabelle 3-1.

Tabelle 3-1: Übersicht über Temperaturmesstechnik und deren Position

<b>Messwert</b>	<b>Typ</b>	<b>Position in Strömungsrichtung [cm]</b>
Fluidtemperatur TF1	Thermoelement Typ K	0
Fluidtemperatur TF2	Thermoelement Typ K	28,5
Fluidtemperatur TF3	Thermoelement Typ K	43,5
Fluidtemperatur TF4	Thermoelement Typ K	72
Rohroberflächentemperatur T1.1	Thermoelement Typ K	3
Rohroberflächentemperatur T1.2	Thermoelement Typ K	12
Rohroberflächentemperatur T2.1	Thermoelement Typ K	16,5
Rohroberflächentemperatur T2.2	Thermoelement Typ K	25,5
Rohroberflächentemperatur T3.1	Thermoelement Typ K	31,5
Rohroberflächentemperatur T3.2	Thermoelement Typ K	40,5
Rohroberflächentemperatur T4.1	Thermoelement Typ K	46,5
Rohroberflächentemperatur T4.2	Thermoelement Typ K	55,5
Rohroberflächentemperatur T5.1	Thermoelement Typ K	60
Rohroberflächentemperatur T5.2	Thermoelement Typ K	69

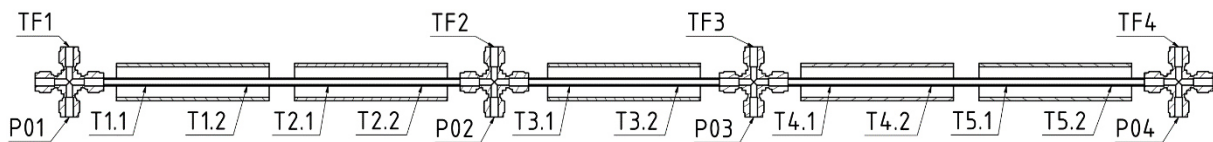


Abbildung 3-3: Position der Messtellen bis Versuchsnummer 65

### 3.3. Druckmessung

Die Druckmessung innerhalb des Versuchsaufbaus erfolgt mithilfe von Drucksensoren der Firma STS. Die Sensoren besitzen einen Messbereich von 0 bis 100 bar und sind in Abbildung 3-4 dargestellt. Diese sind mithilfe geeigneter Anschraubverbinder problemlos mit den Swagelok® Rohrverbindern verschraubbar und garantieren bei sachgerechter Montage eine leckagefreie Verbindung. Zur Gewinnung reeller und genauer Messwerte ist es notwendig die, bei der letzten Kalibrierung des jeweiligen Sensors erhaltenen, Kalibrierpolynome in Labview zu hinterlegen. Nur damit lassen sich die vom Messsystem ausgegebenen Spannungen in den anliegenden Druckwert überführen.

Des Weiteren ist eine Differenzdrucksensor verbaut. Mit dessen Hilfe ist es möglich den Druckverlust zwischen Einlass und Auslass aus der Messstrecke zu erfassen. Auch hier ist es notwendig die zugehörigen Polynome in Labview zu hinterlegen.



Abbildung 3-4: Drucksensor von STS Sensors [37]

### 3.3.1. Position und Nomenklatur

In Abbildung 3-3 sind zusätzlich zu den Positionen der Temperaturmessstellen ebenfalls die der Drucksensoren dargestellt. Analog zu den Medientemperaturen wird der Druck an den vier Rohrverbindern aufgenommen. Diese werden mit P01 bis P04, aufsteigend stromabwärts, benannt. Auch hier ist zu erwähnen, dass die Druckmessung aufgrund der Montage ausschließlich an den Rohverbindern positioniert werden kann und daher die Variationsmöglichkeiten stark beschränkt sind. Der Differenzdrucksensor ist in Abbildung 3-3 nicht dargestellt. Dieser misst den Differenzdruck zwischen P01 und P04.

Für die Drucksensoren erfolgte nach Versuchsnummer 65 ein Umbau. Aufgrund der hohen Temperaturen an den Sensoren kam es zu einem Temperaturdrift, dieser führte zu fehlerhaften Messungen. Daher war ein Tausch der Sensoren notwendig. Des Weiteren wurde in diesem Zug die Position der Sensoren so modifiziert, dass Sie von der Trägerplatte des Aufbaus verdeckt werden, um einen Schutz vor der Wärmestrahlung zu bieten. Die neu verbauten Sensoren waren ebenso kalibriert, hier muss lediglich das neue Polynom im Messdatenerfassungssystem eingetragen werden. Einen Überblick über die verbaute Druckmesstechnik liefert Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Übersicht über Druckmesstechnik und deren Position

<i>Messwert</i>	<i>Typ</i>	<i>Position in Strömungsrichtung [cm]</i>
Fluiddruck P01	STS Typ TM; 0 – 100bar	0
Fluiddruck P02	STS Typ TM; 0 – 100bar	28,5
Fluiddruck P03	STS Typ TM; 0 – 100bar	43,5
Fluiddruck P04	STS Typ TM; 0 – 100bar	72
Differenzdruck	Bell & Howell; 0 – 500mbar	–

### 3.4. Keramische Heizelemente

Zur Erwärmung des Rohrs werden keramische Heizelemente verwendet. Diese wurden im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit als geeignetste Alternative zur Beheizung der Messstrecke ausgewählt. Die Elemente werden von der Rauschert GmbH hergestellt. In die Umgebende  $Al_2O_2$  Isolationskeramik wurden Platinleiterbahnen eingesintert.

Laut Herstellerangaben erreicht der Heizer an der Innenseite eine Temperatur von ca.  $1100^\circ C$ . Für kurze Zeit ist es möglich diesen auf bis zu  $1300^\circ C$  zu erhitzen. Die maximale elektrische Leistung  $P_{el,max}$  beträgt  $1050W$ . Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass diese sowohl nach innen als auch nach außen abgestrahlt wird. Im hier vorliegenden Fall ist jedoch nur die nach innen abgestrahlte Leistung nutzbar. Unter Annahme gleicher Emissionsgrade  $\varepsilon$  nach innen und außen, lässt sich die anteilige nach innen abgestrahlte Leistung  $P_{innen}$  mithilfe der äußeren und inneren Mantelfläche zu  $465W$  bestimmen. Die technischen Daten, sowie die Zeichnung des Heizers lassen sich in Anhang A.2 nachschlagen.

Tabelle 3-3: Technische Daten eines Heizelements

<i>Elektrische Leistung <math>P_{el,max}</math></i>	<i>1050W</i>
<i>Mantelfläche außen <math>A_a</math></i>	<i>6429mm<sup>2</sup></i>
<i>Mantelfläche innen <math>A_i</math></i>	<i>5099mm<sup>2</sup></i>
<i>Nutzbare Leistung <math>P_{innen}</math></i>	<i>465W</i>

### 3.5. Keramische Lagerelemente

Die Lagerelemente liefern die Möglichkeit die keramischen Heizer zu lagern. Ohne die Elemente ist es nicht möglich die Heizelemente zu positionieren und deren Position über den gesamten Versuchszeitraum zu gewährleisten.

#### 3.5.1. Anforderungen

Die gestellten Anforderungen an die Lagerelemente sind anspruchsvoll. Neben einer hohen Temperaturbeständigkeit ist ebenso eine Formstabilität bei hohen Temperaturen notwendig. Des Weiteren sollte das Material für eine Verwendung im Vakuum geeignet sein und damit möglichst keine geschlossenen Poren mit Gaseinschlüssen aufweisen. Diese könnte aufbrechen und damit zu einer Verformung des Bauteils bei Evakuierung der Testkammer führen. Aufgrund dieser geforderten Eigenschaften fiel die Entscheidung auf ein Bauteil aus keramischem Material.

#### 3.5.2. Herstellung

Die Herstellung der Elemente soll vor Ort vorgenommen werden. Hierzu wird auf ein Additives Fertigungsverfahren, die Stereolithografie (vgl. 2.4.2) zurückgegriffen. Wie bereits beschrieben ist es möglich Harze mit keramischen Partikeln zu erwerben. Hier wurde das Produkt „Porcelite“ von Tethon 3D verwendet. Es besteht aus einem Gemisch, von Photopolymer, welches empfindlich auf eine Wellenlänge von  $405nm$  reagiert, und feinen



Partikel aus Keramik [29]. Der Druck wird ausgeführt in einem „Photon Mono X“ von Anycubic. Dieser besitzt eine LC-Display mit einer 4k Auflösung wodurch einer hohe Detailtreue und Genauigkeit garantiert werden kann.

Der erfolgreiche Druck wird von der Build Plattform abgelöst und zur Reinigung ungefähr zehn Minuten in Propan-2-ol geschwenkt. Dieser Vorgang löst nicht ausgehärtetes Harz, welches sich auf dem Bauteil abgesetzt hat, ab und sorgt damit für eine maßhaltige und reine Oberfläche. Daraufhin wird das Bauteil zwischen sechs und acht Stunden im UV-Härter behandelt, sodass das Harz komplett ausgehärtet ist.

Um die endgültige Geometrie und Temperaturbeständigkeit zu erhalten, wird das Bauteil in einem Brennofen gehärtet. Dabei wird das verbindende Polymer ausgebrannt und die keramischen Partikel versintern zu einem reinen Bauteil. Beim Ausbrennen des Polymers kommt es zu einer verstärkten Rauchbildung innerhalb des Ofens und eine starken Geruchsbeeinträchtigung. Daher ist es zu empfehlen den Brennvorgang in einem gut durchlüfteten oder mit Abzug versehen Raum beziehungsweise im Freien durchzuführen. Der gesamte Prozess des Brennens ist in Tabelle 3-4 dargestellt und dauert circa 22 Stunden zuzüglich des natürlichen Abkühlvorgangs.

Tabelle 3-4: Temperaturverlauf Brennvorgang

<b>Zieltemperatur</b> [°C]	<b>Änderungsrate</b> $\left[\frac{K}{h}\right]$	<b>Haltedauer</b> [h]
240	40	2
600	40	–
1300	150	0,33
20	–	–

Nach dem Abkühlen lässt sich das Teil aus dem Ofen entnehmen und die Stützstruktur, welche beim Brennvorgang dafür sorgt, dass das Bauteil sich nicht verformt, kann entfernt werden. Da es beim Brennen zu einer Schrumpfung kommt ist es notwendig eine Skalierung des Drucks vorzunehmen, sodass das Bauteil zum Ende die gewünschten Maße besitzt. Dieser Skalierungsfaktor konnte anhand einiger Probebrände auf einen Wert von 1,17 bestimmt werden.

### Herausforderungen

Die Herstellung der Halter ist mit vielfachen Herausforderungen verbunden. Begonnen beim Druck des Bauteils bis hin zum Brennen der Keramik. Zu Beginn der Arbeit stellte sich als eines der größten Probleme die erfolgreiche Anhaftung der ersten, sogenannte Base Layer, an die Build Plattform dar. Der Hersteller des Harzes gibt hierfür eine Expositionszeit je Layer von ca. 20s an. Dies führte jedoch nicht zu einem Erfolg. Sämtliche Hinweise, wie das Anrauen der Platte, zur Erhöhung der Haftung, sowie eine ausgiebige Entfettung der Plattform blieben ebenfalls ohne Erfolg. Das Schrittweise erhöhen der Expositionszeit auf 200s führte schließlich zu einem Anhaften der Base Layer an der Plattform. Für alle anderen Layer ist eine Expositionszeit von 15s vollkommen ausreichend.

Die sehr hohe Abrassivität der Keramikpartikel ist ebenfalls zu berücksichtigen. Diese führt zu einem um den Faktor zehn erhöhten Verschleiß des Bodens des Harzbeckens. Damit erhöht sich die Rauigkeit des Bodens deutlich. Somit ist die Haftung des Bauteils am Boden höher

als an der Plattform und es kommt zu einem Ablösen dessen von der Plattform. Die Verdrängung des Harzes und die davon hervorgerufenen Strömung zwischen Platte und Boden fördert einen Abtrag von Aluminium an der Plattenunterseite.

Eine sehr hohe Anzahl an schnell absetzenden Keramikpartikel führt zu einer teils nicht ausreichend durchmischten Flüssigkeit, welche, wie in Abbildung 3-5 zu erkennen, zu einem kompletten Zerfall bzw. Auflösen des Bauteils aufgrund eines erhöhten Polymeranteils im Werkstück führt. Daher ist es notwendig das Harz vor der Verwendung ausgiebig zu durchmischen.



Abbildung 3-5: Fehlgelagerter Keramikbrand im inneren des Brennofens aufgrund zu hohen Polymeranteils im Werkstück

Des Weiteren kommt es beim Brennvorgang zu einer Destabilisierung der Bauteile zwischen der Phase des Ausbrennens des Polymers und der Versinterung der Keramikpartikel. Dies führt, bei zu geringer und schwacher Stützstruktur, wie in Abbildung 3-6 zu erkennen ist, zu einer Verformung des Bauteils. Umgehen lässt sich diese Verformung mit einer engmaschigeren und stärkeren Stützstruktur, die unter keinen Umständen vor dem Brennen entfernt werden darf.

Im linken, rot markierten, Bereich von Abbildung 3-6 ist eine deutliche Rissbildung im Bauteil zu erkennen. Zunächst wurde angenommen, dass dies auf einen zu schnellen Brennvorgang zurückzuführen ist. Da das ausgasende Harz nicht ausreichend schnell durch das Material entweichen kann und dadurch das Material aufbricht. Brennversuche mit flacherer Temperaturkurve widerlegten diese Theorie jedoch größtenteils. Eine Umgestaltung des Lagerelements führte ebenso wenig zu einer Verbesserung des Ergebnisses. Als schlussendliche Ursache des Problems wurde das bereits oben genannten absetzen der Keramikpartikel im Harz ausgemacht. Wie bereits beschrieben tritt dies zeitnah nach Beginn des Drucks auf und führt zu einer inhomogenen Durchmischung der Flüssigkeit.

Zur Vermeidung dieser Problematik konnte jedoch keine zeitnahe Lösung ausgemacht werden, sodass im vorliegenden Versuchsaufbau auf Halter mit gerissener Struktur zurückgegriffen werden musste. Da dieses Bauteil jedoch keinen hohen Mechanischen Lasten ausgesetzt ist, beeinflusst dies die Versuchsdurchführung nicht.

