



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Untersuchung des Wärmetransports in
feuchtem Erdreich zur In-Situ Behandlung
von Böden

Laura Lederle, BSc

Februar 2022

Masterarbeit

Untersuchung des Wärmetransports in feuchtem Erdreich zur In-Situ Behandlung von Böden

erstellt am

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Vorgelegt von:

Laura Lederle, BSc
01235097

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr. Christof Spijker
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 20. Februar 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 23.02.2022

Unterschrift Verfasser/in
Laura Lederle

Danksagung

Zu Beginn dieser Arbeit möchte ich mich bei Herrn Dipl.Ing. Dr.mont.Christoph Spijker und Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch bedanken, die meine Arbeit betreut haben und mir immer mit hilfreichen Anregungen und konstruktiver Kritik zur Seite gestanden sind. Mein weiterer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Gregor Berger, der stets für Fragen meinerseits offen war und der tatkräftig bei der Durchführung der Versuche mitgeholfen hat. Bedanken möchte ich mich auch bei allen weiteren Mitgliedern des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik, die jederzeit ein offenes Ohr für mich hatten, sowie bei Herrn Wolfgang Rühl für die Hilfe beim Aufbau und der Vorbereitung der Versuche.

Außerdem gilt mein Dank all jenen, die sich die Mühe gemacht haben, diese Arbeit Korrektur zu lesen und mir stets zur Seite gestanden sind, namentlich erwähnen möchte ich hierbei Julia Lederle, Jacqueline Schmidbauer und Anja Schwärzler. Danke auch an sämtliche Freunde und Studienkollegen, die mir über die Jahre beigestanden sind, sei es mit Lernunterlagen, Tipps oder auch moralischer Unterstützung.

Zuletzt und doch vor allem will ich mich bei meinen Eltern, Gerhard und Brigitte Lederle, sowie dem Rest meiner Familie bedanken. Ohne ihre bedingungslose Geduld und Unterstützung hätte ich das alles niemals geschafft. Vielen Dank für euer Vertrauen!

Kurzfassung:

Die vorliegende Masterarbeit entstand durch das Projekt *InnoBla*, das im Rahmen des Programms „Altlastenforschung“ gefördert wird und behandelt die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Aufheizung von Böden durch elektrisch beheizte Wärmequellen bzw. Heizlanzen (*Thermal Conductive Heating*) für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung. Für diese Untersuchungen kommt nicht kontaminiertes Erdreich aus Kraubath in der Steiermark zur Anwendung. In vier Versuchen findet die Aufheizung des Erdreichs in einer zylindrischen Stahlkonstruktion mittels Heizlanze statt, die für jedes der Experimente auf ein anderes Temperaturniveau erhitzt wird. Die Durchführung der Versuche dauert dabei mehrere Stunden an. In diesen Versuchen wird das Erdreich getrocknet und teilweise auch pyrolysiert. Währenddessen erfolgt die Aufzeichnung der Temperatur in gewissen Zeitabständen digital mittels Labview [1], für die anschließende Auswertung der Ergebnisse kommt Matlab [2] zur Anwendung. Zusätzlich zu den Versuchen werden Daten simuliert und anschließend mit jenen verglichen, die mithilfe der Versuche erzielt werden konnten. Diese Arbeit dient dazu, die durchgeführten Tätigkeiten und erzielten Projektergebnisse darzustellen.

Abstract:

This master thesis was developed by the *InnoBla* project, which is funded by the "Contaminated Sites Research" program and deals with the improvement of the economic efficiency of heating soils by electrically heated heat sources or heating lances (*Thermal Conductive Heating*) for thermally assisted soil vapor extraction. For these investigations, non-contaminated soil from Kraubath in Styria is used. In four experiments the heating of the soil takes place in a cylindrical steel construction by means of a heating lance, which is heated to a different temperature level for each of the experiments. The execution of the experiments takes place over several hours, in which the soil is dried and partially pyrolyzed. The temperature is recorded digitally at certain time intervals using Labview [1] and Matlab [2] is used for the subsequent evaluation of the results. In addition to the experiments, data are simulated and then compared with those obtained using the experiments. The purpose of this work is to present the activities carried out and the project results obtained.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Allgemeine Formelzeichen	IV
Akronyme.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
2 Theorie.....	3
2.1 Wärmetransport.....	3
2.1.1 Wärmeleitung.....	4
2.1.2 Konvektion	6
2.1.3 Wärmestrahlung	9
2.2 Wärmetransport in Schüttgütern	11
2.3 Trocknung von Schüttgütern	14
2.3.1 Bindungsarten der Feuchte am Schüttgut.....	14
2.3.2 Sorptionsisotherme und Bindungsenergie	15
2.4 Pyrolyse.....	16
2.5 Durchströmung von Schüttgütern.....	17
2.5.1 Einphasige Strömungen in Schüttungen	17
2.5.2 Mehrphasige Strömungen in Schüttungen	18
3 Charakterisierung des Bodens	20
3.1 Feuchtegehalt.....	21

