



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK

Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Aufbau und Modellbildung einer Versuchsanlage zur Untersuchung von Wärmetransportvorgängen in Feststoffen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing oder DI) unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.

Andreas Werner

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Lukas Kunz

01125624

Serravagasse 14/-/9

Wien, im August 2020

Lukas Kunz



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich das Thema dieser Arbeit bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im August 2020

Lukas Kunz

Vorwort

Ich möchte mich hiermit bei allen bedanken, die mich während der Diplomarbeit unterstützt haben, besonders bei

Herrn Dr.techn. Andreas Werner der mir viele Themen in meinem Interessenbereich vorstellte und ich so freie Auswahl bei meiner Arbeit hatte. Des Weiteren für die während der gesamten Arbeit andauernden Unterstützung und Hilfestellung bei auftretenden Problemen.

allen Mitarbeitern des Science Centers der TU Wien für ihre freundliche Unterstützung bei dem Bau der Versuchsanlage.

meinen Eltern und Großeltern, die mir ein Studium erst ermöglichten.

meiner Schwester, die diese Arbeit korrekturgelesen hat.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Untersuchung von Wärmeleitungsphänomenen in Feststoffen. Es wurde eine Versuchsanlage ausgelegt, konstruiert und gebaut, welche im weiteren Verlauf für den Zweck einer Laborübung für Studenten an der TU Wien verwendet werden soll. Dies dient der Veranschaulichung des auf der Universität erworbenen theoretischen Wissens im Gebiet der Wärmeleitung. Des Weiteren wurden Computermodelle der Anlage in MS-Excel und MATLAB programmiert, um so Vergleiche zwischen dem realen Verhalten und der mit thermodynamischen Grundgleichungen aufgebauten Simulation zu erstellen. Es erfolgte eine Betrachtung der Unterschiede sowie eine Diskussion von deren Ursachen.

Abstract

This paper deals with the investigation of heat conduct phenomena in solids. For this reason a test facility was designed and built. It shall provide the students with a better and easier understanding of the theoretical knowledge of heat conduction studied at the university. Furthermore models were programmed in VBA Excel and MATLAB to simulate the test facility to investigate the differences of the testing results with the calculated numbers of the simulation. An evaluation of errors was carried out and it's causes were up for discussion.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis.....	III
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen.....	3
2.1 Wärmeübertragung.....	3
2.1.1 Wärmeleitung in ruhenden Medien	4
2.1.2 Wärmetransport durch Konvektion.....	5
2.1.3 Wärmeübertragung durch Strahlung.....	7
2.2 Temperaturmessung	9
2.2.1 Widerstandstemperaturmessung	10
2.2.2 Strahlungstemperaturmessung	12
2.2.3 Temperaturmessung mittels Thermoelemente.....	15
3 Aufbau der Versuchsanlage	18
4 Berechnung der Versuchsanlage	23
4.1 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten am Probestab	23
4.1.1 Freie Konvektion	23
4.1.2 Erzwungene Konvektion	25
4.1.3 Kombiniertes Zustand.....	27
4.2 Definition der Wärmeleitgleichung am Probestab.....	28
4.2.1 Instationäre WLG	29
4.2.2 Stationäre WLG	31
4.3 Wärmeübertragung des Thermoöles an den Probestab.....	32
4.4 Physikalische Kennwerte der feuchten Luft und der Wärmeträgerflüssigkeit	36
4.5 Wärmeleitfähigkeit der Materialproben	38
5 Simulation der Versuchsanlage.....	40
5.1 Erste Berechnung mittels Mathcad.....	40

5.2	Simulation der Anlage mittels VBA im stationären Zustand.....	40
5.2.1	Aufbau der Maske:.....	41
5.2.2	Aufbau des VBA-Codes:	44
5.3	Instationärer Temperaturverlauf mittels MATLAB.....	46
6	Prozessdaten und Auswertung.....	49
6.1	Ergebnisse der Versuchsanlage.....	49
6.2	Ergebnisse des Computermodells.....	51
6.2.1	Simulation der Standardwerte.....	54
6.2.2	Einfluss des Mediums im Spalt auf die Anfangstemperatur	56
6.2.3	Einfluss der Anlagengeometrie auf den Temperaturverlauf	59
6.2.4	Temperaturverläufe unter kombinierter Konvektion	65
6.2.5	Ergebnisse der instationären WLG	68
6.3	Vergleich der Versuchsanlage mit den Simulationen	72
7	Fazit.....	80
8	Literaturverzeichnis	82

Symbolverzeichnis

Formelzeichen

Symbol	Bezeichnung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient	$\frac{W}{m^2 K}$
α_{Ab}	Absorptionsgrad	–
β	thermischer Ausdehnungskoeffizient	K^{-1}
δ_{ij}	Kronecker-Delta	–
ε	Emissionsgrad	–
η	Dynamische Viskosität	$Pa s$
θ	Temperatur	$^{\circ}C$
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\frac{W}{m K}$
λ_w	Wellenlänge	m
ρ	Dichte	$\frac{kg}{m^3}$
ρ_{Re}	Reflexionsgrad	–
σ	Stephan-Boltzmann-Konstante	$\frac{W}{m^2 K^4}$
σ_{ij}	Spannungstensor $i, j = 1, 2, 3$	$\frac{N}{m^2}$
σ'_{ij}	Reibspannungstensor	$\frac{N}{m^2}$
τ_{Tr}	Transmissionsgrad	–
φ_f	relative Luftfeuchtigkeit	–
χ_c	Molanteil von Kohlenstoffdioxid	–
χ_w	Molanteil von Wasserdampf in der Luft	–
a	Temperaturleitfähigkeit	$\frac{m^2}{s}$

c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\frac{J}{kg K}$
C_{12}	Strahlungsaustauschzahl	–
D	Durchmesser	m
$D_{\text{öleit}}$	Durchmesser der Thermoölleitung	m
f_3	Korrekturfunktion bei freier Konvektion	–
f_4	Korrekturfunktion bei erzwungener Konvektion	–
g	Erdbeschleunigung	$\frac{m}{s^2}$
Gr	Grashof-Zahl	–
h, h_α	Spezifische Enthalpie, Komponente α	$\frac{J}{kg}$
j_α	Diffusionsstromdichte der Komponente α	$\frac{kg}{m^2 s}$
k_{ges}	Wärmedurchgangszahl	$\frac{W}{m^2 K}$
L_{Stab}	herausragende Länge des Probestabes	m
L_c	Charakteristische Länge	m
m_{Stab}	Konstante des Probestabes	$\frac{1}{m}$
\dot{m}	Massenstrom	$\frac{kg}{s}$
n, n_i	Normalvektor	1
Nu	Nußelt-Zahl	–
O	Oberfläche	m^2
p	Druck	Pa
Pr	Prandtl-Zahl	–
p_U	Umgebungsdruck	Pa
p_{sv}	Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes	Pa
\dot{q}	Wärmestromdichte	$\frac{W}{m^2}$
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	Elektrischer Widerstand	Ω

R_0	Nennwiderstand bei 0°C	Ω
Ra	Rayleigh-Zahl	—
Re	Reynolds-Zahl	—
t	Zeitkoordinate	s
T_0	Temperatur am Einspannpunkt des Stabes	K
$T_{\text{Öl_Mittel}}$	Mittlere Temperatur des Thermoöls	K
T_{mittel}	Über die herausstehende Stablänge gemittelte Temperatur	K
T	Temperatur	K
u	Spezifische innere Energie	$\frac{m}{s}$
v, v_i	Strömungsgeschwindigkeit, Komponente i	$\frac{m}{s}$
V	Volumen	m^3
x	Längenkoordinate	m
Z	Kompressibilitätsfaktor	—

Indices

Symbol	Bezeichnung
<i>A</i>	Außen
<i>Ab</i>	Absorption
<i>aus</i>	Ausgangsstrom
<i>ein</i>	Eingangsstrom
<i>F</i>	Fluid
<i>frei</i>	Freie Konvektion
<i>Hülse</i>	Kupferhülse
<i>I</i>	Innen
<i>K</i>	Konvektion
<i>kombi</i>	Kombination aus freier und erzwungener Konvektion
<i>lam</i>	Laminar
<i>Luft</i>	Umgebungsluft
<i>Re</i>	Reflexion
<i>s</i>	Feststoff
<i>Spalt</i>	Spalt zwischen Kupferhülse und Probestab
<i>Stab</i>	Materialprobestab
<i>Str</i>	Wärmestrahlung
<i>Tr</i>	Transmission
<i>turb</i>	Turbulent
<i>U</i>	Umgebung
<i>W</i>	Wand
<i>zwang</i>	Erzwungene Konvektion

1 Einleitung

Die Anfänge der Thermodynamik beruhen auf der Theorie der Phlogistonen, welche zu Beginn des 18. Jahrhunderts aufgestellt wurde. Die Theorie besagt, dass die Verbrennung ein chemischer Prozess ist bei dem eine hypothetische Substanz frei wird, mit dem Namen Phlogiston. Die Brennbarkeit des Stoffes war dabei proportional zu dessen Phlogistongehalt. Dieser Substanz wurde die Eigenschaft zugeschrieben nicht brennbar zu sein. Um 1770 kam es zu der Entdeckung des Sauerstoffes, welcher anfangs nicht in Verbindung mit Verbrennungsreaktionen gebracht wurde. Erst 1775 stellte Antoine Laurent de Lavoisier diesen Zusammenhang mit einem Experiment fest. Des Weiteren versuchte er die Rolle der Wärme mittels der von ihm aufgestellten Kalorischen Theorie zu erklären. Lavoisier nahm an, dass eine charakteristische Flüssigkeit (*fluide particulier*) in einem Körper existiert. Ist diese, auch „Feurige Flüssigkeit“ oder „Wärmesubstanz“ genannt, in großen Mengen an einem Ort vorhanden ist es dort warm. Ist wenig Wärmesubstanz an einem Ort ist es kalt. Jeder Körper hat eine fixe Menge an charakteristischer Flüssigkeit und sie fließt von einem wärmeren zu einem kälteren Körper. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde angenommen, dass die „Feurige Flüssigkeit“ aus Materie sei. 1798 zeigte Sir Benjamin Thompson, Graf Rumford mit einem Experiment auf, dass dies nicht der Fall ist. Es folgte die Carnot'sche Theorie, welche die Effekte der Wärmemenge mit der Temperatur bei welcher sie übertragen wurde in Verbindung brachte. Die Grundlagen der klassischen Thermodynamik sind auf die von Clausius, Kelvin und Rankine um 1850/54 modifizierte Carnot'sche Theorie zurückzuführen. Sie stellten Axiome und Postulate auf, auf welche sich die heutige Thermodynamik stützt [1].

Diese Arbeit untersucht die Wärmeübertragung als eine dieser wichtigen Grundlagen. Wärmeübertragung ein Mechanismus zum Transport von thermischer Energie von einem wärmeren System zu einem kälteren System. Dieser Vorgang lässt sich in drei unterschiedliche Bereiche aufteilen. Erstens die Wärmeleitung in ruhenden Medien, zweitens Wärmeübertragung durch Konvektion und drittens die Wärmestrahlung. Bei der Ersten erfolgt der Wärmetransport in einem Stoff welcher sich im Stillstand befindet, aufgrund einer angelegten Temperaturdifferenz. Die physikalischen Eigenschaften eines Stoffes haben einen direkten Einfluss auf die Wärmeleitung. Der Wärmetransport zwischen einer festen Wand und einem strömenden Fluid wird als

Konvektion bezeichnet. Sie ist abhängig von der Temperaturgrenzschicht zwischen den Beiden. Diese wird weiters durch die Strömung beeinflusst. Je nach Ursache der Strömung lässt sie sich weiter unterscheiden in freie und erzwungene Konvektion. Erstere wird aufgrund einer Strömung, erzeugt durch einen Dichteunterschied des Mediums, welcher wiederum durch einen Temperaturunterschied verursacht wird, hervorgerufen. Bei der erzwungenen Konvektion wird die Strömung durch eine äußere Wirkung, wie beispielsweise ein Gebläse, verursacht.

Zu beachten ist hierbei, dass bei der Konvektion immer ein gewisser Anteil an thermischer Energie aufgrund von Wärmeleitung übertragen wird, wodurch Konvektion und Leitung in manchen Werken zusammengefasst werden. In dieser Arbeit erfolgt eine getrennte Betrachtung aufgrund der besseren Unterscheidbarkeit der Wärmetransportvorgänge. Bei der Strahlung erfolgt die Wärmeübertragung durch die jeweilige Abgabe bzw. Aufnahme von elektromagnetischer Strahlung an/von Oberflächen. Ein Medium zwischen den Oberflächen wird nicht benötigt [2].

Das Ziel dieser Arbeit, in Kombination mit der gebauten Versuchsanlage, ist es ein besseres Verständnis der Übertragung von thermischer Energie in Feststoffen zu erhalten und dieses für Studenten greifbarer zu machen. Für das Design der Anlage wurden Vorrichtungen mit ähnlichem Zweck herangezogen und an die benötigten Randbedingungen angepasst. Dafür wurden die Materialproben zu Stäben verarbeitet welche einseitig in die Anlage eingespannt und beheizt werden können. Ein eingebauter regelbarer Querstromlüfter dient der Veranschaulichung der Einflüsse von erzwungener Konvektion auf den Probestab. Der Temperaturverlauf wird mit Thermometern aufgenommen und dargestellt. Die Prozessparameter, wie beispielsweise Material des Probestabes oder Anströmgeschwindigkeit wurden beobachtet und deren Einflüsse diskutiert. Weiters erfolgte die Programmierung einer Simulation der Anlage. Durch einen Vergleich der an der Versuchsanlage ermittelten Werte mit den Simulationsergebnissen sollen mögliche Unterschiede beschrieben und beurteilt werden.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die thermodynamischen Grundlagen zum Thema der Wärmeübertragung angeführt. Auf diesen Überlegungen beruhen in weitere Folge die Modellbildung, Simulation und Berechnung. Des Weiteren erfolgt eine Beschreibung der in der Anlage verwendeten Temperaturmessmethoden.

2.1 Wärmeübertragung

Erfolgt ein Transport von thermischer Energie zwischen zwei oder mehreren Systemen unterschiedlicher Temperatur wird dies allgemein als Wärmeübertragung bezeichnet. Wie diese Energie, auch Wärme genannt, übertragen wird und warum dieser Vorgang abläuft bleibt bei der ersten Definition außer Acht gelassen. Bekannt ist, dass der Transport immer vom wärmeren System in Richtung des kälteren vorstättengeht. Für eine genauere Beschreibung der Vorgänge muss die Wärmeübertragung in Wärmetransport in ruhenden Körpern und strömenden Fluiden, sowie in Wärmestrahlung aufgeteilt werden [2].

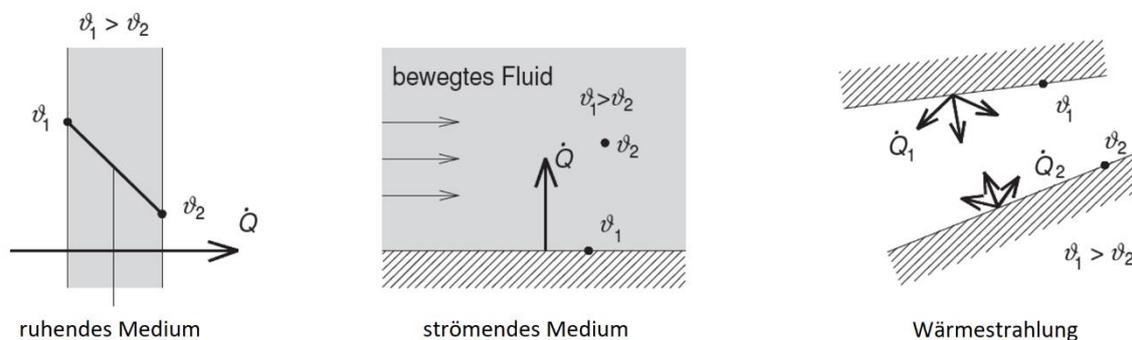


Abbildung 1: Arten der Wärmetransportvorgänge [2]

Der Wärmeübergang in einem Feststoff oder ruhenden Fluid läuft ausschließlich durch Wärmeleitung ab. Kommt es zu einer Strömung eines Fluids über eine Wand erfolgt neben der Wärmeleitung zwischen Wand und Fluid noch ein weiterer Vorgang. Die von der Wand aufgewärmten Teilchen werden aufgrund der Strömung weiter transportiert und beeinflussen dort andere Teilchen. Somit ist die Wärmeübertragung in einem bewegten Fluid von dessen Strömung abhängig. Dieser Vorgang ist allgemein als Konvektion bekannt. Hingegen wird beim Wärmeübergang mittels Strahlung kein Medium für die Übertragung zwischen zwei Körpern benötigt. Die thermische Energie wird mittels elektromagnetischer Wellen transportiert [2].

2.1.1 Wärmeleitung in ruhenden Medien

Bei der Erwärmung eines Stoffes beginnen sich dessen Atome bzw. Moleküle zu bewegen. Die aufgenommene thermische Energie wurde somit als innere Energie gespeichert. Wahrgenommen werden kann dies von außen als Temperatur. Je wärmer ein Stoff erscheint, desto ausgeprägter ist die Bewegung der Atome bzw. Moleküle. Stoßen die Teilchen mit anderen in ihrer Nähe zusammen und übertragen dabei die Bewegung und somit die Energie wird dies als molekulare Wärmeleitung bezeichnet [3]. Die Wärmeleitung in ruhenden Medien ist daher von der angelegten Temperaturdifferenz und den Eigenschaften des Mediums abhängig. Dieser Zusammenhang kann mit dem von Fourier aufgestellten Wärmeleitungsgesetz ausgedrückt werden, vgl. [2]:

$$\dot{q} = -\lambda * \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \quad (1)$$

Hierbei wird die Wärmestromdichte \dot{q} als die negative Wärmeleitfähigkeit λ , welcher die Stoffkenngröße darstellt, multipliziert mit dem Temperaturgradienten, definiert. Sie gibt jenen Wärmestrom an, welcher pro Zeit und Flächeneinheit übertragen wird [2].

Das Verhalten von Stoffen unter Einfluss von Wärmefluss wird durch ihren inneren Aufbau beeinflusst. Kristalline Stoffe leiten meist besser als amorphe. Je nach Orientierung der Kristalle können innerhalb eines Stoffes die Wärmeleit Zahlen unterschiedlich hoch sein. Ebenfalls weisen dichter gepackte Materialien meist eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf als weniger dicht gepackte. Für die Wärmeleitung in ruhenden Gasen, welche sich unterhalb des kritischen Drucks befinden, kann gesagt werden, dass mit steigender Temperatur die molekulare Wärmeleitung zunimmt [3].

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Wärmeleitung in Feststoffen, wobei ein Großteil der für die Versuchsanlage ausgewählten Probestäbe aus Metallen bestehen. Metalle weisen durch ihren Aufbau leicht bewegliche Valenzelektronen auf, welche nur schwach an ihre jeweiligen Atome gebunden sind. Sie können sich nahezu frei im Metallgitter bewegen. Dieser Aufbau sorgt für die charakteristischen Metalleigenschaften, wie beispielsweise die hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit sowie die typische hohe Reflektionsfähigkeit der Oberfläche bei richtiger Bearbeitung. Zwei gleichzeitig ablaufende Mechanismen sind für den Wärmetransport in metallischen Kristallstrukturen verantwortlich. Einerseits das Konzept der elementaren Anregungen der Gitterschwingung (Phononen) und andererseits die

Bewegung der Valenzelektronen. Diese Phänomene können als unabhängig voneinander betrachtet werden, wodurch sich die Gesamtwärmeleitfähigkeit additiv aus deren Wärmeleitzahlen zusammensetzt. Die Wärmeleitung bei Metallen, welche durch die Valenzelektronen erfolgt, ist im Normalfall größer als die durch Phononen [3, 4].

Im Gegensatz zu Metallen weisen die Elektronen von dielektrischen Feststoffen, Isolatoren, keinerlei freie Bewegung auf. Sie sind somit auch nicht an der molekularen Wärmeleitung beteiligt. Der Wärmetransport erfolgt durch das Schwingen von Atomen und Molekülen um ihre Ruhelage, welche über ihre Kohäsionskräfte die Energie an benachbarte Teilchen weitergeben. Je stärker diese Bewegung ausgeprägt ist, desto höher ist die thermische Energie und in weiterer Folge die Temperatur [3].

2.1.2 Wärmetransport durch Konvektion

Beim Vorbeiströmen eines Fluids an einer festen Oberfläche kommt es im Falle eines Temperaturunterschiedes zwischen diesen zum Austausch an thermischer Energie. Die Energie fließt vom wärmeren Medium in Richtung des kälteren. Aufgrund der Tatsache, dass die Bindungskräfte von Atomen bzw. Molekülen in Fluiden kleiner sind als in Feststoffen weisen die Teilchen eine höhere Beweglichkeit auf. Somit ist es möglich thermische Energie nicht nur durch molekulare Wärmeleitung, wie bei Feststoffen zu transportieren, sondern auch durch den Transport der Teilchen selbst. Ein Atom bzw. Molekül, welches sich beispielsweise erwärmt hat, kann sich aufgrund der Fluideigenschaften durch das Medium an einen anderen Ort bewegen und dort seine Wärme abgeben. Dieser Vorgang wird konvektiver Wärmetransport (kurz. Konvektion) genannt. Die Bewegung der Teilchen in einem strömenden Fluid ist vom Strömungsfeld abhängig, womit gesagt werden kann, dass dies ebenfalls für die Konvektion gilt. Es erfolgt eine weitere Aufteilung nach Art der Strömung in freie und erzwungene Konvektion. Bei der freien Konvektion wird die Strömung durch einen Dichteunterschied im Fluid erzeugt, welcher wiederum durch einen Temperaturunterschied entsteht. Strömt hingegen ein Fluid aufgrund einer äußeren Anregung, beispielsweise eines Ventilators, handelt es sich um erzwungene Konvektion [3].

Die Wärmestromdichte \dot{q}_K bei konvektivem Wärmetransport berechnet sich mit Gleichung (2) über den Wärmeübergangskoeffizienten α_K , multipliziert mit der Differenz aus der Temperatur an der Wand T_W und der Fluidtemperatur T_F . Bei der

Fluidtemperatur ist darauf zu achten, dass diese aus einem Gebiet der Strömung stammt, welches sich in ausreichender Entfernung der Wand befindet um deren Einfluss zu minimieren [2].

$$\dot{q}_K = \alpha_K * (T_F - T_W) \quad (2)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient selbst ist abhängig von der Wand- und Fluidtemperatur, dem Zustand der Strömung (laminar oder turbulent) und ihren stofflichen Eigenschaften wie beispielsweise der Dichte ρ , der spezifischen Wärmekapazität c_p , der Viskosität η , der Wärmeleitfähigkeit λ und dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten β . Weitere wichtige Einflüsse sind die Geometrie des Raumes, welche sich durch die charakteristische Länge L_c ausdrückt, sowie die Oberfläche, an welcher der Wärmeaustausch stattfindet. Je nach Anordnung kann es auch zu Abhängigkeiten durch äußere Kraftfelder, wie beispielsweise der Erdbeschleunigung g kommen [3].

$$\alpha_K = \alpha_K(T_W, T_F, \rho, c_p, \lambda, \eta, \beta, L_c, g, \dots) \quad (3)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient ist nicht direkt messbar, da jede Form eines physikalischen Sensors sowohl die Temperatur- als auch die Strömungsgrenzschicht beeinflussen würde. Die Berechnung erfolgt über dimensionslose Kennzahlen [2].

In diesem Zusammenhang dienen dimensionslose Kennzahlen als Maßstabsfaktoren zwischen Modellen mit physikalischer Ähnlichkeit. Zwei Modelle sind physikalisch ähnlich, wenn das Verhältnis der auf sie wirkenden Kräfte gleich ist. Die Herleitung dieser Kenngrößen erfolgt durch das Aufstellen der differentiellen Massen-, Impuls- und Energiebilanz für eine Strömung. Die darin enthaltenen dimensionsbehafteten Stoffgrößen werden mit einer charakteristischen Bezugsgröße verknüpft, um so dimensionslose Größen zu erhalten. Durch Einsetzen in die differentiellen Grundgleichungen erhält man die dimensionslose Form der jeweiligen Gleichung. Modelle, welche gleiche dimensionslose Kennzahlen aufweisen, haben in weiterer Folge die gleiche Lösung der jeweiligen Differenzialgleichung und sind somit physikalisch ähnlich [3, 5].

Für die Bestimmung der Wärmeübergangskoeffizienten bei Konvektion werden die dimensionslosen Größen der Reynolds-, Grashof-, Prandtl- und Nußelt-Zahl benötigt. Der Zusammenhang ist gegeben mit, vgl. [2]:

$$Nu = \frac{\alpha_K * L_c}{\lambda_s} = f(Re, Gr, Pr, \left(\frac{x}{L_c}\right), \dots) \quad (4)$$

Die Nußelt-Zahl Nu ist eine normierte Größe zwischen dem aufgrund von Konvektion übertragenen Wärmestrom zwischen Wand und Fluid und dem theoretischen Wärmestrom, welcher sich durch reine molekulare Wärmeleitung bei gleicher Temperaturdifferenz einstellt. Die Grashof-Zahl Gr wird beim Wärmetransport aufgrund von freier Konvektion benötigt. Sie setzt die drei Kräfte, welche für die konvektive Strömung sorgen, ins Verhältnis. Dabei handelt es sich erstens um den Antrieb der Fluidteilchen aufgrund von Dichteunterschieden, zweitens den Scherkräften, welche dem Antrieb entgegenwirken, und drittens die Trägheit der Teilchen selbst, welche den ersten beiden Kräften entgegenwirkt. Die Prandtl-Zahl Pr gibt das Verhältnis von Wachstum und Dicke der Grenzschicht der Geschwindigkeit zur Temperaturgrenzschicht an. Bei der Berechnung für erzwungene Konvektion wird die Reynolds-Zahl Re benötigt. Sie wird durch den Quotienten aus den an einem Fluidteilchen in einer Strömung wirkenden Trägheitskräften und den Zähigkeitskräften gebildet [3].

2.1.3 Wärmeübertragung durch Strahlung

Bei der Wärmeübertragung mittels Strahlung wird thermische Energie ohne Bedarf eines Mediums mit elektromagnetischen Wellen von einer Oberfläche eines Körpers auf eine andere übertragen. Sie werden durch eine Bewegung von elektrisch geladenen Teilchen im Körper erzeugt und können sich frei im Raum ausbreiten. Die charakteristische Größe zur Beschreibung von Wärmestrahlung ist die Wellenlänge λ_w [3]. Der für den Wärmetransport relevante Wellenlängenbereich liegt zwischen 0,8 bis 400 μm . Er schließt somit den Bereich der sichtbaren Strahlung und Teile der infraroten Strahlung mit ein [2].

Die Intensität der Abstrahlung hängt von der absoluten Temperatur des Körpers ab. Sie steigt proportional mit der Temperatur an. Jeder feste Körper sowie jede Flüssigkeit mit ausreichend hoher Dichte sendet Wärmestrahlung aus. Ein Gas muss aus Molekülen, welche sich aus mehr als 2 Atomen zusammensetzen, bestehen, um nennenswert thermische Strahlung zu emittieren. Befinden sich zwei Körper mit unterschiedlichen Temperaturen in einem System, senden beide Wärmestrahlung aus. Der Körper mit der geringeren Temperatur nimmt mehr Strahlung auf als er abgibt und erwärmt sich. Umgekehrt kühlt der wärmere Körper ab [2].

Treffen emittierte thermische Wellen von einem System auf einen Körper werden diese von dem Körper absorbiert, reflektiert oder transmittiert. Es treten in der Realität meist zwei, manchmal drei, dieser Vorgänge gleichzeitig auf und sind je nach Oberflächenbeschaffenheit und optischen Eigenschaften unterschiedlich ausgeprägt [3].

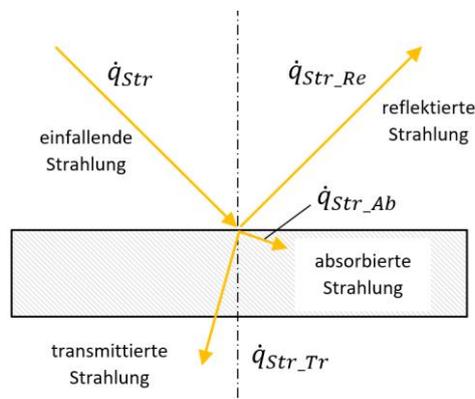


Abbildung 2: Verhalten eines Körpers bei einfallender Strahlung [3]

Absorbiert ein Körper die gesamte emittierte Strahlung und reflektiert und transmittiert nichts davon, wird er als idealer „Schwarzer Körper“ bezeichnet. Bei diesem Vorgang wird die Strahlung vollständig als thermische Energie aufgenommen. Der Name stammt von der Eigenschaft, dass ein Körper, welcher das gesamte Licht absorbiert, für das menschliche Auge schwarz wirkt. Ein weiteres Charakteristikum ist, dass „Schwarze Körper“ ihr Maximum an Energie emittieren. Sie sind somit ideale Absorber und Emitter. Über ihre Oberfläche weisen sie eine konstante Intensitätsverteilung auf und Strahlung wird gleichmäßig diffus in alle Richtungen gesendet. Daher werden die Strahlungseigenschaften von realen Körpern im Vergleich zu den Eigenschaften von „Schwarzen Körpern“ beschrieben [3].

Der Emissionsgrad ε gibt das Verhältnis der von einem realen Körper abgehenden Wärmestrahlung zu der eines „Schwarzen Körpers“ bei gleicher Temperatur an. Ein idealer „Schwarzer Körper“ weist ein Emissionsverhältnis von $\varepsilon = 1$ und ein Absorptionsvermögen $\alpha_{Ab} = 1$ auf. Das Absorptionsvermögen gibt an wieviel Strahlungsenergie eine bestimmte Fläche absorbiert hat im Vergleich zu der insgesamt auf diese Fläche einfallenden Energie. Unter stationären Bedingungen sind Emissionsgrad und Absorptionsverhältnis eines Körpers gleich. Demgegenüber gilt, dass ein idealer „Weißer Körper“ die gesamte auftreffende Strahlung reflektiert. Sein Absorptionsvermögen ist gleich Null, hingegen ist sein Reflexionsgrad $\rho_{Re} = 1$. Der

Reflexionsgrad ist der Quotient aus der reflektierten zur einfallenden Strahlungsintensität. Er hängt von einigen Faktoren ab wie beispielsweise dem Einfallswinkel, der Homogenität und Temperatur der Oberfläche, sowie der Wellenlänge der Strahlung [2, 3].