Für zukünftige Versuchsaufbauten wurde bereits ein neuer Drucker, welcher explizit für die Verwendung von keramischen Harzen zugelassen wurde, angeschafft. Erste Testdrucke erwiesen sich hier als sehr vielversprechend und deutlich formstabiler.

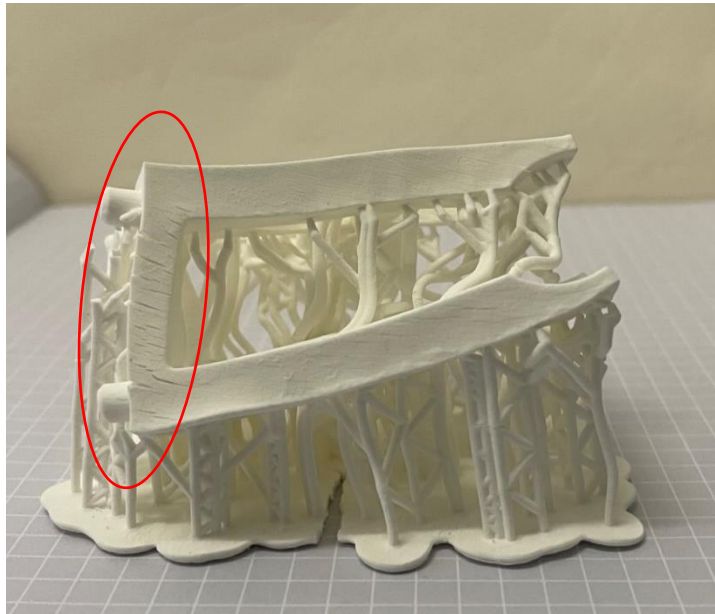


Abbildung 3-6: Deutlich verformtes Bauteil nach Brand im Ofen

### 3.6. Versuchsaufbau

Der in der Vakuumkammer montierte Versuchsaufbau ist in Abbildung 3-7 dargestellt. Zur Durchströmung werden Rohre aus 1.4571 Edelstahl mit einem Außendurchmesser von  $6\text{mm}$  und einer Wandstärke von  $1\text{mm}$  verwendet [30]. Um den Absorptionsgrades des Rohrs zu steigern wurde dieses an den beheizten Stellen mit einem hochtemperaturbeständigen schwarzen Lack beschichtet. In den grünen Kreisen sind die vier Drucksensoren zu erkennen. Ebenso sind die fünf verbauten keramischen Heizer inklusive deren Halter dargestellt. In der Abbildung ist des Weiteren der Differenzdrucksensor rot hervorgehoben.

Auf der abgewandten Seite ist die Stromversorgung der Heizelemente sowie die Führung der Thermoleitungen installiert. Zum Schutz vor Wärmestrahlung sind die elektrischen Kabel zusätzlich durch Glasseideband isoliert. Dies lässt sich in Abbildung 3-8 erkennen. Außerdem erhält man in dieser Abbildung einen Einblick auf die Einführung der Thermolemente in die keramischen Heizer, hier rot umrahmt. Es ist zu beobachten, dass diese weit ins Innere des Heizers eingeführt sind und dort auf dem Rohr angeschweißt wurden. Für die Führung der Thermoleitung ist es wichtig darauf zu achten, dass diese möglichst weder mit dem Rohr noch mit dem Heizelement in Kontakt kommt. Ansonsten könnte es zu einem verbrennen der Isolierung und zu einem Kurzschluss des Thermolements kommen.

An der Stirnseite des Tankes befindet sich die in Kapitel 3.1 genannte Medienversorgung des Tankes. Zum Zug kommen für die anstehende Versuchsreihe die Stickstoff- und Lachgasversorgung. Hierdurch ist es möglich den Aufbau während der Aufheizphase mit Stickstoff zu Spülen und erst zu Beginn der Versuchsreihe Lachgas zu verwenden. Ebenso an der Stirnseite befinden sich die Anschlüsse der Thermolemente und der Drucksensoren um diese von dort aus der Vakuumkammer zum Messsystem zu führen.



Am rechten Bildrand wird das heiße Gas durch einen Hochdruck-Edelstahl-Wellschlauch aus dem Rohr durch den Tank nach außen abgeführt. Dort tritt das Gas durch ein Nadelventil, welches zur Regulierung des Massenstroms verwendet wird, nach außen.

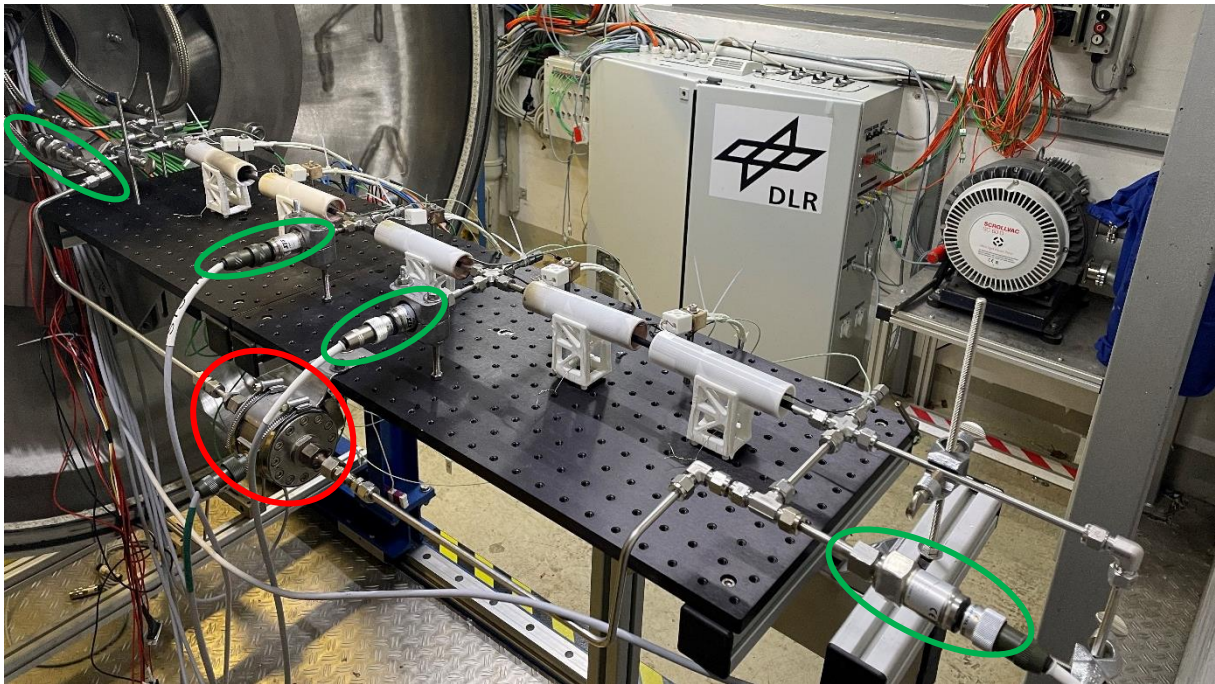


Abbildung 3-7: Finaler Versuchsaufbau montiert am Deckel des Vakuumtanks. Grün eingezeichnet die Drucksensoren, rot eingezeichnet der Differenzdrucksensor.

Vor Beginn der Versuche wird die noch zu erkennende, schwarze, Trägerplatte mit Alufolie ausgekleidet. Aufgrund der langen Testzeiten würde sich diese aufgrund ihres ansonsten hohen Emissionsgrades unnötig stark aufheizen und damit das Risiko einer ungewünschten Verformung des Aufbaus erhöhen.

Es ist anzumerken, dass nach dem zweiten Versuchstag die Montage der Drucksensoren aufgrund von Temperaturdrift so angepasst wurde, dass diese durch die Montageplatten abgeschirmt werden und damit nicht im direkten Wärmestrahlungsbereich der Heizer liegen.

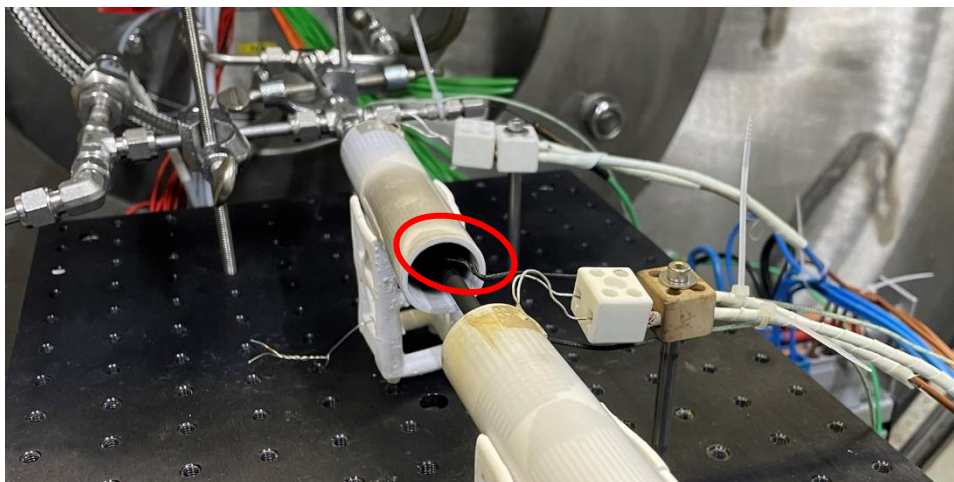


Abbildung 3-8: Detailansicht der montierten Heizelemente

## 4. Durchführung

Die Durchführung der Versuche findet im zuvor beschriebenen Prüfstand mit dem in Kapitel 3.6 vorgestellten Versuchsaufbau statt. Zu Beginn wird der Tank geschlossen und bis auf einen Druck von ca. 4 mbar evakuiert, sodass man von einem Grobvakuum sprechen kann und ausschließlich einen Wärmetransport in Form von Wärmestrahlung zwischen Rohr und Heizelement annehmen kann. Daraufhin wird begonnen das Rohr mit Stickstoff ( $N_2$ ) zu spülen, dies ermöglicht ein langsames Aufwärmen der Heizer und das Einstellen eines stationären Betriebspunkts. Es ist zu betonen, dass ein langsames Aufwärmen sowie, nach Versuchsende, Abkühlen der Heizer äußerst wichtig ist. Eine Nichtbeachtung dieser Vorgabe kann zu Haarrissen in der Keramik und damit zu Totalausfall des Heizers führen. Zum Aufwärmen der Heizer wird eine Spannung angelegt, diese führt je nach Größe zu der mit Gleichung (4.1) berechenbaren Oberflächentemperatur. Hierfür notwendig ist die Kenntnis des Temperaturkoeffizienten  $\alpha$ , von  $0,003 \frac{1}{K}$ , sowie der Initialwiderstand des Heizers  $R_0$  von  $2,3 \Omega$ . Beide Werte sind vom Hersteller ermittelt. Unter Zuhilfenahme von Formel (4.2) lässt sich der Widerstand des erhitzten Heizers  $R_W$  mittels der am Heizer anliegenden Spannung  $U_H$  und Stromstärke  $I_H$  bestimmen.

$$T = \frac{\left(\frac{R_W}{R_0} - 1\right)}{\alpha} + 20K \quad (4.1)$$

$$R_W = \frac{U_H}{I_H} \quad (4.2)$$

Nach Erreichen eines thermisch stationären Zustands, wird die Stickstoffversorgung abgeschaltet und das Rohr mit Lachgas ( $N_2O$ ) durchspült. Aufgrund der unterschiedlichen Wärmekapazitäten von Stickstoff und Lachgas kommt es dabei zu einer Änderung der Temperaturen. Daher muss nach dem Umschalten die Einstellung eines stationären Verhaltens abgewartet werden. Anschließend kann mit der Aufzeichnung der Messdaten begonnen werden. Ist die Aufzeichnung beendet wird der nächste Betriebspunkt eingestellt und bei Erreichen stationärer Bedingungen wiederum mit der Messdatenaufzeichnung begonnen. Die Durchführung findet aufsteigend von niedrigen zu hohen Heizleistungen statt. Damit können die sonst notwendigen Abkühlphasen der Heizelemente und des Systems vermieden werden. Für die Einstellung des Massenstroms wird das Nadelventil am Auslass des Tanks verwendet. Der Massenstrom wird je Leistungsstufe vom hohen hin zum niedrigen Wert abgeprüft, damit die Abkühlphasen des Rohrsystems umgangen werden können. Zur Berücksichtigung von Hysterese-Effekten wurde die Durchführung zu jeder Zeit in dieser Reihenfolge vorgenommen.

### 4.1. Variierte Parameter

Bereits in vorangegangenen Arbeiten wurde der Einfluss der Rohrmaterialien untersucht. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet. Zur Variation werden drei Parameter ausgewählt.

Zum einen ist dies die Leistung beziehungsweise Wärmestrom oder auch Oberflächentemperatur der Heizelemente. Diese lässt sich wie oben genannt berechnen. Die genannten Werte sind direkt abhängig von der am Heizer angelegten Spannung  $U_H$ . Da die Temperatur der Heizer unter einer Ansteuerspannung von  $6V$  nicht ausreichend hoch liegt und bei einer Spannung von bis zu  $9V$  die Bereiche von Interesse abgedeckt sind, wird die Spannung wie in Tabelle 4-1 abgebildet variiert.

Tabelle 4-1: Parametermatrix des Massenstroms, der Spannung und des Drucks

<b>Massenstrom <math>\dot{m}_{N_2O}</math> [<math>\frac{g}{s}</math>]</b>	<b>Spannung <math>U_H</math> [V]</b>	<b>Druck <math>p_{in}</math> [bar]</b>
0,1	6	10
0,3	7	20
0,5	8	30
0,7	9	40
0,9		

Zum anderen wird der Druck  $p_{in}$  des Lachgases geändert. Jedoch ist dieser stark vom Dampfdruck bei der vorliegenden Fluidtemperatur abhängig. Wie in Abbildung 4-1 zu erkennen ist, beträgt der Dampfdruck bei  $0^\circ C$  ca.  $30bar$ . Um jedoch einen Druck von  $50bar$  zu ermöglichen wird bereits eine Fluidtemperatur von  $20^\circ C$  benötigt. Da bei der Expansion des Gases aus der Flasche eine weitere Abkühlung stattfindet ist es, je nach Außentemperatur, ohne weitere technische Hilfsmittel, wie beispielsweise ein zusätzliches Heizen des Fluids, nicht möglich einen Druck von  $50bar$  zu erreichen. Daher wurde der maximale Druck für die Versuchsreihe, auf etwa  $40bar$  beschränkt.