3.2	Organischer Anteil.....	22
3.3	Wärmeleitfähigkeit.....	23
3.4	Korngrößenverteilung.....	27
3.5	Druckverlust	33
4	Versuche zur transienten Erwärmung des Bodens	37
4.1	Versuchsablauf.....	37
4.2	Versuchsreihe 1	38
4.2.1	Versuch 1.....	42
4.2.2	Versuch 2.....	46
4.2.3	Versuch 3.....	50
4.3	Versuchsreihe 2	54
4.3.1	Versuch 4.....	55
4.4	Gegenüberstellung aller Versuche	59
5	Gegenüberstellung mit Simulationsdaten	61
5.1	Versuch 1	61
5.2	Versuch 2	65
5.3	Versuch 3	68
5.4	Versuch 4	71
5.5	Phänomenologische Betrachtung der Versuche anhand der Simulationsergebnisse 74	
5.5.1	Phänomenologische Betrachtung für Versuch 1	74
5.5.2	Phänomenologische Betrachtung für Versuch 4	79
6	Diskussion und Ausblick	82
	Literaturverzeichnis	84

Allgemeine Formelzeichen

Allgemein

a	Temperaturleitfähigkeit	[-]
A	Fläche	[m ²]
c ₀	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	[m/s]
c ₁	fundamentale Naturkonstante	[$\frac{W}{m^2} * \mu m^4$]
c ₂	fundamentale Naturkonstante	[μmK]
c _p	Wärmekapazität	[J/K]
C	Konzentration	[mol/m ³]
C ₁	Kozeny-Carman-Parameter	[-]
d _p	charakteristische Weglänge, Partikeldurchmesser	[m]
D	Diffusionskoeffizient	[m ² /s]
D _i	Durchgang	[-]
é	Energiestromdichte	[W/m ²]
E _a	Äußere Energie	[J]
h	Planck'sches Wirkungsquantum	[Js]
H	Probenschütthöhe	[m]
k	Boltzmann Konstante	[J/K]

K	Permeabilität	[As/Vm]
L	(charakteristische)Länge	[m]
m	Masse	[kg]
m_{br}	Masse der verbrannten Probe	[g]
m_{ges}	Gesamtmasse der Probe	[g]
m_{ft}	Masse der feuchten Probe	[g]
m_{tr}	Masse der trockenen Probe	[g]
M_{λ}^S	flächenspezifische Ausstrahlung	[W/(m ² * μ m)]
M_i	Massenanteil	[-]
N	Stoffstrom	[kg/s]
Nu	Nusselt Zahl	[-]
p	Druck, Dampfdruck	[bar]
p^S	Sattdampfdruck	[bar]
p^*	Gleichgewichtsdampfdruck	[bar]
\dot{q}	Wärmestromdichte	[W/m ²]
Q	Wärme	[J]
\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
R_i	Rückstand	[-]
Re	Reynolds Zahl	[-]
t	Zeit	[s]
T	Temperatur	[K]
T_F	Temperatur des Fluids	[K]
T_W	Temperatur der Wand	[K]
u	Leerrohrgeschwindigkeit	[m/s]
U	innere Energie	[J]
V	Volumen	[m ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /s]

w	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
W	Arbeit	[W]
x	Ortskoordinate	[m]
X	Feuchtegehalt	[-]
Y_{ft}	Massenverlust bezogen auf die feuchte Probe	[%]
Y_{tr}	Massenverlust bezogen auf die trockene Probe	[%]

Griechische Buchstaben

α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/m ² K]
δ	Wanddicke / Filmdicke	[m]
ε	Emissionsgrad	[-]
η	Passabilität	[m]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
μ	dynamische Viskosität	[Pas]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
σ	Stefan Boltzmann Konstante	[W/(m ² K ⁴)]
φ	relative Feuchte	[-]

Akronyme

BLA	Bodenluftabsaugung
Bzw	beziehungsweise
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
eff	effektiv
H ₂	Wasserstoff
rel	relativ
TPT	Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
z.B.	zum Beispiel