Zwischen dem idealen Schwarzen und Weißen Körper liegt der „Graue Körper“, welcher einen konstanten Emissionsgrad ε größer 0 und kleiner 1 aufweist. Sein Emissionsgrad ist nicht von der Wellenlänge abhängig. Die Wärmestromdichte \dot{q}_{Str} welche ein „Grauer Körper“ mit einer Temperatur T ausstrahlt ist proportional zur vierten Potenz dieser Temperatur und kann ausgedrückt werden über, vgl. [2]:

$$\dot{q}_{Str} = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (5)$$

Die Stephan-Boltzmann-Konstante σ ist definiert als:

$$\sigma = 5,67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K^4} \quad (6)$$

Ein Körper gilt als „Farbig“ wenn er nur eine bestimmte Wellenlänge reflektiert. Lässt ein Körper Strahlung vollständig oder nur teilweise durch ihn hindurch wird er als „Transmittierend“ bezeichnet. Der Transmissionskoeffizient τ_{Tr} ist der Anteil an Strahlung, die der Körper durchlässt. Der Zusammenhang zwischen Absorptions-, Reflexions- und Transmissionsgrad ist gegeben mit, vgl. [2, 3]:

$$1 = \alpha_{Ab}(\lambda_W, T) + \rho_{Re}(\lambda_W, T) + \tau_{Tr}(\lambda_W, T) \quad (7)$$

Aufgrund der vielen möglichen Einflüsse ist die Berechnung des Wärmetransportes aufgrund von Strahlung nur bei genau bekannten Randbedingungen möglich. Zu diesen Faktoren zählen das Gefüge und die Temperatur des Stoffes, die Oberflächeneigenschaften, wie beispielsweise Oxidationen oder Rauheit, Form des Kristallgitters und die Richtung sowie die Wellenlänge der Strahlung [6].

2.2 Temperaturmessung

In diesem Abschnitt werden die Temperaturmessmethoden erklärt, welche bei der Versuchsanlage zum Einsatz kamen. Die Temperatur zählt zu den intensiven Zustandsgrößen. Das bedeutet, dass sie nicht von der Stoffmenge in einem System abhängt. Da viele weitere Eigenschaften eines Stoffes temperaturabhängig sind, ist es wichtig bei der Auslegung eines Systems gute Kenntnisse über sie zu haben. Daher

ist auf die Temperaturmessung viel Wert zu legen. Es gibt eine Vielzahl an Methoden, jedoch haben sie die Tatsache gemein, dass sie indirekte Messungen sind. Keine der bisherigen Messmethoden ist in der Lage die Temperatur auf direktem Wege zu ermitteln. In diesem Kapitel wird auf die Temperaturmessung mit Widerständen, Thermoelementen und Strahlung eingegangen.

2.2.1 Widerstandstemperaturmessung

Der elektrische Widerstand von Feststoffen ist von deren Temperatur abhängig. Bei der Widerstandstemperaturmessung nutzt man diese Proportionalität aus, um mittels der elektrischen Widerstandsänderung eines Werkstoffes auf dessen Temperatur zu schließen. Dies lässt sich allgemein beschreiben mit der Gleichung der Widerstandskennlinie mit, vgl. [6]:

$$R(T) = R_0 * (1 + A * T + B * T^2 + \dots) \quad (8)$$

wobei R_0 der Nennwiderstand bei einer Bezugstemperatur von 0°C ist. Die Einteilung erfolgt je nach Verhalten in Metall- und Halbleiterwiderstandsthermometer. Die elektrische Leitfähigkeit von Halbleitern ist direkt proportional zu deren Temperatur, bei Metallen ist das Gegenteil der Fall. Wird ein Metall erwärmt kommt es zu einer Steigerung der Gitterschwingung, was in weiterer Folge den elektrischen Widerstandswert erhöht [6].

Nicht jedes Metall ist für die Temperaturmessung geeignet, da es einige Spezifikationen aufweisen muss. Es ist anzuraten ein Material mit hoher chemischer, thermischer und mechanischer Stabilität auszuwählen. Der Widerstandswert sollte nur durch die Temperatur beeinflussbar sein und nicht durch andere äußere Einflüsse wie beispielsweise den Druck. Für eine genaue Messung muss eine Variation in der Temperatur eine möglichst große Änderung des Widerstandswertes hervorrufen. Vor allem Platin, Nickel und Kupfer weisen diese Eigenschaften auf, wodurch sie die am häufigsten eingesetzten Sensormaterialien sind. Besonders Platin hat sich für diesen Zweck ausgezeichnet. Es besitzt eine gute thermische Beständigkeit und ist leicht zu verarbeiten. Die für die ersten Versuche verwendeten Temperatursensoren sind aus den eben genannten Gründen Platinwiderstandsthermometer. Sie werden mit einem „Pt-“, gefolgt von einer Zahl, bezeichnet. Diese Zahl gibt den Widerstandswert in Ohm bei einer Temperatur von 0°C an. Für die Versuchsanlage stehen sechs Pt-100 zur

Verfügung. Der Widerstandswert bei 100 Ohm beträgt 0 °C. Weitere in der Industrie eingesetzte Thermometer sind Pt-200 und Pt-1000 [6].

Damit eine Messung möglich ist muss der Widerstand in eine Schaltung eingebunden werden. Der einfachste Aufbau einer solchen Schaltung besteht aus einer Stromquelle, dem temperaturabhängigen Widerstand und Leitungen, um einen Stromkreis zu bilden. Die Stromquelle liefert einen möglichst geringen Messstrom. Durch das Messen der Spannung kann mit dem Ohm'schen Gesetz $R = U/I$ auf den Widerstandswert geschlossen werden. Bei einer solchen Messung werden jedoch auch die Widerstandswerte der Leitung mit in die Berechnung genommen was in weiterer Folge zu einer verfälschten Temperaturanzeige führt. Da von dem Widerstand zwei Leitungen wegführen wird ein solcher Aufbau als 2-Leiter-Schaltung bezeichnet. Sie wird in der Praxis nur bei Messungen eingesetzt, welche keine hohen Genauigkeiten erfordern oder wenn die Leitungslänge kurz ist und damit der Leitungswiderstand vernachlässigt werden kann [6].

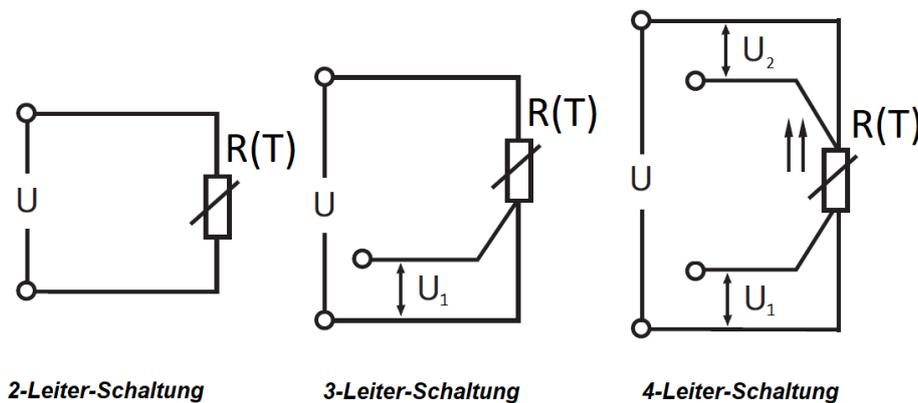


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der 2-,3-,4-Leiter-Schaltung [7]

Bei der 3- und 4-Leiter-Schaltung werden eine bzw. zwei zusätzliche Leitungen an das Widerstandsbauelement angeschlossen. Sie dienen dazu die allein an der Hauptleitung anfallende Spannung zu messen. Subtrahiert man diesen Wert von der Gesamtspannung kann auf die Einzelspannung und damit auf den Einzelwiderstand des temperaturabhängigen Bauelements geschlossen werden. Eine genauere Messung der Temperatur ist somit möglich. Es ist ebenfalls darauf hinzuweisen, dass bei einer 3-Leiterschaltung nur der Widerstandswert einer Leitung gemessen wird. Daher ist es wichtig, dass die Hauptleitungen des Widerstandsbauelementes dieselbe Länge und dasselbe Material aufweisen, um eine genaue Messung zu gewährleisten. Die Ermittlung des temperaturabhängigen Widerstandes erfolgt durch das Bilden einer

Brückenschaltung. Diese wird aus dem Messwiderstand und drei weiteren temperaturunabhängigen Widerständen gebildet [6].

Ein Problem bei der Messung mit einem Widerstandsthermometer ist die Eigenerwärmung. Aufgrund des Stromes, welcher durch den Widerstand fließt, kommt es zu einer Temperaturerhöhung des Widerstandsbauelements. Dies führt in weiterer Folge zu einem Messfehler. Um diesen Effekt zu minimieren wird bei der Auslegung eines Messwiderstandes der maximal zulässige Messstrom berechnet. Dieser muss so gering sein, dass die Eigenerwärmung des Messelementes vernachlässigbar klein ist [6].

2.2.2 Strahlungstemperaturmessung

Körper deren Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegen senden thermische Energie in Form von Wärmestrahlung aus. Diese elektromagnetischen Wellen werden mit der Wellenlänge λ_w beschrieben. Nach dem planckschen Strahlungsgesetz ist die Oberflächentemperatur eines „Schwarzen Körpers“ proportional zu dessen Wellenlänge und spektralen Strahldichte. Die bisher auf den Markt verfügbaren Strahlungsthermometer (Pyrometer) können Temperaturen zwischen -200 °C bis 3500 °C in einem Wellenlängenbereich von 400 nm bis $30\text{ }\mu\text{m}$ messen. Aufgrund der Natur des Strahlungstemperaturmessens erfolgt die Messung berührungslos. Vor allem bei der Temperaturmessung von beweglichen Objekten oder von Stoffen, welche empfindlich auf Kontamination reagieren ist dies unumgänglich. Weitere Vorteile sind die Messung an Objekten mit sehr hohen Temperaturen ($>1500\text{ °C}$), sowie Körpern deren Temperaturen sich rasch ändern. Allgemein kann gesagt werden, dass die Strahlungstemperaturmessung bei richtiger Anwendung sehr zuverlässig ist und nur sehr kleine Messfehler produziert [6].

Jedoch ist im Gegensatz zu anderen Temperaturmessmethoden viel Information über die optischen Eigenschaften des Messobjekts und die Messumgebung für eine genaue Messung nötig. Bei der Messung mit einem Strahlungsthermometer sollte auf einen möglichst geringen Abstand zwischen Sensor und den zu vermessenden Körper geachtet werden. Weiters ist die Sensorfläche parallel zu der strahlenden Fläche auszurichten. Häufig werden optische Systeme wie beispielsweise eine Sammellinse verwendet, um die Strahlung auf den Sensor zu konzentrieren [6].

Die Funktionsweise und der Aufbau eines Strahlungsmessgeräts wird im folgenden Abschnitt überblicksmäßig für einen „Schwarzen Strahler“ beschrieben (Abbildung 4) [6].

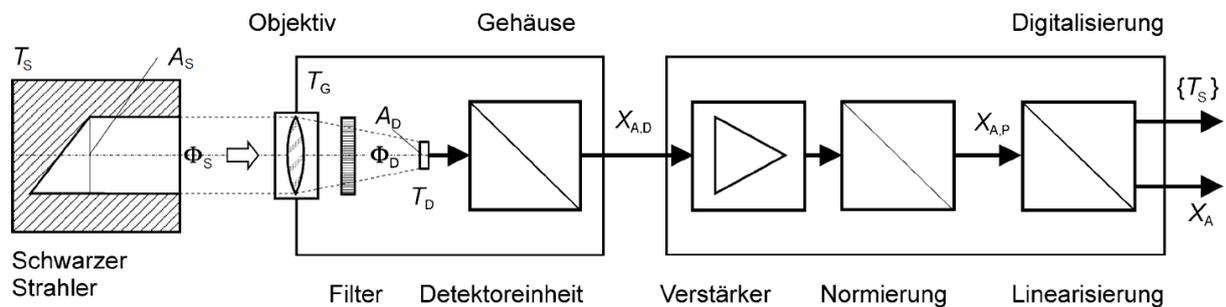


Abbildung 4: Strahlungstemperaturmessung an einem „Schwarzen Strahler“ [6]

Ein „Schwarzer Strahler“ mit einer Temperatur von T_S emittiert Strahlung über die Strahlungsfläche A_S mit der Strahlungsleistung ϕ_S . Diese wird über ein Objektiv konzentriert, trifft gefiltert auf die Fläche A_D des Detektors auf und erzeugt die Ausgangsgröße des Detektors $X_{A,D}$. Die Detektorausgangsgröße ist abhängig von der wahren Temperatur des Strahlers T_S . Weitere Einflussgrößen sind die Gehäusetemperatur, die Detektortemperatur, welche als gleich groß angenommen werden können, sowie die spektralen Eigenschaften des Detektors und der optischen Bauteile. Die Ausgangsgröße des Detektors $X_{A,D}$ erfährt in den elektronischen Komponenten (Digitalisierung) eine Verstärkung und Normierung am Temperaturmessbereich und wird in eine analoge elektrische Abbildungsgröße $X_{A,P}$ umgewandelt. Nach einer Linearisierung wird die Größe $X_A(T_S)$ ausgegeben. Dabei handelt es sich um ein analoges Ausgangssignal, beispielsweise ein eingprägter Strom zwischen 4 mA und 20 mA oder eine Spannung zwischen 0 mV und 10 mV. Des Weiteren wird der Zahlenwert $\{T_S\}$ angezeigt [6].

Die Temperaturmessung mit einem Pyrometer weist viele mögliche Fehlerquellen auf. Die Emission eines realen Körpers ist, unter gleichen Bedingungen, immer geringer als die des idealen „Schwarzen Körpers“ und über seine Oberfläche nicht konstant. Bei der Temperaturmessung wird an dem Pyrometer eine Emissionsgrad eingestellt welcher möglichst mit dem tatsächlichen Emissionsgrad des Körpers übereinstimmt. Ist dies nicht der Fall oder schwankt die Emissivität des Körpers stark aufgrund von einer inhomogenen Oberflächenbeschaffenheit kann dies zu größeren Unrichtigkeiten des Messwertes führen.

Fremdstrahlung, welche vom Messkörper auf den Sensor reflektiert oder, bei einem transparenten Messobjekt, hindurchgelassen (transmittiert) wird, beeinflusst die Detektorausgangsgröße und damit den Messwert. Weitere negative Auswirkungen auf die Messgröße haben optische und geometrische Fehler, Strahlung der Oberflächen der Einbauten, beispielsweise von Objektiv und Filter, im Sensorgehäuse, sowie seine innere Oberfläche [6].

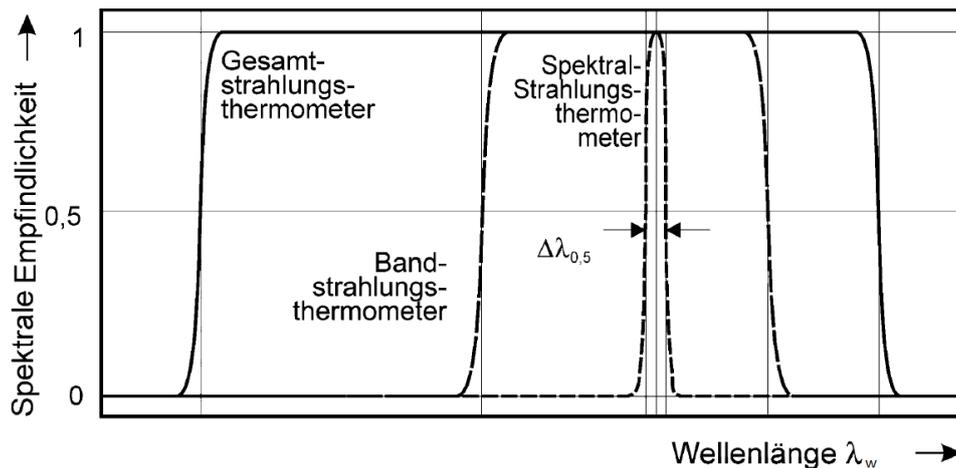


Abbildung 5: Wellenlängenbereich von Gesamt-, Band- und Spektral-Strahlungsthermometern [6]

Die Einteilung erfolgt in Gesamt-, Band-, Spektral- und Verhältnis-Strahlungsthermometer. Wird über 90 % der von einem Körper abgegebenen Strahlung für die Messung vom Temperatursensor erfasst, gilt dieses als Gesamtstrahlungsthermometer. Das Einsatzgebiet liegt beim Bestimmen von niedrigen Temperaturen, da eine geringe Abgabe von Strahlung für die Ermittlung der Temperatur ausreicht. Der Nachteil dieser Methode ist die hohe Empfindlichkeit gegenüber Störstrahlung. Durch gezieltes Begrenzen des zur Messung herangezogenen Wellenlängenbereichs, beispielsweise durch einen optischen Filter oder Prismen, erhält man aus dem Gesamt- ein Bandstrahlungsthermometer. Das Spektralstrahlungsthermometer ist für sehr kleine Wellenlängenbereiche ausgelegt. Das bringt den Vorteil von sehr geringen Messfehlern mit sich. Jedoch ist eine hohe Strahldichte erforderlich, wodurch es bei der Messung von hohen Temperaturen zum Einsatz kommt. Beim Verhältnis-Strahlungsthermometer (Quotienten-Pyrometer) wird der Temperaturwert aus dem Verhältnis der spektralen Strahldichte von zwei unterschiedlichen Wellenlängen ermittelt [6].

2.2.3 Temperaturmessung mittels Thermoelemente

Die Messung der Temperatur mit Thermoelementen beruht auf dem Seebeck-Effekt. Dieser beschreibt, dass in einem geschlossenen Stromkreis, welcher aus zwei unterschiedlichen elektrischen Leitern (Material A und B) besteht, ein Strom hervorgerufen wird, wenn sich die Verbindungsstellen der beiden Leiter auf unterschiedlichen Temperaturniveaus befinden (Abbildung 6). Hinzuzufügen ist, dass der Seebeck-Effekt nicht nur bei geschlossenen sondern auch bei offenen Leiterkreisen auftritt [6].

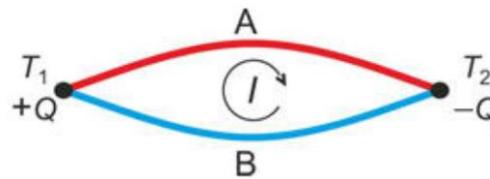


Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung des Seebeck-Effekts [6]

Valenzelektronen in einem Metall können sich aufgrund ihrer schwachen Bindung an ihr Atom frei als Elektronengas bewegen. Geht man von einem einfachen metallischen Leiter (Material A) aus, welcher über seine gesamte Länge eine konstante Temperatur aufweist, dann bewegen sich die freien Elektronen ebenfalls mit gleicher Geschwindigkeit durch das Gitter. Kommt es zu einer einseitigen Erwärmung dieses Leiters steigt im aufgeheizten Bereich die kinetische Energie der Elektronen. Die so mit Energie angereicherten Elektronen bewegen sich schneller in Richtung der unbeheizten Seite des Leiters als die Elektronen der kälteren Seite in Richtung der heißeren. Bei diesem Vorgang entsteht eine Differenz der Potenziale zwischen der warmen und kalten Zone. Sie ist temperaturabhängig und kann ausgedrückt werden über den Seebeck-Koeffizienten $S_A(T)$ mit, vgl. [3]:

$$S_A(T) = \frac{dU_A(T)}{dT} \quad (9)$$

Für den Einsatz als Temperaturmesswerkzeug muss der Leiter aus Material A mit einem zusätzlichen Leiter aus einem anderen Material B einen thermoelektrischen Kreis bilden (Abbildung 7). Die Thermospannung $U_{A/B}(T_2, T_1)$ eines solchen Stromkreises kann ausgedrückt werden mit, vgl. [6]:

$$U_{A/B}(T_2, T_1) = \int_{T_1}^{T_2} S_{A/B}(T) dT \quad (10)$$

Wobei $S_{A/B}(T)$ die differentielle thermoelektromotorische Kraft (EMK) oder auch der relativer Seebeck-Koeffizient der Leiterkombination A/B ist [6].

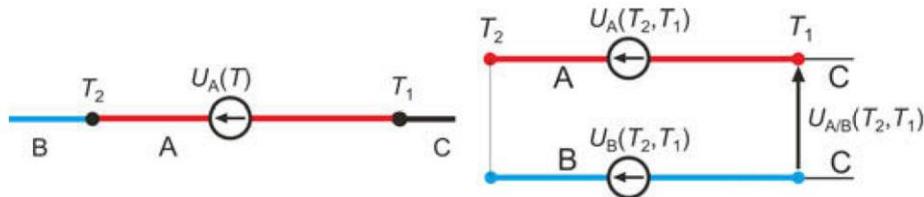


Abbildung 7: Ein thermoelektrischer Leiter (links) erweitert zu einem thermoelektrischen Kreis (rechts) [6]

Anhand von Gleichung (10) ist zu erkennen, dass die Thermospannung $U_{A/B}(T_2, T_1)$ proportional zu der Temperaturdifferenz zwischen den beiden Kontaktpunkten der Materialien ist. Somit besteht die Möglichkeit bei einer bekannten messbaren Thermospannung, einem bekannten Seebeck-Koeffizienten und der Temperatur T_1 , auf die Temperatur T_2 , oder umgekehrt zu schließen. Der Seebeck-Koeffizient ist sowohl material- als auch temperaturabhängig und wird meist über Tabellen, welche auch als thermoelektrische Spannungsreihen bezeichnet werden, bestimmt. Für eine höhere thermische Empfindlichkeit werden Materialpaarungen verwendet, welche eine hohe Differenz in deren Seebeck-Koeffizienten aufweisen [3, 6].

Eine geschlossene Leiterschleife, bestehend aus zwei unterschiedlichen Materialien, kann auf zwei unterschiedliche Weisen für den Einsatz zur Temperaturmessung verwendet werden. Die erste Möglichkeit besteht in der Auftrennung eines der beiden Leiter in der Mitte, was zu einer Trennung der Anschluss- und Vergleichsstelle führt. Wird hingegen die Leiterschleife an einem Verbindungspunkt der beiden Leiter getrennt so kombiniert sich die Vergleichs- mit der Anschlussstelle (Abbildung 8). Dabei ist T_M die Temperatur, welche die Messobjekttemperatur annimmt, wohingegen T_V als Vergleichstemperatur dient. Aufgrund der Eigenschaft, dass die gemessene Spannung proportional zur Temperaturdifferenz zwischen diesen beiden Temperaturen ist, muss für die Bestimmung der Messtemperatur die Referenz- bzw. Vergleichstemperatur bekannt sein [6].

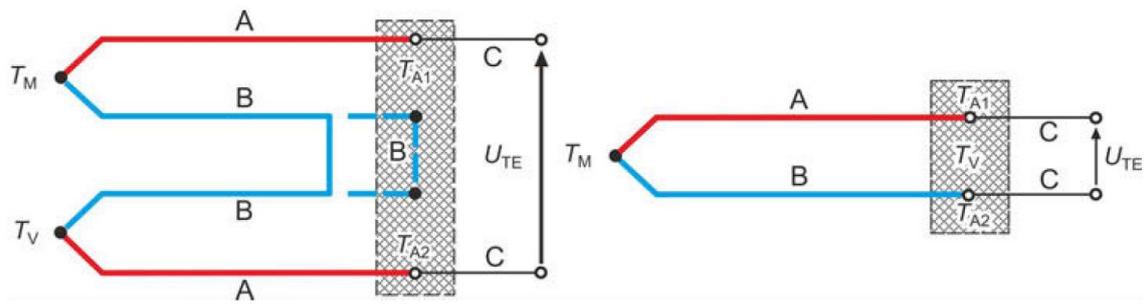


Abbildung 8: Zwei mögliche Anordnungen für eine Temperaturmessung mittels Thermoelements [6]

Die Anordnung mit getrennter Vergleichs- und Anschlussstelle wird häufig für Labormessungen eingesetzt, da eine genauere Messung aufgrund der exakt bestimmbaren Vergleichstemperatur möglich ist. In vielen Fällen erfolgt dies durch das Eintauchen der Vergleichsstelle in ein Eisbad. Die zweite Anordnung findet aufgrund der simpleren Messanordnung häufig in fest verbauten Thermoelementen in der Industrie Anwendung. Hierbei gleichen die Temperaturen der Anschlusspunkte der Vergleichstemperatur. Die Anforderung für die Anschlussklemme ist daher, dass sie elektrisch isolierend ist, jedoch auch eine gute thermische Leitfähigkeit aufweist um $T_{A1} = T_{A2} = T_V$ zu gewährleisten [6].

3 Aufbau der Versuchsanlage

In diesem Abschnitt werden der Aufbau und die Funktionsweise der Anlage erklärt. Außerdem wird auf die Ziele und Randbedingungen eingegangen, welche die Auslegung beeinflussen.

Das Ziel der in Zukunft stattfindenden Übungseinheit ist die Untersuchung und das bessere Verständnis von Wärmetransportvorgängen. Da es sich hierbei um einen für die Forschung, grundlegenden Prozess handelt, wurde im ersten Schritt nach bereits existierenden Anlagen gesucht, welche denselben oder einem ähnlichen Zweck dienen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Aufbauten meist aus einem entweder horizontalen oder vertikal liegenden Stab bestanden, welcher einseitig mit einer Wärmequelle beaufschlagt wurde. Die in Achsrichtung fix angebrachten Temperatursensoren maßen an ihrer Position die Temperatur, um so einen Temperaturverlauf in Längsrichtung des Stabes zu erhalten. Der Probestab konnte gegen Proben aus diversen anderen Materialien ausgetauscht werden. Für die Untersuchung von Wärmetransport unter Konvektion wurde der Probestab mit einer Querströmung beaufschlagt. Die in dieser Arbeit beschriebene Versuchsanlage hält sich an die eben genannten Randbedingungen und erweitert sie in manchen Bereichen.

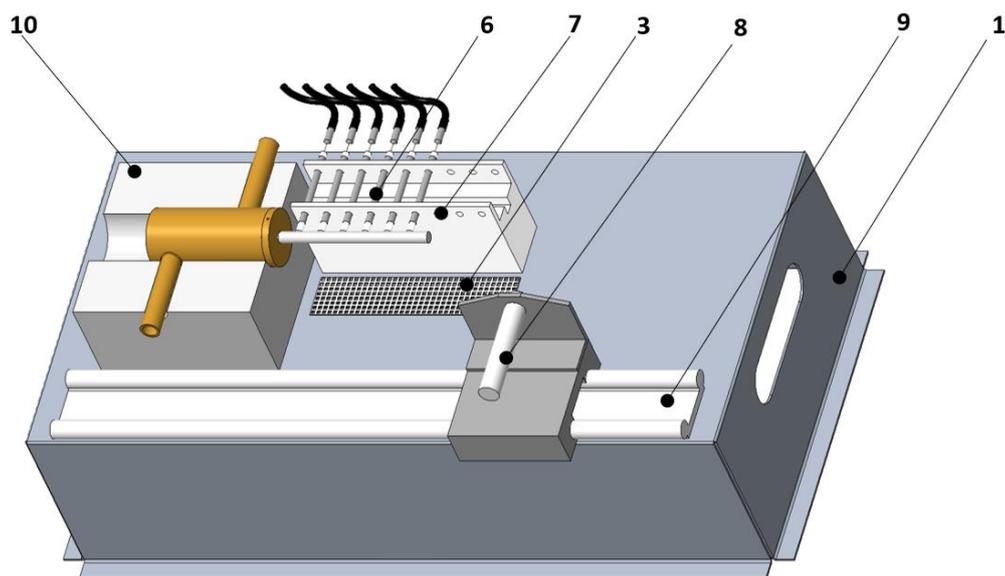


Abbildung 9: 3D-Modell der Versuchsanlage

Die Konstruktion, ersichtlich in Abbildung 9, ist ein ausgereiftes Konzept, welches die Randbedingungen erfüllt. Sie wurde in dem 3D Konstruktionsprogramm *Creo Elements Pro 5 Student Edition* erstellt. Dabei handelt es sich um ein 3D-CAD-Werkzeug der Firma *Parametric Technology Corporation* (kurz PTC). Aufgrund dessen war eine genaue Planung und Abschätzung der Dimensionen der Anlage möglich. Weiters konnte bei einer solchen Herangehensweise während der Auslegungsphase auf Änderungen schnell und präzise eingegangen werden. Der Bau der Versuchsanlage basiert auf dieser Konstruktion. Leichte Änderungen wurden während der Fertigung vorgenommen, sodass es zu möglichen Unterschieden zwischen Versuchsanlage und Konzeptkonstruktion kommen kann. Die Funktionsweisen der einzelnen Bauteile blieben erhalten.

Die Grundplatte mit der Positionsnummer 1 (kurz PN 1) in Abbildung 9 wurde in abgewickelter Form aus einem Stahlblech mit einer Dicke von 2 mm mittels Laserschneider herausgeschnitten. Anschließend erfolgten an den vorgesehenen Stellen Biegungen. Weiters schnitt der Laserschneider zwei Ausnehmungen aus den Seiten. Diese dienen als Griffe, um die Versuchsanlage einfach transportieren zu können. Eine weitere Öffnung wurde in Form eines Rechteckes in der Mitte der Grundplatte vorgenommen. Durch dieses Loch hindurch strömt der vom Querstromlüfter, ersichtlich in Abbildung 10 Positionsnummer 2 (PN 2), erzeugte Luftstrom. Das feinmaschige Gitternetz (PN 3) darüber dient dazu den Luftstrom möglichst gleichmäßig über den gesamten Probestab strömen zu lassen.

Bei dem Querstromlüfter handelt es sich um ein Modell der Firma Papst. Die Länge und Dimensionen wurden so gewählt, dass es zu einem Anströmen des Stabes über dessen gesamte Länge kommt.