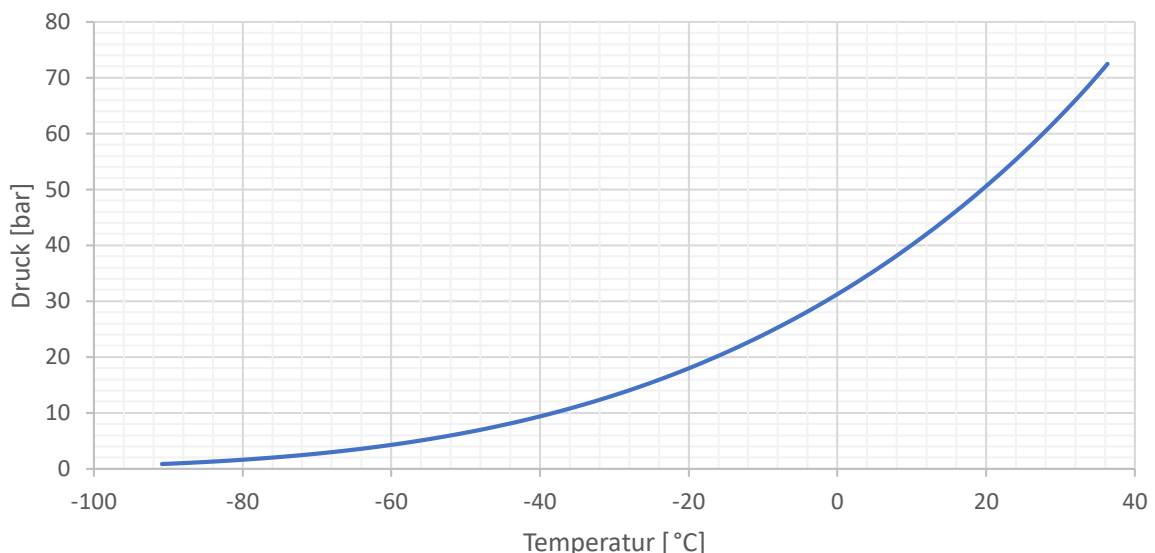


Abbildung 4-1: Dampfdruckkurve von Lachgas

Als dritter Parameter wird der Massenstrom  $\dot{m}_{N_2O}$  des Fluids variiert. Mithilfe des Massenstroms lässt sich die Kühlwirkung von Lachgas bestimmen. In der Theorie lässt sich bei größeren Massenströmen mehr Energie vom Rohr auf das Medium übertragen und damit die Temperatur des Werkstoffs niedriger halten. Bei niedrigen Massenströmen hingegen erhöht sich die Temperatur von Werkstoff und Medium, sodass Zersetzungsprozesse auftreten

können. Um dies zu untersuchen wird der Massenstrom wie Tabelle 4-1 beschrieben verändert.

Die beiden erstgenannten Parameter werden dabei mithilfe von Labview, welches zur Prüfstandssteuerung verwendet wird, vorgegeben. Ein PID-geregelter Domdruckminderer regelt den Druck auf die gewünschte Größe. Die Ansteuerspannung und die daraus resultierende Stromstärke wird mithilfe eines Ring-Stell-Transformators angelegt. Im Gegensatz hierzu gestaltet sich die Einstellung des Massenstroms herausfordernd. Da das Nadelventil am Auslass nur manuell bedient werden kann ist es notwendig für jeden Versuch den Massenstrom händisch am Nadelventil einzustellen. Aufgrund der kleinen Dimension des Massenstroms und der großen Transienten des Coriolis ist diese Einstellung aufwendig. Daher ist die Anzahl der Versuchsdurchführungen pro Tag begrenzt. Zudem birgt diese manuelle Steuerung ein deutliches Risiko einer möglichen Fehlerquelle. Da die austretenden Gase nicht unbedenklich sind, ist die Betätigung des Ventils ausschließlich von Fachpersonal mit der notwendigen persönlichen Schutzausrüstung möglich [31].

Zur Erstellung der Versuchsreihe wurden alle oben aufgelisteten Parameter in jeglichen Kombinationen miteinander abgeprüft. Dies führt zu einer Anzahl von 80 unterschiedlichen Betriebspunkten.

## 5. Auswertung

Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt mithilfe von Labview. Die dabei erzeugten Messdatensätze verfügen über eine sehr hohe zeitliche Auflösung und damit aufgrund einer Aufnahmezeit von ungefähr 20s über eine große Anzahl von Messpunkten. Da bei den durchgeführten Versuchen ausschließlich stationäre Bedingungen betrachtet wurden lässt dies eine Mittelung über die gesamte Aufnahmezeit zu. Ungewünschtes Messrauschen kann hierdurch ausgeglichen werden. Das Auslesen der Daten aus den Messdateien, die Mittelung der geforderten Parameter, sowie die folgenden Berechnungen wurden mithilfe eines Matlab Skripts vorgenommen.

### 5.1. Temperaturen

Vorab ist anzumerken, dass alle folgenden Diagramme in der Darstellung den Verlauf der Kurven zwischen den Messdaten interpolieren. Dies stellt damit keine exakte Nachbildung der betrachteten Größen dar und ist zum Verständnis des Zusammenhangs und zur besseren Übersichtlichkeit dargestellt.

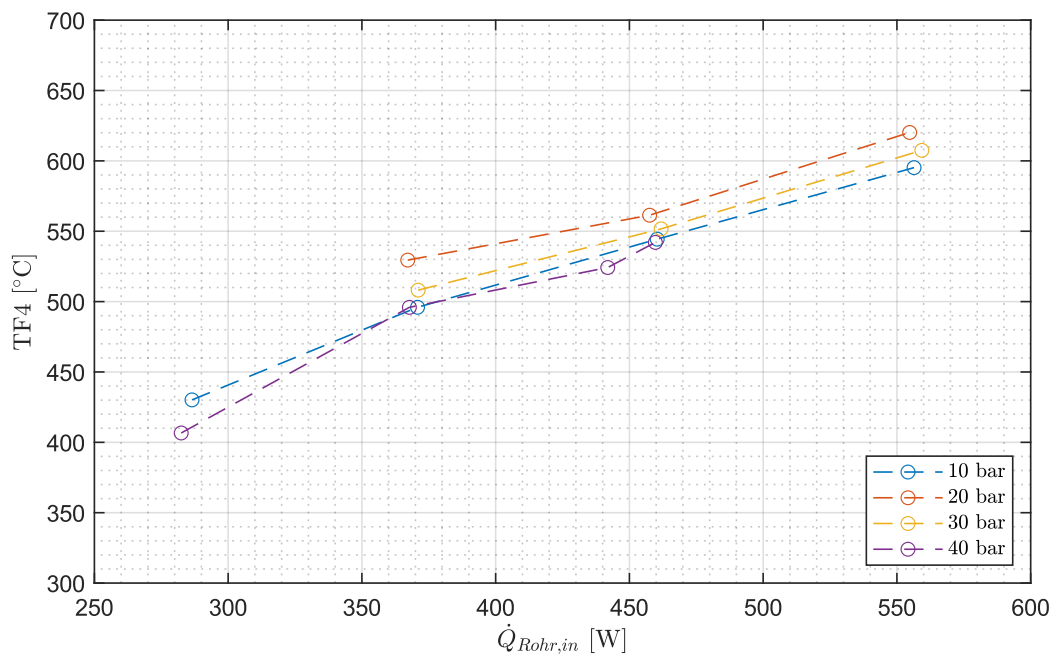


Abbildung 5-1: Fluidtemperatur  $TF4$  über die eingestrahlte Leistung für verschiedene Drücke bei konstantem Massenstrom von  $0,5 \text{ g/s}$

Die Analyse beginnt mit der Betrachtung der Fluidtemperaturen am Auslass aus dem System. In Abbildung 5-1 ist der Verlauf der Fluidtemperatur  $TF4$  über die von den Heizelementen auf das Rohr eingestrahlte Leistung  $\dot{Q}_{Rohr,in}$  bei verschiedenen Druckniveaus für einen Lachgasmassenstrom  $\dot{m}_{N_2O} = 0,5 \text{ g/s}$  zu erkennen. Die Abweichung des Temperaturverlaufs von einem nahezu linearen Verlauf bei einem Druck von ungefähr  $40 \text{ bar}$  lässt sich durch den Defekt eines Heizers in diesem Versuch erklären. Es zeigt sich, dass die Temperaturen für unterschiedliche Druckniveaus sehr nahe beieinander liegen. Daraus lässt sich schließen, dass die Wärmeübertragung von Rohr auf das Fluid unabhängig vom Druck des Fluid ist.



Diese Annahme lässt sich ebenso aus den Gleichungen (2.9) bis (2.15) ablesen und deckt sich damit mit der Theorie des Wärmeübergangs durch Konvektion (vgl. Kapitel 2.1.2). In Gleichung (5.1) ist dieser Zusammenhang dargestellt. Wie zu erkennen, bleibt die Reynoldszahl  $Re_d$  für einen konstanten Massenstroms, unabhängig vom Druck, konstant. Jedoch ist eine leichte Abweichung der Kurven voneinander zu erkennen, allerdings lässt sich dieses Verhalten auf Messungenauigkeiten zurückführen.

$$Re_d = \frac{u d_h \rho}{\eta} = \frac{\dot{m}_{N_2O} d_h}{A_{Fluid} \eta} \quad (5.1)$$

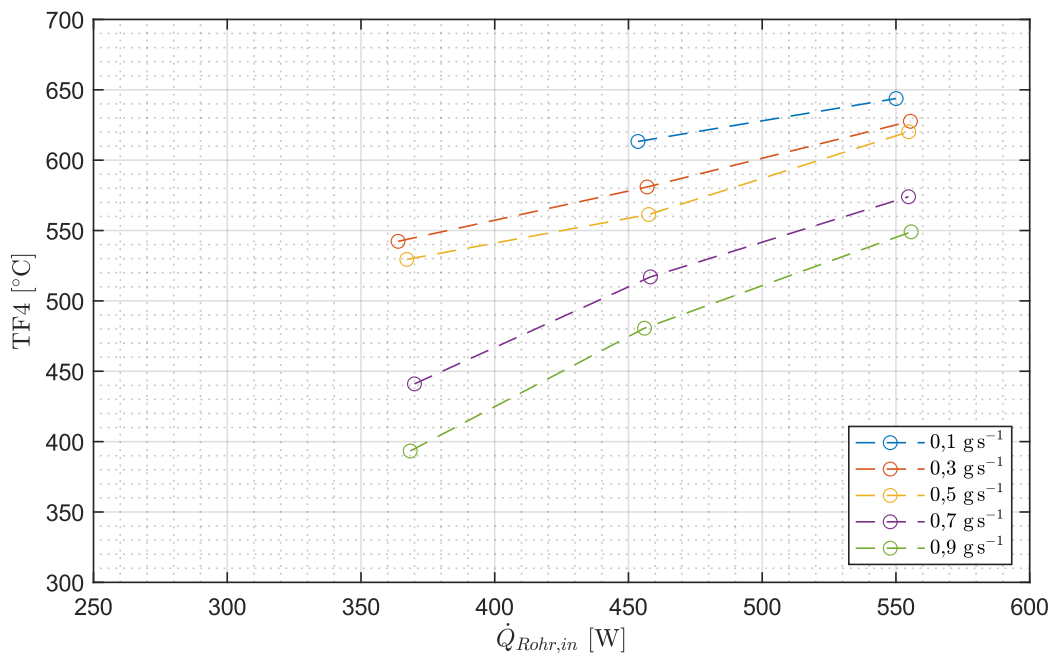


Abbildung 5-2: Fluidtemperatur TF4 über die eingestrahlte Leistung für verschiedene Massenströme bei konstantem Druck von 20 bar

Eine Betrachtung des Verlaufs der Temperatur  $TF4$  über die Leistung  $\dot{Q}_{Rohr,in}$  für verschiedene Massenströme bei einem konstanten Druck von 20bar, wie in Abbildung 5-2 dargestellt, lässt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen eingebrachter Leistung und der Temperatur am Austritt erkennen. Wie zu erwarten, heizt sich das Fluid bei niedrigerem Massenstrom und gleichem Wärmeeintrag stärker auf. Durch die verlängerte Aufenthaltszeit aufgrund der geringeren Strömungsgeschwindigkeit verlängert sich die Dauer des Wärmeeintrags auf ein einzelnes Fluidteilchen und damit ist die von ihnen aufgenommene Energie umso größer.

Entgegen hierzu zeichnet Abbildung 5-3, ein anderes Bild. Dort ist die Fluidtemperatur über die Lauflänge aufgetragen. Der Druck des Fluids beträgt 20bar und die elektrische Leistung ca. 5kW. Für Messpunkte höherer Massenströme verläuft die Temperatur des Lachgases nahezu linear. Das Abflachen des Temperaturanstiegs zum Ende der Messstrecke ist auf eine erhöhte Wärmeabstrahlung vom Rohr in die Umgebung aufgrund der höheren Oberflächentemperatur zurückzuführen. Hieraus resultiert ein geringeren Nettowärmestrom auf das Fluid. Die Betrachtung des Messpunkts mit dem geringsten Massenstrom von 0,12 g/s zeigt einen deutlichen Ausschlag der Temperatur im Umfeld der zweiten Messstelle. Stromabwärts gleicht sich die Temperatur mit zunehmender Lauflänge den ebenfalls

dargestellten Temperaturen an. Somit lässt sich feststellen, dass es bei niedrigen Massenströmen zu einem zusätzlichen Wärmeeintrag im Rohr kommt. Da sowohl die elektrische Leistung der Heizelemente als auch die optischen Parameter der Werkstoffe unverändert sind, liefern diese Faktoren keine Erklärung für dieses Verhalten. Der Temperaturanstieg muss somit auf eine Wärmefreisetzung innerhalb des Rohres zurückzuführen sein.