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Prinzipskizze für den Einsatz fester Wärmequellen bzw. Heizlanzen [3] ...2

Abbildung 2-1: Grafische Darstellung von Strömungsgrenzschicht (links) und thermischer Grenzschicht (rechts) [6] 7

Abbildung 2-2: Darstellung der Dicke der thermischen Grenzschicht [6]..... 8

Abbildung 3-1: Bodenproben im Muffelofen zur Verbrennung der organischen Bestandteile22

Abbildung 3-2: Prinzipieller Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Schematisch dargestellt ist die Heizplatte ganz unten, darauf die Probe, oben befindet sich die Metallplatte.24

Abbildung 3-3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Zu sehen ist am ersten Bild die Probe im Metallring mit aufliegender Metallplatte, die anderen beiden Bilder zeigen die Isolierung des Mantels mit Dämmwolle.24

Abbildung 3-4: Ergebnisse zur Messung der Wärmeleitfähigkeit. Die strichlierte Linie in der Abbildung stellt die Versuchsdurchführung bei einer Heizplattentemperatur von 200 °C dar, während die durchgehende Linie den Versuch bei 40 °C abbildet.....27

Abbildung 3-5: Sieblinie von Probe 1, feucht. Die durchgängige Linie stellt hier den Rückstand dar, die strichlierte Linie bildet den Durchgang ab. Der mittlere Korndurchmesser ist durch die blaue Linie gekennzeichnet 30

Abbildung 3-6: Sieblinie von Probe 1, trocken. Die dargestellten Linien (strichliert und grau) zeigen Durchgang und Rückstand sowie die mittlere Korngröße (in blau) der Probe an..... 30

Abbildung 3-7: Sieblinie von Probe 1, gebrannt. Die dargestellten Linien (strichliert und grau) zeigen Durchgang und Rückstand sowie die mittlere Korngröße (in blau) der Probe an.	31
Abbildung 3-8: Probe vor der Trocknung.....	32
Abbildung 3-9: Probe nach Herausnahme aus dem Muffelofen bei 650 °C	32
Abbildung 3-10: Aufbau zur Messung des Druckverlustes. Zu sehen ist hier das Füllrohr, das die Probe beinhaltet, sowie die dazugehörigen Mess- und Regelungsgeräte.....	34
Abbildung 3-11: Druckdifferenzmessung der feuchten Probe. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Druckdifferenz auch die Leerrohrgeschwindigkeit ansteigt, die auf der X-Achse aufgetragen ist.....	35
Abbildung 3-12: Druckdifferenzmessung der trockenen Probe. Der quadratische Term der Gleichung ist dieses Mal negativ und sehr klein, was auf einen annähernd linearen Verlauf schließen lässt.....	36
Abbildung 3-13: Druckdifferenzmessung der verbrannten Probe. Ansätze einer Exponentialfunktion im Diagramm sind erkennbar.....	36
Abbildung 4-1: Modell der Stahlkonstruktion für die Großversuche	39
Abbildung 4-2: Querschnitt des Versuchsaufbaus, inklusive Beschriftung der einzelnen Elemente	40
Abbildung 4-3: Aufbau des Versuchs, ersichtlich ist die bereits verschlossene Konstruktion mit Heizlanze und eingebrachten Thermoelementen.....	41
Abbildung 4-4: Temperaturverlauf von Heizlanze und Thermoelement, inklusive Kennzeichnung des Bereichs der Versuchsunterbrechung	42
Abbildung 4-5: Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 1	43
Abbildung 4-6: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 1	44
Abbildung 4-7: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 1	44
Abbildung 4-8: Temperaturverlauf des Erdreichs am vierten Messpunkt, Versuch 1. Erkennbar ist der Abfall der Temperatur, sowie die erneute Aufheizung	45
Abbildung 4-9: Erdreich nach Beendigung von Versuch 1	46
Abbildung 4-10: Temperaturverlauf der Heizlanze für Versuch 2, der Sprung im Verlauf zu Beginn ist durch eine Störung der Regelung zu erklären	47
Abbildung 4-11: Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 2	48