Aus den zu untersuchenden Materialien wurden Zylinder (PN 4) mit jeweils ca. 210 mm Länge und einem Durchmesser von 10 mm gefertigt. Die Länge wurde so gewählt, dass es leicht möglich ist die Temperaturmessfühler in einem sinnvollen Abstand zueinander über die gesamte Stablänge zu verteilen, zum Zweck des Erhalts eines aussagekräftigen Temperaturverlaufs. Da die Proben oft gewechselt werden müssen wurde bei der Fertigung auf eine lockere Passung zwischen Kupferhülse (PN 5) und Proben geachtet. Der dabei auftretende Luftspalt beeinflusst den Temperaturverlauf aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit der Luft. Um diesem Effekt entgegen zu wirken kann der Probestab, bevor er in die Hülse geschoben wird, mit einer Wärmeleitpaste

beschichtet werden. Bei ihrer Wahl wurde auf eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit geachtet. Daher entschied man sich für eine Paste auf Kupferbasis. Eine nähere Beschreibung der Auswirkung dieses Problems erfolgt in Kapitel 6.2.2.

Zu Beginn der Planung und Konstruktion sollte die Temperaturmessung (PN 6) entlang des Probestabes mit Pt-100 Thermometern mit je einem Durchmesser von 6 mm erfolgen. Die Temperaturfühlerhalterung (PN 7) ist auf diese Dimensionen ausgelegt. Nach dem ersten Testlauf der Anlage stellte sich heraus, dass die Pt-100 über ihre Oberfläche zu viel Wärme an die Umgebung ableiteten und so an ihren Messpunkten eine viel zu geringe Temperatur aufwiesen. Daher wurden die Pt-100 durch Thermoelemente des Typs K ersetzt. Insgesamt sind bei der Anlage sechs Thermoelemente verbaut. Die Temperaturfühler weisen einen Durchmesser von einem Millimeter auf. Damit sie mit der bestehenden Halterung kompatibel sind, ist jedes Thermoelement in einem Rohr, gefertigt aus Teflon, gelagert. Teflon hat eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, womit das anfängliche Problem der zu großen Abwärme an die Umgebung minimiert wird. Des Weiteren erfolgten Bohrungen entlang des Materialprobestabes, in welche die Thermoelemente einführbar sind.

Eine zusätzliche Messmethode mittels Strahlungstemperaturmessgerät (PN 8) wurde vorgesehen. Es handelt sich um ein Thermometer mit der Bezeichnung „SENSOR PARTNERS I-TEC E CH-HAT“ mit dem eine berührungslose Temperaturmessung möglich wäre. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Auswahl des Pyrometers war die Möglichkeit den Emissionsgrad einzustellen, womit höhere Genauigkeiten realisierbar sind. Da die mit dem Produkt standardmäßige mitgelieferte Optik einen zu großen Detektionskegel aufwies und sie somit auch Fremdstrahlung auffing, musste eine zusätzliche Optik bestellt werden. Die neue Optik zentrierte den Messbereich auf einen Kreis mit einem Durchmesser von 5 mm bei einem optimalen Abstand von 10 cm. Somit wird nur die vom Probestab emittierte Strahlung als Messsignal verwendet. Anzumerken ist, dass das Pyrometer zwar eingebaut wurde, jedoch aufgrund von Komplikationen mit der Emissionseinstellung zum Zeitpunkt der Versuche nicht einsatzfähig war.

Sowohl die Thermoelemente als auch das Pyrometer dienen der Bestimmung der Temperatur an vorgegebenen Stellen um einen Temperaturverlauf aufzunehmen. Die Thermoelemente können nur eine fixe Position einnehmen, wohingegen das Pyrometer mittels Linearführung (PN 9) entlang der Stabachse beweglich gelagert ist.

So ist es möglich an einer beliebigen Stelle die Temperatur zu messen. Bei einer solchen Anordnung können Zwischenmessstellen ermittelt werden, um somit die Genauigkeit der Messkurve zu erhöhen. Ebenfalls ist ein Vergleich der beiden Messmethoden möglich, da ein Messen an Positionen, welche dieselben Temperaturen aufweisen müssten, realisierbar ist. Es kann auch eine Beeinflussung der an dem Probestab anliegenden Messfühler auf den Temperaturverlauf untersucht werden.

Der grauweiße Würfel, welcher sich auf der Grundplatte befindet, wird als Wärmedämmwürfel (PN 10) bezeichnet. Er setzt sich aus einer oberen und einer unteren Hälfte zusammen, welche miteinander verschraubt sind, um so den dazwischen liegenden Thermoölzylinder (PN 11) zu fixieren. Die Hälften bestehen aus Brandschutzplatten. Diese weisen eine hohe Wärmedämmung auf, um so die Verluste nach außen zu minimieren und den während der Modellbildung angenommenen adiabaten Zustand so gut wie möglich zu realisieren.

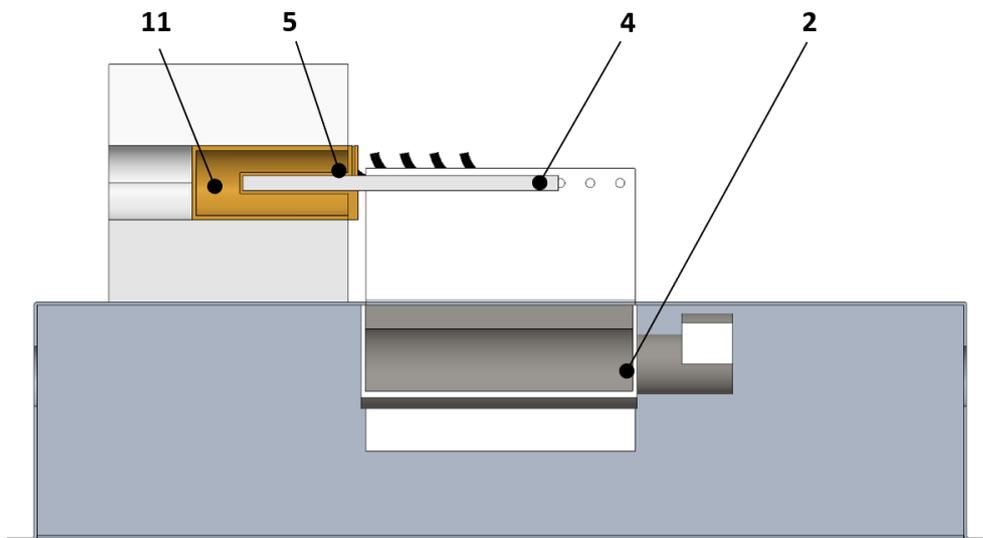


Abbildung 10: Schnittansicht der Versuchsanlage

Die Hülse, welche den Probestab umschließt, sollte eine möglichst hohe Wärmeleitfähigkeit besitzen da sie für den Wärmetransport zwischen Thermoöl und Materialprobe zuständig ist. Daher wurde sie aus Kupfer gefertigt. Des Weiteren besteht ihre Aufgabe darin den Probestab in Position zu halten. Sie wird vom Thermoölzylinder umschlossen. Dieser dient als Ölreservoir, um so die Kupferhülse und in weiterer Folge das Probematerial über eine gewisse Länge bei konstanter Temperatur zu halten. Das Thermoöl wird mit einer Umwälzpumpe im Kreis durch den

Ölzylinder gepumpt und mittels eines Heizelements auf einen möglichst konstanten Wert von 150 °C erwärmt. Die Temperatur sollte hoch genug sein, um einen gut erkennbaren Temperaturverlauf zu erzeugen, aber gering genug, um Verletzungen von Studenten aufgrund von möglichen Unachtsamkeiten zu vermeiden.

Die Probestäbe bestehen aus unterschiedlichen Materialien und können, solange die Dimensionen eingehalten werden, um beliebig viele Feststoffproben erweitert werden. Für die Versuche und in weiterer Folge für die Laborübung fiel die Wahl auf vier in der Industrie oftmals genutzte Materialien, bei welchen es sich um austenitischen Stahl, Aluminium, Kupfer und Keramik handelt. Diese Auswahl deckt einen großen Bereich an unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten ab.

4 Berechnung der Versuchsanlage

In diesem Abschnitt werden die für die Simulation verwendeten Formeln angeführt und erläutert. Die Berechnung begann nach der Konstruktion des dreidimensionalen Modells, da auf diese Weise Dimensionen besser abschätzbar waren. Somit kam es während der Ausarbeitung zu nur geringen Änderungen. Im Verlauf der Modellbildung wurden Annahmen getroffen, welche in dieser Arbeit aufgezählt werden.

4.1 Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten am Probestab

Der erste Teil der Berechnung beschäftigt sich mit der Ermittlung der Wärmeübergangszahl zwischen dem Materialprobestab und seiner Umgebung. Es wird angenommen, dass die Wärmeübertragung ausschließlich durch Konvektion erfolgt. Der Einfluss von Wärmestrahlung auf den Stab wird vernachlässigt. Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsmethoden erfolgt eine Aufteilung in Wärmetransport aufgrund von freier und erzwungener Konvektion. In der Realität tritt erzwungene Konvektion kaum alleinig auf, wodurch ein weiterer Zustand in die Berechnung miteinfließt. Er wird als kombinierte Konvektion bezeichnet und setzt sich aus der freien und erzwungenen Konvektion zusammen.

4.1.1 Freie Konvektion

Aufgrund der einseitigen Beheizung des Probestabes erwärmt sich dieser, wodurch es zu einem Temperaturunterschied zwischen der Oberfläche des Stabes und der Umgebung kommt. Dies sorgt dafür, dass die Luft um den Stab erhitzt wird. Die erwärmte Luft weist eine geringere Dichte auf als die Luft in der kälteren Umgebung was für einen Auftrieb um den Stab sorgt. Der Auftrieb erzeugt eine Strömung an der Staboberfläche, die in weiterer Folge den Temperaturverlauf des Probestabs beeinflusst. Dieses Phänomen wird als Wärmetransport aufgrund von freier Konvektion bezeichnet [2].

Wie eingangs erwähnt, kann der Wärmeübergangskoeffizient über die Nußelt-Zahl bestimmt werden, welche wiederum je nach Konvektionsart eine Funktion von unterschiedlichen dimensionslosen Kennzahlen ist. Für beide Fälle wird, um den Einfluss der Geometrie miteinzubinden, eine charakteristische Länge L_c benötigt,

welche von der überströmten Oberfläche abhängt. Diese Länge, auch Überströmlänge genannt, bildet sich bei quer angeströmten Körpern aus dem Quotienten aus der Übertragungsfläche und dem projizierten Umfang. Je nach geometrischer Vorgabe können sich die Berechnungsgrößen ändern. Für einen quer angeströmten Zylinder kann die charakteristische Länge berechnet werden mit, vgl. [2]:

$$L_c = \frac{\pi * D_{Stab}}{2} \quad (11)$$

wobei zu erkennen ist, dass die Länge L_c nur vom Außendurchmesser D_{Stab} des überströmten Stabes abhängig ist. Die Länge wird für die Berechnung der Grashof-Zahl Gr benötigt, welche ein Verhältnis aus den Auftriebskräften und den Reibungskräften nach Gleichung (12) darstellt [2].

$$Gr = \frac{g * L_c^3 * \beta * (T_{mittel} - T_U)}{\left(\frac{\eta_F}{\rho_F}\right)^2} \quad (12)$$

Hierbei ist g die Erdbeschleunigung, T_{mittel} die mittlere Temperatur der Staboberfläche (39), T_U die Umgebungstemperatur, η_F die dynamische Viskosität des Fluids und ρ_F die Dichte des Fluids. Aufgrund der Vereinfachung der Berechnung wird für die Ermittlung des Wärmeausdehnungskoeffizienten β angenommen, dass es sich bei der Umgebungsluft um ein ideales Gas handelt. Somit kann dieser berechnet werden mit, vgl. [2]:

$$\beta = \frac{1}{T_U} \quad (13)$$

Eine weitere dimensionslose Kennzahl, welche für die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten benötigt wird, ist die Prandtl-Zahl. Sie beschreibt das Verhältnis zwischen den Dicken der Temperatur- und Strömungsgrenzschicht. Die Prandtl-Zahl schwankt mit minimaler Abweichung bei den meisten Gasen um einen Wert von 0,7 und kann dargestellt werden mit, vgl. [2]:

$$Pr = \frac{\eta_F * c_{p_F}}{\lambda_F} \quad (14)$$

wobei c_{p_F} die spezifische Wärmekapazität und λ_F die Wärmeleitfähigkeit des Fluids ist. Die Prandtl- und Grashof-Zahl können zu einer weiteren dimensionslosen Kennzahl, der Rayleigh-Zahl, zusammengefasst werden mit, vgl. [2]:

$$Ra = Gr * Pr \quad (15)$$

Die Nußelt-Zahl zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten bei freier Konvektion an einem quer angeströmten Zylinder ist eine Funktion aus der Rayleigh-Zahl, also in weiterer Folge von der Prandtl- und der Grashof-Zahl, sowie von einer Korrekturfunktion f_3 und wird berechnet mit, vgl. [2]:

$$Nu_{frei} = \left(0,752 + 0,387 * Ra^{\frac{1}{6}} * f_3\right)^2 \quad (16)$$

Der Korrekturfaktor f_3 ist eine Funktion der Prandtl-Zahl und lässt sich bestimmen mit, vgl. [2]:

$$f_3 = \left(1 + 0,721 * Pr^{-\frac{9}{16}}\right)^{-\frac{8}{27}} \quad (17)$$

Über den Zusammenhang zwischen Nußelt-Zahl, charakteristischer Länge und Wärmeleitzahl kann der Wärmeübergangskoeffizient für freie Konvektion dargestellt werden mit, vgl. [2]:

$$\alpha_{frei} = \frac{Nu_{frei} * \lambda_F}{L_c} \quad (18)$$

4.1.2 Erzwungene Konvektion

In dieser Versuchsanlage verursacht eine regelbarer Querstromlüfter eine definierte Strömung des Fluids. Somit ist es möglich die Einflüsse von erzwungener Konvektion auf den Temperaturverlauf des Probestabe über dessen gesamte Länge zu untersuchen. In realen Anwendungsfällen übersteigt das Maß an Wärmetransport durch erzwungene Konvektion jenes durch freie Konvektion häufig, sodass letztere oft vernachlässigt wird. In Kapitel 6.2.4 werden die Daten der beiden Konvektionsarten verglichen und diskutiert.

Aufgrund der konstanten geometrischen Verhältnisse kann die Berechnung der charakteristischen Länge L_c von der natürlichen Konvektion übernommen werden (Gleichung (11)). Beim Wärmetransport aufgrund von erzwungener Konvektion wird anstatt der Grashof-Zahl die Reynolds-Zahl für die Bestimmung der Wärmeübergangszahl benötigt. Sie kann ausgedrückt werden mit, vgl. [2]:

$$Re = \frac{u_F * L_c * \rho_F}{\eta_F} \quad (19)$$

wobei u_F für die Geschwindigkeit des Fluids steht. Aufgrund der Tatsache, dass die Prandtl-Zahl nur von den Stoffeigenschaften abhängt und es zwischen freier und erzwungener Konvektion während der Versuche zu keinem Wechsel des Anströmmediums kam (Luft) kann die Formel für die Berechnung der Prandtl-Zahl übernommen werden. Aufgrund von Temperaturunterschieden zwischen den beiden Konvektionsarten werden jedoch Differenzen in der Prandtl-Zahl erwartet.

Wie eingangs erwähnt hängt der Wärmetransport mittels Konvektion von den Strömungseigenschaften des Fluids ab. Bei der Berechnung wird dieser Einfluss durch das Aufstellen von mehreren Gleichungen zur Ermittlung der Nußelt-Zahl berücksichtigt. Die Auswahl der Gleichung hängt vom Zahlenwert der Reynolds-Zahl ab [2].

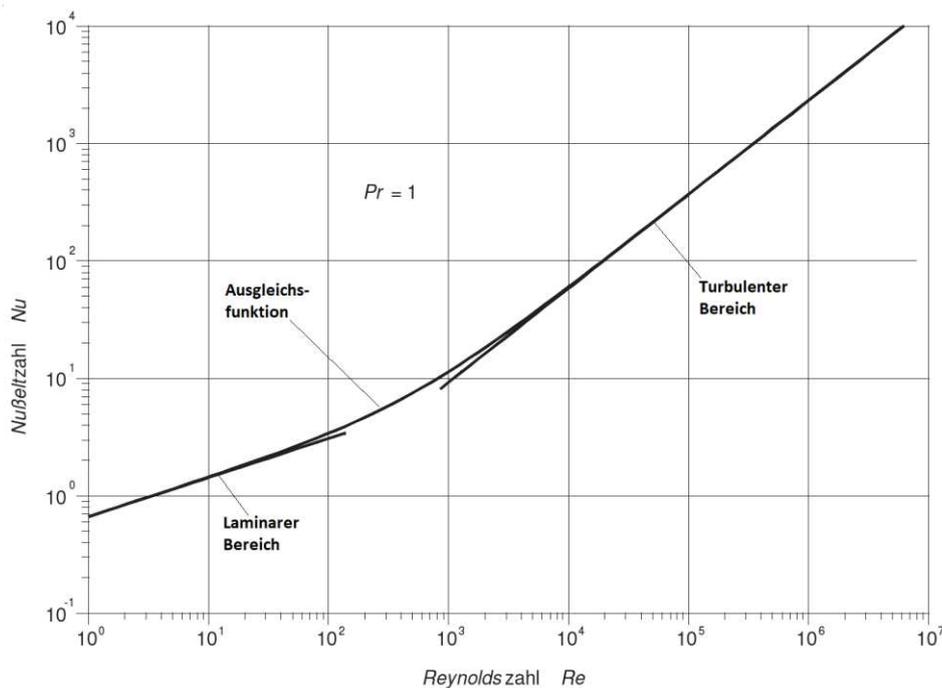


Abbildung 11: Nußelt-Zahl in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl [2]

Befindet sich die Strömung in einem Bereich der Reynolds-Zahl zwischen 1 und 1000 lässt sich die Nußelt-Zahl, gleich wie bei einer ebenen Wand, berechnen mit, vgl. [2]:

$$Nu_{zwang_lam} = 0,664 * \sqrt[3]{Pr} * \sqrt{Re} \quad (20)$$

Im turbulenten Strömungsbereich mit Reynolds-Zahlen zwischen 10^5 und 10^7 wird die Nußelt-Zahl ausgedrückt über, vgl. [2]:

$$Nu_{zwang_turb} = \frac{0,037 * Re^{0,8} * Pr}{1 + 2,443 * Re^{-0,1} * \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} * f_4 \quad (21)$$

Ähnlich wie bei der freien Konvektion benötigt die Nußelt-Zahl bei der erzwungenen Konvektion einen Korrekturfaktor f_4 (Gleichung (22)). Dieser beruht, je nachdem ob es sich um eine Flüssigkeit oder ein Gas handelt, auf unterschiedlichen Formeln [2].

$$f_4 = \left(\frac{Pr}{Pr_W}\right)^{0,25} \quad \text{für Flüssigkeiten,} \quad f_4 = \left(\frac{T_U}{T_{mittel}}\right)^{0,121} \quad \text{für Gase} \quad (22)$$

Hierbei ist Pr_W die Prandtl-Zahl der Flüssigkeit bei Wandtemperatur. Der Korrekturfaktor soll die Auswirkungen der Richtung des Wärmestromes beachten. Beispielsweise verringert sich der Wärmeübergangskoeffizient bei einem schräg angeströmten Körper [2].

Aufgrund des großen Werteabstandes zwischen diesen beiden Bereichen (10^3 bis 10^5) wurde eine Ausgleichsfunktion asymptotisch an die Werte der beiden Gleichung aufgestellt (Abbildung 11). Die Nußelt-Zahl in diesem Gebiet lässt sich berechnen mit, vgl. [2]:

$$Nu_{zwang} = 0,3 + \sqrt{Nu_{zwang_lam}^2 + Nu_{zwang_turb}^2} \quad (23)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion α_{zwang} wird über denselben Zusammenhang, mit angepassten Werten, bestimmt wie bei der freien Konvektion [2].

4.1.3 Kombinerter Zustand

Bei realen Anwendungsbereichen kann es vorkommen, dass Wärmetransport allein durch freie Konvektion verursacht wird. Dies gilt jedoch nicht im Falle der erzwungenen Konvektion, da sich schon aufgrund eines sehr geringen Temperaturunterschiedes zwischen Körper und Fluid eine leichte Strömung ausbildet. Somit erfolgt ein Anteil des Wärmetransports bei erzwungener Konvektion auch immer aufgrund von freier. Diese ist jedoch meist so gering, dass sie häufig bei Anwendungen vernachlässigt wird. Für die Berechnung wird diese Annahme nicht getroffen und eine dritte

Konvektionsart hinzugenommen. Dabei handelt es sich um einen kombinierten Zustand, bei dem freie und erzwungene Konvektion gleichzeitig auftreten. Die Nußelt-Zahl eines quer angeströmten Zylinders unter kombiniertem Zustand lässt sich ermitteln mit [2]:

$$Nu_{kombi} = \sqrt[3]{Nu_{frei}^3 + Nu_{zwang}^3} \quad (24)$$

4.2 Definition der Wärmeleitgleichung am Probestab

Die Ermittlung der Wärmeleitgleichung (kurz WLG) in differenzieller Form erfolgte durch das Aufstellen der Energiegleichung. Für die Anpassung musste anfangs aus der realen Versuchsanlage ein Berechnungsmodell erstellt werden. Es beschreibt einen einseitig eingespannten Zylinder aus einem beliebigen Feststoff welcher horizontal in den Raum ragt (Abbildung 12). Die Koordinate x liegt auf der Achse des Zylinders und beschreibt dessen Längsrichtung. In radialer Richtung wurde die Koordinate r gewählt.

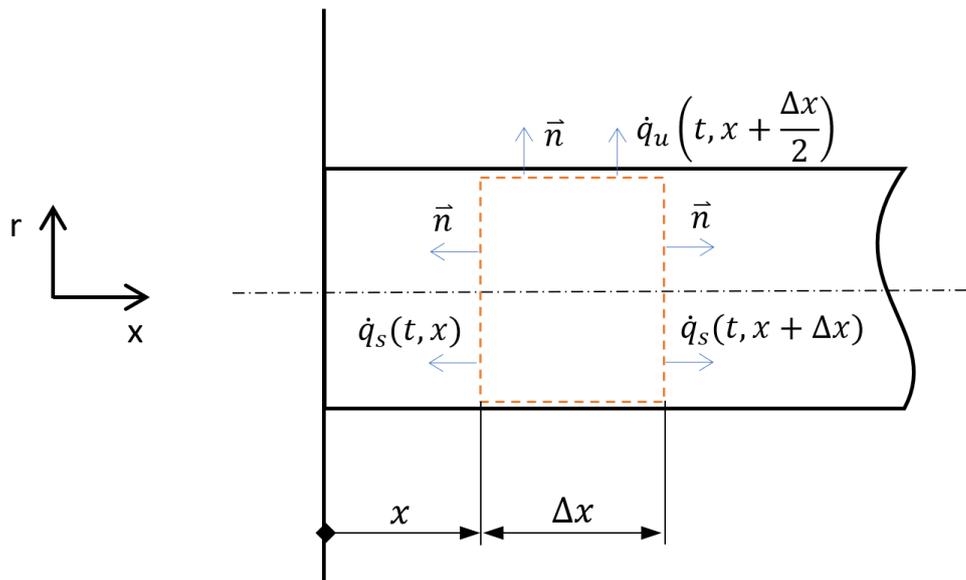


Abbildung 12: Kontrollvolumen im Probestab

Der Probestab in der Versuchsanlage wird einseitig beheizt. Dies wurde im Modell dargestellt als eine konstante Temperatur T_0 , welche bei der Position $x=0$ über den gesamten Zeitraum und Querschnitt wirkt. Da die Länge des Stabes wesentlich größer als dessen Durchmesser ist wird davon ausgegangen, dass sich die Temperatur über

den Querschnitt nicht ändert. Es liegt daher ein eindimensionales instationäres Problem der Wärmeleitung vor.

Weiters ist darauf hinzuweisen, dass während der Berechnungsphase anfangs die stationäre Gleichung aufgestellt und erst im späteren Verlauf die instationäre betrachtet wurde. Da es jedoch einfacher ist von der instationären auf die stationäre zu schließen wird in dieser Arbeit die Vorgehensweise anhand der instationären Wärmeleitgleichung erklärt und später auf die stationäre umgeformt.

4.2.1 Instationäre WLG

Ausgegangen wird von der Energiebilanz für ein massenfestes Kontrollvolumen eines offenen Systems. Die rechte Seite der Gleichung (25) bildet sich aus der Energie an den Oberflächen, der potenziellen sowie der thermischen Energie [5].

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho * \left(\frac{v_i * v_i}{2} + u \right) dV = \oint_O \sigma_{ij} v_i n_j dO + \int_V \rho g_i v_i dV + \oint_O q'_i n_i dO \quad (25)$$

Hierbei ist ρ die Dichte, v eine Geschwindigkeit, u die innere Energie, σ_{ij} der Spannungstensor, n der Normalvektor, g die Erdbeschleunigung und q'_i der thermische Energiestrom durch die Oberfläche des Kontrollvolumens. Dieser setzt sich, wie in Gleichung (26) aufgezeigt, aus dem durch Wärmeleitung sowie durch Diffusion verursachten Wärmestrom zusammen. Die Wärmestrahlung wird hierbei vernachlässigt [5].

$$\vec{q}' = \vec{q} + \sum_{\alpha} j_{\alpha} h_{\alpha} \quad (26)$$

Ebenfalls wird für die weitere Berechnung angenommen, dass es zu keinem durch diffusiven Transport verursachten thermischen Energiestrom kommt. Daraus folgt $\sum_{\alpha} j_{\alpha} h_{\alpha} = 0$. Der Spannungstensor setzt sich bei Fluiden aus Druckanteil $p\delta_{ij}$ und Reibspannungstensor σ'_{ij} zusammen mit, vgl. [5]:

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (27)$$

Da sich das Kontrollvolumen in einem Feststoff befindet, kann der Term der kinematischen Energie vernachlässigt werden. Aufgrund der Annahme der Reibungsfreiheit wird auch der Reibspannungstensor vernachlässigt. Ebenfalls wird

die potenzielle Energie nicht mit in die Berechnung genommen. Die innere Energie lässt sich ersetzen durch, vgl. [5]:

$$u = h + \frac{p}{\rho} \quad (28)$$

wobei die Enthalpie h weiter ausgedrückt werden kann mit, vgl. [5]:

$$h = c_p * T(t, x) \quad (29)$$

Mit den vorher genannten Annahmen vereinfacht sich die Energiebilanz zu:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T(t, x)) = -\frac{\partial \dot{q}_s(t, x)}{\partial x} - \frac{4}{D_{Stab}} \dot{q}_U(t, x) \quad (30)$$

wobei $\dot{q}_s(t, x)$ die Wärmestromdichte, welche durch den Probestab fließt, und $\dot{q}_U(t, x + \frac{\Delta x}{2})$ die Wärmestromdichte, die an die Umgebung abgegeben wird, ist. D_{Stab} ist der Durchmesser des Probestabs. Die Wärmestromdichte aufgrund von molekularer Wärmeleitung in einem Feststoff kann mittels des Fourier'schen Wärmeleitungsgesetzes ausgedrückt werden [5].

$$\dot{q}_s(t, x) = -\lambda_s * \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \quad (31)$$

Die Wärmestromdichte, welche an die Umgebung abgegeben wird, erfolgt (einfacherweise) aufgrund von Wärmeübertragung durch Konvektion und kann somit ausgedrückt werden mit, vgl. [5]:

$$\dot{q}_U(t, x) = \alpha_U * (T(t, x) - T_U) \quad (32)$$

wobei α_U der Wärmeübergangskoeffizient zwischen dem Stab und der Umgebungsluft und T_U die Umgebungstemperatur ist. Die Energiebilanz in Verbindung mit den Vereinfachungen und Annahmen kann auf eine inhomogene Differenzialgleichung zweiter Ordnung reduziert werden. Durch Umformen erhält man Gleichung (33), welche den instationären Temperaturverlauf im Probestab unter Einwirkung von Konvektion beschreibt.

$$\rho c_p \frac{\partial T(t, x)}{\partial t} = \lambda_s * \frac{\partial^2 T(t, x)}{\partial x^2} - \frac{4\alpha_U}{D_{Stab}} * (T(t, x) - T_U) \quad (33)$$

Für die Lösung dieser Gleichung wurde auf eine numerische Methode zurückgegriffen. Mittels der Matrixlöser-Software MATLAB kann der Temperaturverlauf nach den Koordinaten x und t in einem Oberflächendiagramm dargestellt werden. Die Ergebnisse finden sich in Kapitel 6.2.5. Als Anfangsbedingung wurde angenommen, dass der Temperaturverlauf über den Stab zum Zeitpunkt $t = 0$ gleich der Umgebungstemperatur ist. Für eine Differentialgleichung zweiter Ordnung werden zwei Randbedingungen benötigt. Für die linke Seite, also für den beheizten Bereich des Stabes, wurde eine konstante Temperatur angenommen. Es erfolgte die Annahme, dass der Probestab aufgrund seines geringen Verhältnisses von Durchmesser zu Länge nur über seine Mantelfläche Wärme an die Umgebung abgibt. Dies bedeutet, dass der Temperaturverlauf auf der rechten Seite, also dem freien Stabende, eine horizontale Tangente besitzt. Somit ist die Ableitung des Temperaturverlaufes an dieser Stelle Null gleichzusetzen. Die Randbedingungen können dargestellt werden mit:

$$T(t, 0) = T_0, \quad \left. \frac{\partial T(t, x)}{\partial x} \right|_{x=L_{Stab}} = 0 \quad (34)$$

4.2.2 Stationäre WLG

Die stationäre Lösung kann einfach von der instationären Lösung abgeleitet werden. Dafür werden alle Zeitableitungen auf Null gesetzt. Somit folgt der stationäre Temperaturverlauf in einem einseitig beheizten Stab mit:

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} + \frac{4\alpha_U}{D_{Stab} \lambda_s} * T(x) = -\frac{4\alpha_U}{D_{Stab} \lambda_s} T_U \quad (35)$$

Da es sich hierbei um eine bekannte Differenzialgleichungsform handelt, welche einen Lösungsansatz anbietet, ist eine analytische Lösung der Gleichung möglich. Die Lösung kann ausgedrückt werden mit:

$$T(x) = T_U + (T_0 - T_U) * \left(\frac{e^{-m_{Stab} * x}}{1 + e^{-2m_{Stab} * L_{Stab}}} + \frac{e^{m_{Stab} * x}}{1 + e^{2m_{Stab} * L_{Stab}}} \right) \quad (36)$$

Die Konstante m_{Stab} besteht aus weiteren Konstanten. Diese wurden aufgrund einfacherer Darstellung zu einer Konstante zusammengefasst und wie folgt berechnet:

$$m_{Stab} = \sqrt{\frac{4\alpha_U}{D_{Stab} \lambda_s}} \quad (37)$$

Nach Berechnung des Temperaturverlaufes über den Probestab wird der an die Umgebung abgegebene Verlustwärmestrom ermittelt. Es kann angenommen werden, dass dieser gleich dem Wärmestrom ist, welcher in den Stab einfließt. Dafür wird das Fourier'sche Wärmeleitungsgesetz an der Einspannstelle aufgestellt und gelöst mit, vgl. [3]:

$$\dot{Q}_U = \lambda_s * \frac{D_{Stab}^2 \pi}{4} * m_{Stab} * (T_0 - T_U) * \tanh(m_{Stab} * L_{Stab}) \quad (38)$$

Für die mittlere Temperatur über den Stab wird der Mittelwertsatz für Integrale angewandt mit:

$$T_{mittel} = \frac{1}{L_{Stab}} * \int_0^{L_{Stab}} T(x) dx \quad (39)$$

4.3 Wärmeübertragung des Thermoöles an den Probestab

Das Thermoöl fließt durch den Reservoir-Zylinder und gibt seine Wärme an die Kupferhülse ab. Die Kupferhülse leitet die Wärme weiter durch einen Spalt, der je nach Ausführung mit Luft oder Wärmeleitpaste gefüllt ist, hindurch an die Außenfläche der Materialprobe. Abbildung 13 veranschaulicht schematisch den zu erwartenden Temperaturverlauf von der Thermoölunggebung bis zum Probestab (grauer Kreis). Ebenfalls eingezeichnet sind die Wärmeleitzahlen der Materialien und der Wärmeübergangskoeffizient der, mit Thermoöl angeströmten, Kupferhülse.