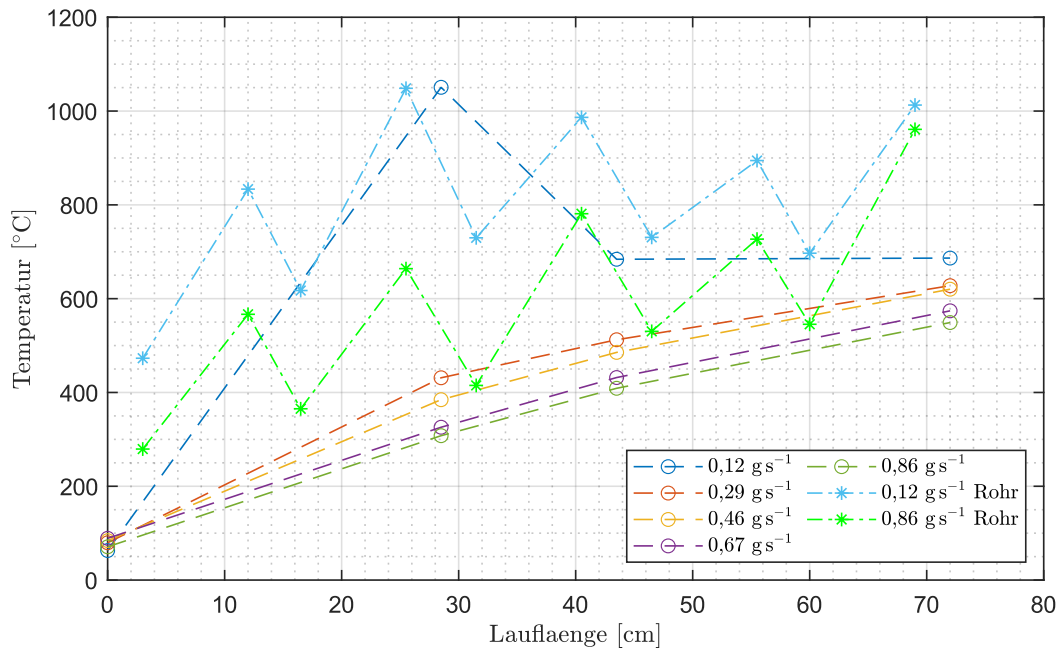


Abbildung 5-3: Fluidtemperatur und Oberflächentemperatur des Rohrs über die Laufänge im System bei einem Druck von 20bar und einer elektrischen Leistung des Heizsystems von ca. 5000W

Des Weiteren sind in Abbildung 5-3 die Temperaturen der Rohroberflächen für die Messpunkte mit einem Massenstrom von  $0,86 \frac{g}{s}$  sowie  $0,12 \frac{g}{s}$  dargestellt. Der Verlauf der genannten Temperaturen rührt daher, dass die Heizelemente nicht über ihre gesamte Bauteillänge beheizt sind. Aufgrund der Platzierung der Messtellen zu Anfang als auch zu Ende jedes Elements, wird sowohl der unbeheizte als auch der beheizte Bereich abgebildet. Es gilt jedoch zu beachten, dass der Verlauf, anders als im Diagramm dargestellt, nach Erreichen der größten Temperatur, mit hoher Wahrscheinlichkeit logarithmisch abfällt und zu Beginn der beheizten Zone steil ansteigt. Unabhängig des Verlaufs ist für einen erhöhten Massenstrom ein nahezu linearer Temperaturanstieg der mittleren Oberflächentemperatur zu erkennen. Der Abfall der Oberflächentemperatur bei einer Laufänge von ca. 55cm tritt in allen gewonnen Messdaten auf. Dieser ist auf eine ungenaue Platzierung des Thermoelements asymmetrisch zur Mitte des beheizten Bereichs zurückzuführen. Im Kontrast zum geradlinigen Verlauf der Temperatur bei einem hohen Massenstrom steht der Temperaturverlauf bei einem geringen Massenstrom. Analog zur Fluidtemperatur steigt die Temperatur auf der Rohroberfläche zu Beginn stark an. Ein Zusammenhang mit der übermäßig starken Erwärmung des Fluids liegt hier nahe. Nach Erreichen der maximalen Temperatur von mehr als  $1000^{\circ}C$  senkt sich die Oberflächentemperatur des Rohrs wieder ab und nähert sich, wenn auch nicht vollständig, der Oberflächentemperatur für den Fall eines hohen Massenstroms an. Für geringere Massenströme ist die Verschiebung sowohl der Fluid als auch der Oberflächentemperatur hin

zu höheren Temperaturen auf eine verminderte Kühlleistung aufgrund des geringeren Massenstroms zurückzuführen.

## 5.2. Wärmeströme

Zur näheren Untersuchung der oben genannten Effekte wird die Wärmestrombilanz des gesamten Systems betrachtet. Hierfür lässt sich zunächst die in Gleichung (5.2) abgebildete Bilanzgleichung aufstellen.

$$0 = \dot{Q}_{Rohr,in} - \dot{Q}_{Rohr,out} - \dot{Q}_{Fluid} + \dot{Q}_{Intern} \quad (5.2)$$

Für das System muss der eingestrahle Anteil der Wärme  $\dot{Q}_{Rohr,in}$  sowie der intern gewonnene Anteil  $\dot{Q}_{Intern}$  dem vom Rohr abgestrahlten Anteil  $\dot{Q}_{Rohr,out}$  und dem vom Fluid abtransportierten Anteil  $\dot{Q}_{Fluid}$  entsprechen. Da die Versuche im Vakuum durchgeführt wurden, treten keine Verluste in Form von Konvektion auf. Die Verluste durch Querwärmeleitung im Rohr als auch auf die Struktur des Aufbaus sind aufgrund der geringen Wandstärke zu vernachlässigen. Der eingestrahle Anteil der Wärme  $\dot{Q}_{Rohr,in}$  lässt sich, wie in Gleichung (2.24) bereits dargelegt, mithilfe der Kenntnis über die elektrische Leistung  $P_{el}$  und des Sichtfaktors zwischen Heizer und Rohr  $\varphi_{H \rightarrow R}$  bestimmen. Unter Zuhilfenahme des Stefan-Boltzmann-Gesetzes und der idealisierten Annahme eines schwarzen Strahlers für das Rohr, kann der vom Rohr abgestrahlte Anteil der Wärme  $\dot{Q}_{Rohr,out}$  mithilfe von Gleichung (5.3) bestimmt werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Temperatur des Rohres  $T_{Rohr}$  stark von der Lauflänge und den Heizzonen des Heizelements abhängt. Daher wird die Gleichung so umgeformt, dass diese von der Lauflänge im Rohr abhängt. Dies wird in Gleichung (5.4) dargestellt.

$$\dot{Q}_{Rohr,out} = \sigma A_{Rohr,au\beta en} T_{Rohr}^4 \quad (5.3)$$

$$\dot{Q}_{Rohr,out} = \sigma \pi d_{Rohr,a} \int_{l_0}^{l_{ende}} l T_{Rohr}(l)^4 dl \quad (5.4)$$

Zur Analytischen Berechnung des abgestrahlten Wärmestroms ist eine genaue Kenntnis über den Rohrtemperaturverlauf notwendig. Aufgrund des komplexen Verlaufs stellt sich dies als eine große Herausforderung dar. Es ist daher fraglich, ob eine analytische Lösung möglich ist. Um eine Vereinfachung des Temperaturverlaufs vorzunehmen, können die Temperaturverläufe zwischen den bekannten Messstellen als linear angenommen werden, sodass der Verlauf in neun Intervalle mit jeweils einem linearen Temperaturverlauf aufgeteilt werden kann. Eine derartige Vereinfachung scheint aufgrund der geringen Länge der Intervalle von wenigen Zentimetern als angemessen.

Für eine Bestimmung der vom Fluid abtransportierten Wärme  $\dot{Q}_{Fluid}$  wird eine Energiebilanz über das Medium gezogen. Diese Bilanz ist in Gleichung (5.5) dargestellt und bestimmt sich mithilfe des Fluidmassenstroms  $\dot{m}_{N_2O}$ , der spezifischen Wärmekapazität des Fluids  $c_{p,m}$  bei der mittleren Temperatur  $T_m$  sowie der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Beginn und Ende des betrachteten Abschnitts.



$$\dot{Q}_{Fluid} = \dot{m}_{N_2O} c_{p,m} \Delta T \quad (5.5)$$

$$T_m = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \quad (5.6)$$

Die genannte Bilanz lässt sich zwischen allen Messstellen der Fluidtemperatur ziehen. Dies ermöglicht eine detailliertere, abschnittsweise Betrachtung der Zu- und Abflüsse im jeweiligen Intervall. Abschnitte in denen das Fluid Wärme aufnimmt sind durch einen Anstieg der Temperatur zwischen Beginn und Ende des Intervalls gekennzeichnet. Ein Temperaturanstieg ist jedoch nicht nur durch die Einbringung von Wärmestrahlung möglich, sondern auch durch sogenannte interne Gewinne  $\dot{Q}_{Intern}$ . Als internen Gewinn wird im vorliegenden Fall die gesamte, durch chemische Reaktionen freigesetzte Wärme bezeichnet. Gemäß der Literatur lässt sich Lachgas bei Temperaturen oberhalb von  $600^\circ C$  und Drücken von mehr als  $10\text{bar}$  in seine Bestandteile zersetzen. Die dafür notwendige Temperatur ist jedoch stark vom Druckniveau und der Aufenthaltszeit des Lachgases unter diesen Bedingungen und damit von der eingebrachten Gesamtenergie abhängig [32]. Einen Überblick über diese Zusammenhänge liefert Abbildung 5-4.

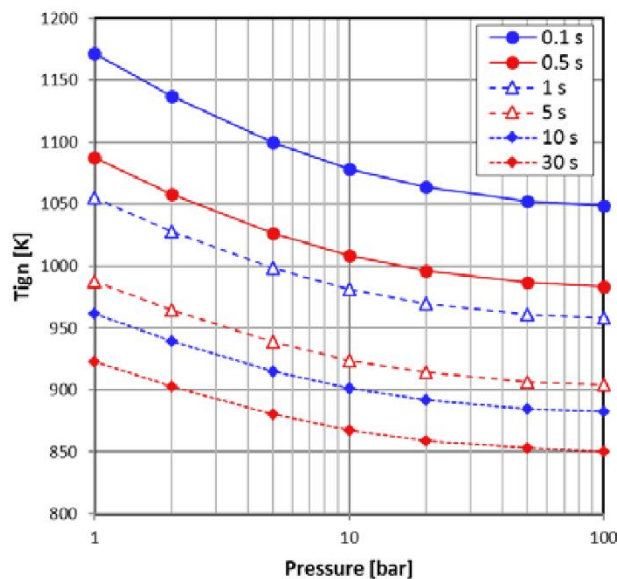


Abbildung 5-4: Selbstzersetzungstemperaturen von  $N_2O$  für unterschiedliche Druckniveaus und in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer [32]

Dabei zeigt sich, dass mit abnehmender Aufenthaltszeit eine höhere Fluidtemperatur bis zum Eintritt der Selbstzersetzung möglich ist. Zudem lässt sich erkennen, dass ein Anheben des Druckes die Zersetzungstemperatur absenkt. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit steigenden Druckniveaus im Rohrsystem bei gleichbleibender Medientemperatur eine höhere Strömungsgeschwindigkeit und damit ein höherer Massenstrom nötig ist um die Stabilität des Fluids zu gewährleisten. Der Vorgang der Zersetzung findet, wie in Gleichung (5.7) dargestellt, exotherm und damit unter Freisetzung von Wärme statt.



Der Betrag der freigesetzten Wärme  $\Delta H_R$  beträgt  $82 \text{ kJ/mol}$  [33]. Mithilfe der molaren Masse von Lachgas  $M_{N_2O} = 44 \text{ g/mol}$  ergibt sich eine Energie von  $1,8636 \text{ kJ/g}$ . Unter Zuhilfenahme der in Gleichung (5.8) dargestellten Formel lässt sich die interne Wärme damit in Abhängigkeit des Lachgasmassenstroms  $\dot{m}_{N_2O}$  bestimmen. Hierbei ist erkennbar, dass die durch Zersetzung freiwerdende Wärmemenge, unter Annahme einer vollständigen Zersetzung, bereits bei Massenströmen von lediglich  $0,1 \text{ g/s}$  bis zu 30% des durch die Heizelemente eingebrachten Wärmestroms entspricht.

$$\dot{Q}_{Intern} = \Delta H_R \dot{m}_{N_2O} = 1,8636 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \dot{m}_{N_2O} = 1863 \text{ W} \frac{\text{s}}{\text{g}} \dot{m}_{N_2O} \quad (5.8)$$

Abbildung 5-5 zeigt, die zu den in Abbildung 5-3 dargestellten Temperaturen gehörigen Wärmeströme. Die linke Anordnung gruppierter Balken stellt den vom Fluid aufgenommenen spezifische Wärmestrom, skaliert auf die Rohroberfläche, über den gesamten Versuchsaufbau dar. Dabei ist zu erkennen, dass die Wärmemenge nahezu proportional zum Massenstrom ansteigt. Wie in Gleichung (5.5) beschrieben hängt dieser Wert größtenteils vom Massenstrom und der Temperaturdifferenz ab. Ein Blick in Abbildung 5-3 zeigt, dass die gemessene Temperaturdifferenz  $\Delta T$  über die gesamte Lauflänge nahezu konstant bleibt. Jedoch steigt der Massenstrom um den Faktor 9 an. Unter Berücksichtigung der Sichtfaktoren und Emissionsgrade wird bei einer elektrischen Leistung von ca.  $5 \text{ kW}$  ein Wärmestrom von ca.  $555 \text{ W}$  in das Rohr eingebracht, unabhängig von den Fluidparametern. Dieser Aspekt weist darauf hin, dass in den Fällen geringer Massenströme die Abstrahlung des Rohres  $\dot{Q}_{Rohr,out}$  auf einem höheren Niveau liegt als bei großen Massenströmen. Dies führt zu der Annahme, dass die Rohrtemperatur in Fällen hoher Massenströme geringer ausfällt als in Fällen niedriger Massenströme und deckt sich damit mit den Beobachtungen aus der Praxis.

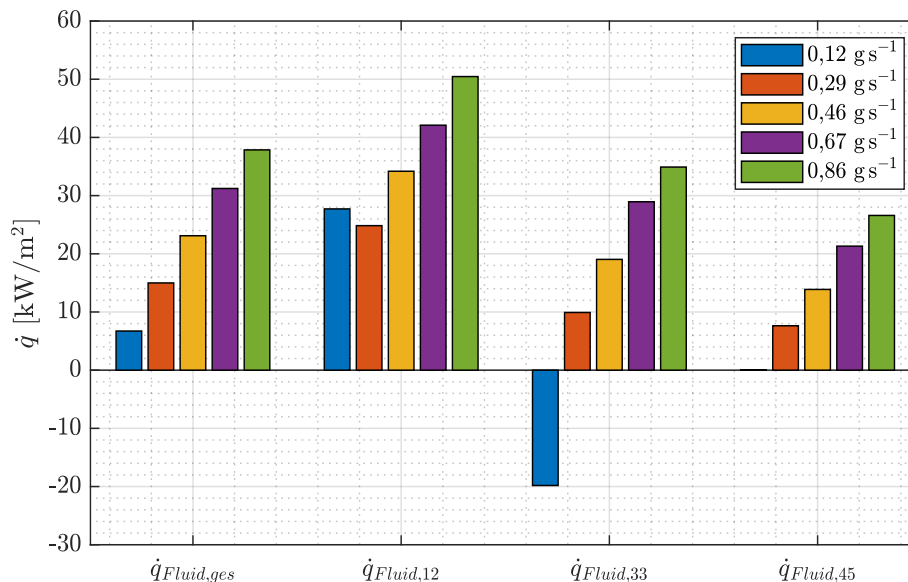


Abbildung 5-5: Flächenspezifische Kühlleistung des Fluids bezogen auf die Rohroberfläche des betrachteten Intervalls für unterschiedliche Massenströme bei  $20 \text{ bar}$  und ca.  $5000 \text{ W}$  Heizleistung

Die drei rechten gruppierten Säulen der Abbildung stellen die spezifische Kühlleistung der Abschnitte bezogen auf die Rohroberfläche des jeweiligen Intervalls dar. Einen Bezug zur

Oberfläche des Rohrs im Messintervall zu ziehen ist notwendig, da die Positionen der Thermoelemente im Fluid sich nicht in gleichem Abstand zueinander befinden. Eine Betrachtung der absoluten Größen würde keine Vergleichbarkeit liefern. Die Bezeichnung der Intervalle erfolgt anhand der Heizelemente, über die diese betrachtet wurde. Für hohe Massenströme ist erkennbar, dass das Fluid zu Beginn des Wärmeeintrags den größten Anteil der Wärme aufnimmt und dieser Wert zum Ende der Messstrecke stetig abnimmt. Dieses Verhalten lässt sich ebenso bei den geringeren Massenströmen beobachten. Ein Blick auf die in Abbildung 5-3 abgebildeten Oberflächentemperaturen legt die Vermutung eines Zusammenhangs nahe. Wie in Gleichung (5.3) erläutert, besteht ein Zusammenhang zwischen der Temperatur eines Körpers und dessen abgegebenem, strahlungsbedingtem, Wärmestrom. Die Körpertemperatur geht dabei mit der vierten Potenz in die Formel ein. Damit wird zu Ende des Betrachtungsgebiets ein höherer Wärmestrom ausgestrahlt. Somit ist die Differenz der Wärmeströme zwischen eingebrachtem Wärmestrom  $\dot{Q}_{Rohr,in}$  und abgestrahltem Wärmestrom  $\dot{Q}_{Rohr,out}$  geringer und das Fluid ist daher einem geringeren Wärmestrom ausgesetzt. Der Wärmeeintrag in das Fluid fällt dadurch geringer aus. Dies führt zu den, beobachtete, geringeren spezifischen Wärmeströmen zu Ende des Rohrsystems. Der Effekt der Wärmestromabgabe kann mit dem der Strahlungskühlung (vgl. Kapitel 2.2.1) verglichen werden.

Interesse weckt nun das Ergebnis bei einem Massenstrom von  $0,12 \frac{g}{s}$ . Hier tritt im ersten Intervall eine deutlich größere, als anhand der oben getätigten Betrachtungen, zu erwartender spezifische Kühlleistung auf. Im zweiten Intervall erfährt das Fluid einen negativen Wärmestrom und kühlt sich dabei herunter. Für das dritte Intervall ist ein stabiler Zustand zu erkennen, hier nimmt das Fluid weder Wärme auf noch gibt es Wärme ab. Ein Blick auf den Verlauf der Fluidtemperatur in Abbildung 5-3 bestätigt das gezeigte Verhalten. Auch in diesem Fall lässt sich wiederum eine Verbindung zu den Oberflächentemperaturen des Rohrs herstellen. Aufgrund des starken Temperaturanstiegs im ersten Intervall ist von einer, oben erwähnten, Zersetzung des Lachgases nach Gleichung (5.7) auszugehen. Wird von einer Zersetzung des gesamten Lachgases im ersten Intervall ausgegangen, setzt dieses dabei einen internen Wärmestrom  $\dot{Q}_{intern,12}$  in Höhe von  $223,6W$  frei. Flächenspezifisch betrachtet führt dies zu einem Wärmestrom von  $\dot{q}_{intern,12} = 41,62 \frac{kW}{m^2}$ . Das thermisch träge Rohr wird dabei ebenfalls aufgeheizt. Zusätzlich findet weiterhin der Wärmeeintrag durch die Heizelemente statt. Dieser Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{Rohr,in,12}$  beträgt im ersten Intervall  $221,3W$  beziehungsweise  $41,19 \frac{kW}{m^2}$ . Damit ist, hervorgerufen durch die Zersetzung, eine Verdopplung der eingebrachten Wärmeströme erkennbar. Die Verwendung von Gleichung (5.2) führt zu den Bilanzen (5.9) und (5.10).

$$\dot{Q}_{intern,12} + \dot{Q}_{Rohr,in,12} = 444,9W = \dot{Q}_{Fluid,12} + \dot{Q}_{Rohr,out,12} \quad (5.9)$$

$$\dot{q}_{intern,12} + \dot{q}_{Rohr,in,12} = 82,82 \frac{kW}{m^2} = \dot{q}_{Fluid,12} + \dot{q}_{Rohr,out,12} \quad (5.10)$$

Auf der linken Seite der Gleichung sind die zugeführten Wärmeströme dargestellt. Zu den abgeführten Wärmeströmen auf der rechten Seite der Gleichung zählen die Kühlleistung sowie die abgestrahlte Leistung durch das Rohr. Die Kühlleistung beschreibt die vom Fluid aufgenommene Wärme und ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Sie beträgt in diesem Fall

$\dot{q}_{Fluid,12} = 27,71 \text{ kW/m}^2$ . Anhand dessen ist ersichtlich, dass der vom Rohr abgestrahlte Wärmestrom  $\dot{q}_{Rohr,out,12}$  im ersten Intervall mit einem Wert von  $55,11 \text{ kW/m}^2$  größer ist, als der durch die Heizelemente eingebrachte Wärmestrom. Das Rohr fungiert in diesem Fall somit als eine Art Strahlungskühlung (vgl. Kapitel 2.2.1) für das Fluid. Im Zweiten Intervall vereinfacht sich die Betrachtung deutlich da die Zersetzung des Lachgases bereits abgeschlossen ist. Das Fluid wird in diesem Intervall aufgrund des Strahlungsaustrags aus dem Rohr abgekühlt. Zusätzlich ist eine Abkühlung aufgrund der abgeschlossenen Reaktion und der Bildung neuer Spezies naheliegend. Die Abkühlung ist in Abbildung 5-5 anhand des negativen Wärmestroms erkennbar. Eine genauere Untersuchung der Hintergründe und Mechanismen muss für die vorliegenden Geometrie durchgeführt werden. Im dritten und damit letzten Intervall liegt ein Gleichgewicht zwischen den zu- und abgeführten Wärmeströme vor. Daher nimmt das Fluid weder Energie auf, noch gibt es Wärme ab. Die Kühlleistung beträgt nahezu null.

Die in Abbildung 5-5 zu erkennbaren spezifischen Kühlleistungen lassen sich unter Kenntnis der Fluidtemperaturen zu Anfang und Ende des jeweiligen Intervalls bestimmen. Damit lassen sich mithilfe der Bilanz sämtliche Wärmeströme des Rohrsystems bestimmen, sodass eine Aussage über die Kühlleistung getroffen werden kann. Eine nähere Untersuchung der Zersetzungsbedingungen folgt in den nächsten Abschnitten.

### 5.3. Wärmeübergangskoeffizient und Nußeltzahl

Mithilfe der Nußeltzahl ist eine Abschätzung des Kühlverhaltens möglich. Zur Bestimmung der mittleren Nußeltzahl  $Nu_m$ , ohne Verwendung einer Korrelation, ist der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_m$  notwendig. Ein Umformen von Gleichung (2.8) führt zu Gleichung (5.11). Unter Zuhilfenahme des Wandwärmestroms  $\dot{q}_W$  sowie der mittleren Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Rohroberfläche lässt sich der mittlere Wärmeübergangskoeffizient bestimmen.

$$\alpha_m = \frac{\dot{q}_W}{\Delta T} \quad (5.11)$$

Für Betriebspunkte hohen Massenstroms kann der Mittelwert, der Fluid- und der Oberflächentemperaturen bestimmt werden. Für den oben dargestellten Verlauf bei einem Massenstrom von  $0,86 \text{ g/s}$  ergibt sich eine mittlere Rohrtemperatur  $T_{Rohr,m}$  von  $583,5^\circ\text{C}$  sowie eine mittlere Fluidtemperatur  $T_{N_2O,m}$  von  $334,2^\circ\text{C}$ . Hieraus resultiert eine mittlere Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Rohr von  $\Delta T = 249,3\text{K}$ .

Die Bestimmung des spezifischen Wandwärmestroms  $\dot{q}_W$  erfordert eine detaillierte Analyse des von den Heizern eingebrachten sowie des vom Rohr ausgestrahlten Wärmestroms. Da bei großen Massenströmen keine Zersetzung von Lachgas zu erwarten ist, vereinfacht sich Gleichung (5.2) zu nachfolgendem Term.

$$0 = \dot{Q}_{Rohr,in} - \dot{Q}_{Rohr,out} - \dot{Q}_{Fluid} \quad (5.12)$$

Damit ergibt sich der Wandwärmestrom aus der Differenz des von den Heizern eingestrahnten und vom Rohr abgestrahlten Wärmestrom. Zudem entspricht dies dem vom Medium

aufgenommenen Wärmestrom. Der vom Fluid abgeführte Wärmestrom des Fluids  $\dot{Q}_{Fluid}$  beträgt für den vorliegenden Fall 513,8W.

Zur Bestimmung des flächenspezifischen Wärmestroms ist zudem die Größe der Bezugsfläche notwendig. In Abbildung 5-6 ist der idealisierte Verlauf des spezifischen Wandwärmestroms über die Lauflänge von Eintritt in den ersten bis Austritt aus dem letzten Heizelement dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass dieser in bestimmten Intervallen einen konstanten, positiven Wert annimmt. In den verbliebenen Intervallen fällt dieser jedoch logarithmisch ab. Die Intervalle konstanten Werts stellen die von den Heizelementen beheizbare Fläche dar. Der logarithmische Abfall tritt aufgrund der Wärmestrahlung vom Rohr in die Umgebung auf. Da die Wärmestrahlung in vierter Potenz (vgl. Gleichung (2.20)) von der Oberflächentemperatur des Werkstoffes abhängt wirkt sich dieser Effekt bei einem Wechsel von beheiztem zu unbeheiztem Bereich deutlich stärker aus als zu Ende dieses Abschnitts. Da der abgestrahlte Anteil des Wandwärmestroms zwischen den beheizten Zonen lediglich einen Anteil von ca. 5% des Gesamtbetrags des eingestrahelten Wärmestroms einnimmt, ist dieser zu vernachlässigen. Es kann die Annahme getroffen werden, dass die Eigenschaften des Fluids im unbeheizten Bereich konstant sind. Unter Berücksichtigung dieser Annahmen

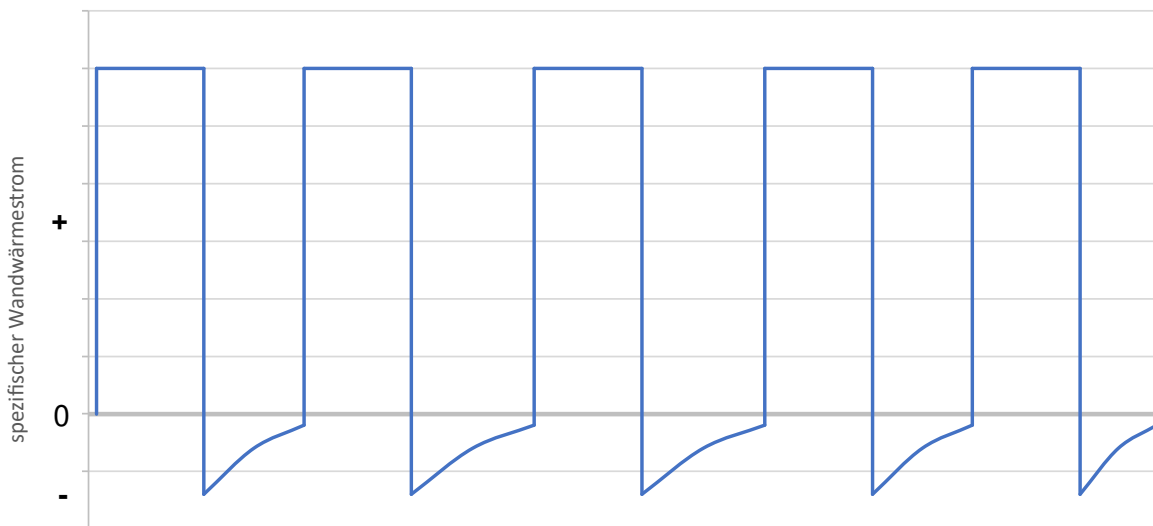


Abbildung 5-6: Idealisierte Darstellung des Verlaufs des spezifischen Wandwärmestroms des Rohrs über die gesamte Lauflänge des Versuchsaufbaus. Konstanter Eintrag aufgrund der beheizten Bereiche der Keramischen Heizer. Austrag aufgrund der Abstrahlung des Rohrs über die unbeheizten Stellen.

verkleinert sich die Bezugsfläche der Oberfläche zur Bestimmung des spezifischen Wandwärmestroms auf die beheizten Intervalle.