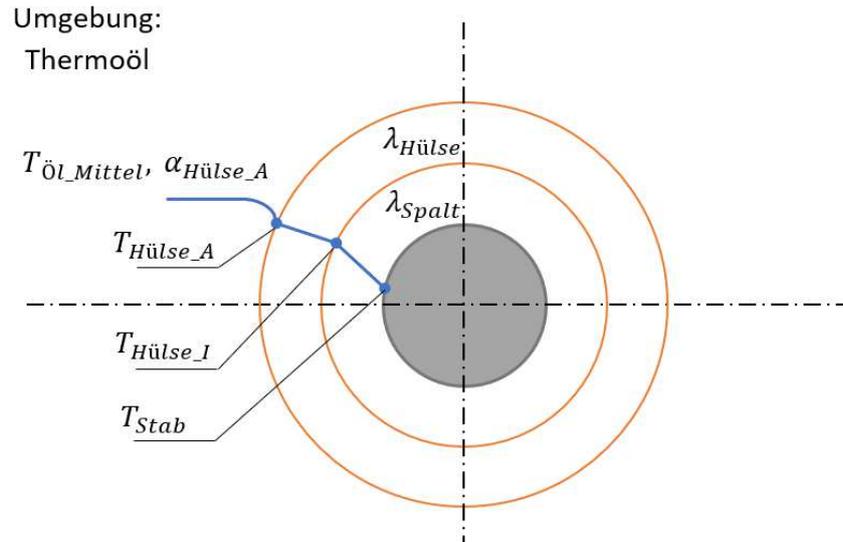


Abbildung 13: Temperaturverlauf im Querschnitt durch die Kupferhülse und Umgebung

Die Berechnung der Temperatur an der Außenseite des Stabes innerhalb der Kupferhülse T_{Stab} bei stationärer Betrachtung wird benötigt, da die Annahme getroffen wird, dass diese Temperatur gleich ist mit der Temperatur über den Querschnitt am Anfang des herausragenden Probestabes T_0 . Um dieser Annahme zu entsprechen wurde die Länge der Kupferhülse so gewählt, dass sich eine möglichst konstante Temperatur des Stabes darüber einstellt. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der Wärmestrom \dot{Q}_u , welcher vom Probestab an die Umgebung abgegeben wird, gleich jener Wärmestrom ist, welcher durch die Kupferhülse fließt und weiters gleich der Verlustwärmestrom des Thermoöl ist. Für eine bekannte Öleintrittstemperatur $T_{\text{Öl}_{ein}}$ lässt sich die Temperatur beim Herausströmen bestimmen mit:

$$T_{\text{Öl}_{aus}} = T_{\text{Öl}_{ein}} - \frac{\dot{Q}_U}{\dot{m}_{\text{Öl}} * c_{p_{\text{Öl}}}} \quad (40)$$

Der Ölmassenstrom lässt sich über die Geschwindigkeit des Öls $v_{\text{Öl}}$, seiner Dichte $\rho_{\text{Öl}}$ und den Durchmesser der Ölleitung $D_{\text{Ölleit}}$ berechnen mit:

$$\dot{m}_{\text{Öl}} = v_{\text{Öl}} * \frac{D_{\text{Ölleit}}^2 * \pi}{4} * \rho_{\text{Öl}} \quad (41)$$

Es wird angenommen, dass die Temperaturdifferenz zwischen ein- und ausströmendem Öl sehr gering ist, wodurch auf das einfach zu berechnende arithmetische Mittel zurückgegriffen wird, um die mittlere Temperatur des Öls in dem Ölbehälter zu berechnen.

$$T_{\dot{O}l_Mittel} = \frac{T_{\dot{O}l_ein} + T_{\dot{O}l_aus}}{2} \quad (42)$$

Befindet sich der eingesteckte Materialprobekörper in der Kupferhülse so verursacht die Möglichkeit des Stabwechsels einen Luftspalt zwischen der Innenseite der Kupferhülse und der Außenseite des Stabes. Für die Berechnung wurden daher zwei mögliche Wärmetransportszenarien berücksichtigt. Bei Ersterem setzt sich der Wärmeübergang durch den Luftspalt aus Wärmeleitung durch ruhende Luft und der Wärmestrahlung von der Innenseite der Hülse zur Außenseite des Probekörpers zusammen. Aufgrund der Tatsache, dass Luft eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist, könnte dies während den Versuchen zu einer Beeinträchtigung des Messergebnisses führen. Das zweite Szenario ist ein Auftragen einer Wärmeleitpaste zwischen dem Probekörper und der Kupferhülse. Damit setzt sich der Wärmetransport im Spalt ausschließlich aus molekularer Wärmeleitung durch die Wärmeleitpaste zusammen. Die verwendete Paste ist nicht transmissiv womit in diesem Fall auf Wärmestrahlung verzichtet wird.

Für eine bessere Übersicht der Einflüsse auf die Wärmedurchgangszahl des Gesamtsystems k_{ges} wurden Wärmeleitfähigkeiten von ruhenden Medien in deren Wärmeübergangskoeffizienten umgeformt. Der Wärmeübergangskoeffizient durch die Kupferhülse $\alpha_{Hülse}$ sowie durch den Spalt α_{Spalt} , sowohl mit Wärmeleitpaste als auch mit ruhender Luft wurde berechnet mit, vgl. [2]:

$$\alpha_s = \frac{2 * \lambda_s}{D_A * \ln\left(\frac{D_A}{D_I}\right)} \quad (43)$$

wobei λ_s für die Wärmeleitfähigkeit des jeweiligen Mediums und D_A bzw. D_I für den Außen- bzw. Innendurchmesser stehen. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten mittels Wärmestrahlung zwischen der Innenseite der Kupferhülse und der Stabaußenseite wurde durchgeführt mit, vgl. [8]:

$$\alpha_{Str} = C_{12} * (T_{Hülse_I}^2 + T_{Stab}^2) * (T_{Hülse_I} + T_{Stab}) \quad (44)$$

Die Strahlungsaustauschzahl C_{12} ist von der Geometrie und den Strahlungseigenschaften der Materialoberfläche abhängig. Es wurde angenommen, dass es sich sowohl bei der Kupferhülse wie auch beim Probekörper um „graue“ Strahler handelt. Mit dieser Annahme und der Tatsache, dass die Querschnitte der beiden

Bauteile ähnlich groß sind ($A_{Hülse_I} \approx A_{Stab}$) wird die Strahlungsaustauschzahl berechnet mit, vgl. [8]:

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (45)$$

wobei ε_1 und ε_2 die Emissionsgrade der Materialien der Kupferhülse und des Probematerials sind. Sie wurden als konstant angesehen und einer Tabelle entnommen [8]. Bei den Werten handelt es sich um einen, nach Ermessen, über die unterschiedlichen Oberflächenqualitäten des jeweiligen Materials, hinweg bestimmten Mittelwert.

Beim Einströmen des Öls in den Reservoir-Zylinder erfolgt ein Queranströmen der Kupferhülse. Somit kann, wie beim Probestab die Wärmeübergangszahl an der Außenseite der Kupferhülse $\alpha_{Hülse_A}$, mit den Formeln eines quer angeströmten Zylinders unter erzwungener Konvektion berechnet werden (siehe Kapitel 4.1.2). Zu beachten ist, im Vergleich zum Fall der Anströmung des Probestabs, die Veränderung des Mediums von gasförmig zu flüssig. Diese Änderung betrifft die Bestimmung des Korrekturfaktors $f_{4_{\dot{O}l}}$, welcher im Falle einer Flüssigkeit über das Verhältnis der Prandtl-Zahlen nach Gleichung (22) ermittelt wird. Die mittlere Temperatur des Thermoöls liegt sehr nahe an der Außentemperatur der Kupferhülse im stationären Zustand, wodurch $f_{4_{\dot{O}l}} = 1$ angenommen werden kann [2].

Die Wärmedurchgangszahl durch das gesamte System lässt sich berechnen mit, vgl. [2]:

$$k_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{Hülse_A}} + \frac{1}{\alpha_{Hülse}} + \frac{D_{Hülse_A}}{D_{Hülse_I}} * \frac{1}{(\alpha_{Str} + \alpha_{Spalt})}} \quad (46)$$

Die Temperatur an der Außenseite des Materialprobestabes kann berechnet werden mit, vgl. [2]:

$$T_{Stab} = T_{\dot{O}l_{mittel}} - \frac{\dot{Q}_U}{k_{ges} * L_{Hülse} * \pi * D_{Hülse_A}} \quad (47)$$

4.4 Physikalische Kennwerte der feuchten Luft und der Wärmeträgerflüssigkeit

Für die Berechnung der physikalischen Eigenschaften der Luft stehen Formeln unterschiedlichen Ursprungs und Abhängigkeiten zur Verfügung. Die für diese Arbeit verwendeten Gleichungen beruhen auf einem Werk, welches das Ziel hatte, eine einheitliche Methode für die Ermittlung von unterschiedlichen Kennwerten von feuchter Luft aufzustellen [9]. Für die Simulation der Anlage wurden die Formeln zur Berechnung der Dichte, Wärmeleitfähigkeit, dynamischen Viskosität und spezifischen Wärmekapazität der feuchten Umgebungsluft ausgewählt. Die Kennwerte sind für eine genauere Berechnung des Wärmeüberganges mittels freier und erzwungener Konvektion am Materialprobekörper unerlässlich. Die Konstanten a_n , welche in den folgenden Gleichungen verwendet werden, sind in Tabelle 1 nachzulesen.

Die Formel zur Berechnung der Dichte der Luft beruht auf der thermischen Zustandsgleichung für ideale Gase. Für eine bessere Näherung an das reale Verhalten wurde die Gleichung mit dem Kompressibilitätsfaktor erweitert. Eine weitere Modifikation erfolgt durch das Einführen des Molanteils an Wasser in der Luft. Die Dichte der feuchten Luft wird bestimmt mit, vgl. [10, 11]:

$$\rho_{Luft} = (3,48349 + 1,44 * (\chi_c - 0,0004)) * 10^{-3} * \frac{p_s}{Z_{Luft} * T_{Luft}} (1 - 0,378\chi_w) \quad (48)$$

wobei χ_c der Molanteil von CO_2 in der Luft ist. Es wurde beschrieben, dass dieser unter Laborbedingungen als $\chi_c = 400 \text{ ppm}$ anzunehmen ist. Diese Annahme wurde getroffen, wodurch für die weitere Berechnung die Kohlendioxidabhängigkeit wegfällt. Des Weiteren ist p_U der Umgebungsdruck, Z_{Luft} der Kompressibilitätsfaktor, T_{Luft} die Temperatur der Luft. Der Molanteil des Wasserdampfes χ_w in der Umgebungsluft wird berechnet mit, vgl. [10]:

$$\chi_w = \varphi_f * \frac{p_{sv}}{p_U} * (a_0 T_{Luft}^2 + a_1 p_s + a_2 \vartheta_{Luft}^2) \quad (49)$$

wobei φ_f die relative Luftfeuchtigkeit und ϑ_{Luft} die Temperatur der Luft eingesetzt in Grad Celsius ist. Eine Aufgabe der jetzigen an der TU Wien stattfindenden Laborübung ist die Bestimmung der relativen Luftfeuchtigkeit. Der gemessene Wert könnte als

Berechnungswert dienen. Der Sättigungspartialdruck des Wasserdampfes p_{SV} wird ermittelt mit, vgl. [10]:

$$p_{SV} = \exp(a_0 T^2 + a_1 T + a_2 + a_0 T^{-1}) \quad (50)$$

Das Verhältnis zwischen dem idealen und realen Verhalten eines Gases wird beschrieben über den Realgas- bzw. Kompressibilitätsfaktor Z_{Luft} , welcher berechnet wird mit, vgl. [10]:

$$Z_{Luft} = 1 - \frac{p_U}{T} * (a_0 + a_1 \vartheta + a_2 \vartheta^2 + (a_3 + a_4 \vartheta) \chi_w + (a_5 + a_6 \vartheta) \chi_w^2) + \left(\frac{p_U}{T}\right)^2 (a_7 + a_8 \chi_w^2) \quad (51)$$

Diese Gleichung wurde aus einer Kombination aus dem zweiten und dritten Viralkoeffizienten der trockenen Luft und des Wasserdampfes gebildet. Ebenfalls berücksichtigt sie die Interaktion, welche zwischen Luft- und Wassermolekülen stattfindet. Dabei wurde angenommen, dass sich die Luft wie eine homogene Substanz verhält [10].

Die Gleichungen für die dynamische Viskosität und die spezifische Wärmekapazität der feuchten Luft beruhen auf den Untersuchungen von Arnold Wexler et al., welche in dem Buch „Humidity and Moisture“ beschrieben werden [12]. Auf Grundlage dieser Arbeit stellten 1985 Zuckerwar et al. die beiden expliziten Gleichungen auf, welche auch in dieser Arbeit verwendet werden [13].

Die Viskosität von feuchter Luft wurde angegeben mit, vgl. [13]:

$$\eta_{Luft} = (a_0 + a_1 T + (a_2 + a_3 T) \chi_w + a_4 T^2 + a_5 \chi_w^2) * 10^{-8} \quad (52)$$

Die Wärmeleitfähigkeit der feuchten Luft wurde bestimmt mit, vgl. [13]:

$$\lambda_{Luft} = (a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + (a_3 + a_4 T) \chi_w) * 10^{-8} \quad (53)$$

Die mittlere spezifische Wärmekapazität von feuchter Luft kann mit folgender Beziehung berechnet werden, vgl. [9]:

$$c_{p_Luft} = a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + (a_4 + a_5 T + a_6 T^2) \chi_w + (a_7 + a_8 T + a_9 T^2) \chi_w^2 \quad (54)$$

Die für die Berechnung benötigten Konstanten a_n sind aus Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Konstanten für die Berechnung der feuchten Luft [9]

	p_{sv}	χ_w	Z_{Luft}	η_{Luft}	λ_{Luft}	c_{p_Luft}
	[Pa]	[-]	[-]	[Pas]	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	$\left[\frac{cal}{gK}\right]$
a_0	$1,2378847 \cdot 10^{-5}$	1,00062	$1,58123 \times 10^{-6}$	84,986	60,054	0,251625
a_1	$-1,9121316 \cdot 10^{-2}$	$3,14 \times 10^{-8}$	$-2,9331 \times 10^{-8}$	7,0	1,846	$-9,2525 \times 10^{-5}$
a_2	33,937110 47	$5,6 \times 10^{-7}$	$1,1043 \times 10^{-10}$	113,157	$2,06 \times 10^{-6}$	$2,1334 \times 10^{-7}$
a_3	$-6,3431645 \cdot 10^{-3}$		$5,707 \times 10^{-6}$	-1	40	$-1,0043 \times 10^{-10}$
a_4			$-2,051 \times 10^{-8}$	$-3,750 1 \times 10^{-3}$	$-1,775 \times 10^{-4}$	0,12477
a_5			$1,989 8 \times 10^{-4}$	-100,015		$-2,283 \times 10^{-5}$
a_6			$-2,376 \times 10^{-6}$			$1,267 \times 10^{-7}$
a_7			$1,83 \times 10^{-11}$			0,01116
a_8			$-0,765 \times 10^{-8}$			$4,61 \times 10^{-6}$
a_9						$1,74 \times 10^{-8}$

Die Gleichungen für die physikalischen Eigenschaften des Thermoöls wurden mittels eines Datenblatts bestimmt. Bei dem Thermoöl handelt es sich um eine Wärmeträgerflüssigkeit mit der Bezeichnung FRAGOLTHERM® X-400-A der Firma Fragol AG [14]. Die aus dieser Produktinformation entnommenen Daten der Dichte, spezifischen Wärmekapazität, Viskosität und Wärmeleitfähigkeit wurden in Abhängigkeit der Temperatur in Excel als Diagramme dargestellt. Mittels Trendlinie erfolgte die Umwandlung der Kurven in Gleichungen, welche in die Berechnung implementiert wurden.

4.5 Wärmeleitfähigkeit der Materialproben

Bei der Probe des austenitischen Stahles handelt es sich um einen Werkstoff mit der Bezeichnung 1.4301 Niro bzw. X5CrNi 18-10. Die aus dem Buch „Das 100-Stähle-Programm“ entnommenen Daten für die Wärmeleitfähigkeit wurden mittels der in Excel vorhanden Trendlinienfunktion zu einer Geradengleichung umgewandelt, vgl. [15]:

$$\lambda_{Stahl} = 0,0148 * T_{mittel} + 10,658 \quad (55)$$

Die für die Versuche verwendete Kupferprobe entspricht der Kupfersorte 2.0060 bzw. CW004A. Die Werte wurden aus dem Werkstoff-Datenblatt des Deutschen Kupferinstitutes übernommen, vgl. [16]. Die erstellte Trendliniengleichung lässt sich ausdrücken mit:

$$\lambda_{Kupfer} = 564,453 * T_{mittel}^{-0,06382} \quad (56)$$

Bei der Aluminiumprobe handelt es sich um den Werkstoff Al 6060. Die Messdaten sind aus einem Versuchsaufbau für die thermische Analyse von Aluminiumrohlingen abgeleitet worden, vgl. [17]. Die aus den Messdaten erzeugte polynomische Gleichung kann dargestellt werden mit:

$$\lambda_{Alu} = 3,5 * 10^{-7} * T_{mittel}^3 - 7,15 * 10^{-4} * T_{mittel}^2 + 0,42779 * T_{mittel} + 110,4644 \quad (57)$$

Die Wärmeleitfähigkeitskurve der Probe aus Glaskeramik mit der Bezeichnung MACOR® des Herstellers Corning kann beschrieben werden mit, vgl. [18]:

$$\lambda_{Keramik} = -6,2 * 10^{-9} * T_{mittel}^3 + 1,15 * 10^{-5} * T_{mittel}^2 - 0,00703 * T_{mittel} + 2,7649 \quad (58)$$

5 Simulation der Versuchsanlage

In diesem Kapitel werden die erstellten Berechnungen und Simulationen der realen Versuchsanlage beschrieben. Je nach Einsatzzweck kamen dafür unterschiedliche Softwareprogramme zum Einsatz. Es handelte sich um Mathcad, Microsoft Excel und MATLAB. Des Weiteren werden Verwendung und Funktion der einzelnen Programme erklärt. Diese sollen nach Durchführung der Laborübung den Studierenden zur Verfügung gestellt werden, wodurch sie selbst erste Simulationsdaten sammeln können. Daher dient dieses Kapitel ebenfalls als erste Einführung und Bedienungsanleitung der Programme.

5.1 Erste Berechnung mittels Mathcad

Die ersten Berechnungen wurden mit dem Computer-Algebrasystem Mathcad durchgeführt. Es ist ein kommerziell verfügbares Programm der Firma Parametric Technology Corporation (PTC). Mathcad bietet den Vorteil, dass beliebigen Konstanten und Variablen Werte und Einheiten zugewiesen werden können. Ein symbolisches Ausdrücken der Gleichung sorgt für eine gute Übersicht. Des Weiteren erfolgt bei jeder Berechnung eine Einheitenanalyse, was mögliche Fehlerquellen minimiert. Nachteile liegen in der Linearität der Berechnung wodurch beispielsweise Iterationen erschwert werden. Die Ermittlung des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten am angeströmten Materialprobekörper erfolgte auf iterative Weise. Aufgrund von Limitationen dieses Programms wurden die Berechnungen auf Microsoft Excel verlagert.

5.2 Simulation der Anlage mittels VBA im stationären Zustand

Bei der Software Excel von Microsoft handelt es sich um ein Tabellenkalkulationsprogramm. Es bietet den Vorteil, dass es weit verbreitet ist und ebenfalls, zumindest bis zu einem gewissen Grad, mit OpenOffice kompatibel ist. Somit ist es vielen Studenten möglich, die Simulationen selbst durchzuführen. Die eigentliche Berechnung und Simulation wurden in der Skriptsprache Visual Basic for Applications, oder kurz VBA, geschrieben. Sie ist eine eigens für die Ansteuerung von Microsoft-Office Programmen geschriebene Programmiersprache, wodurch keine manuelle

Implementation nötig war. Beim Arbeiten mit der Simulation läuft die Berechnung komplett autark im Hintergrund ab, womit ein Wissen der User kein Fachwissen im Gebiet von Programmiersprachen für die Durchführung einer Simulation haben muss. Ein weiterer entscheidender Faktor für die Wahl dieses Programmes war die Möglichkeit, Prozesse mittels Schleifen zu automatisieren. Allgemein gesagt, wiederholen Schleifen solange einen Vorgang, bis ein vorgegebenes Ziel erreicht wurde. Für die Berechnung des stationären Temperaturverlaufes über den Probestab und die damit verbundene notwendige Iteration zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten wurde daher eine Schleife verwendet. Dies beschleunigt die Auswertung immens, womit viele verschiedene Szenarien getestet werden können.

5.2.1 Aufbau der Maske:

Der Aufbau der Excel-Datei „Berechnung Temperaturverlauf Konvektion“ teilt sich in drei Tabellenblätter namens „Anleitung“, „Auswertung“ und „Diagramm“ auf, welche in dieser Arbeit sowohl als Maske, als auch für die Ausgabe der Ergebnisse dienen. Das als "Anleitung" bezeichnete Tabellenblatt enthält eine schematische Zeichnung der Anlage mit den wichtigsten Variablen eingezeichnet, sowie eine kurze Beschreibung der Simulation. Das Tabellenblatt namens „Auswertung“ wird weiters aufgeteilt in zwei Abschnitte, welche mit einem in Excel erstellten Rahmen visuell voneinander getrennt sind (Abbildung 14). Im Abschnitt „Prozessparameter“ sind die Ergebnisse der Berechnung ersichtlich. Läuft diese zur Gänze ab wird in die letzte Zeile unterhalb der Resultate in blauer Schrift „Berechnung vollständig“ geschrieben. Daraus ist ersichtlich, dass das Makro vollständig ablief und es zu keinerlei Laufzeitfehler kam. Der zweite Bereich „Prozessparameter“ dient dem Zweck, Vergleiche und Unterschiede zwischen Berechnungen durchzuführen. In diesem Bereich werden die Eingabewerte, auf welchen die Berechnungen beruhen, angezeigt. Bevor eine Berechnung gestartet werden kann, muss das Eingabefeld aufgerufen werden. Dies wurde mittels UserForm in VBA erstellt. Das Feld wird durch Betätigen des Knopfes „Eingabe anzeigen“ dargestellt. Auf diesem befinden sich im oberen Abschnitt drei Dropdown-Menüs. Hier können das Material des Probestabes (Stahl, Aluminium, Kupfer oder Keramik), die Konvektionsart (freie, erzwungene oder kombinierte Konvektion) und das Medium im Spalt (Wärmeleitpaste oder Luft) ausgewählt werden. Darunter befindet sich, aufgeteilt in zwei Registerkarten, der Eingabebereich. Die erste Karte namens „Prozessparameter“ enthält die Geometrie, sowie die Eigenschaften der

Umgebungsluft und Emissionsgrade der Materialien. Auf der zweiten Karte „erweiterte Einstellungen“ werden Wärmeleitfähigkeiten der Proben und Thermoölparameter eingegeben. Mittels der beiden Dropdown-Menüs kann die Art der Berechnung sowohl für die Wärmeleitfähigkeit der Materialproben als auch die physikalischen Eigenschaften des Thermoöls geändert werden. Je nach Auswahl werden die in diesem Reiter eingetragenen Werte für die Berechnung herangezogen, oder sie werden mittels Makros auf Basis der Umgebungsbedingungen berechnet.

Der sich auf der UserForm befindende Knopf „Standardwerte“ soll den Usern als Hilfe dienen. Bei Betätigung werden die gesamten Eingabefelder mit den ursprünglichen Standardwerten gefüllt. Dies hat den Zweck, dass bei einem versehentlichen Löschen ein oder mehrerer Werte diese zurückgeholt werden können. Ebenfalls dient es der Veranschaulichung der jeweiligen Größenordnung der Werte. Die Eingabe der Zahlenwerte muss in den richtigen Einheiten erfolgen, da Excel in Gegensatz zu Mathcad, keine Einheitenanalyse durchführt und es bei Abweichung zu Fehlern kommt. Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass bei Aktivierung des Knopfes alle Werte mit Standardparametern überschrieben werden.

The image shows a screenshot of an MS-Excel spreadsheet and a VBA UserForm. The spreadsheet is divided into two main sections: 'Ausgabewerte' (Output Values) and 'Prozessparameter' (Process Parameters). The 'Ausgabewerte' section contains columns for 'Bezeichnung' (Description), 'Formelzeichen' (Symbol), 'Wert' (Value), and 'Einheit' (Unit). The 'Prozessparameter' section contains columns for 'Bezeichnung', 'Formelzeichen', 'Wert', and 'Einheit'. The UserForm, titled 'Temperaturverlauf mit Konvektion', is overlaid on the spreadsheet. It contains a dropdown menu for 'Material des Probestabes' (Material of the specimen), a dropdown for 'Konvektionsart' (Convection type), and a dropdown for 'Medium im Spalt' (Medium in the gap). There are also input fields for 'Durchmesser Probestab' (Specimen diameter), 'Länge Probestab' (Specimen length), 'Wandstärke Hülse' (Hole wall thickness), 'Spaltbreite' (Gap width), 'Umgebungsdruck' (Ambient pressure), 'Geschwindigkeit des Öl' (Oil velocity), 'Durchmesser der Ölleitung' (Oil pipe diameter), 'Geschwindigkeit der Luft' (Air velocity), 'Öl Einleitetemperatur' (Oil inlet temperature), 'Geschwindigkeit des Öl' (Oil velocity), 'Durchmesser der Ölleitung' (Oil pipe diameter), 'Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitpaste' (Thermal conductivity of thermal paste), 'Emissionsgrad Stahl' (Emissivity of steel), 'Emissionsgrad Aluminium' (Emissivity of aluminum), 'Emissionsgrad Kupfer' (Emissivity of copper), and 'Emissionsgrad Keramik' (Emissivity of ceramic). A 'Berechnung Starten' button is located on the right side of the UserForm.

Abbildung 14: Aufbau der Maske in MS-Excel

Nach Betätigung des Knopfes „Berechnung starten“ werden die Makros im Hintergrund aktiviert und die Simulation läuft ab. Je nach vorheriger Auswahl zeigt der Abschnitt „Ausgabewerte“ die angepassten Resultate an. Es werden die für die jeweilige Art der Konvektion notwendigen dimensionslosen Kennzahlen, die mittlere Temperatur und der Wärmeübergangskoeffizient über den Probestab ausgedrückt. Der Vollständigkeit

halber erfolgt eine Ausgabe der berechneten Zustandsgrößen der Luft bei gegebener/(m) Temperatur, Druck und Luftfeuchtigkeit.

Die Berechnung der Ergebnisse auf dem dritten Tabellenblatt „Diagramm“ läuft zeitgleich mit dem zweiten Blatt ab. Je nach vorheriger Materialauswahl wird eine der vier Tabellen ausgefüllt. Mit Null beginnend wird bei jedem Zehntel der eingegebenen Probestablänge, dargestellt als Koordinate x , die an dieser Stelle vorhandene Temperatur des Probestabes $\theta(x)$ berechnet. Das Diagramm ist so eingestellt, dass es die Werte aus der Tabelle automatisch einliest und als Temperaturverlauf wiedergibt. Die Tabellen können untereinander verschoben werden, wodurch es möglich ist, Vergleiche von unterschiedlichen Szenarien anzustellen. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse von gleichen Probestabmaterialien immer in die gleiche Spalte eingetragen werden.

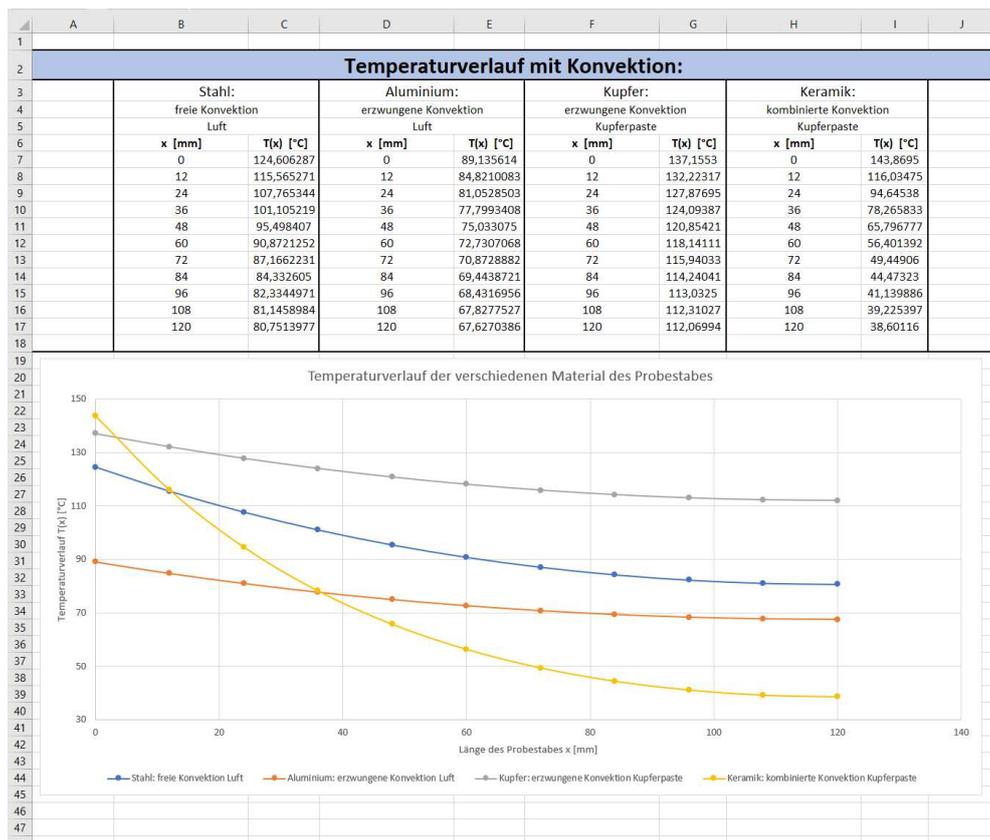


Abbildung 15: Tabellenblatt "Diagramm" mit möglichen Temperaturverläufen

Oberhalb der Längen- und Temperaturwerte erscheint das jeweilige Material, die Konvektionsart und das Spaltmedium. Diese Ausgabe dieser Werte dient der besseren Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Sie werden ebenfalls in der Legende des Diagrammes wiedergegeben.

5.2.2 Aufbau des VBA-Codes:

In diesem Abschnitt der Arbeit wird auf den Aufbau und die Funktionsweise der in VBA geschriebenen Simulation der Versuchsanlage eingegangen. Für eine mögliche Erweiterung dieser Arbeit und die damit verbundene Modifikation des VBA-Codes wurde auf eine ausführliche Kennzeichnung geachtet. Allgemein gilt, dass beim Arbeiten mit Programmiersprachen eine ausführliche Beschreibung des Codes sehr hilfreich ist.

Aufgrund der verbesserten Übersicht erfolgt eine Einteilung der Berechnung in diverse Module, welche nach ihren Aufgaben benannt wurden. Jedes Modul entspricht einem eigenen Codefenster, welches wiederum eine beliebige Anzahl an Sub-Prozeduren, beispielsweise „Sub Auswertung“, enthalten kann (Abbildung 16). Eine Prozedur ist ein Abschnitt eines Codes, in dem mehrere Befehle hintereinander ausgeführt werden [19].

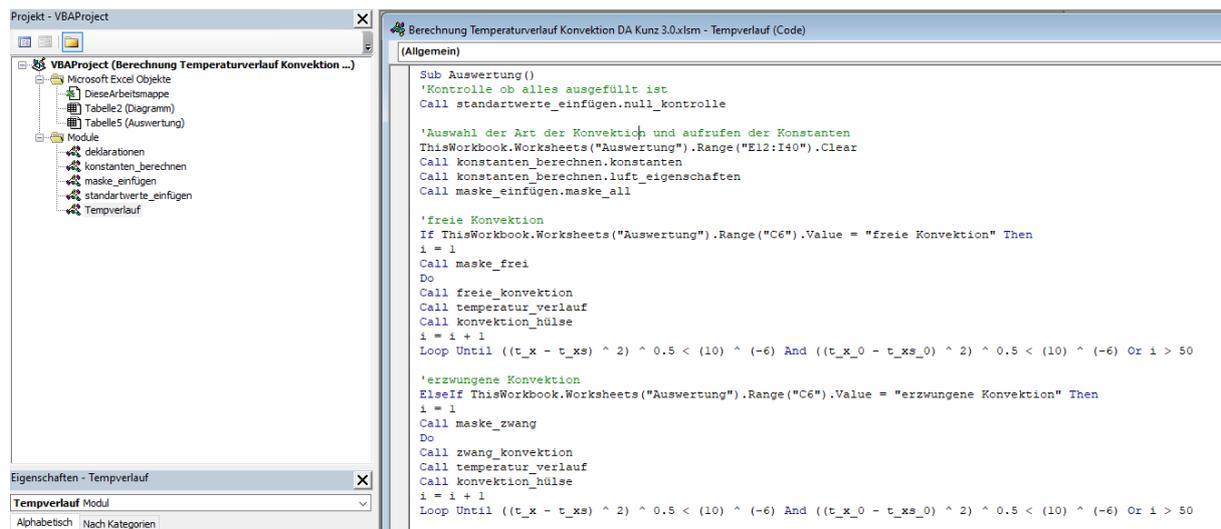


Abbildung 16: Aufbau der Module und Sub-Prozeduren

Formular „UserForm1“

Die Steuerung der Simulation erfolgt über eine UserForm. Dies ist eine vom VBA-User selbst erstellte Maske und kann für die Ansteuerung diverser Prozesse genutzt werden. In dieser Arbeit wird sie für die Eingabe der Prozessparameter verwendet. Des Weiteren sind die Parameter, welche bei der Aktivierung des Knopfes „Standardparameter“ eingefügt werden, in der UserForm hinterlegt. Im Falle einer manuellen Eingabe der Werte wurde darauf geachtet, dass nur Zahlenwerte eingetragen werden können. Ebenfalls ist es nicht möglich in einigen Eingabefeldern

einen Wert von Null hineinzuschreiben. Diese Maßnahmen sollen im weiteren Verlauf Fehler von unvorsichtigen Usern verhindern.

Modul „deklarationen“

Es beinhaltet alle während der Berechnung vorkommenden Konstanten. Ein Zahlenwert wird einer Konstanten standardmäßig nur innerhalb eines Modules zugewiesen. Da es sich bei den meisten Konstanten um modulübergreifende Werte handelt, müssen diese mit dem Vorsatz „Public“ versehen werden. Somit ist es möglich Werte zwischen zwei Modulen auszutauschen. Ein weiterer Punkt ist die bessere Übersicht, die ein solcher Aufbau bietet.

Modul „konstanten_berechnen“

Die sich in diesem Modul befindliche Sub-Prozedur „konstanten“ liest die in der Maske eingegebenen Zahlenwerte ein und weist sie bestimmten Konstanten zu. Ebenfalls befindet sich die Prozedur „lufteigenschaften“ in dem Modul, welche in Abhängigkeit der angegebenen Temperatur, Umgebungsdruck und Umgebungsluftfeuchtigkeit die physikalischen Kennwerte der Dichte, dynamischen Viskosität, spezifischen Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit der feuchten Umgebungsluft berechnet. Die Prozedur „thermoöl_eigenschaften“ ermittelt die notwendigen physikalischen Eigenschaften der verwendeten Wärmeträgerflüssigkeit. Eine Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit des Probematerials kann durch Aktivierung der Prozedur „wärmeleitfähigkeit_probematerial“ in die Berechnung miteinbezogen werden. Die Inkludierung dieser beiden Prozeduren in die Berechnung erfolgt über die jeweiligen Dropdown-Menüs auf der UserForm.

Modul „maske_einfügen“

Dieses Modul beinhaltet keinerlei Berechnung und dient dem alleinigen Zweck die richtigen Namen und Einheiten in die dafür vorgesehenen Felder zu schreiben.

Modul „Tempverlauf“

In diesem Modul befindet sich der Großteil der eigentlichen Berechnung, aufgeteilt in mehrere Sub-Prozeduren. Beim Betätigen des Knopfes „Berechnung starten“ auf der UserForm wird die Prozedur namens „Auswertung“ aufgerufen. Sie dient als Lageplan der Simulation mit der Aufgabe mehrere andere Sub-Prozesse, auch über

verschiedene Module verteilt, sowie Berechnungsschleifen in einer bestimmten Reihenfolge auszuführen. Je nach Auswahl der Konvektionsart über das Dropdown-Menü werden unterschiedliche Schleifen für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten und des Temperaturverlaufes angesteuert. In diesen wiederholt sich die Berechnung solange, bis die mittlere Temperatur über den Probestab sowie die Anfangstemperatur, bis auf wenige Kommastellen, gleich ist mit der aus dem vorherigen Schleifendurchgang. Ein Durchlaufen der Schleife kann als ein Iterationsschritt gesehen werden. Die Bedingung für die Beendigung der Schleife und damit die Genauigkeit der Berechnung ist über den VBA-Code einstellbar und wurde standardmäßig auf eine Differenz der beiden mittleren Temperaturen von kleiner 10^{-4} festgelegt. Da eine solche Einstellung in besonderen Fällen auch dazu führen kann, dass die Schleife nicht abbricht, wurde eine Sicherheit eingeführt, welche die Berechnung nach 50 Iterationsschritten beendet. Dies ist ebenfalls über den VBA-Code einstellbar.

Die Prozeduren mit den Namen „freie_konvektion“, „zwang_konvektion“ und „kombi_konvektion“ enthalten die nötigen Gleichungen für die Berechnungen des Wärmeübergangskoeffizienten bei freier, erzwungener oder kombinierter Konvektion.

Die mittlere Temperatur über dem Stab sowie die an die Umgebung abgegebene Wärme wird mit der Sub-Prozedur „temperatur_verlauf“ berechnet. Diese dient als Grundlage für die Bestimmung des Wärmedurchganges zwischen Thermoöl und Probestaboberfläche, welche in der Sub-Prozedur „konvektion_hülse“ ermittelt wird.

Die Prozedur „temperaturverlauf_diagramm“ teilt eine beliebige Stablänge in 10 gleichgroße Abschnitte und berechnet bei jedem dieser Punkte die Temperatur. Die Werte werden in Form einer Tabelle im Tabellenblatt „Diagramm“ ausgegeben.

5.3 Instationärer Temperaturverlauf mittels MATLAB

Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben ließ sich die instationäre eindimensionale partielle Differenzialgleichung angepasst an die Versuchsanlage nicht analytisch lösen. Daher wurde auf ein Computerprogramm namens MATLAB, entwickelt vom Unternehmen MathWorks, zurückgegriffen. Es ist besonders zur Berechnung von numerischen Problemen mit Matrizen geeignet. Allgemein stehen in MATLAB je nach Art der Differenzialgleichung diverse Funktionen für die numerische Lösung zur Verfügung.

Bei einfachen Gleichungen ist eine analytische Lösung ebenfalls möglich. Da es sich in diesem Fall um eine eindimensionale partielle Differenzialgleichung handelt wurde mit der *pdepe*-Funktion gearbeitet. Für die richtige Berechnung muss die aufgestellte Gleichung in eine für MATLAB lösbare Form umgewandelt werden. Allgemein ist diese definiert mit:

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \frac{\partial u}{\partial t} = x^{-m} \frac{\partial}{\partial x} \left(x^m f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \right) + s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) \quad (59)$$

Gleichung (33) muss an diese Form angepasst werden. Bei einem Vergleich der beiden Formeln ist zu erkennen, dass die Konstante m gleich Null gesetzt werden muss. Sie wird innerhalb von MATLAB als die „Symmetry constant“ definiert, welche je nach Gleichungsform den Wert Null, Eins oder Zwei annehmen kann. Die restlichen Anpassungsvariablen wurden definiert mit:

$$c\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 1 \quad (60)$$

und

$$f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = \frac{\lambda_s}{\rho c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (61)$$

sowie

$$s\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = \frac{4\alpha_U}{\rho c_p D_{stab}} (T_U - T(x, t)) \quad (62)$$

Für die Eingabe der Randbedingungen müssen die von MATLAB vorgegebenen Gleichungen angepasst werden mit:

$$p(x, t, u) = q(x, t), \quad f\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}\right) = 0 \quad (63)$$

Die Anpassungsvariablen sind dabei p und q . Somit ist die Randbedingung für das linke und rechte Ende des Probestabes definiert mit:

$$p_L = (T_L - T_0), \quad q_L = 0, \quad p_R = 0, \quad q_R = 1 \quad (64)$$

Für die Anfangsbedingung wurde angenommen, dass der Temperaturverlauf zum Zeitpunkt $t=0$ konstant der Temperatur der Umgebungsluft T_U entspricht.

Ermittlung des instationären Temperaturverlaufes:

In diesem Unterkapitel wird die Funktionsweise des MATLAB-Programmes für die Ermittlung des Oberflächendiagrammes der Temperatur beschrieben. Es soll vor allem den Studierenden als Hilfestellung für das korrekte Arbeiten mit dieser Simulation dienen.



Abbildung 17: Ausbau des Berechnungstools in MATLAB

Bevor die Berechnung des Temperaturverlaufes mit dem Namen „aufwarmvorgang“ und die damit verbundene Ausgabe des Flächendiagrammes gestartet werden kann, müssen die Materialkonstanten in den Workspace geladen werden. Dies erfolgt durch das Starten einer der sogenannten „Werte“-Funktionen. Beispielsweise werden beim Ausführen der Funktion mit dem Namen „stahl_werte“ die benötigten Materialkonstanten, sowie die Temperatur für die Randbedingung für die Berechnung des Stahlprobestabes in den Workspace geladen (Abbildung 17). Durch Ausführen einer anderen „Werte“-Funktion werden die sich im Workspace befindlichen Daten mit den neueren überschrieben.

6 Prozessdaten und Auswertung

In diesem Kapitel werden die ermittelten Daten der Versuchsanlage sowie die Daten der Simulation aufgelistet. Es ist darauf hinzuweisen, dass aufgrund der Covid-19 Pandemie, welche während des Schreibens dieser Diplomarbeit ausbrach, die Versuchsanlage ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr zugänglich war. Es war jedoch möglich einen Versuchsdurchgang durchzuführen. Daher wird der Schwerpunkt der Auswertung auf den Simulationsdaten liegen. Im Anschluss erfolgt eine Prüfung auf Plausibilität der Daten.

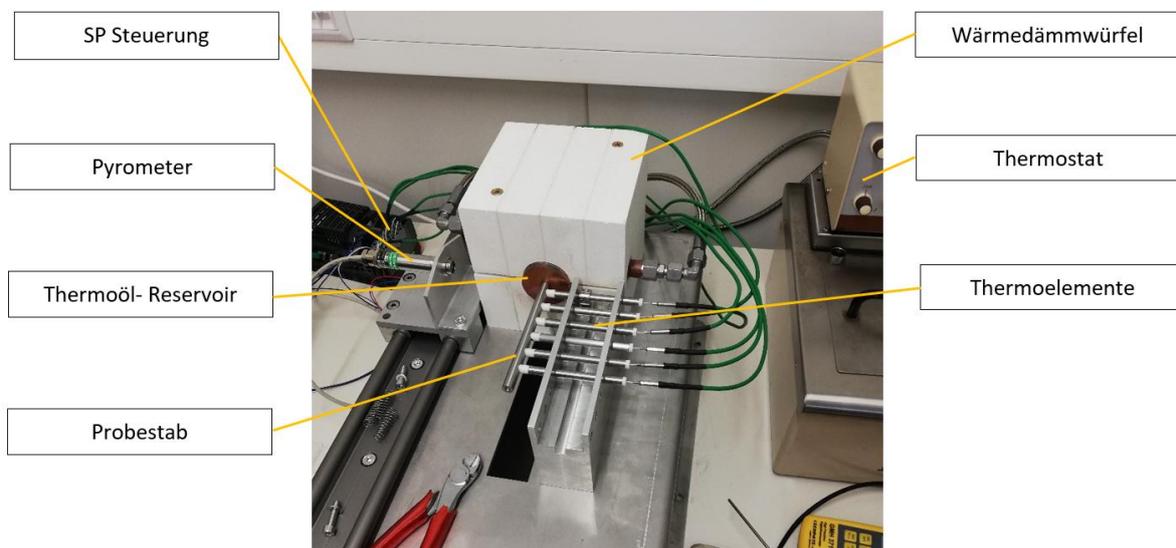


Abbildung 18: Kennzeichnung der Versuchsanlage

6.1 Ergebnisse der Versuchsanlage

Zu Beginn der Versuchsdurchführung wurde das Thermostat auf eine Thermoöltemperatur von 150 °C eingestellt. Nachdem das eingebaute Display des Thermostats eine konstante Temperatur anzeigte, begannen die Versuche. Dabei wurde der jeweilige Probestab in die Kupferhülse gesteckt. Danach erfolgte das Anschließen der Thermoelemente. Jedes Thermoelement ist in einem Zylinder aus Teflon gelagert, um so den Wärmeverlust an die Umgebung zu verringern. Des Weiteren sind alle Probestäbe mit Löchern in Achsrichtung versehen, in welche die Messspitzen der Thermoelemente eingesetzt wurden. Diese Maßnahmen sollen die Umgebungseinflüsse minimieren. Ein eigens für die Versuchsanlage geschriebenes Computerprogramm zeigte die Temperaturen des jeweiligen Messelements in Echtzeit

an. Die Zeit die benötigt wurde um konstante Temperaturen zu erreichen lag je nach Material zwischen 20 und 60 Minuten.

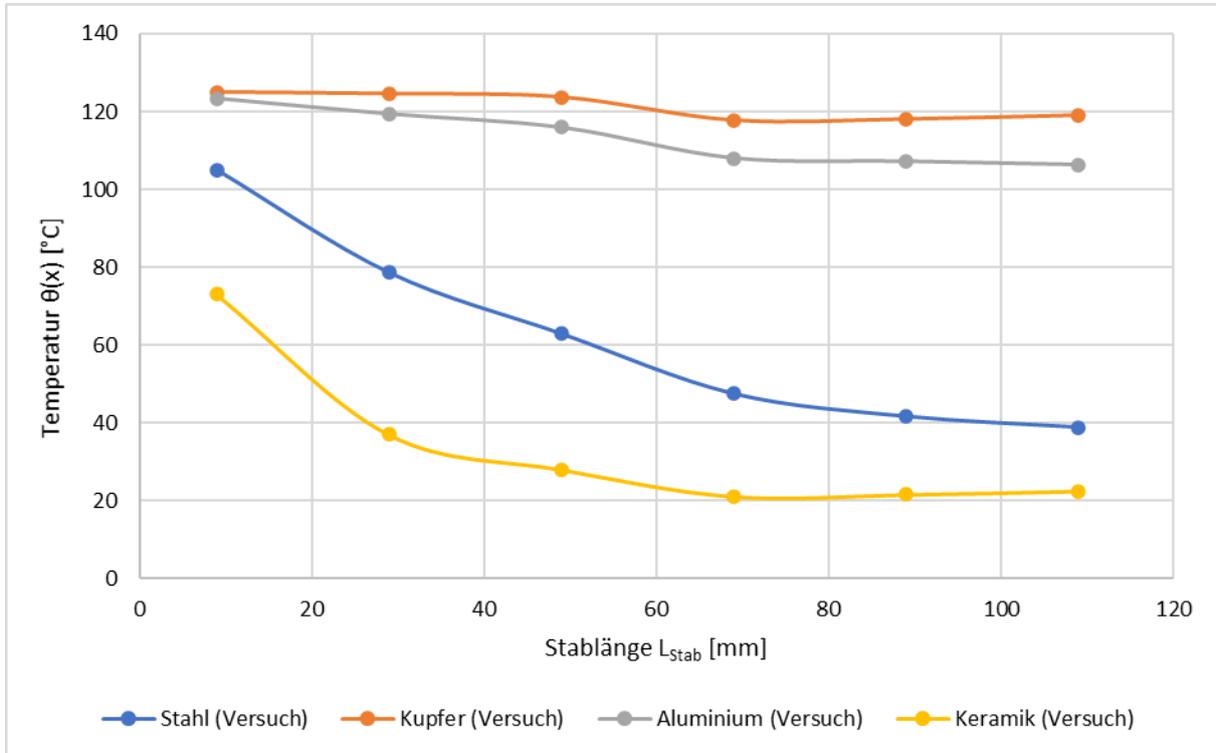


Abbildung 19: stationärer Temperaturverlauf der Anlage bei freier Konvektion und Luft im Spalt

In Abbildung 19 sind die ermittelten stationären Temperaturverläufe bei freier Konvektion dargestellt. Weiters ist anzumerken, dass keine Wärmeleitpaste zum Einsatz kam, da der Einfluss eines möglichen Luftspalts zwischen Probestab und Kupferhülse untersucht werden sollte und ein späteres Entfernen der Paste nur mit größerem Aufwand verbunden wäre.

Bei erster Betrachtung verhalten sich die Temperaturverläufe wie erwartet. Materialien, welche eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit haben, wie Kupfer und Aluminium, heizen sich über ihre gesamte Länge stark auf und weisen einen geringen Temperaturabfall auf. Die beiden Probestäbe mit geringerer Wärmeleitfähigkeit, austenitischer Stahl und Keramik, zeigen hingegen einen weitaus steileren Temperaturabfall. Bei genauer Betrachtung der Verläufe kann erkannt werden, dass sowohl beim Verlauf des Kupferstabes als auch beim Verlauf des Keramikstabes ein Anstieg der Temperatur an den letzten beiden Messpunkten zu verzeichnen ist (Tabelle 2). Da der Probestab jedoch nur einseitig beheizt und keine weitere Wärmequelle angeschlossen wurde, ist dies nicht möglich.

Tabelle 2: Ermittelte Versuchsdaten stationär/frei/Luft

Stahl		Aluminium		Kupfer		Keramik	
x [mm]	$\theta(x)$ [°C]	x [mm]	$\theta(x)$ [°C]	x [mm]	$\theta(x)$ [°C]	x [mm]	$\theta(x)$ [°C]
9	105	9	123,4	9	125	9	73,1
29	78,6	29	119,4	29	124,6	29	37
49	62,9	49	115,9	49	123,7	49	28
69	47,5	69	108	69	117,7	69	21,1
89	41,7	89	107,2	89	118	89	21,6
109	38,9	109	106,3	109	119	109	22,5

Nach Durchführung der Versuche und vollständiger Abkühlung der Anlage erfolgte eine Untersuchung dieses Phänomens. Es stellte sich heraus, dass die Thermoelemente bei Raumtemperatur unterschiedliche Temperaturen anzeigten. Jene waren, aufgelistet nach deren Nähe zur Stirnfläche der Kupferhülse, ca. 21 °C, 21 °C, 24 °C, 20 °C, 21 °C und 22 °C. Dieses Verhalten ist auch durchgehend bei den Temperaturverläufen der einzelnen Materialien zu erkennen, da der dritte Messpunkt einen starken Buckel im Verlauf verursacht. Der Temperaturanstieg am Ende kann dadurch erklärt werden, dass die angezeigten Temperaturen bei den auf Raumtemperatur abgekühlten Thermoelementen in diesem Bereich ebenfalls anstiegen. Da aufgrund der anfangs beschriebenen Situation eine spätere Kalibrierung der Thermoelemente nicht möglich war, wird für den Vergleich mit der Simulation auf die Temperaturen dieser Messelemente zurückgegriffen.

6.2 Ergebnisse des Computermodells

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Daten, welche die programmierten Modelle berechneten, aufgezeigt und erörtert. Die Eingabewerte der Simulation sind veränderbar und können auch von der realen Anlage abweichen. Die Daten, welche der realen Anlage ähneln, werden als Standarddaten bezeichnet und sind in Tabelle 3 und Tabelle 4 zusammengefasst.

Es wird zwischen temperaturabhängigen und temperaturunabhängigen Größen unterschieden. Jene Größen welche abhängig von der Temperatur sind werden bei 20

°C und 150 °C aufgelistet. Die untere Grenze entspricht der angenommenen Umgebungstemperatur und die obere Grenze ist die vorgegebene Maximaltemperatur der Anlage. So können die Wertebereiche der einzelnen Größen besser eingesehen werden.

Tabelle 3: Temperaturunabhängige Standardwerte

Bezeichnung:	Formelzeichen:	Wert:	Einheit:
Wärmeleitfähigkeit Wärmeleitpaste	λ_{paste}	48	$\frac{W}{(mK)}$
Durchmesser Probestab	D_{Stab}	10	mm
Länge Probestab	L_{Stab}	133	mm
Länge Hülse	$L_{Hülse}$	73	mm
Wandstärke Hülse	$t_{Hülse}$	2	mm
Spaltbreite	s_{Spalt}	0,04	mm
Umgebungstemperatur	T_U	20	°C
Öl-Einlasstemperatur	$T_{\text{Öl}_{ein}}$	150	°C
Umgebungsdruck	p_U	1,013	bar
relative Luftfeuchtigkeit	φ_{Luft}	50	%
Anströmgeschwindigkeit	v_{Luft}	1	$\frac{m}{s}$
Geschwindigkeit des Öls	$v_{\text{Öl}_{leit}}$	2	$\frac{m}{s}$
Durchmesser der Ölleitung	$d_{\text{Öl}_{Leit}}$	10	mm
Emissionsgrad Stahl	ε_{Stahl}	0,15	–
Emissionsgrad Aluminium	$\varepsilon_{Aluminium}$	0,09	–
Emissionsgrad Kupfer	ε_{Kupfer}	0,04	–
Emissionsgrad Keramik	$\varepsilon_{Keramik}$	0,8	–

Die in Tabelle 4 aufgelisteten Parameter dienen zur Abschätzung der Temperaturabhängigkeit im Arbeitsbereich der Anlage. Die für die Ermittlung des Temperaturverlaufes verwendeten Wärmeleitfähigkeiten der Materialproben werden

über die gemittelte Proben­temperatur bestimmt. Anhand des sehr geringen Wertebereiches des Wärmeleitkoeffizienten zwischen minimaler und maximaler Temperatur erzeugt eine solche Annahme kleine Abweichungen.

Tabelle 4: Temperaturabhängige Standardwerte

Bezeichnung:	Formelzeichen:	Wert bei 20°C:	Wert bei 150°C:	Einheit:
Wärmeleitfähigkeit Stahl	λ_{Stahl}	14,997	16,921	$\frac{W}{mK}$
Wärmeleitfähigkeit Aluminium	λ_{Alu}	183,243	189,977	$\frac{W}{mK}$
Wärmeleitfähigkeit Kupfer	λ_{Kupfer}	392,806	383,712	$\frac{W}{mK}$
Wärmeleitfähigkeit Keramik	$\lambda_{Keramik}$	1,536	1,380	$\frac{W}{mK}$
Dichte der Luft	ρ_{Luft}	1,204	0,834	$\frac{kg}{m^3}$
dyn. Viskosität der Luft	η_{Luft}	$1,815 \cdot 10^{-5}$	$2,376 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$
spez. Wärmekapazität der Luft	c_{pLuft}	1006,109	1017,658	$\frac{J}{kgK}$
Wärmeleitfähigkeit der Luft	λ_{Luft}	0,0252	0,0352	$\frac{W}{mK}$
kinematische Viskosität Thermoöl	$\nu_{\dot{o}l_{150}}$	$5,05 \cdot 10^{-5}$	$7,905 \cdot 10^{-6}$	$\frac{m^2}{s}$
Wärmeleitfähigkeit Thermoöl	$\lambda_{\dot{o}l_{150}}$	0,151	0,115	$\frac{W}{mK}$
spez. Wärmekapazität Thermoöl	$c_{p\dot{o}l_{150}}$	1,524	1,684	$\frac{kJ}{kgK}$
Dichte Thermoöl	$\rho_{\dot{o}l_{150}}$	963,352	863,109	$\frac{kg}{m^3}$

Die physikalischen Eigenschaften der Luft sind vom Umgebungsdruck, der Umgebungstemperatur, der mittleren Proben­temperatur und der Luftfeuchtigkeit abhängig. Für die Ermittlung der Tabellenwerte wurde trockene Luft verwendet.

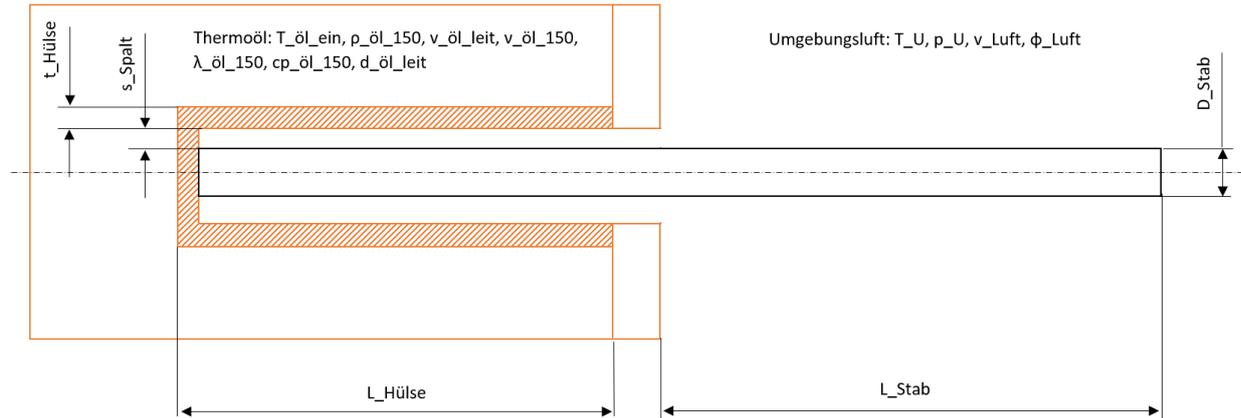


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Versuchsanlage für die Simulation

Abbildung 20 soll dazu dienen, die in den vorangegangenen Tabellen aufgelisteten Prozessparameter besser darzustellen. Somit ist es möglich deren Einflussbereich leichter abzuschätzen.

6.2.1 Simulation der Standardwerte

Die erste Simulation der Versuchsanlage erfolgt unter Verwendung von den in Tabelle 3 und Tabelle 4 aufgelisteten Standardwerten. Sie sollen als Ausgangswerte dienen, welche die Eigenschaften der realen Anlage widerspiegeln. Für eine bessere Deckung der Ergebnisse zwischen der realen Anlage und dem Modell ist eine Anpassung der Standardwerte möglich. Bei der Auswertung wird zwischen einem mit Luft oder mit Wärmeleitpaste gefüllten Spalt unterschieden. Die Versuche erfolgen unter freier Konvektion.