Dies führt zu einer berücksichtigten Rohroberfläche  $A_{Rohr,beh}$  von  $0,0669m^2$ . Daraus ergibt sich der flächenspezifische Wandwärmestrom  $\dot{q}_w$  zu  $76,8kW/m^2$ . Somit lässt sich der mittlere Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_m$  zu  $308W/m^2K$  bestimmen. Mithilfe von Gleichung (2.15) berechnet sich die Nußeltzahl. Der hydraulische Durchmesser des Rohrs beträgt  $4mm$ . Die Wärmeleitfähigkeit von Lachgas bei der anliegenden Temperatur berechnet sich nach Gleichung (2.14) und beträgt  $37,54mW/mK$ . Daraus ergibt sich eine analytisch bestimmte Nußeltzahl von  $Nu_m = 32,8$ .

Wird die Nußeltzahl, unter Zuhilfenahme der Dittus-Boelter-Korrelation aus Gleichung (2.12), berechnet muss zunächst die Prandtl und die Reynoldszahl bestimmt werden. Die Reynoldszahl  $Re$  berechnet sich nach Gleichung (2.9) unter Zuhilfenahme der dynamischen Viskosität nach Gleichung (2.11) von  $26,03 \mu Pa s$  zu  $Re = 14619$ . Die Berechnung der Prandtlzahl nach Gleichung (2.13) führt zu einem Wert von  $Pr = 0,761$ . Daraus resultiert die Nußeltzahl nach Dittus-Boelter  $Nu_{m,DB}$  zu  $44,27$ . Wie erkennbar ist, weicht diese Nußeltzahl um den Faktor 1,4 vom analytisch berechneten Wert ab. Zusätzlich zu dieser Korrelation wird die Nußeltzahl mit der Gleichung von Gnielinski (2.16) berechnet. Zur Berechnung ist die Länge des Rohrs  $l_{Rohr}$  nötig. Hierfür wird die Gesamtlänge der oben genannten beheizten Abschnitte von  $0,355m$  verwendet. Die Berechnung der Nußeltzahl nach der Formel von Gnielinski ergibt einen Wert von  $Nu_{m,GN} = 44,10$ .

Um einen Eindruck der Abweichungen über die breite der Versuchsreihe zu erlangen, ist ein Vergleich der Werte in Tabelle 5-1 dargestellt. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Dittus-Boelter sowie der Gnielinski Korrelation fällt auf, dass sich diese stark ähneln. Über alle Versuche hinweg beläuft sich die Abweichung zwischen den Korrelationen und dem analytischen Wert auf einen Faktor zwischen 1,25 und 1,5. Jedoch ist hierbei anzumerken, dass die verwendeten Korrelationen für eine Reynoldszahl größer 10.000 angewandt werden dürfen. Damit können die Betriebspunkte niedrigen Massenstroms nicht ausreichend abgebildet werden und der Faktor der Abweichung steigt bis auf einen Wert von 2 an.

Tabelle 5-1: Vergleich der Nußeltzahlen bei 20bar Fluiddruck und maximaler Heizleistung

$\dot{m}_{N2O}$ [ $\frac{g}{s}$ ]	$\dot{q}_{Rohr,in}$ [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	$p_{in}$ [bar]	$Re$ [-]	$Nu_m$ [-]	$Nu_{m,DB}$ [-]	$Nu_{m,GN}$ [-]
0,86	83,04	21,11	14619	32,81	44,27	44,10
0,67	82,89	21,36	11255	25,47	35,89	35,80
0,46	82,91	21,53	7380	16,94	25,57	25,30
0,29	83,00	21,67	4699	9,97	17,81	17,01

Eine Betrachtung von Tabelle 5-2 bestätigt den gewonnenen Eindruck. Auch für unterschiedliche Drücke weichen die Werte der Korrelationen um den Faktor 1,5 bis 2 von der analytischen Lösung ab. Eine Analyse der Betriebspunkte mit einer Reynoldszahl  $Re > 10000$  zeigt, dass die Abweichung geringer ausfällt und lediglich um den Wert 1,25 – 1,5 abweicht. Dabei muss ein bislang nicht berücksichtigter Effekt betrachtet werden. Die Berechnung der Reynoldszahl beruht ausschließlich auf den vorliegenden Strömungsgeschwindigkeiten. Eine detaillierte Betrachtung der Strömungsverhältnisse innerhalb des Rohrs fand zu keinem Zeitpunkt statt. Aufgrund von Einbauten wie Thermoelementen, aber auch Rohrverbindern ist eine deutliche Erhöhung der wahren Reynoldszahl zu erwarten. Dieser Einfluss lässt sich jedoch kaum bestimmen. Daher ist davon auszugehen, dass die Reynoldszahl höher liegt als berechnet, was dazu führt, dass die Abweichung der Korrelationen von der analytischen Berechnung deutlicher ausfallen würde.

In Tabelle 5-3 sind alle Messpunkte für einen Druck von ca. 20bar dargestellt. Der Fokus wird hier auf die Untersuchung des Einflusses der eingestrahlenen Leistung gelegt. In diesem Fall kann ebenso festgestellt werden, dass die Korrelationen von Gnielinski und Dittus-Boelter

keine nennenswerte Abweichung untereinander aufweisen. Die Betrachtung der Abweichung von den analytischen Werten liefert ein ähnliches Bild wie bereits beobachtet werden konnte. Bei Messpunkten niedriger Massenströme und damit geringerer Reynoldszahl tritt eine größere Abweichung auf als bei Messpunkten hoher Reynoldszahlen. Zudem lässt sich eine geringfügig größere Abweichung der Korrelationen vom analytischen Wert bei geringeren spezifischen Wärmeströmen feststellen. Jedoch kann auch hier der oben bestimmte Faktor der Abweichung im Gültigkeitsbereich der Korrelationen von 1,25 – 1,5 bestätigt werden. Da die Werte der NuBelt Korrelationen über den Werten der analytisch bestimmten NuBeltzahlen liegen wird der Wärmeübergang anhand der Korrelationen überschätzt und damit höher angegeben als er in der Realität ist.

Ausgenommen von diesen Betrachtungen sind die Versuche, bei denen es zu Auffälligkeiten im Temperaturverlauf des Fluids kam. Da es sich bei diesen Anomalien höchstwahrscheinlich um die oben genannten Wärmefreisetzung aufgrund der Zersetzung von Lachgas handelt, lassen sich die genannten Korrelationen hierfür nicht anwenden. Eine nähere Betrachtung dieser Versuche findet im folgenden Kapitel statt. Abschließend lässt sich feststellen, dass die untersuchten Korrelationen zur Charakterisierung des Wärmeübergangs verwertbare Ergebnisse liefern und für eine Abschätzung verwendet werden können. Die Korrelationen von Dittus-Boelter und Gnielinski liefern nahezu identische Ergebnisse. Aufgrund der Einfachheit wird die Verwendung der Dittus-Boelter Korrelation empfohlen.

Tabelle 5-2: Vergleich der NuBeltzahlen bei maximaler Heizleistung, unterschiedlichen Drücken und Massenströmen ohne Zersetzung des Fluids

$\dot{m}_{N2O}$ [ $\frac{g}{s}$ ]	$\dot{q}_{Rohr,in}$ [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	$p_{in}$ [bar]	$Re$ [-]	$Nu_m$ [-]	$Nu_{m,DB}$ [-]	$Nu_{m,GN}$ [-]
0,88	83,72	8,86	15175	30,56	45,40	45,14
0,72	83,42	9,31	12012	24,83	37,64	37,50
0,51	83,15	9,70	8457	17,15	28,41	28,22
0,32	82,82	9,91	5138	9,27	19,07	18,40
0,86	83,04	21,11	14619	32,81	44,27	44,10
0,67	82,89	21,36	11255	25,47	35,89	35,80
0,46	82,91	21,53	7380	16,94	25,57	25,30
0,29	83,00	21,67	4699	9,97	17,81	17,01
0,92	83,19	29,41	15933	13,32	47,65	47,48
0,73	83,34	29,52	12257	10,87	38,57	38,50
0,51	83,59	29,61	8318	8,04	28,23	28,06
0,86	66,22	35,66	15597	32,79	47,15	47,09
0,71	66,18	35,51	12709	27,80	39,95	39,95
0,53	66,04	35,38	9142	20,76	30,63	30,55

Tabelle 5-3: Vergleich der Nußeltzahlen bei 20bar Fluiddruck, unterschiedlichen Heizleistungen und Massenströmen ohne Zersetzung des Fluids

$\dot{m}_{N2O}$ [ $\frac{g}{s}$ ]	$\dot{q}_{Rohr,in}$ [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	$p_{in}$ [bar]	$Re$ [-]	$Nu_m$ [-]	$Nu_{m,DB}$ [-]	$Nu_{m,GN}$ [-]
0,91	55,06	21,20	17613	33,61	51,75	51,52
0,45	54,87	21,52	7791	18,77	26,78	26,57
0,34	54,38	21,64	5765	13,03	21,04	20,53
0,91	68,14	21,12	16241	35,48	48,29	48,07
0,66	68,47	21,33	11562	25,92	36,74	36,67
0,53	68,38	21,42	8942	20,61	29,87	29,73
0,32	68,29	21,57	5282	11,27	19,59	18,96
0,86	83,04	21,11	14619	32,81	44,27	44,10
0,67	82,89	21,36	11255	25,47	35,89	35,80
0,46	82,91	21,53	7380	16,94	25,57	25,30
0,29	83,00	21,67	4699	9,97	17,81	17,01

#### 5.4. Zersetzung von Lachgas

Bei der Durchführung der Versuche trat unter bestimmten Bedingungen eine starke Wärmefreisetzung innerhalb des Rohrs auf. Dies Wärmefreisetzung kann durch einen Temperaturanstieg des Fluids festgestellt werden und wird durch sogenannte interne Gewinne hervorgerufen. Der Ursprung der internen Gewinne ist, wie in Gleichung (5.8) dargestellt, die Zersetzung von Lachgas.

Tabelle 5-4 liefert einen Überblick über alle durchgeführten Versuche, bei denen eine Anomalie im Fluidtemperaturverlauf auftrat. Als anomal wird ein Temperaturverlauf bezeichnet, wenn dieser von der linearen Aufheizung des Fluids abweicht. Anhand der Messdaten ist zu erkennen, dass eine Abweichung überwiegend bei Massenströmen im Bereich von ca. 0,1  $\frac{g}{s}$  auftritt. Nach Kuznetsov Et al. [32] ist die zur Zersetzung notwendige Temperatur maßgeblich von der Aufenthaltszeit abhängig. Bei geringeren Massenströmen ist nach der Kontinuitätsgleichung die Strömungsgeschwindigkeit niedriger und damit die Aufenthaltszeit im Rohr verlängert. Zudem verringert ein höherer Fluiddruck die zur Zersetzung notwendige Temperatur.

Die Aufenthaltszeit des Fluids im Versuchsaufbau ist in der letzten Spalte der Tabelle dargestellt. Dabei lässt sich erkennen, dass die flächenspezifische Wandwärmestromdichten keinen messbaren Einfluss auf die Aufenthaltszeit im Rohr besitzt. Bei der Betrachtung der Kontinuitätsgleichung ist erkennbar, dass die Aufenthaltszeit hauptsächlich vom vorliegenden Massenstrom beeinflusst wird.



## Auswertung

Tabelle 5-4: Übersicht der Versuche bei denen eine Zersetzung von Lachgas auftrat

$\dot{q}_{Rohr,in}$ [ $\frac{kW}{m^2}$ ]	$\dot{m}_{N_2O}$ [ $\frac{g}{s}$ ]	$p_{in}$ [bar]	TF1 [°C]	TF2 [°C]	TF3 [°C]	TF4 [°C]	Zeit [s]
63,36	0,12	36,68	17,45	741,80	623,86	596,75	1,98
65,91	0,14	35,41	28,34	853,40	447,45	590,90	1,56
67,78	0,08	21,74	51,67	856,66	594,30	613,29	1,61
67,93	0,09	21,68	48,95	790,84	599,75	648,03	1,46
68,28	0,10	29,81	7,60	783,80	600,81	579,50	1,87
69,19	0,21	29,47	31,31	1146,72	882,32	720,56	0,67
69,19	0,90	29,47	32,52	564,02	1104,66	718,84	0,16
82,12	0,14	21,34	35,42	597,41	550,73	616,28	1,01
82,20	0,13	21,80	64,33	988,72	659,34	643,79	0,93
82,68	0,12	21,74	62,95	1050,63	684,03	686,55	0,98
82,96	0,26	29,73	38,68	522,06	1003,64	713,88	0,64

Hervorzuheben sind die Messwerte für einen Massenstrom von  $0,90 \frac{g}{s}$ . Nach den bereits gewonnen Erkenntnissen sollte bei den vorliegenden Bedingungen keine Zersetzung zu erwarten sein. In den Temperatordaten ist diese jedoch eindeutig erkennbar. Erreicht wurde dieses Verhalten über einen Umweg. Dabei wurde der Versuch zunächst mit einem geringen Massenstrom gestartet. Daraufhin setzte eine Zersetzung ein und der Massenstrom wurde stetig erhöht. Das führte zu einer Verschiebung der Zersetzungszone stromabwärts. Diese ankerte dort und ließ eine Messung bei konstanten Randbedingungen zu. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass durch den Start der Zersetzung der notwendige Energieeintrag für die Aufheizung eines größeren Massenstroms gegeben ist und diese damit aufrecht gehalten werden kann.

In Abbildung 5-7 ist der Verlauf der Fluidtemperatur über die Lauflänge im Rohr dargestellt. Bei den dargestellten Messdaten handelt es sich ausschließlich um die Temperaturverläufe der Betriebspunkte mit Anomalien in der Temperaturverteilung. Die Abbildung zeigt auf, dass für den Fall geringer Massenströme bereits zu Beginn der Messstrecke eine Temperaturspitze auftritt. Aufgrund der geringen Dichte von Messstellen im Fluid lässt sich jedoch keine Aussage über die genaue Position der Zersetzung treffen. Die maximale aufgezeichnete Temperatur variiert je nach Leistung der Heizelemente ebenso wie durch die geringen Variationen im Massenstrom. Zudem ist es von hoher Wahrscheinlichkeit, dass die Position der zweiten Messtelle im Fluid, TF2, zu keiner Zeit den genauen Ort der Zersetzung darstellte. Damit ist es aufgrund der geringen Messstellendichte nicht möglich die maximale Temperatur im Fluid zu bestimmen. Der oben genannte Fall eines hohen Massenstroms wird anhand der hellblauen Kurve dargestellt. Diese lässt erkennen, dass die Zersetzungszone stromabwärts gewandert ist. Da bis zum Beginn der Messdatenaufzeichnung ein stationäres Verhalten abgewartet wurde, lässt sich anmerken, dass die Zersetzungszone ihren Ort stets stabil in der Messtrecke hält.