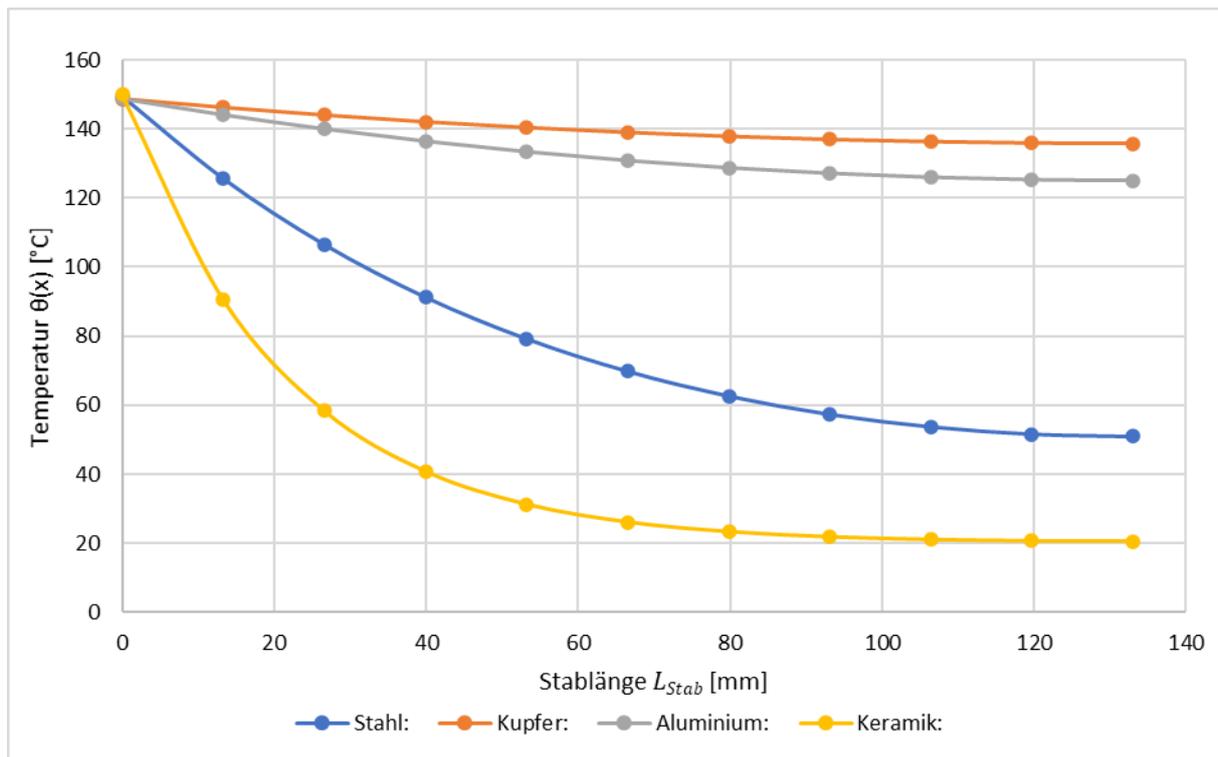


Abbildung 21: stationärer Temperaturverlauf bei freier Konvektion und WLP im Spalt

In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass die Kurven einen ähnlichen Verlauf zeigen, wie die der realen Versuchsanordnung. Sowohl Aluminium als auch Kupfer heizen sich mit nur geringer Temperaturabnahme bis zum Stabende auf, wohingegen Stahl und Keramik eine weitaus größere Temperaturdifferenz zwischen beheizter und unbeheizter Probeseite aufweisen. Der starke Einfluss der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer und Aluminium machen sich durch deren höheren Temperaturverläufe bemerkbar. Aufgrund der Tatsache, dass die Materialien unterschiedlich viel Wärme an die Umgebung abgeben, sind auch deren Anfangstemperaturen leicht verschieden. Beispielsweise kann der keramische Werkstoff nur einen geringen Anteil an Energie an die Umgebung abgeben, somit kühlt das Thermoöl weniger stark ab. Dies hat zur Folge, dass auch die Anfangstemperatur der Keramikprobe weniger abfällt, als die der anderen Materialien.

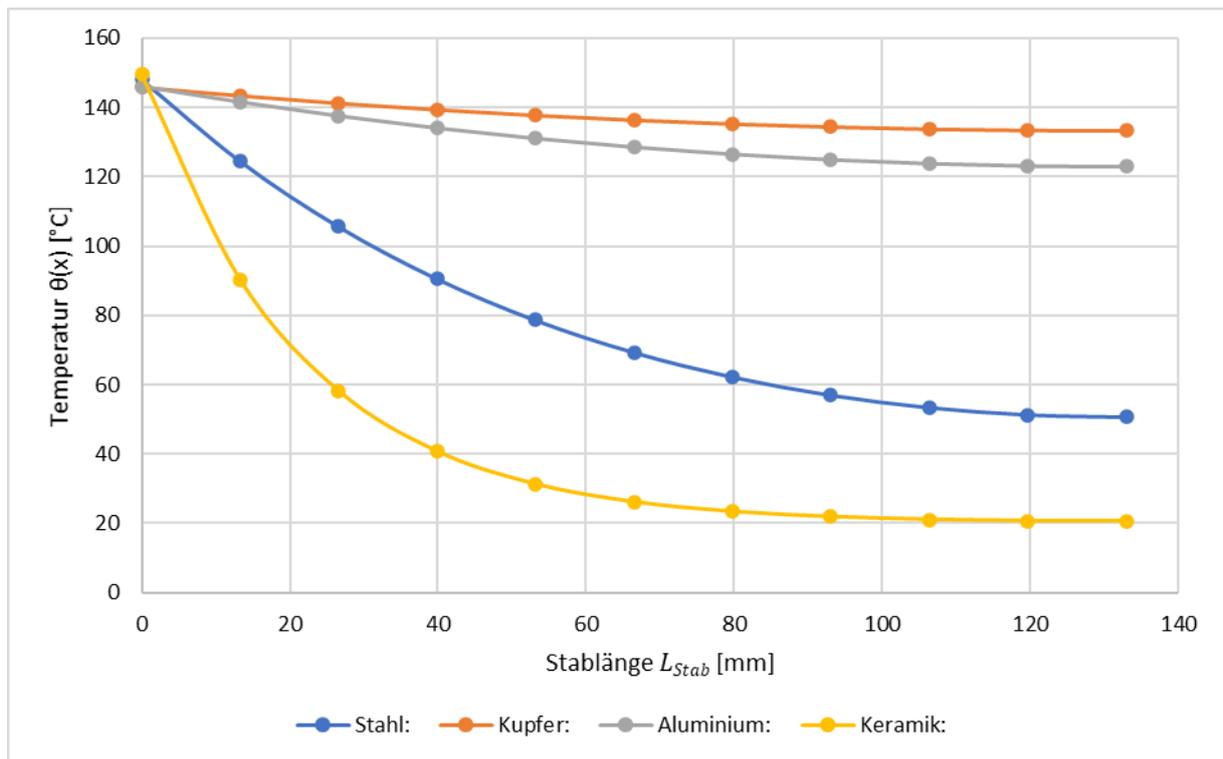


Abbildung 22: stationärer Temperaturverlauf bei freier Konvektion und Luft im Spalt

Dieses Phänomen ist in Abbildung 22 aufgrund des Luftspalts zwischen der Kupferhülse und des Probestabes stärker ausgeprägt. Wie eingangs erwähnt ist aufgrund der Fertigung der Anlage ein Spalt zwischen der Hülse und den Materialproben nicht vermeidbar, da sonst die Proben nicht austauschbar wären. Anhand der Temperaturverläufe ist zu erkennen, dass unterschiedliche Medien im Spalt Materialien mit einer höheren Wärmeleitfähigkeit stärker beeinflussen. Die Differenz der Anfangstemperaturen zwischen den Versuchen mit Luft im Spalt im Gegensatz zu den Versuchen mit Wärmeleitpaste beträgt bei Kupfer ca. 4 °C und bei Keramik ca. 0,5 °C. Der restliche Verlauf der Kurven ähnelt stark denen mit Wärmeleitpaste im Spalt womit nach erster Betrachtung gesagt werden kann, dass der Einfluss des Mediums im Spalt um den Bereich der Anfangstemperatur beschränkt ist.

6.2.2 Einfluss des Mediums im Spalt auf die Anfangstemperatur

Bei diesen Versuchen soll der Einfluss der Spaltgröße und des -mediums auf die Anfangstemperatur und den Temperaturverlauf je nach Material untersucht werden. Es handelt sich um einen theoretischen Spalt der gleichmäßig die Materialprobe umschließt. In der realen Anlage würde die Probe auf der unteren Seite der Kupferhülse aufliegen. Vergleiche sind daher nur bis zu einer bestimmten Spaltbreite

vertretbar. Die Untersuchungen werden bei Standardwerten durchgeführt, wobei der Spalt Breiten von 0,04 mm bis maximal 0,5 mm annimmt.

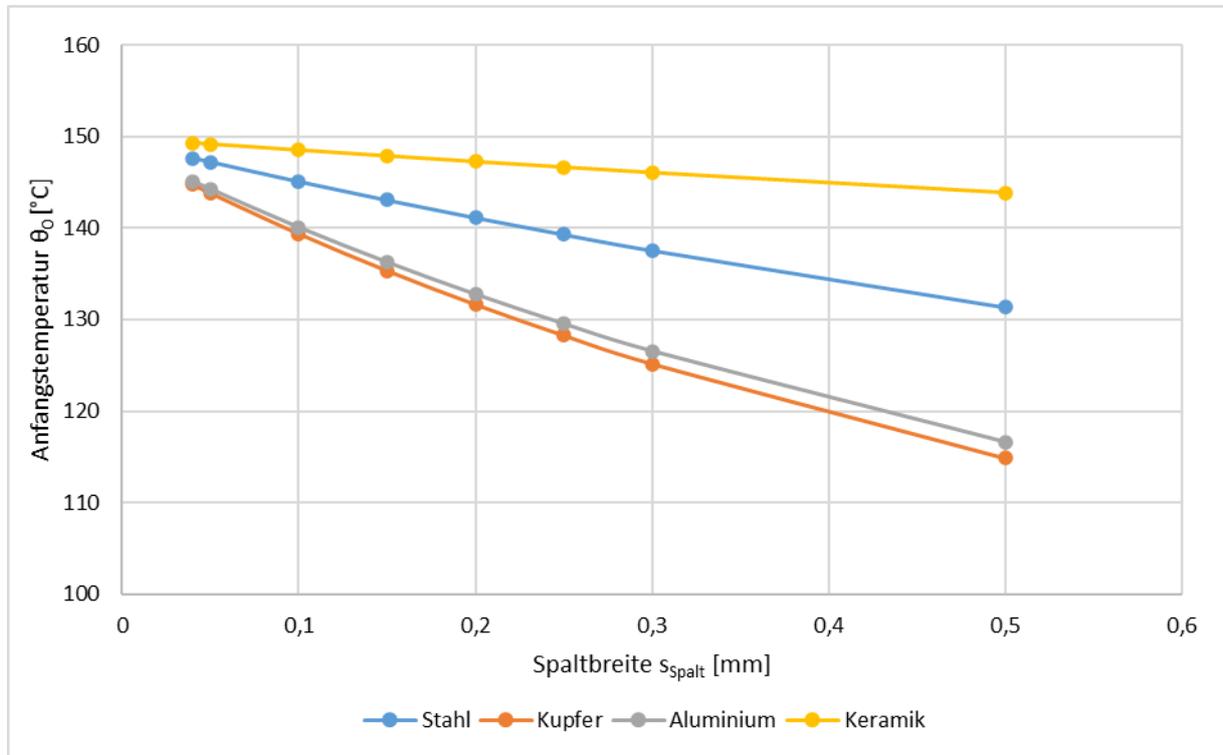


Abbildung 23: Einfluss der Spaltbreite (Luft) auf die Anfangstemperatur

In Abbildung 23 sind die Temperaturen der beheizten Seite der Probestäbe in Abhängigkeit der Spaltbreite zwischen Kupferhülse und Probe dargestellt. Es wird angenommen, dass die Oberflächentemperatur der Probe innerhalb der Kupferhülse gleich der Anfangstemperatur der Materialprobe außerhalb der Hülse ist. Sie legt somit eine der Randbedingungen der Differentialgleichung für den Temperaturverlauf fest. Befindet sich Luft als Medium im Spalt ist zu erkennen, dass Materialien mit einem niedrigen Wärmeleitkoeffizienten auch einen flacheren Verlauf haben. Umgekehrt kann daraus geschlossen werden, dass bei einer Verbindung zwischen zwei gut thermisch leitenden Materialien wie beispielsweise Kupferhülse zu Kupferprobe ein möglichst guter thermischer Kontakt erforderlich ist, um einen Temperaturabfall zu vermeiden. Wie in Tabelle 5 zu erkennen ist, geben gut wärmeleitende Material einen hohen Wärmestrom an die Umgebung ab. In Verbindung mit dem durch den Luftspalt erzeugten niedrigen Wärmedurchgangskoeffizienten zwischen Thermoöl und Probestaboberfläche kommt es zum stärkeren Anfangstemperaturabfall der Aluminium- und Kupferprobe.

Tabelle 5: Wärmestrom in Abhängigkeit der Spaltbreite (Luft)

Luft im Spalt	Keramik	Stahl	Aluminium	Kupfer
\dot{Q}_U in Watt bei 0,04 mm	0,698	2,449	5,333	5,751
\dot{Q}_U in Watt bei 0,5 mm	0,666	2,095	3,891	4,100

Die Wärmedurchgangszahl zwischen dem Thermoöl und der Materialprobe verringert sich von ca. 328 W/(m²K) auf ca. 33 W/(m²K) bei einer Erhöhung des Spalts von 0,04 mm auf 0,5 mm. Dies verhält sich mit geringen Abweichungen über alle Materialproben konstant. Der an die Umgebung abgegebene Wärmestrom ist materialabhängig und sinkt bei Vergrößerung des Spalts. Daraus kann geschlossen werden, dass nicht nur die Anfangstemperatur sinkt, sondern der gesamte Temperaturverlauf beeinflusst wird.

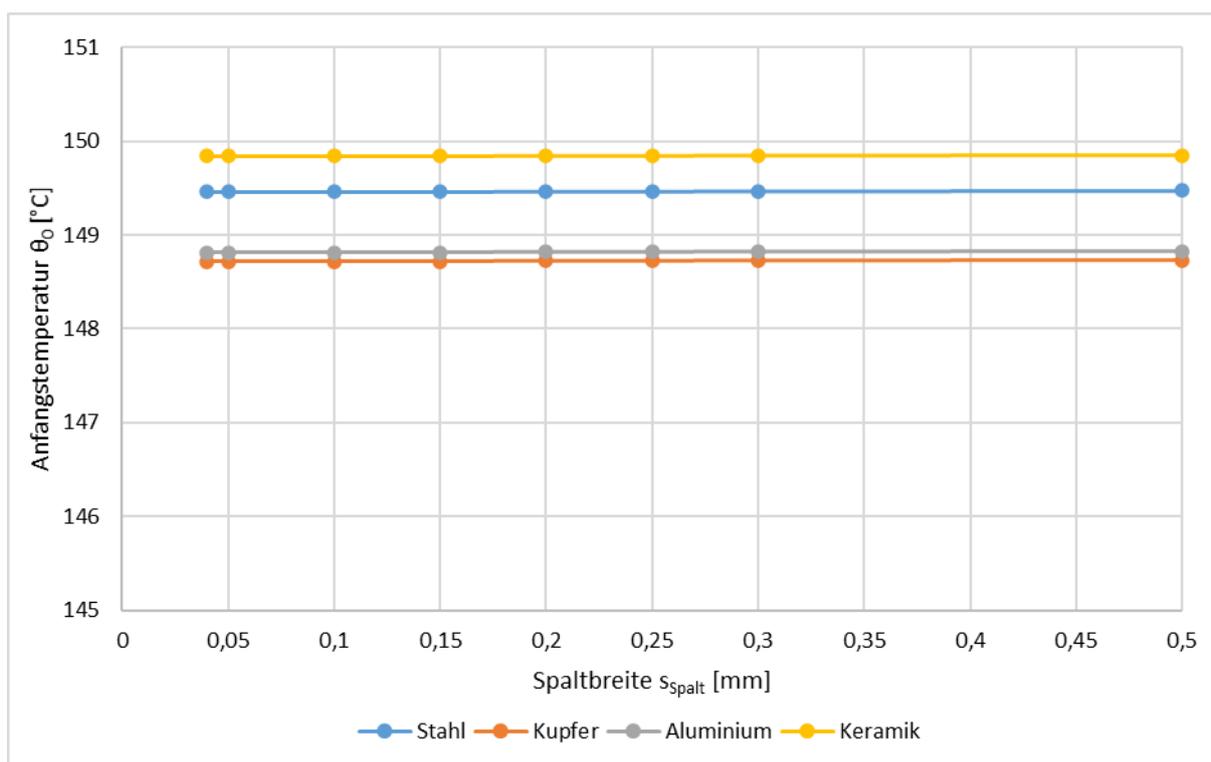


Abbildung 24: Einfluss der Spaltbreite (WLP) auf die Anfangstemperatur

Abbildung 24 zeigt den Verlauf der Anfangstemperatur unter der Annahme, dass sich eine Wärmeleitpaste im Spalt zwischen der Kupferhülse und dem Probestab befindet. Im Gegensatz zu den Kurven mit Luft als Spaltmedium weisen diese einen sehr leichten Temperaturanstieg mit steigender Spaltbreite auf. Dies hängt mit der Methode der Programmierung zusammen. Aufgrund der Tatsache, dass der Kupferhülse-

durchmesser mit dem Probestabdurchmesser und der Spaltbreite berechnet wird, kommt es bei einer Vergrößerung des Spalts automatisch zu einer Erhöhung des inneren und äußeren Durchmessers der Kupferhülse. Mit einer solchen Programmierung ist es für den User unmöglich einen größeren Probestabdurchmesser als Kupferhülsendurchmesser anzugeben. Somit können Fehler aufgrund von Unachtsamkeit vermieden werden. Unter Betrachtung von Gleichung (47) kann erkannt werden, dass eine Erhöhung des Außendurchmessers der Kupferhülse zu einer Erhöhung der Stab- bzw. Anfangstemperatur führt. Die Wärmedurchgangszahl zwischen dem Thermoöl und der Materialprobe verringert sich von ca. 1456 W/(m²K) auf 1386 W/(m²K) bei einer Vergrößerung des Spalts von 0,04 mm auf 0,5 mm. Die Auswirkungen auf die Anfangstemperatur aufgrund der Erhöhung des Hülsenaußendurchmessers übersteigen die Minderung der Wärmedurchgangszahl, womit es zum leichten Ansteigen der Kurve kommt. Dies verhält sich über alle Materialproben konstant.

Tabelle 6: Wärmestrom in Abhängigkeit der Spaltbreite (WLP)

WLP im Spalt	Keramik	Stahl	Aluminium	Kupfer
\dot{Q}_U in Watt bei 0,04 mm	0,70156	2,4891	5,5275	5,97800
\dot{Q}_U in Watt bei 0,5 mm	0,70157	2,4892	5,5284	5,9791

Der an die Umgebung abgegebene Wärmestrom ist materialabhängig und steigt sehr leicht bei Vergrößerung des Spalts an. Ein möglicher Grund für das leichte Ansteigen ist die größere Temperatur an der Staboberfläche, welche aus der Vergrößerung des Spalts resultiert. Dieser Einfluss überwiegt den Abfall der Wärmedurchgangszahl.

6.2.3 Einfluss der Anlagengeometrie auf den Temperaturverlauf

Bei diesen Simulationen soll das Verhalten der Temperaturwerte in Abhängigkeit von geometrischen Änderungen untersucht werden. Einer der Vorteile eines Computermodelles liegt darin, dass Parameter wie beispielsweise Längen oder Durchmesser leichter veränderbar sind, als bei einer realen Anlage. Beim ersten Versuch erfolgt das Erhöhen des Durchmessers der Probe. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Stahlprobe mit Wärmeleitpaste im Hülsenspalt und unter freier Konvektion.

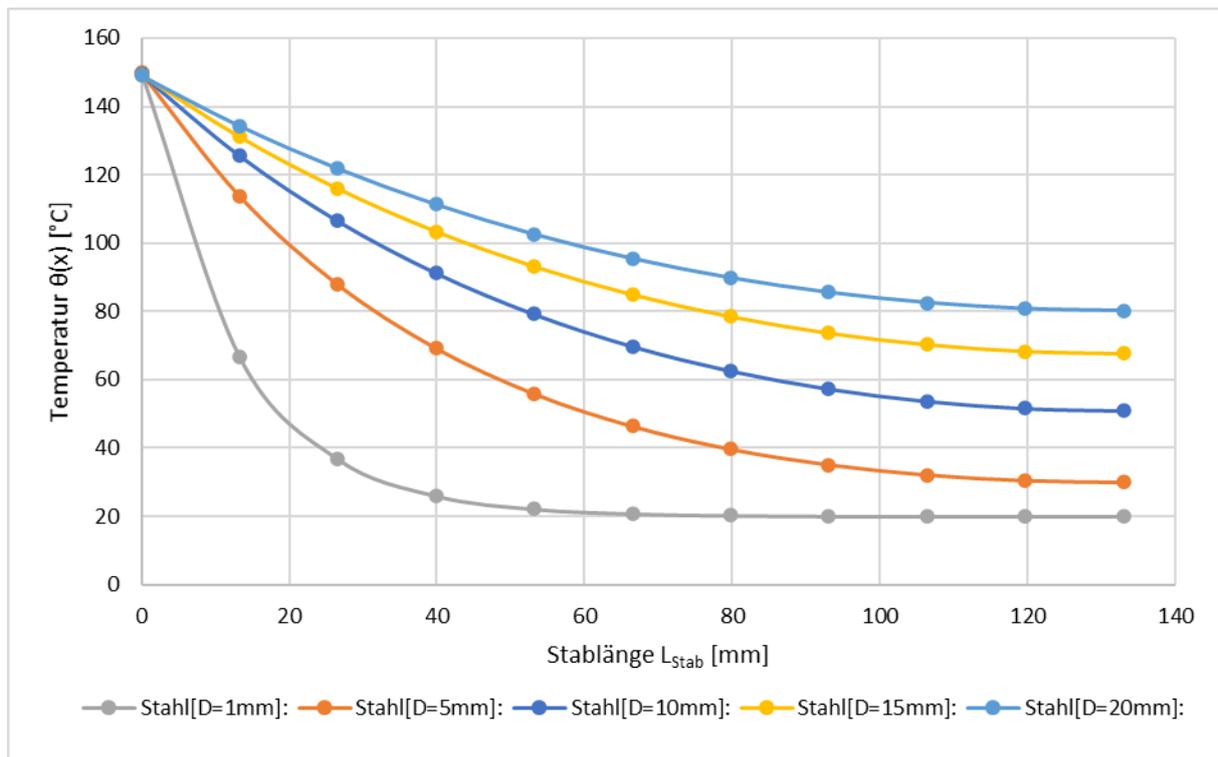


Abbildung 25: Einfluss des Stabdurchmessers auf den Temperaturverlauf

In Abbildung 25 ist der Temperaturverlauf in Abhängigkeit des Materialprobendurchmessers unter freier Konvektion dargestellt. Im Falle eines quer angeströmten Zylinders ist die charakteristische Länge der Quotient aus der Querschnittsfläche durch den Umfang. Somit hängt sie allein von dem Durchmesser des Zylinders ab. Eine Vergrößerung des Durchmessers lässt die charakteristische Länge stärker Anwachsen als die Nußelt-Zahl (Tabelle 7). Bei Betrachtung der Formel für die Wärmeübergangszahl α (Gleichung (18)) kann gesehen werden, dass ein solches Verhalten ein Abfallen von α zur Folge hat. Sowohl der Stabdurchmesser als auch die Wärmeübergangszahl beeinflussen den Temperaturverlauf $\theta(x)$ über die Konstante m_{stab} (Gleichung (36)). Eine Vergrößerung des Durchmessers führt sowohl direkt, als auch über die Wärmeübergangszahl zu einer Minderung der Konstante m_{stab} und damit zu höheren Stabtemperaturen. Dieses Verhalten ist plausibel aufgrund der Tatsache, dass der Wärmestrom, welcher in den Stab fließt, gleich groß sein muss wie jener der an die Umgebung abgegeben wird. Der Wärmestrom durch den Stab ist von dessen Querschnittsfläche abhängig, wohingegen der Wärmestrom, welcher an die Umgebung abgegeben wird, von der Mantelfläche des Stabs abhängt. Wird der Durchmesser des Probestabs erhöht vergrößert sich die Querschnittsfläche um einen größeren Anteil als die Mantelfläche des Stabs. Das so erzeugte

Ungleichgewicht wird durch die Steigerung des Temperaturverlaufes $\theta(x)$ ausgeglichen.

Tabelle 7: Durchmessereinfluss auf Prozessgrößen

D_{Stab}	L_{Char}	Nu	α_{frei}	\dot{Q}_U
[mm]	[mm]	[-]	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	[W]
1	1,571	1,371	22,426	0,119
5	7,854	3,435	11,711	0,970
10	15,708	5,697	10,005	2,489
15	23,562	7,818	9,332	4,246
20	31,416	9,853	8,942	6,108

Die Untersuchungen des Einflusses des Durchmessers auf den Temperaturverlauf unter erzwungener Konvektion weisen einen ähnlichen Zusammenhang auf. Unterschiede zeigen sich in der Größe der Nußelt-Zahl. Diese ist aufgrund der zusätzlichen Wirkung der Anströmgeschwindigkeit von 1 m/s um durchschnittlich das 3,7-fache größer als bei freier Konvektion. Somit erhöht sich die Wärmeübergangszahl. Die Folge daraus ist, dass die Temperaturverläufe der erzwungenen Konvektion tiefer liegen als die der freien Konvektion bei gleichen Durchmessern.

Bei den in Abbildung 26 dargestellten Kurven wird der Einfluss der Länge auf den Temperaturverlauf unter freier Konvektion untersucht. Eine Vergrößerung der Stablänge führt zu einer Erhöhung der Austauschfläche zwischen Stab und Umgebung, was für eine bessere Wärmeübertragung zwischen diesen sorgt. Die so erzeugte verstärkte Kühlung verursacht eine Absenkung der Temperatur an den Messtellen. Für eine erhöhte Übersichtlichkeit werden die Temperaturverläufe auf die prozentuelle Stablänge bezogen.

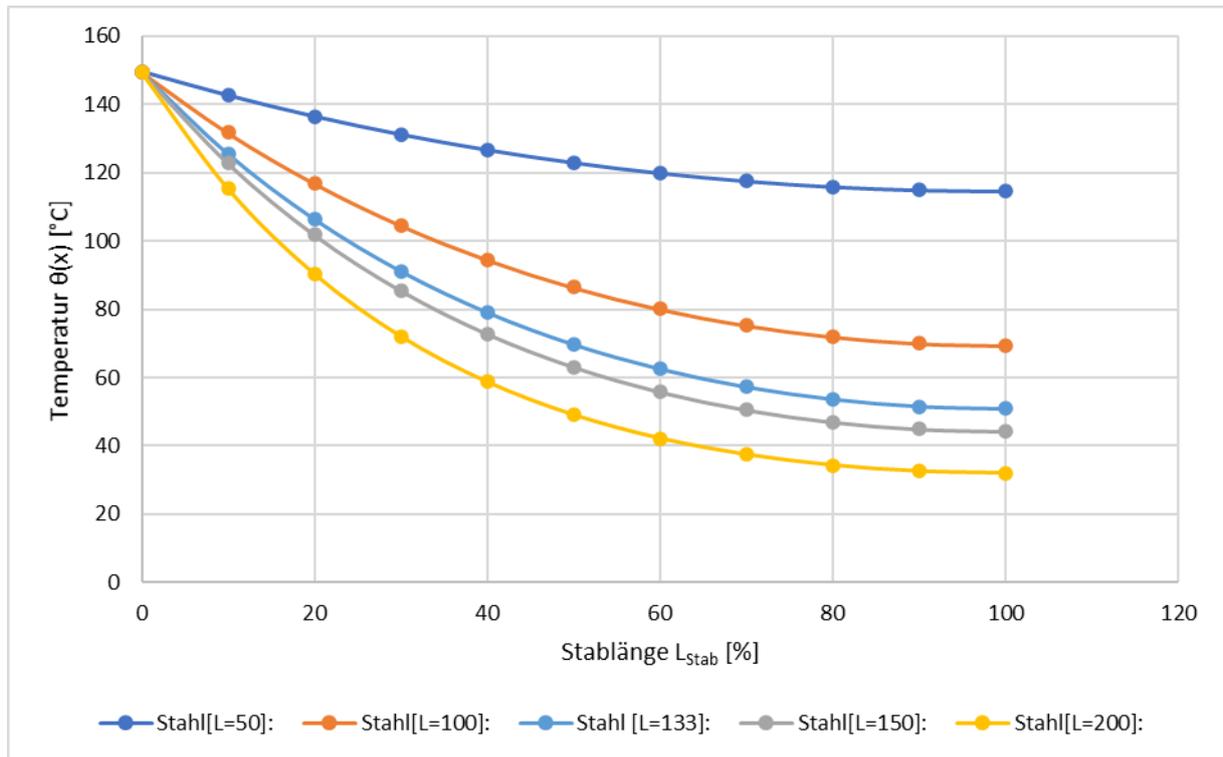


Abbildung 26: Einfluss der Länge auf den Temperaturverlauf

Wie anfangs vermutet erzeugt ein längerer Stab einen, auf seine relative Länge bezogenen, niedrigeren Temperaturverlauf. Unabhängig von anderen Prozessgrößen hat die Stablänge einen direkten Einfluss auf die Temperaturkurve $\theta(x)$. Dies ist in Gleichung (36) zu erkennen. Eine Erhöhung der Größe L_{Stab} führt nach dieser Gleichung immer zu einer Temperaturniedrigung. Aufgrund des gleichbleibenden Durchmessers verändert sich die charakteristische Länge nicht. Die in Tabelle 8 angeführten Wärmeübergangskoeffizienten der freien Konvektion sind somit nur vom Temperaturunterschied zwischen Probe und Umgebung abhängig. Dies ist einerseits bedingt durch den Temperaturdifferenz-Term in der Grashofzahl und andererseits durch die temperaturabhängigen Prozessgrößen der Luft, welche aus dem arithmetischen Mittel von mittlerer Proben- und Umgebungstemperatur gebildet werden. Eine Verlängerung des Probestabes sorgt für eine niedrigere Stabtemperatur und somit auch für ein Abfallen der mittleren Temperatur der Probe. Dadurch verringert sich die Temperaturdifferenz zwischen Probe und Umgebung und in weiterer Folge der Wärmeübergangskoeffizient.

Tabelle 8: Längeneinfluss auf Prozessgrößen

L_{Stab}	Gr	Nu	α_{frei}	\dot{Q}_U
[mm]	[-]	[-]	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$	[W]
50	30690,016	6,129	11,539	1,922
100	26499,682	5,876	10,542	2,449
133	23368,537	5,697	10,005	2,489
150	21909,564	5,611	9,770	2,482
200	18363,881	5,387	9,213	2,429

Der an die Umgebung abgegebene Wärmestrom steigt zunächst bis zu einer gewissen Länge an und sinkt danach leicht. Dieses Phänomen ist auf die Berechnungsformel zurückzuführen. Der in der Gleichung für die Bestimmung des Wärmestromes \dot{Q}_U enthaltene Term $\tanh(m_{Stab} * L_{Stab})$ konvergiert mit steigender Länge gegen Eins. Eine Verkleinerung des Wärmeübergangskoeffizienten aufgrund des geringeren Temperaturunterschieds zwischen Probe und Umgebung wirkt sich ab einer bestimmten Stablänge auf den Wärmestrom stärker aus als der Anstieg des tanh-Terms. Weitere Untersuchungen ergeben, dass die Materialien Aluminium und Kupfer dieses Verhalten innerhalb der untersuchten Längen nicht aufweisen, wohingegen der Keramikstab schon ab der kleinsten Länge einen schrumpfenden Wärmestrom verzeichnet. Unter Betrachtung der Gleichung (37) kann erkannt werden, dass eine höhere Wärmeleitfähigkeit den Wert der Konstante m_{Stab} verringert. Somit konvergiert der tanh-Term von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit weniger schnell gegen Eins als von Materialien mit geringer Wärmeleitfähigkeit. Bei Berechnungen mit Stäben mit erhöhter Länge bzw. geringer Wärmeleitfähigkeit ist dieses Verhalten zu berücksichtigen.

Die Versuche bei erzwungener Konvektion ergeben den gleichen allgemeinen Zusammenhang zwischen Stablänge und Temperaturverlauf. Die Wärmeübergangszahlen erfahren nur minimale Änderungen aufgrund des Korrekturfaktors f_4 , welcher von der mittleren Stab- und Umgebungstemperatur abhängt. Den größten Einfluss auf die Wärmeübergangszahl bei erzwungener

Konvektion hat die Anströmgeschwindigkeit. Da diese konstant gelassen wird, veränderten sich die Wärmeübergangszahlen auch nur sehr wenig.

Die in Abbildung 27 dargestellten Kurven sind Temperaturverläufe unter erzwungener Konvektion bei möglichst konstanten Reynolds-Zahlen. Dafür wird der Stabdurchmesser verändert und mittelst Anströmgeschwindigkeit angepasst.

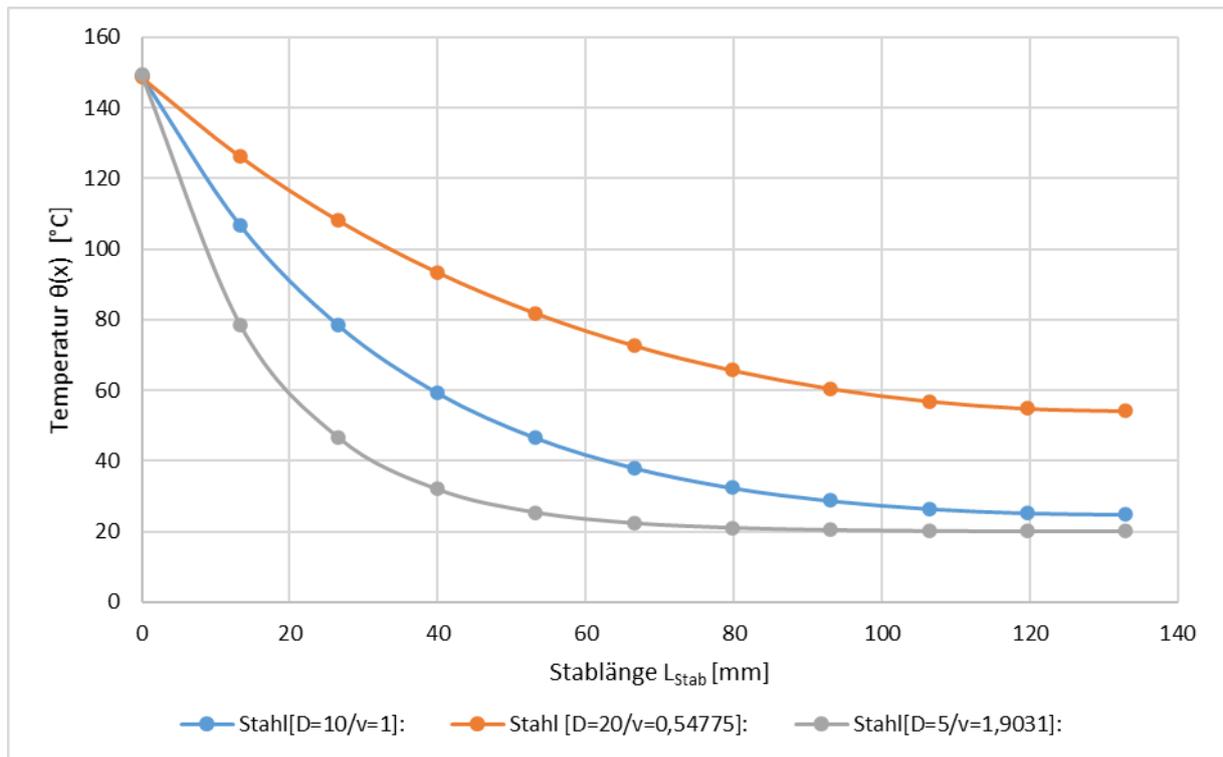


Abbildung 27: Temperaturverläufe bei ähnlichen Reynolds-Zahlen

Die Reynolds-Zahl wird über eine charakteristische Länge sowie der Anströmgeschwindigkeit und der kinematischen Viskosität des Fluids berechnet. Aus den Kurven ist zu erkennen, dass ein einfaches Anpassen von zwei dieser drei Werte nicht ausreicht, um ähnliche Temperaturverläufe zu erhalten. Der Grund dafür ist der starke Einfluss des Durchmessers auf die Wärmeübergangszahl. Ähnliche Temperaturverläufe bei unterschiedlichen Durchmessern wären nur bei Anpassung des Strömungsmediums möglich. Dies ist mit dem jetzigen Stand des Modells nicht durchführbar. Für die Zukunft wäre eine Erweiterung auf unterschiedliche Anströmmedien realisierbar.

Tabelle 9: Wärmeübergangskoeffizient bei ähnlichen Reynoldszahlen

D_{Stab}	v_{Luft}	Re	α_{zwang}
[mm]	$\left[\frac{m}{s}\right]$	[-]	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
5	1,9031	939,558	67,212
10	1	939,537	34,412
20	0,54775	939,536	17,987

6.2.4 Temperaturverläufe unter kombinierter Konvektion

Bei diesen Versuchen wird der Einfluss der Anströmgeschwindigkeit der Luft auf den Temperaturverlauf der Materialproben untersucht. Die Versuche sind für alle Materialien durchgeführt worden und die Ergebnisse sind im Anhang aufgelistet. Die in diesem Abschnitt aufgezeigten Diagramme beziehen sich auf die Stahlprobe da der grundlegende Einfluss der Luftgeschwindigkeit auf alle Materialien sehr ähnlich war. Die Ermittlungen erfolgen mit Standardwerten bei Geschwindigkeit der Luft von 0,1 m/s, 0,5 m/s, 1 m/s und 5 m/s. Die Wahl fällt auf diesen Bereich, weil der Querstromlüfter der Anlage ähnliche Geschwindigkeiten erzeugt. Um mögliche Einflüsse des Spalts zu minimieren wird Wärmeleitpaste eingesetzt.

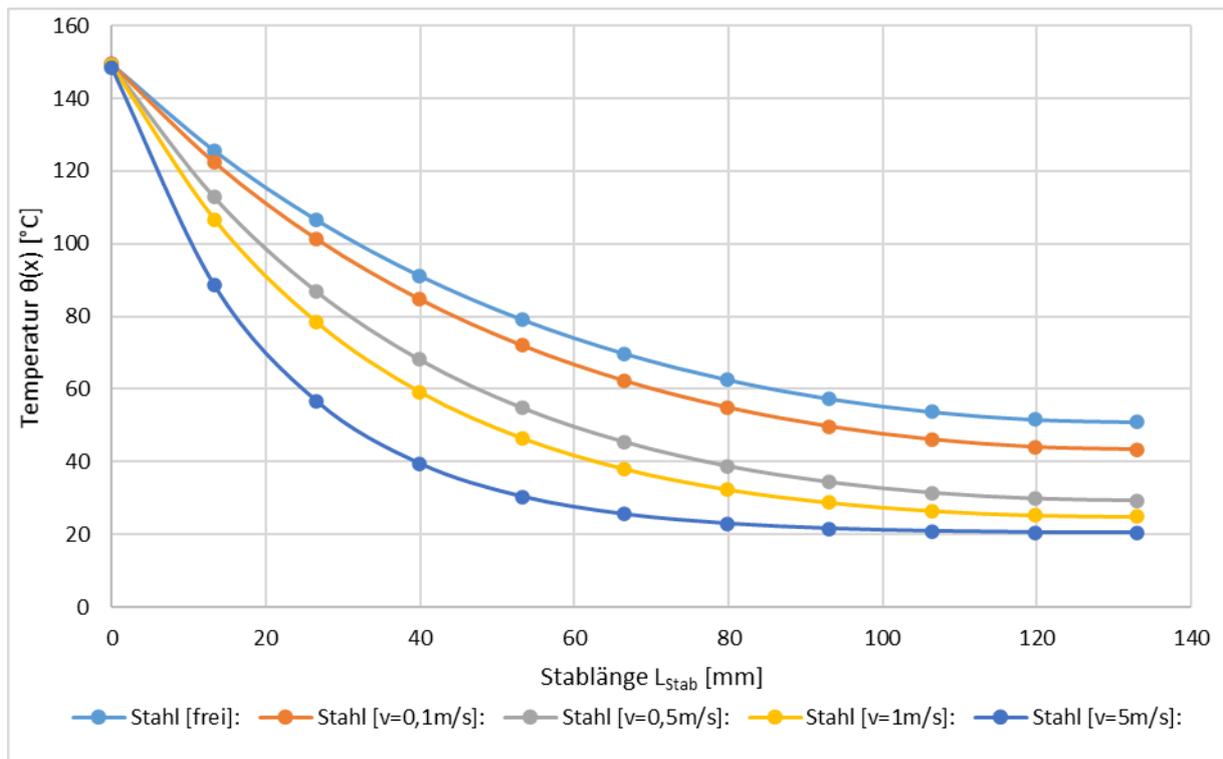


Abbildung 28: stationäre Temperaturverläufe unter kombinierter Konvektion

In Abbildung 28 sind die Temperaturverläufe der Stahlprobe unter kombinierter Konvektion aufgelistet. Der Vollständigkeit halber und um einen besseren Vergleich aufzeigen zu können wird der Temperaturverlauf bei freier Konvektion in die Grafik aufgenommen. Dieser bildet die obere noch mögliche Grenze. Der Wärmeübergangskoeffizient bei erzwungener Konvektion und in weiterer Folge kombinierter Konvektion zwischen der Oberfläche des Probestabes und der Umgebung ist stark von der Anströmgeschwindigkeit abhängig. Somit ist, wie in dem Diagramm aufgezeigt, ein schnelles Abkühlen der Materialprobe bei einer erhöhten Strömungsgeschwindigkeit zu erwarten. Es kann gesagt werden, dass ein solches Verhalten ebenfalls bei der realen Anlage erwartet wird. Bei einer Geschwindigkeit von 5 m/s erreicht der Stab am Ende die Umgebungstemperatur.

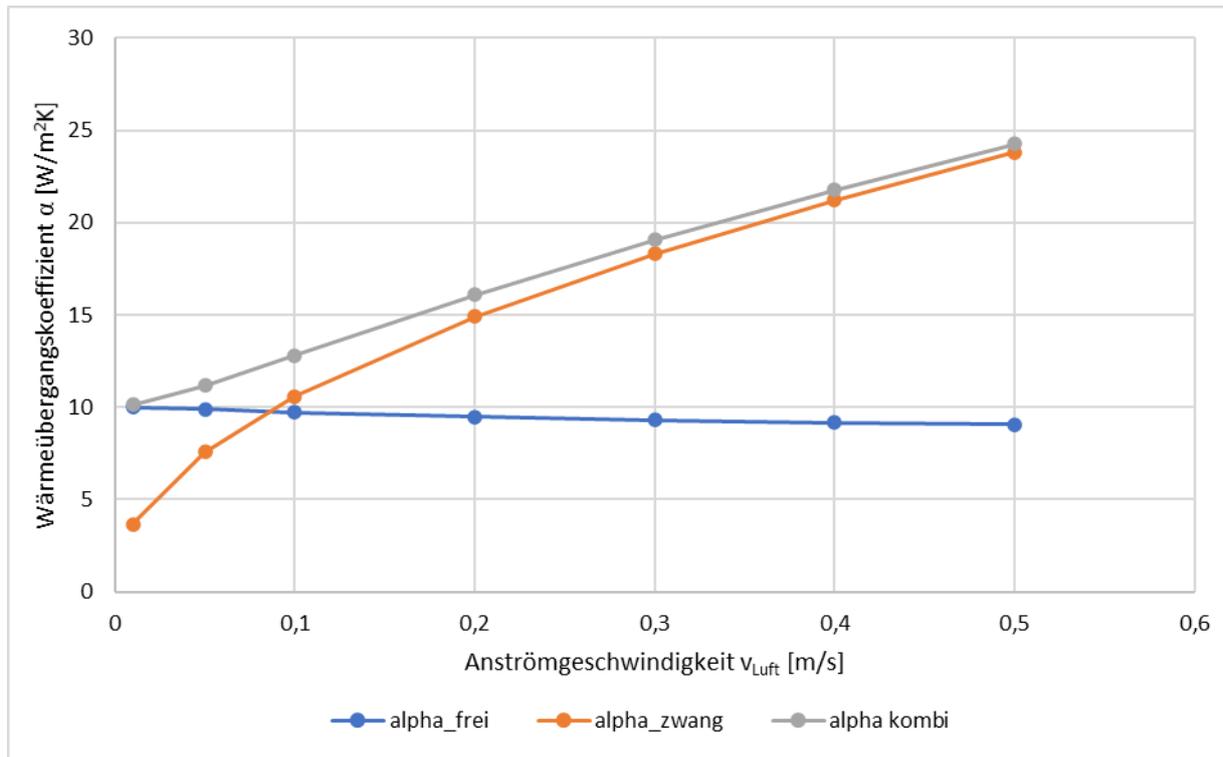


Abbildung 29: Vergleich der Anteile von freier und erzwungener Konvektion

Unter kombinierter Konvektion wird das gleichzeitige Auftreten von freier und erzwungener Konvektion verstanden. Die kombinierte Konvektion beruht auf der Tatsache, dass aufgrund des Wärmeunterschiedes zwischen Probe und Umgebung immer ein gewisser Anteil an freier Konvektion zu der, durch äußere Einwirkung verursachten, erzwungenen Konvektion hinzukommt. Abbildung 29 zeigt den Verlauf des Wärmeübergangskoeffizienten von freier, erzwungener und kombinierter Konvektion in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit. Mit dieser Grafik können Größenordnungen der diversen Konvektionsformen leichter abgeschätzt werden. Des Weiteren ist zu erkennen ab welchem Bereich ein Vernachlässigen des Anteils durch freie Konvektion vertretbar wäre. Die Kurve der freien Konvektion nimmt mit steigender Strömungsgeschwindigkeit ab. Bei Erhöhung der Anströmung sinkt die mittlere Temperatur der Probe. Der Wärmeübergangskoeffizient der freien Konvektion steht in direktem Zusammenhang zu dieser Temperatur. Daher kommt es zu einem leichten Abfallen der Kurve im Bereich erhöhter Geschwindigkeiten. Der Verlauf der Kurve bei erzwungener Konvektion steigt zunächst steil an und flacht zum Ende hin leicht ab. Der Schnittpunkt der beiden Konvektionskurven liegt bei ca. $v=0,085$ m/s. Des Weiteren kann gesagt werden, dass der Anteil an freier Konvektion bei Geschwindigkeiten ab ca. 0,3 m/s nur noch einen vernachlässigbar kleinen Anteil an der kombinierten Konvektion aufweist.

Tabelle 10: Wärmeübergangskennzahlen unter kombinierter Konvektion

v_{Luft}	α_{frei}	α_{zwang}	α_{kombi}	Re	\dot{Q}_U
$\left[\frac{m}{s}\right]$	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$	$[-]$	$[W]$
0,01	9,989	3,644	10,148	8,652	2,509
0,1	9,736	10,569	12,813	88,171	2,843
0,5	9,047	23,822	24,249	460,743	3,932
1	8,681	34,413	34,596	939,791	4,685
5	7,825	85,323	85,345	4875,337	7,290

Wie aus den Gleichungen zu erwarten ist verläuft die Reynolds-Zahl proportional zu der Anströmgeschwindigkeit. Anzumerken ist, dass die Formel, welche für die Berechnung der Nußelt-Zahl verwendet wird, nur zwischen einer Reynolds-Zahl im Bereich von 10 bis 10^7 gültig ist. Aus den Daten ist erkennbar, dass dieser Bereich bei einer Geschwindigkeit von 0,01 m/s unterschritten wird. Die obere Grenze wird bei gleichbleibender Geometrie trotz hoher Anströmgeschwindigkeit nicht erreicht.

6.2.5 Ergebnisse der instationären WLG

Für die Untersuchung von Aufwärmvorgängen der Materialproben ist die instationäre Differentialgleichung der Temperaturverteilung als Funktion in MATLAB implementiert worden. Bei der Funktion handelt es sich alleinig um die Lösung der Differenzialgleichung. Die Prozess- und Werkstoffparameter wie die Dichte, spezifische Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit des Stabes und der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Stab und Umgebung müssen manuell eingegeben werden. Die Versuche sollen die Auswirkungen der Parameter auf die Aufheizzeit beleuchten.

Die Auswertung erfolgt bei einer konstanten Temperatur an der Einspannstelle von $T(t, 0) = 150^\circ C$ sowie einer Umgebungstemperatur von $T_U = 20^\circ C$. Die Versuchsdaten der einzelnen Materialien sind in Tabelle 11 angeführt.

Tabelle 11: Versuchsdaten für die instationäre DGL der Temperaturverteilung, [15, 16, 17, 18]

	λ_{Stab}	ρ_{Stab}	$c_{p_{Stab}}$	α_u
	$\left[\frac{W}{mK}\right]$	$\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\left[\frac{J}{kgK}\right]$	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
Stahl	15,878	7919	495,786	10,005
Aluminium	189,712	2105,9	933,7	11,725
Kupfer	384,294	8930	396,838	11,917
Keramik	1,4987	2520	790	7,8942

Das Ergebnis der in MATLAB numerisch gelösten instationären Differentialgleichung des Temperaturverlaufs kann in Form eines Oberflächendiagramms dargestellt werden. In Abbildung 30 ist der Aufwärmvorgang der Stahlprobe unter freier Konvektion dargestellt.

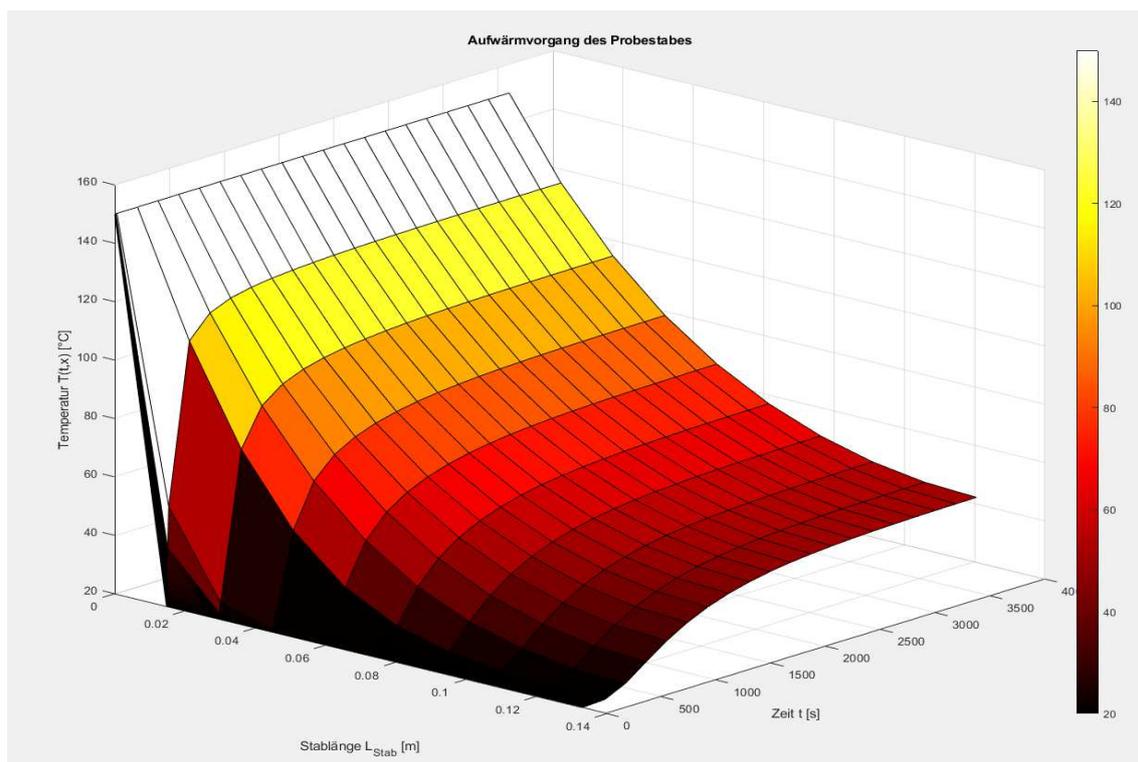


Abbildung 30: Instationärer Temperaturverlauf der Stahlprobe

Im Diagramm erkennt man, dass sich das Material zunächst schnell erwärmt und gegen Ende mehr Zeit für einen Temperaturanstieg benötigt. Die Triebkraft für Wärmeleitung in einem Feststoff ist der Temperaturgradient. Dieser ist zu Beginn dieses Vorganges am größten und wird mit Erhöhung des Temperaturverlaufes

geringer, bis sich ein Gleichgewichtszustand einstellt. Für die Untersuchungen werden die Parameter der einzelnen Materialien in die MATLAB-Funktion geladen und ein Oberflächendiagramm erstellt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 angeführt. Die Zeitangaben sind direkt aus dem Diagramm abgelesen und auf die nächsthöhere Fünfer-Dezimalstelle gerundet worden.

Tabelle 12: Benötigte Aufheizzeit der Materialproben

	θe_{konst}	t_{konst}	θe_{99}	t_{99}
	[°C]	[s]	[°C]	[s]
Stahl	50,73	6390	50,22	3030
Aluminium	126	700	124,74	285
Kupfer	136,9	465	135,53	290
Keramik	20,45	4345	20,25	1865

Die Temperatur am freien Ende der Materialprobe θe_{konst} ist jene Temperatur, welche beim Aufwärmvorgang als letzte einen konstanten Wert annimmt. Diese wird für die Ausführung der Versuche als Beobachtungsvariable herangenommen. Es wird jene Zeit als benötigte Aufheizzeit t_{konst} angesehen, bei welcher der gesamte Temperaturverlauf konstant ist. Zu erkennen ist, dass sich die Materialien Kupfer und Aluminium schnell bis zu ihrer Temperaturkonstanz aufwärmen. Die Kupferprobe erreicht nach ca. 8 Minuten, die Aluminiumprobe nach ca. 12 Minuten, die Stahlprobe nach ca. einer Stunde und 47 Minuten und die Keramikprobe nach ca. einer Stunde und 13 Minuten ihren jeweiligen konstanten Temperaturverlauf. Einer der Gründe könnte an den unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten liegen. Jedoch bestimmen noch weitere Größen diesen Vorgang, denn der keramische Werkstoff weist eine niedrigere Aufheizzeit auf als die Stahlprobe trotz geringerer Wärmeleitfähigkeit. Die Größe t_{99} gibt jene Zeit an nach der das Ende des Stabes 99% der Endtemperatur erreicht hat.

Für die Untersuchungen des Einflusses der Parameter auf die Aufwärmzeit werden die Werkstoffgrößen und die Wärmeübergangszahl der Stahlprobe einzeln verändert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Tabelle 13: Einfluss der Kenngrößen auf die Aufwärmzeit

Stahlprobe	θe_{konst}	t_{konst}	Faktor zu Grundzeit
	[°C]	[s]	[–]
$\lambda_{Stab} = 7,939 \left[\frac{W}{mK} \right]$	32,73	6395	0,742
$\lambda_{Stab} = 31,756 \left[\frac{W}{mK} \right]$	75,44	4740	0,5
$\rho_{Stab} = 3959,5 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	50,73	3195	2
$\rho_{Stab} = 15838 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	50,73	12780	0,5
$cp_{Stab} = 247,893 \left[\frac{J}{kgK} \right]$	50,73	3195	0,5
$cp_{Stab} = 991,52 \left[\frac{J}{kgK} \right]$	50,73	12780	2
$\alpha_U = 5,0025 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	75,44	9480	1,484
$\alpha_U = 20,01 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$	32,73	3200	0,501

Bei den Versuchen werden, bei Gleichlassen der übrigen Parameter, die jeweilige betrachtete Größe verdoppelt bzw. halbiert. So können einzelne Einflüsse und ihre Größenordnung besser erkannt werden. Es ist zu sehen, dass eine höhere Wärmeleitfähigkeit zu einer geringeren Aufheizzeit führt. Wohingegen eine Erniedrigung nur einen sehr geringen Einfluss aufweist. Wie auch bei den Ergebnissen des stationären Modells sorgt eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit für eine Verschiebung des Temperaturverlaufes.

Die Erhöhung der Dichte wie auch die Vergrößerung der spezifischen Wärmekapazität führt zu einer Verlängerung der Aufheizzeit. Dies ist plausibel, weil einem Körper, welcher eine hohe spezifische Wärmekapazität aufweist, mehr Energie pro Masse zugeführt werden muss, als einem Körper mit geringerer spez. Wärmekapazität um deren Temperaturen um den gleichen Wert zu erhöhen. Dies könnte einer der Gründe sei, weshalb der Keramikstab trotz geringerer Wärmeleitfähigkeit schneller einen konstanten Temperaturverlauf aufweist als der Stahlstab. Das Produkt aus spezifischer Wärmekapazität und Dichte ist vom Keramikmaterial geringer als vom

austenitischen Stahl. Des Weiteren kann gesehen werden, dass die Temperatur am Ende des Stahlstabes $\theta_{e_{konst}}$ im stationären Zustand die gleichen Werte annimmt, trotz unterschiedlicher Dichte und spez. Wärmekapazität, und somit nicht von diesen beiden Größen abhängt. In der instationären Temperaturgleichung stehen die beiden Stoffwerte vor der Zeitableitung der Temperatur. Erreicht das System einen stationären Zustand fällt die Zeitableitung weg, womit auch die spezifische Wärmekapazität und die Dichte keinen Einfluss mehr haben. Des Weiteren ist zu erkennen, dass eine Verdopplung bzw. Halbierung dieser Werte auch zu einer Verdopplung bzw. Halbierung der Aufheizzeit führt. In der Energiebilanz sind die beiden Größen Teil der Beschreibung zur Änderung der inneren Energie des Systems.

Es kann gesehen werden, dass den größten Einfluss auf Aufwärm- bzw. Abkühlvorgänge die Stoffgrößen Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität und Dichte haben. Diese Größen werden zusammengefasst zu der Temperaturleitfähigkeit mit [2]:

$$a = \frac{\lambda_s}{\rho c_p} \quad (65)$$

Die Temperaturleitfähigkeit a hat die Einheit $\frac{m^2}{s}$ und gibt an wie schnell ein Temperatúrausgleich in einem Stoff vonstattengeht [2]. Zu beachten ist hierbei, dass es im Falle von zusätzlichen Wärmequellen oder -senken in dem System noch weitere Einflussfaktoren auf die Aufheiz- bzw. Abkühlzeit gibt.

Wie auch bei den stationären Untersuchungen verursacht ein Anstieg des Wärmeübergangskoeffizienten einen Abfall des Temperaturverlaufes. Interessanterweise sorgt eine Verdoppelung der Wärmeübergangszahl für die gleiche stationäre Temperatur am Ende des Stabes wie eine Halbierung der Wärmeleitfähigkeit der Stahlprobe. Diese Eigenschaft ist auf die Form der instationären Differentialgleichung zurückzuführen und wäre bei einer realen Anlage nur schwer nachzuprüfen. Eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten resultiert in einer schnelleren Aufheizzeit.

6.3 Vergleich der Versuchsanlage mit den Simulationen

In diesem Abschnitt werden die Temperaturverläufe der realen Anlage mit denen des Modells für jedes Probematerial einzeln verglichen. Für die Erstellung der ersten

Modelldaten erfolgt eine Simulation mit Standardwerten unter der Einwirkung von freier Konvektion sowie Luft im Spalt zwischen Probestab und Kupferhülse, welche als blaue Kurven in Abbildung 31 bis Abbildung 34 dargestellt sind. Zu erkennen ist, dass unabhängig vom Material die Temperaturverläufe des Modells über denen der realen Anlage liegen. Es ist darauf hinzuweisen, dass die Daten der realen Anlage mit nicht kalibrierten Thermoelementen gemessen wurden. Die realen Temperaturen wären zwar in einem ähnlichen Bereich, aber deren Verläufe würden glattere Kurven bilden. Um einen besseren Vergleich realisieren zu können werden Trendlinien basierend auf den Versuchsdaten für jedes Material erstellt. Die von Excel erzeugte Formel der Trendlinie berechnet an jedem Zehntel der Stablänge einen Temperaturwert, welcher mit dem Modellwert an dieser Stelle verglichen wird. Da die Trendlinie nur innerhalb ihrer berechneten Grenzen repräsentativ ist, erfolgen die Vergleiche von Anlage und Modell nur innerhalb dieses Bereiches. Die aus den Temperaturdifferenzen zwischen Trendlinie und Modellkurve gebildeten Mittelwerte betragen gerundet für Keramik 8,6 °C, austenitischen Stahl 20 °C, Aluminium 17 °C und Kupfer 15,7 °C.