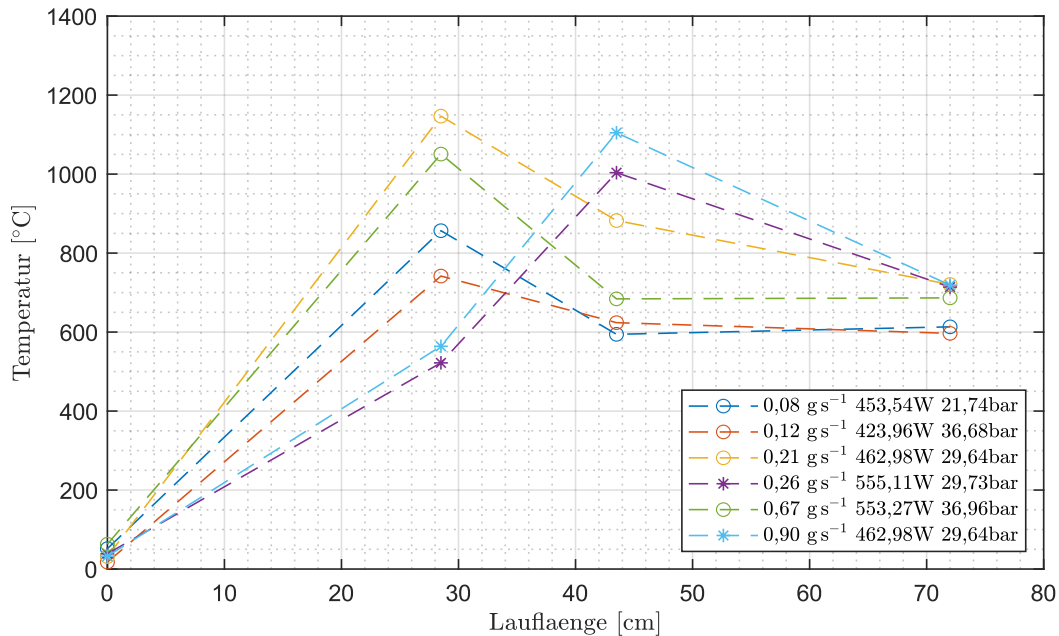


Abbildung 5-7: Verlauf der Fluidtemperatur über die Lauflänge des Rohrs für die Fälle einer Zersetzung (Auszug)

Um eine mögliche Charakterisierung der Zersetzungseigenschaften durchführen zu können ist eine Kenntnis über die Fluideigenschaften notwendig. Bei Lachgas handelt es sich um eine metastabile Verbindung. Metastabilität bezeichnet eine schwache Form der Stabilität. Es besteht ein stabiler Zustand gegenüber kleinen Änderungen, kommt es jedoch zu größeren Änderungen führt dies zu einer Instabilität. Die metastabile Phase besitzt ein höheres Energieniveau als die stabile Phase. Das Zuführen von Aktivierungsenergie bringt das Molekül in einen instabilen Zustand. Im Instabilen Zustand fällt das Molekül unter Freisetzung von Energie in den stabilen Zustand ab [34]. Dies ist in Abbildung 5-8 schematisch dargestellt.

Für den vorliegenden Fall bedeutet dies, dass das Energieniveau des strömenden Lachgases so weit erhöht werden muss, bis es in den instabilen Zustand überführt wird. Ist dies geschehen zerfällt es unter Energiefreisetzung in seine Bestandteile. Die Energiefreisetzung kann in Form eines Temperaturanstiegs beobachtet werden. Zur Charakterisierung der Zersetzungsbedingungen ist es darum notwendig die Aktivierungsenergie zu bestimmen, die je Masseneinheit notwendig ist, um das Lachgas vom einen in den anderen Zustand zu überführen. Wird ein konstanter Wandwärmestrom angenommen, muss für das jeweilige Druckniveau genau der Massenstrom bestimmt werden, bei dem eine Zersetzung eintritt. Denn dann ist der Zeitpunkt gegeben an dem die notwendige Aktivierungsenergie eingebracht wurde. Zusätzlich ist eine exakte Kenntnis über den Ort der Zersetzung unabdingbar. Unter Zuhilfenahme des Orts und des Massenstroms lässt sie nach Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit die Aufenthaltsdauer im Rohr bestimmen. Mithilfe von Aufenthaltsdauer und dem Wandwärmestrom lässt sich der Energieeintrag in das Fluid ermitteln. Der Energieeintrag, der bis zu diesem Zeitpunkt stattgefunden hat entspricht ebendieser benötigten Aktivierungsenergie. Eine Kenntnis über die notwendige Aktivierungsenergie ermöglicht, unter Wissen des Wandwärmestroms und der Strömungsbedingungen, die Vorhersage der Zersetzung sowie die genaue Position des Zerfalls. Bei der Bestimmung der Energie ist darauf zu achten, dass mit einem hohen Massenstrom begonnen wird und dieser dann langsam schrittweise abgesenkt wird, sodass

ermöglicht wird, dass exakt der Massenstrom bestimmt wird bei dem die Zersetzung Eintritt. Damit wird der oben genannte Fall umgangen, der die stromabwärts Verschiebung der Zersetzungszone aufgrund der Erhöhung des Massenstroms zur Folge hatte. In diesem Fall lässt sich die eingetragene Energie nämlich nicht exakt bestimmen, denn zusätzlich zum Wandwärmestrom kommt der Energieeintrag durch den Zerfall hinzu. Dieser würde ebenso einen Beitrag zur benötigten Energie leisten und die Untersuchung damit verfälschen.

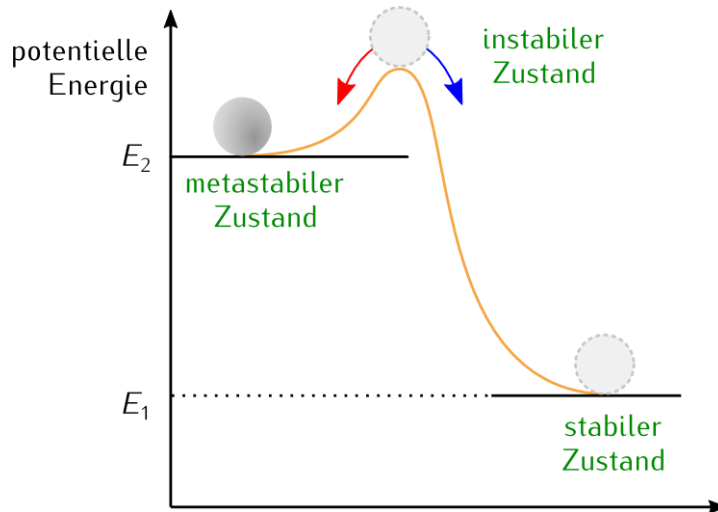


Abbildung 5-8: Schematische Darstellung der Zustandsänderung von einem metastabilen in einen stabilen Zustand [42].

Es ist zu betonen, dass der Phasenwechsel von einem metastabilen in einen stabilen Zustand von Lachgas wissenschaftlich nicht ausreichend untersucht ist und hierzu keine ausreichende Datenlage vorliegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird lediglich der Versuch unternommen eine qualitative Aussage über die Zersetzungsbedingungen aufgrund von Beobachtungen zu treffen. Eine detaillierte Untersuchung dieser Bedingungen kann anhand des oben beschriebenen Verfahrens in zukünftigen Arbeiten vorgenommen werden.

## 5.5. Einflussgrößen

Zum Ende der Auswertung soll nochmals ein Überblick über die Einflussgrößen des Versuchsaufbaus und der Auswertung gegeben werden. Hierbei ist in die Einflussgrößen während der Versuchsdurchführung und damit bei Aufzeichnung der Messdaten und der Einflüsse aufgrund von Annahmen und Vereinfachungen während der Auswertung zu unterscheiden.

Einflussgrößen des Versuchsaufbaus sind einerseits die Messfehler der Sensoren sowie die Abweichungen aufgrund von Aufheizung. Neben den geringen Grenzabweichungen der Thermoelemente spielt zudem die Einbausituation und die Güte des Einbaus eine entscheidende Rolle. Die angegebenen Grenzabweichungen werden unter definierten Bedingungen, wie beispielsweise ausreichendem Wandabstand der Messspitze, geprüft. Diese Bedingungen sind im vorliegenden Versuchsaufbau nicht gewährleistet. Zudem soll die Messspitze in der Mitte des  $4\text{mm}$  durchmessenden Rohrs platziert werden. Jedoch kann sich jene während des Fixiervorgangs verschieben. Das hat zur Folge, dass die Messspitze außerhalb des Strömungsmittelpunkts liegt und eine Temperatur nahe der Wand angibt. Dieser Einfluss ist nicht messbar beziehungsweise kann dieser nicht beziffert werden.

Allerdings ist davon auszugehen, dass dieser Fehler in Relation zu den absolut gemessenen Werten klein ist. Bei der Druckmessung kommt es zu Abweichungen aufgrund der Aufheizung der Sensoren mit steigender Versuchslaufzeit. Diese Abweichung aufgrund des sogenannte Temperaturdrifts kann nicht nachvollzogen werden, da alle Sensoren diesem Temperaturanstieg ausgesetzt sind.

Mit Blick auf die Auswertung wurden viele Vereinfachungen getroffen, damit eine Bestimmung der gesuchten Größen möglich war. Zum einen wurde die Querwärmeleitung im Rohr sowie vom Rohr auf den gesamten Aufbau vernachlässigt. Zum anderen wird trotz des Grobvakuum von ca. 4 mbar die freie Konvektion an den Heizelementen und am Rohr vernachlässigt. Dabei treten ebenfalls nicht bezifferbare Verluste auf. Bei der Bestimmung der Wärmeströme wird im Falle einer Zersetzung von Lachgas jederzeit von einer vollständigen Umsetzung in die Reaktionsprodukte Stickstoff und Sauerstoff ausgegangen. Um über die Umsetzungsrate eine Aussage treffen zu können ist es notwendig die Abgase des Systems zu untersuchen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die getroffenen Annahmen stets unter Berücksichtigung der daraus resultierenden Auswirkungen getroffen wurden und darauf geachtet wurde, dass diese die berechneten Werte nicht übermäßig verfälschen. Allerdings ist der wahre Einfluss der Vereinfachungen und der Abweichungen der Sensoren aufgrund der Einbausituation nicht bestimmbar.

## 6. Zusammenfassung

Die Forschung an sogenannten grünen Treibstoffen, die ersatzweise für das toxische Hydrazin eingesetzt werden sollen, weckt derzeit ein großes Interesse. Das DLR forscht im Rahmen des Projekts „Future Fuels“ an geeigneten Ersatzstoffen. Dabei werden auch Treibstoffe auf Basis von Lachgas ( $N_2O$ ), sowohl als Monopropellant als auch Bipropellant untersucht. Aufgrund der hohen Verbrennungstemperaturen der Treibstoffgemische von ca.  $3000K$ , ist es notwendig eine geeignete Kühlung der Raketenmotoren zu gewährleisten. Häufig wird hierfür eine regenerative Kühlung verwendet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Kühleigenschaften von Lachgas und die Einsatzgrenzen des Stoffes für einen sicheren Betrieb untersucht. Zunächst wurde hierfür der vorhandene Versuchsaufbau grundlegend überarbeitet indem zum einen die elektrische Heizleistung um 66% erhöht wurde und zum anderen die Positionierung der Messstellen für Temperatur und Druck angepasst wurde. Zusätzlich wurde für die Befestigung der Thermoelemente auf der Oberfläche des Rohrs anstelle von Klebstoff ein Schweißgerät verwendet. Damit war es möglich die Messwerte in einem ausgedehnteren Temperaturbereich ohne Ablösung auf dem Rohr aufzuzeichnen. Die Lagerung der Heizelemente wurde mithilfe von keramischen Lagerelementen optimiert und für die hohen Temperaturen der Heizelemente angepasst. Hierfür wurde anhand der Maße ein Halter designt und im Rahmen der Arbeit in einem 3D Drucker hergestellt.

Die Durchführung der Versuche fand in der Vakuumkammer des Prüfstands M11.2 statt. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Aufbaus folgte das Abprüfen einer Vielzahl an Randbedingungen. Hierzu wurde sowohl der Massenstrom des Lachgases  $\dot{m}_{N_2O}$ , als auch die Leistung der Heizelemente  $P_{el}$  und der Fluiddruck  $p_{in}$  variiert. Die dabei aufgezeichneten Messdaten wurden mithilfe eines Matlab Skripts ausgewertet und zur Datenauswertung bereitgestellt. Eine Betrachtung der Austrittstemperaturen des Fluids  $TF4$  zeigte einen linearen Temperaturverlauf über die eingebrachte Heizleistung. In Einklang damit steht der Temperaturverlauf des Fluids über die Lauflänge. Jedoch sind hier für einige wenige Betriebspunkte Anomalien im Verlauf festzustellen. Die Untersuchung der Wärmeströme ermöglichte eine detailliertere Analyse. Mithilfe der Wärmeströme war es möglich eine Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten und damit der Nußeltzahl vorzunehmen. Ein Vergleich mit üblichen Nußelt-Korrelationen, wie der Dittus-Boelter-Gleichung oder der Gleichung von Gnielinski, lieferte eine Abweichung um den Faktor 1,25 – 1,5 vom analytisch bestimmten Wert und überschätzt den realen Wärmeübergang damit. Die Korrelationen dienen damit als gute Näherung zur Abschätzung des Wärmeübergangs. Ausgenommen hiervon sind jedoch die Betriebspunkte, die eine Anomalie im Temperaturverlauf aufweisen. Zur Untersuchung dieser Punkte wurden die Wärmeströme näher betrachtet. Es fiel auf, dass es in den betrachteten Abschnitten zu einer unüblichen Wärmefreisetzung mit Temperaturen von bis zu  $1200^\circ C$  kommt. Das deutete darauf hin, dass es innerhalb des Rohrs zu einer Zersetzung von Lachgas in seine Bestandteile Sauerstoff ( $O_2$ ) und Stickstoff ( $N_2$ ) kam. In folge der Zersetzung kommt es der Theorie nach zu einer starken Wärmefreisetzung innerhalb des Fluids.