Aufgrund des vergleichsweisen großen Abstands zwischen den Kurven der realen Anlage und dem Modell wird ein zweiter Datensatz mit angepassten Werten (Berechnung 2 bzw. B2) erzeugt. Dieser ist in den Diagrammen als gelbe Linie dargestellt. Das Ziel dieses Versuches ist es Kurven zu erzeugen, welche möglichst nahe an den Daten der Versuchsanlage liegen. Die Thermoöleinlasstemperatur wird von 150 °C auf 130 °C und der Luftspalt von 0,04 mm auf 0,02 mm verringert. Durch diese Vorkehrungen verringern sich insgesamt die Anfangstemperaturen der Kurven und in weiterer Folge deren restlicher Temperaturverlauf, wobei die Kurven von Materialien mit höheren Wärmeleitfähigkeiten einen steileren Abfall verzeichnen in Relation zu ihrem anfänglichen Verlauf. Daher liegen die angepassten Kurven sowohl bei Aluminium als auch bei Kupfer unterhalb der Trendlinie der Versuchswerte, wohingegen sich die angepassten Temperaturverläufe von Keramik und Stahl oberhalb ihrer Anlagendaten befinden. Während der Ermittlung der Daten an der realen Anlage wurde ein ungewollter Luftzug im Versuchsraum festgestellt, welcher die natürliche Konvektion der Umgebung beeinflusste. Somit ist davon auszugehen, dass eine zusätzliche Luftströmung die Materialprobe umströmte. Diese wurde in der Berechnung berücksichtigt, indem bei der Stahl-, Aluminium- und Keramikprobe eine Umstellung von freier auf kombinierte Konvektion erfolgte. Die Anströmgeschwindigkeit der Stahl- und Keramikprobe betrug 0,15 m/s und die der

Aluminiumprobe 0,1 m/s. Bei der Kupferprobe wurde freie Konvektion beibehalten. Die Schwankungen in der Anströmgeschwindigkeit sind möglich da es ebenfalls zu Schwankungen des natürlichen Luftstroms im Versuchsraum gekommen sein könnte.

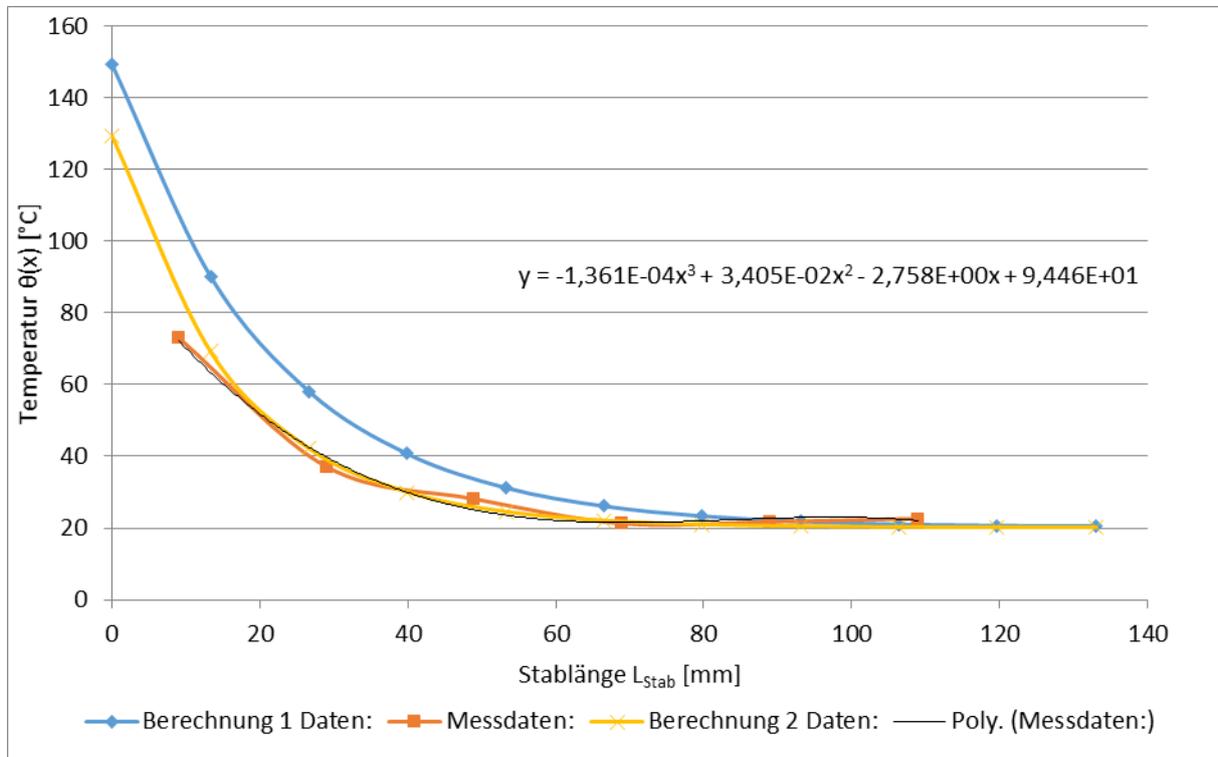


Abbildung 31: Vergleich der Temperaturverläufe von Anlage mit Modell (Keramik)

Der Abstand der vom Modell erzeugten Temperaturkurve (blau) zu der Kurve der realen Anlage (orange) weist bei geringer Stablänge einen sehr großen Unterschied auf, welcher in Richtung des Stabendes kleiner wird, bis sich die Kurven bei ca. 90mm überlagern. Sowohl das Modell als auch die reale Anlage zeigen auf, dass der Stab an seinem Ende Raumtemperatur erreicht hat. Die Kurve des Polynoms deckt sich gut mit der Anlagenkurve. Der Verlauf der angepassten Daten (gelb) liegt sehr nahe an denen der realen Anlage, wobei auch hier die größte Differenz zwischen den Anfangstemperaturen zu verzeichnen ist.

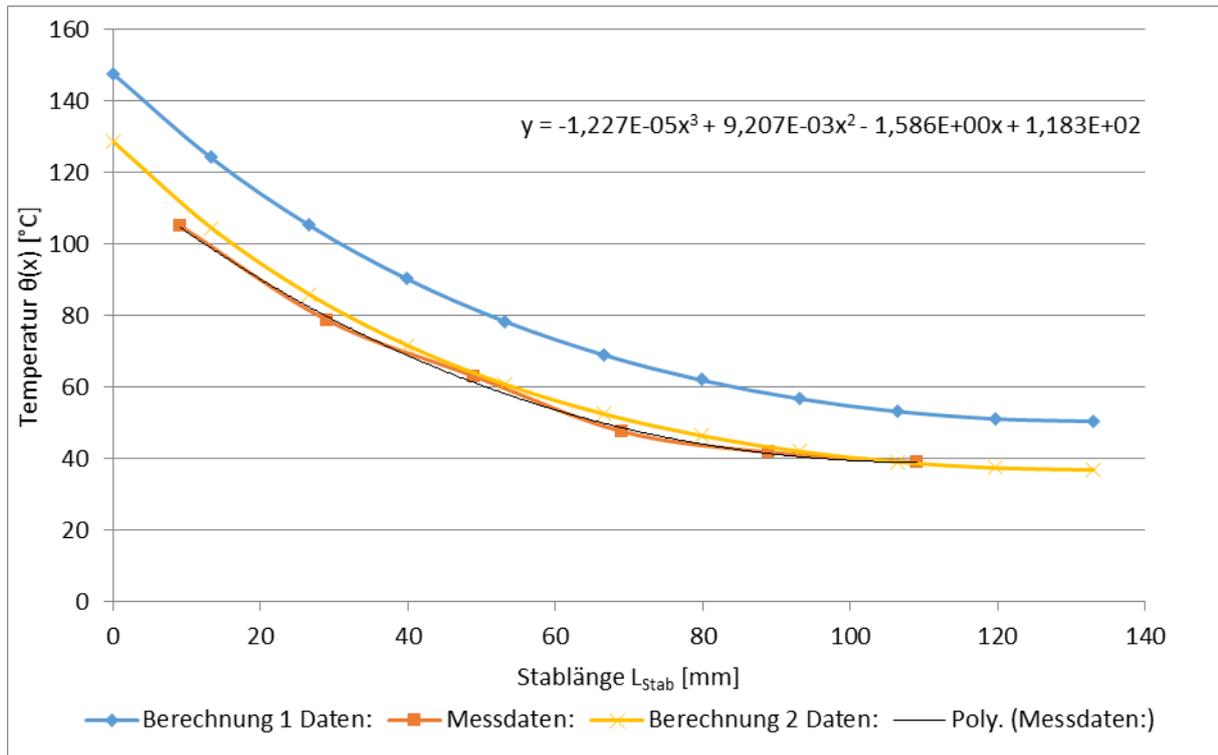


Abbildung 32: Vergleich der Temperaturverläufe von Anlage mit Modell (Stahl)

Bei der Stahlprobe liegt der Modellverlauf parallel zum Anlagenverlauf. Dies gilt sowohl für die erste (blau) als auch die zweite Berechnung (gelb). Mittels der angepassten Parameter ist es gut möglich der Temperaturkurve der realen Anlage zu folgen. Die mit der polynomischen Gleichung erstellte Kurve repräsentiert die Daten der Versuchsanlage ausreichend genau.

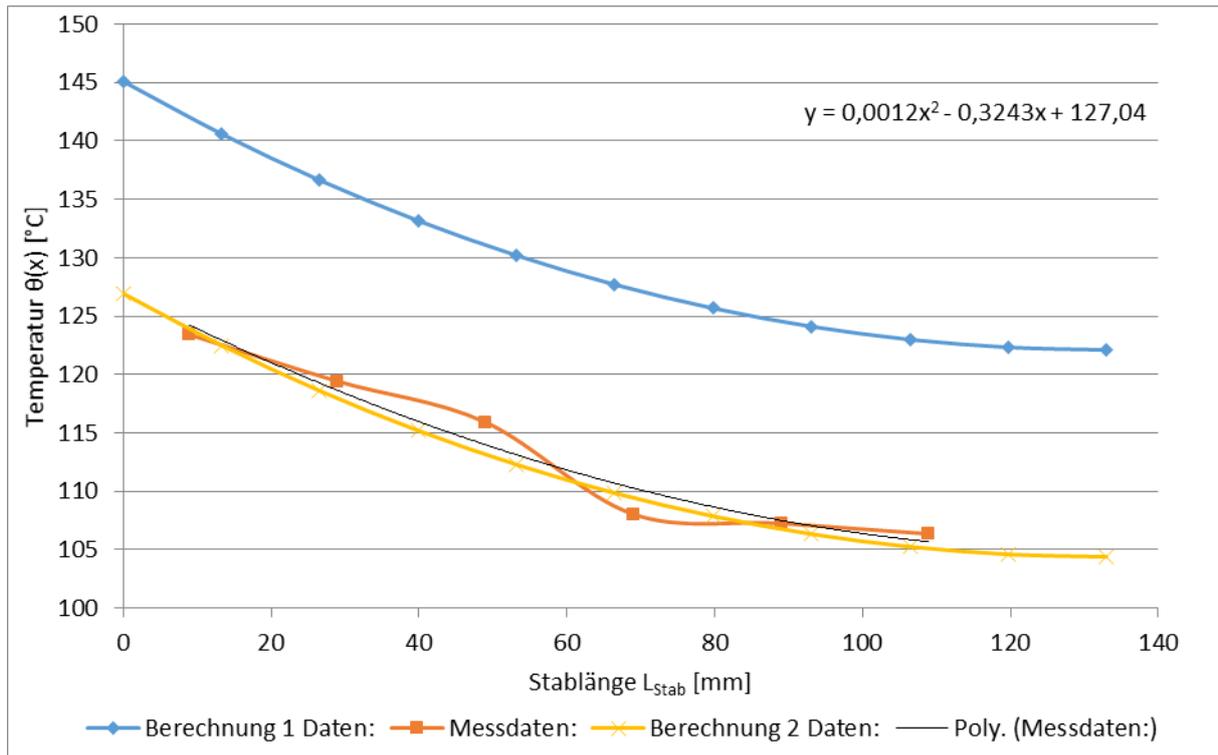


Abbildung 33: Vergleich der Temperaturverläufe von Anlage mit Modell (Aluminium)

Die Auswirkungen der nicht kalibrierten Thermoelemente sind bei Stoffen mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit und der damit verbundene flachen Temperaturkurve stark ausgeprägt. Die Einführung einer Trendlinie soll dieses Verhalten ausgleichen und einen Einblick auf den möglichen Temperaturverlauf der Aluminiumprobe geben. Wie bei der Stahlprobe liegt die Kurve des Modells parallel zu der Kurve der Versuchsanlage. Die angepassten Parameter decken sich gut mit den Werten des realen Versuchs.

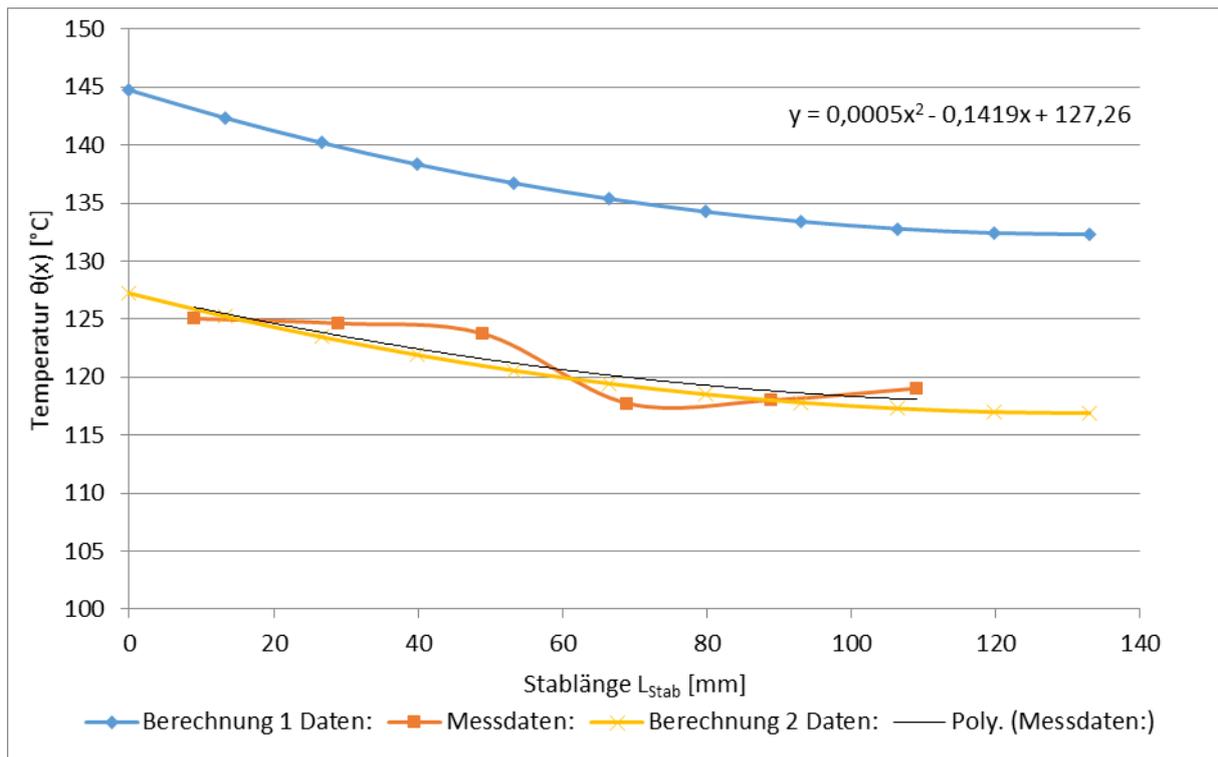


Abbildung 34: Vergleich der Temperaturverläufe von Anlage mit Modell (Kupfer)

Die Kupferprobe weist ein ähnliches Verhalten, aufgrund der ebenfalls hohen Wärmeleitfähigkeit auf, wie die Aluminiumprobe.

Tabelle 14: Vergleich der Temperaturverläufe

	Keramik	Stahl	Aluminium	Kupfer
Mittelwert ΔT Polynom/Berechnung 1	8,646	19,714	17,099	15,666
Mittelwert ΔT Polynom/Berechnung 2	1,703	2,626	0,840	0,496
Maximale Abweichung Mittelwert (B1)	18,117	5,643	0,570	1,223
Maximale Abweichung MW (B2)	4,106	2,981	0,366	0,247
Durchschnittliche Abweichung MW (B1)	6,778	2,782	0,228	0,556
Durchschnittliche Abweichung MW (B2)	1,409	0,986	0,126	0,089

Für einen genaueren Vergleich werden die ermittelten Differenzen und Abweichungen in Tabelle 14 dargestellt. Der aufgezeigte Mittelwert ist aus der durchschnittlichen Temperaturdifferenz zwischen den Berechnungsdaten und dem aus den realen Daten erzeugte Polynom gebildet worden. Je größer dieser Wert ist, desto größer ist der gemittelte Abstand zwischen den beiden Kurven. Hierbei wird der erste Versuch unter Verwendung der Standardwerte als „Berechnung 1“ bzw. „B1“ und der mit

angepassten Parametern als „Berechnung 2“ bzw. „B2“ bezeichnet. Unter dem Begriff „Abweichung“ wird in diesem Zusammenhang die Differenz zwischen dem Mittelwert der Temperaturdifferenzen und den einzelnen Temperaturdifferenzen verstanden. Eine geringe Abweichung weist daher eine gute Parallelität der Modellwerte mit den Anlagenwerten auf. Für eine Deckung der Kurven ist sowohl ein geringer Mittelwert als auch eine geringe Abweichung nötig. Mittels der angepassten Parameter ist es möglich den Mittelwert der Temperaturdifferenz auf ein Maximum von ca. 2,6 °C zu senken. Die durchschnittliche Abweichung liegt hierbei unter 1,5 °C. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die angepassten Parameter eher dem realen Zustand entsprechen als die anfangs angenommen Standardwerte.

Annahmen des Modells:

Das in Excel geschriebene Modell wird immer bis zu einem gewissen Anteil ein anderes Ergebnis aufweisen als die reale Anlage. Einer der wichtigsten Einflussfaktoren für den Verlauf der Temperatur ist die Wärmeleitfähigkeit des Probematerials. In der Simulation wird sie über eine Näherungsformel berechnet, welche dem Verlauf der Wärmeleitfähigkeit unter Temperatureinfluss folgt. Hierbei wird die über die Stablänge gemittelte Temperatur verwendet was zu Ungenauigkeiten führt.

Die Stoffparameter der Umgebungsluft sowie die des Thermoöls werden über eine gemittelte Temperatur berechnet. Für die Berechnung der Luft wird das arithmetische Mittel zwischen der mittleren Stabtemperatur und der Umgebungstemperatur verwendet. Die Eigenschaften des Thermoöls beruhen auf dem arithmetischen Mittel zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur des Öls.

Bei der Berechnung der Formel für den Temperaturverlauf wurde angenommen, dass Parameter wie die Wärmekapazität, Dichte, Wärmeübergangskoeffizienten und die Wärmeleitfähigkeit der Materialien konstant über die Länge des Stabes und die Zeit sind.

Eine weitere Annahme ist, dass das System des Wärmedämmwürfels sowie des mit Thermoöl gefüllten Reservoir-Zylinders vollständig adiabatisch sind. Die Ergebnisse sprechen jedoch dagegen. Für die Anpassung der berechneten Kurve an die Versuchsergebnisse war es unumgänglich die Thermoöltemperatur zu senken. Die

reale Anlage ist somit nicht adiabat was zur Folge hat, dass das Thermoöl durch Wärmeabgabe an die Umgebung zusätzlich abkühlt.

Ein weiterer Grund für eine zu geringe Anfangstemperatur der Proben könnte der Reservoir-Zylinders sein. Dieser steht 6 mm aus dem Wärmedämmwürfel heraus, womit Wärme an die Umgebung abgegeben wird und als weiteren Effekt die Temperatur des Thermoöl senkt. Außerdem legt die Stirnfläche des Zylinders den Nullpunkt für den Abstand der Thermolemente fest. Eine Änderung dieses Punktes auf die Höhe des Wärmedämmwürfels hätte eine Verschiebung der Temperaturkurven der realen Anlage im Diagramm nach rechts und eine Verlängerung des Stabes im Modell zur Folge.

Die Versuchsanlage stand in einem kleinen Raum, welcher sich während der Durchführung der Versuche erwärmte. Um dem Effekt der steigenden Umgebungstemperatur entgegen zu wirken wurde die Zugangstür geöffnet. Dies verursachte jedoch eine leichte Luftströmung durch den Raum, welche wiederum die Messung beeinflusste. Für die Simulation mit den angepassten Werten wurde daher versucht ein Anströmen der Umgebungsluft auf die Probe durch die Auswahl von kombinierter Konvektion zu berücksichtigen. Im Modell ist diese als konstant angesehen worden, da keine genauen Angaben bekannt waren. Während der Versuche ist jedoch mit einem Schwanken der Strömungsgeschwindigkeit zu rechnen.

Eine Anpassung der Standardwerte wurde nicht durchgeführt, da aufgrund der fehlenden Kalibrierung der Thermolemente die erzeugten Temperaturen nicht vollständig repräsentativ waren. Des Weiteren ist das Ziel des Modells Zusammenhänge zwischen Prozessgrößen darzustellen und deren Größenordnungen aufzuzeigen. Diese Aufgabenstellung wurde mit den einzelnen Simulationen erfüllt.

7 Fazit

Es wurde eine Versuchsanlage zum Zweck der Demonstration von Wärmetransportvorgängen konstruiert und gebaut. Die vier Materialien (austenitischer Stahl, Aluminium, Kupfer und Keramik) sind für den Einsatz als Proben in Zylinderstäbe verarbeitet worden. Es erfolgten Versuche, bei denen jede Probe einzeln einseitig beheizt und deren stationärer Temperaturverlauf unter der Auswirkung von freier Konvektion aufgezeichnet wurde. Die aus diesen Daten erstellten Kurven wiesen einen leicht welligen Verlauf auf, welcher auf die nicht kalibrierten Messelemente zurückzuführen ist.

Des Weiteren erfolgte die Programmierung von Modellen der Versuchsanlage in der Skriptsprache Visual Basic for Applications und MATLAB. Die mit dem Modell erstellten Daten wurden mit den Daten der Versuchsanlage verglichen. Es kann gesagt werden, dass mit leichten Anpassungen der Modellwerte eine Deckung der Versuchskurven mit denen des Modells möglich war. Für den Angleich war eine Reduzierung der Thermoöltemperatur sowie eine Erhöhung des Wärmeübergangskoeffizienten zwischen Probe und Umgebung notwendig. Dies lässt darauf schließen, dass das gesamte System einen größeren Wärmeverlust aufweist als bei der Berechnung angenommen. Die Auswirkungen des Spaltmediums und der -breite zwischen der Kupferhülse und dem Probestab sind untersucht worden. Für die an der realen Anlage bestehende Spaltbreite ist der Unterschied der Temperaturverläufe zwischen Wärmeleitpaste und Luft im Spalt gering. Bei Vergrößerung des Luftspalts ist bei Proben mit hoher Wärmeleitfähigkeit mit stärkerer Beeinflussung zu rechnen. Für einen mit Wärmeleitpaste gefüllten Spalt ergaben sich vernachlässigbar kleine Differenzen im untersuchten Größenbereich. Der Einfluss des Stabdurchmessers und -länge wurde aufgezeigt. Ein kleinerer Durchmesser führt zu einem hohen Wärmeübergangskoeffizienten und in weiterer Folge zu einem stärkeren Abfallen des Temperaturverlaufes wohingegen ein kürzerer Stab zu einem höheren Temperaturverlauf führt. An dem programmierten Modell erfolgten Untersuchungen über die Auswirkung von kombinierter Konvektion an der Materialprobe. Wie zu erwarten war verursachte eine höhere Anströmgeschwindigkeit geringere Stabtemperaturen. Des Weiteren wurden der Wärmeübergangskoeffizient der kombinierten Konvektion, sowie seine Anteile aus freier und erzwungener Konvektion in Form eines Diagrammes dargestellt. Es kann gesagt werden, dass freie Konvektion

nur bei geringen Anströmgeschwindigkeiten einen merkbaren Einfluss auf die kombinierte Konvektion hatte. Die Parameter der instationäre Wärmeleitgleichung wurden betrachtet und ihr Einfluss auf die Aufheizzeit bewertet.

Weiterführende Arbeiten/ Ausblick:

Während der Durchführung dieser Diplomarbeit kam es zum Ausbruch der Covid-19 Pandemie. Dies hatte zur Folge, dass das Labor des IET, in der die Anlage stand, nicht mehr begehbar war und keine weiteren Untersuchungen mehr durchführbar waren. Eine der wichtigsten Aufgaben, nachdem die Versuchsanlage wieder zugänglich gemacht wird, wäre die Kalibrierung der Thermoelemente. Des Weiteren enthält die Anlage einen funktionsfähigen und über eine Pulsweitenmodulation ansteuerbaren Querstromlüfter. Dieser kam aufgrund der beschriebenen Situation nie zum Einsatz. Daher könnte eine zukünftige Arbeit die Untersuchung des Einflusses von erzwungener Konvektion sein. Es wurde ebenfalls ein Pyrometer bestellt und verbaut. Dieses konnte in der verfügbaren Zeit nicht einsatzfähig gemacht werden. Die Halterung und Anschlüsse befinden sich auf der Anlage. Eine weitere Aufgabe könnte darin liegen, dass Strahlungstemperaturmessgerät betriebsbereit zu machen. Zusätzliche Verbesserungen wären weitere Temperaturmessstellen für die direkte Messung der Thermoöltemperatur im Kupferzylinder und der Temperatur am Stabanfang sowie eine komplette Wärmedämmung des Systems. Mit diesen Maßnahmen könnte der in den Versuchsdaten erkennbare Temperaturabfall des Thermoöl gemessen und diesem entgegengewirkt werden.

Das Computermodell der Anlage ist modular aufgebaut und kann mit grundlegendem Wissen in Programmieren und VBA leicht erweitert werden. Beispielsweise wäre es möglich das System um diverse Materialien als Probe zu erweitern. Dafür benötigt es alleinig den Zusammenhang zwischen Wärmeleitfähigkeit und Temperatur des jeweiligen Stoffes. Ebenso ist das Einbauen unterschiedlicher Wärmeträgerflüssigkeiten für die Beheizung der Probe realisierbar, wenn die Gleichungen ihrer physikalischen Eigenschaften bekannt sind. Abschließend könnte die Diversität der Anströmmedien auf die Probe ausgebaut werden. Beispielsweise wäre es möglich das Modell auf einem mit Wasser umströmten Stab zu erweitern, womit Kühlungsphänomene untersucht werden könnten.

8 Literaturverzeichnis

- [1] F. Wodlei und R. Kleinhappel, Geschichte und Entwicklung der Thermodynamik, Graz, 2008.
- [2] P. von Böckh und T. Wetzel, Wärmeübertragung Grundlagen und Praxis 4.Auflage, Karlsruhe: Springer Verlag, 2011.
- [3] N. Hannoschöck, Wärmeleitung und -transport, Deutschland: Springer Vieweg, 2018.
- [4] U. Grigull und H. Sandner, Wärmeleitung, Deutschland: Springer Verlag, 1986.
- [5] S. Braun, Skript zur Vorlesung Wärme- und Stoffübertragung 2, Wien: TU Wien, 2019.
- [6] F. Bernhard, Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2. Auflage, Deutschland: Springer Vieweg, 2014.
- [7] „www.sab-kabel.de,“ [Online]. Available: https://www.sab-kabel.de/fileadmin/user_upload/pdf/catalog_dt/Thermotechnik_dt/Allgemeine_Informationen/Anschluss_von_Widerstandsthermometern.pdf. [Zugriff am Januar 2020].
- [8] S. Kabelac und D. Vortmeyer, „K1 Strahlung technischer Oberflächen,“ in *VDI Wärmeatlas*, Deutschland, Springer Verlag, 2013, pp. 1083-1096.
- [9] K. Rasmussen, Calculation methods for the physical properties of air used in the calibration of microphones, Department of Acoustic Technology Technical University of Denmark, 1997.
- [10] G. P, „Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981),“ *Metrologia*, Bd. 18, pp. 33-40, 1982,.
- [11] D. R.S, „Equation for the Determination of the Density of Moist Air (1981/91),“ *Metrologia*, Bd. 29, pp. 67-70, 1992.

-
- [12] A. Wexler und W. A. Wildhack, Humidity and Moisture: Measurement and Control in Science and Industry, New York: Reinhold Publishing Corporation, 1965.
- [13] A. J. Zuckerwar und R. W. Meredith, „Low-frequency absorption of sound in air,“ *The Journal of the Acoustical Society of America*, Bd. 78, pp. 946-955, 1985.
- [14] „FRAGOTHERM® X-400-A Produktinformation www.fragol.de,“ FRAGOL AG. [Online]. [Zugriff am 18. Februar 2020].
- [15] F. Richter, Die physikalischen Eigenschaften der Stähle "Das 100-Stähle-Programm" Teil 1: Tafeln und Bilder, Mülheim a.d. Ruhr.
- [16] „www.kupferinstitut.de,“ 2005. [Online]. Available: <https://www.kupferinstitut.de/wp-content/uploads/2019/11/Cu-ETP.pdf>. [Zugriff am 20 Februar 2020].
- [17] T. Greß, T. Mittler, S. Schmid, W. Volk, H. Chen und N. B. Khalifa, „THERMAL ANALYSIS AND PRODUCTION OF AS-CAST Al 7075/6060 BILAYER BILLETS,“ *International Journal of Metalcasting*, Nr. Volume 13, Issue 4, pp. 817-829, 2019.
- [18] „<https://at.rs-online.com>,“ Corning, Inc., [Online]. Available: <https://docs.rs-online.com/f739/0900766b80397c65.pdf>. [Zugriff am 18 Februar 2020].
- [19] „Visual Basic für Applikationen - Das VBA-Tutorial,“ 12 November 2018. [Online]. Available: <https://www.vba-tutorial.de/>. [Zugriff am Oktober 2019].