Eine Charakterisierung der Zersetzungsbedingungen gestaltete sich als schwierig. Da sich das Lachgas in einem metastabilen Zustand befindet, benötigt es Aktivierungsenergie in Form

von Wärme um daraufhin, unter starker Wärmefreisetzung, in einen stabilen Zustand überzugehen. Die Bestimmung der Aktivierungsenergie war im vorliegenden Fall nicht möglich, da die Messstellen der Fluidtemperatur engmaschiger hätten sein müssen. Es lässt sich jedoch festhalten, dass die Zersetzung ausschließlich bei sehr geringen Massenströmen von ca.  $0,1 \text{ g/s}$  eingetreten ist. Bei höheren Massenströmen ist die in der Abhandlung von Kuznetsov et al. [32] beschriebene Aufenthaltszeit des Fluids zu gering, um eine Zersetzung unter den vorliegenden Bedingungen auszulösen.

### 6.1. Handlungsempfehlung für zukünftige Forschungsarbeiten

Abschließend soll im folgenden Abschnitt eine Handlungsempfehlung für nachfolgende Arbeiten anhand der gewonnenen Erkenntnisse ausgesprochen werden.

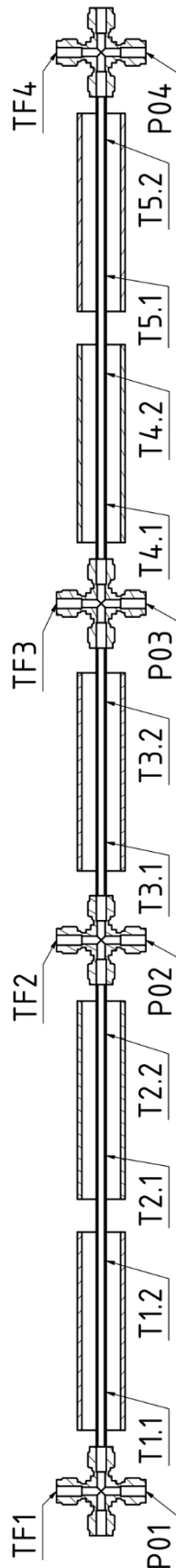
Mit Blick auf die Testumgebung traten Probleme bei der Zuführung von Lachgas zu Messstrecke auf. Unter anderem kam es dazu, dass der Domdruckregler, der für die Einstellung des Versorgungsdrucks zuständig ist, mit anhaltendem Versuchsbetrieb keine Ansteuerung ermöglichte. Eine Untersuchung des Problems ergab, dass eine Membran im inneren des Reglers aufgrund der niedrigen Temperaturen, hervorgerufen durch die Expansion des Gases, einfrore und damit die Regelfähigkeit verloren ging. Der Einsatz eines Domdruckreglers mit niedrigeren Betriebstemperaturen oder die Möglichkeit einer Beheizung kann diesen Aspekt umgehen. Zudem gestaltete sich die Einstellung des Massenstroms als herausfordernd. Hierfür könnte der Einsatz eines ansteuerbaren und regelnden Nadelventils am Auslass aus der Vakuumkammer eine deutliche Erleichterung darstellen. Außerdem kann hierdurch die Regeltüte des Massenstroms deutlich verbessert werden.

Bezogen auf den Versuchsaufbau und dessen Vorbereitung kann zum einen der keramische 3D Druck deutlich optimiert werden und zum anderen die Instrumentierung mit Sensoren verbessert werden. Für den Fall des 3D Drucks traten, wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben, einige Herausforderungen auf. Die Anschaffung eines neuen Druckers soll hierfür Abhilfe schaffen. Insbesondere mit Blick auf maßhaltige und hochtemperaturbeständige Bauteile bietet sich mithilfe dieser Technologie eine große Chance. Der neue Drucker konnte im Rahmen von Testdrucken bereits eingesetzt werden. Infolge dessen wiesen die Drucke nach dem Brand mit den bekannten Parametern (vgl. Kapitel 3.5.2) nahezu keine Verformung auf und erfordern lediglich einer Feinjustage. Die Positionierung der Drucksensoren sollte zur Vermeidung von Beschädigungen und Ausfällen bereits zu Beginn so gewählt werden, dass keine direkte Wärmestrahlung auftrifft. Alternativ muss über eine Möglichkeit zu Abschirmung beziehungsweise Isolierung der Sensoren nachgedacht werden. Zur Bestimmung der Aktivierungsenergie der Zersetzung von Lachgas und damit der Charakterisierung der Zersetzungsbedingungen muss, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, eine deutliche Erhöhung der Messstellendichte erreicht werden. Aufgrund der aktuellen Einbausituation der Messstellen im Fluid ist eine Messung dieser Temperaturen lediglich zwischen den Heizelementen möglich. Unter Umständen kann hier ein Umweg über die Oberflächentemperatur der Rohre gegangen werden. Jedoch ist auch hier eine deutliche Erhöhung der Messstellendichte notwendig.

Mithilfe der beschriebenen Verbesserungsmöglichkeiten können in zukünftigen Arbeiten aufgetretene Probleme umgangen, neue Technologien prozesssicherer eingesetzt und eine detailliertere Untersuchung der Zersetzungsbedingungen von Lachgas vorgenommen werden.

## Anhang A

### A.1 Position der Messstellen





## A.2 Technische Zeichnung der Heizelemente [35]

Copying of this document and giving it to others and the use or communication of the contents thereof, are forbidden without express authority. All rights reserved.

Weitergabe und Vervielfältigung dieser Unterlage, sowie Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Alle Rechte vorbehalten.

Projektionsmethode:

Zeichnungskopie zu EMPB  
 26.03.2019  
 Geprüft: i.A.DeckelmannK

Paul Rauschert Steinbach GmbH  
 Fabrikweg 1  
 96361 Steinbach am Wald

Power (*)	1050W ± 125W	(*) Values fit automatically if the resistance lies within the tolerance range and the heater is used with the specified voltage in calm air and can radiate free in all directions. Thus these values are no check sizes. (**) No check size, process-related variation possible.
Temperature (*)	1100°C ± 75°C	
Resistance	2.3 Ohm ± 0.3 Ohm	
Voltage	100 Vac	
Kennwerte		

VK-Art.-Nr.:  
**880103100**

Werkstoff: C799, Pt, Ag	19	Datum	Name	Bezeichnung:
Allgem. Toleranzen: DIN 40680M	Bear.	30.01.	RP	<b>HT- Rohrheizer</b>
Artikel- Nr.:	Gepr.	30.01.	RP	Zeichnungs- Nr.: 13-2019A
2107847H00000	Freig.	05.02.19	MA	Firma:
	Maßstab: 1:2			<b>Allgemein</b>
Ä. Buchst.	Bemerkung	Datum	Name	Format: A4



## Literaturverzeichnis

- [1] H. Ciezki, „Raketentreibstoffe I (Flüssigtreibstoffe)“ Hardthausen, 2020.
- [2] F. Kalberlah und M. Schwarz, „Karzinogene, mutagene, reproduktionstoxische (CMR) und andere problematische Stoffe in Produkten“ Umweltbundesamt, Freiburg, 2011.
- [3] „DLR Fortschrittliche Treibstoffe“ [Online]. Available: [https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-8485/14621\\_read-36501/](https://www.dlr.de/ra/desktopdefault.aspx/tabid-8485/14621_read-36501/). [Zugriff am 03.03.2022].
- [4] B. Weigand und J. von Wolfersdorf, „Wärmeübertragung (Manuskript zur Vorlesung)“ ITLR Universität Stuttgart, Stuttgart, 2007.
- [5] H. Herwig und A. Moschallski, „Wärmeübertragung“ Springer Vieweg, Hamburg, 2019.
- [6] „Thermophysical properties of nitrous oxide“ ESDU, 2006.
- [7] L. Werling, T. Höger, H. Ciezki und S. Schlechtriem, „Experimental and Theoretical Analysis of the Combustion Efficiency and the Heat Loads on a N<sub>2</sub>O/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> Green Propellant Combustion Chamber“ 2019.
- [8] E. Messerschmidt und S. Fasoulas, „Raumfahrtsysteme“ Springer-Verlag GmbH, Stuttgart, 2017.
- [9] „Chemie.de“ [Online]. Available: [https://www.chemie.de/lexikon/Wiensches\\_Verschiebungsgesetz.html](https://www.chemie.de/lexikon/Wiensches_Verschiebungsgesetz.html). [Zugriff am 22.02.2022].
- [10] „Chemie.de“ [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Stefan-Boltzmann-Gesetz.html>. [Zugriff am 02.02.2022].
- [11] „Manuskript Wärmestrahlung“ Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung, Stuttgart, 2021.
- [12] A. Gernoth, „Chemische Raumfahrtantriebe - Kühlung von Raketenschubkammer,“ Stuttgart, 2020.
- [13] G. P. Sutton und O. Biblarz, „Rocket Propulsion Elements“ JOHN WILEY & SONS, 2001.
- [14] D. J. Alser, „An experimental investigation of nozzle cooling for a small rocket engine“ Air Force Institute of Technology, 1963.
- [15] S. R. Shine und S. Shri Nidhi, „Review on film cooling of liquid rocket engines“ 2016.
- [16] M. Pizzarelli, „Regenerative cooling of liquid rocket engine thrust chambers“.
- [17] C. Koch, „Versuchs- und Messtechnik in Gasturbinen und Turbomaschinen V6“ Stuttgart, 2020.

- [18] CENELEC, „Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (DIN EN 60584-1)“ Beuth Verlag GmbH, 2014.
- [19] „Guenther Temperaturmesstechnik“ [Online]. Available: <https://www.guenther.eu/techninformationen/thermoelemente/5-grenzabweichung-fuer-thermoelemente>. [Zugriff am 02.03.2022].
- [20] C. Koch, „Versuchs- und Messtechnik in Gasturbinen und Turbomaschinen V4“ Stuttgart, 2020.
- [21] „Kistler Instrumente AG“ [Online]. Available: <https://www.kistler.com/de/glossar/begriff/piezoelektrischer-drucksensor/>. [Zugriff am 03.02.2022].
- [22] A. Breitkopf, „Statista“ 20.01.2022. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/787021/umfrage/meinung-zur-relevanz-von-technologie-trends-fuer-unternehmen-in-deutschland/>. [Zugriff am 20.02.2022].
- [23] A. Breitkopf, „Statista“ 20.01.2022. [Online]. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/802439/umfrage/globales-marktvolumen-von-3d-druck-verfahren-in-ausgewaehlten-branchen/>. [Zugriff am 20.2.2022].
- [24] „Fraunhofer“ [Online]. Available: [https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/kompetenzen/additive\\_fertigung\\_am.html](https://www.igcv.fraunhofer.de/de/forschung/kompetenzen/additive_fertigung_am.html). [Zugriff am 21.11.2021].
- [25] „Mission Additive“ [Online]. Available: <https://www.mission-additive.de/was-ist-additive-fertigung-definitionen-anwendungen-potenziale-a-898676/>. [Zugriff am 21.11.2021].
- [26] „3dNatives“ [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/de/3d-druck-schmelzschichtung/#!>. [Zugriff am 18.01.2022].
- [27] „3Duck“ [Online]. Available: <https://3druck.com/3d-druck-grundkurs/uebersicht-3d-druckverfahren/>. [Zugriff am 21.10.2021].
- [28] „3DNatives“ [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/de/selektives-lasersintern/>. [Zugriff am 21.10.2021].
- [29] „THETHON3D“ [Online]. Available: <https://tethon3d.com/product/porcelain-ceramic-resin/>. [Zugriff am 10.11.2021].
- [30] „Werkstoffdatenblatt 1.4571“ [Online]. Available: <https://www.stauberstahl.com/werkstoffe/14571-werkstoff-datenblatt/>. [Zugriff am 13.02.2022].
- [31] J. Weimann, „Toxicity of nitrous oxide“ 2003.
- [32] M. Kuznetsov, J. Grune und S. Jallais, „Decomposition of N<sub>2</sub>O Dynamics of Explosion and Flame Propagation“ Karlsruhe, 2017.

- [33] „NIST Nitrous Oxide“ [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C10024972&Units=SI&Mask=1#ref-1>. [Zugriff am 11.02.2022].
- [34] „Chemie.de“ [Online]. Available: <https://www.chemie.de/lexikon/Metastabilit%C3%A4t.html>. [Zugriff am 26.02.2022].
- [35] Rauschert GmbH , „Datenblatt HT-Rohrheizer“ 2019.
- [36] „DLR M11.2“ [Online]. Available: <https://www.dlr.de/content/de/grossforschungsanlagen/pruefstandskomplex-m11.html>. [Zugriff am 04.01.2022].
- [37] „STS Sensors“ [Online]. Available: [https://www.stssensors.com/de/wp-content/uploads/sites/5/2020/07/Datasheet-ATM.mini-Miniatur\\_Drucktransmitter\\_DE.pdf](https://www.stssensors.com/de/wp-content/uploads/sites/5/2020/07/Datasheet-ATM.mini-Miniatur_Drucktransmitter_DE.pdf). [Zugriff am 04.01.2022].
- [38] N. Stoll, „Realisierung einer Wärmeübergangsmessstrecke zur Untersuchung von „Green Rocket Propellants“ Aachen, 2019.
- [39] „Wikipedia Wärmestrahlung“ [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/W%C3%A4rmestrahlung>. [Zugriff am 05.01.2022].
- [40] „Formlabs“ [Online]. Available: <https://formlabs.com/de/blog/einfuehrung-sls-3d-druck/>. [Zugriff am 21.10.2021].
- [41] „RS Components“ [Online]. Available: <https://de.rs-online.com/web/p/thermoelemente/3971236>. [Zugriff am 04.01.2022].
- [42] „Lycee Guillaume Kroll“ [Online]. Available: [http://chimie.lgk.lu/Common\\_c\\_files/c\\_4\\_TGSNPS/aktana\\_aha.htm](http://chimie.lgk.lu/Common_c_files/c_4_TGSNPS/aktana_aha.htm). [Zugriff am 25.02.2022].