Abbildung 4-12: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 2....	48
Abbildung 4-13: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 2.....	49
Abbildung 4-14: Temperaturverlauf des Erdreichs am vierten Messpunkt, Versuch 2.....	49
Abbildung 4-15: Erdreich nach Beendigung von Versuch 2	50
Abbildung 4-16: Temperaturverlauf der Lanze bei Versuch 3	51
Abbildung 4-17 Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 3. Zu sehen ist hier der Trocknungsbereich sowie die erneute Aufheizung des Erdreichs	52
Abbildung 4-18: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 3....	52
Abbildung 4-19: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 3.....	53
Abbildung 4-20: Temperaturverlauf des Erdreichs am vierten Messpunkt, Versuch 3. Aufgrund des Ausfalls des linken Thermoelements sind hier nur zwei Temperaturverläufe zu sehen.....	53
Abbildung 4-21: Erdreich nach Beendigung von Versuch 3	54
Abbildung 4-22: Erweiterung der Konstruktion um einen Luftkreislauf, der der Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs dient	55
Abbildung 4-23: Temperaturverlauf der Lanze bei Versuch 4	56
Abbildung 4-24: Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 4. Zu sehen ist ein rascher Anstieg der Temperatur nach der Trocknung des Bodens	57
Abbildung 4-25: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 4....	57
Abbildung 4-26: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 4. Gut erkennbar sind hier die zwischenzeitlichen Ausfälle der Thermoelemente	58
Abbildung 4-27: Erdreich nach Beendigung von Versuch 4.	58
Abbildung 4-28: Vergleich des Erdreichs der vier Versuche jeweils nach Versuchsende, gekennzeichnet durch Nummerierung. Zu sehen ist der getrocknete sowie der pyrolysierte und der gesinterte Bereich.	60
Abbildung 5-1: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 1, basierend auf den Daten der Simulation [19]	62
Abbildung 5-2: Temperaturvergleich Modell - Messung am ersten Messpunkt, Versuch 1 [19]	63

Abbildung 5-3: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 1 [19]	63
Abbildung 5-4: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 1 [19]	64
Abbildung 5-5: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 1 [19]	64
Abbildung 5-6: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 2 [19]	65
Abbildung 5-7: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 2 [19]	66
Abbildung 5-8: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 2 [19]	66
Abbildung 5-9: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 2 [19]	67
Abbildung 5-10: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 2 [19]	67
Abbildung 5-11: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 3 [19]	68
Abbildung 5-12: Temperaturvergleich Modell - Messung am ersten Messpunkt, Versuch 3 [19]	69
Abbildung 5-13: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 3 [19]	69
Abbildung 5-14: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 3 [19]	70
Abbildung 5-15: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 3 [19]	70
Abbildung 5-16: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 4 [19]	71
Abbildung 5-17: Temperatur der injizierten Luft der Messung an allen vier Injektoren sowie das Polynom der Eingangsdaten der Simulation [19]	72
Abbildung 5-18: Temperaturvergleich Modell - Messung am ersten Messpunkt, Versuch 4 [19]	73
Abbildung 5-19: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 4 [19]	73

Abbildung 5-20: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 4 [19]	74
Abbildung 5-21: Temperaturfeld von Versuch 1 nach 1300 Sekunden. Die erste Zellreihe zeigt eine Überschreitung der Temperaturmarke von 100 °C. [19]	75
Abbildung 5-22: Spezifische Masse des flüssigen Wassers nach 1300 Sekunden bei Versuch 1. Es ist die komplette Trocknung der ersten Zellreihe zu erkennen. [19]	76
Abbildung 5-23: Wärmeleitfähigkeit des Bodens nach 1300 Sekunden, Versuch 1. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt aufgrund des trockenen Bodens und eine Isolationsschicht ist erkennbar. [19]	76
Abbildung 5-24: Temperaturfeld von Versuch 1 nach 20000 Sekunden. [19]	77
Abbildung 5-25: Spezifische Masse des flüssigen Wassers bei Versuch 1 nach 20000 Sekunden. Erkennbar ist, dass die trockene Schicht an Stärke gewonnen hat und Konzentrationszonen sowohl am Deckel als auch im Boden auftreten. [19]	78
Abbildung 5-26: Wärmeleitfähigkeit des Bodens bei Versuch 1 nach 20000 Sekunden. Die Isolierung nimmt mit zunehmender Stärke der trockenen Schicht zu. [19]	78
Abbildung 5-27: Temperaturprofil von Versuch 4 nach 10000 Sekunden. [19]	79
Abbildung 5-28: Temperaturprofil von Versuch 4 nach 20000 Sekunden. [19]	80
Abbildung 5-29: Spezifische Masse des flüchtigen Wassers bei Versuch 4 nach 10000 Sekunden. [19]	81
Abbildung 5-30: Spezifische Masse des flüchtigen Wassers bei Versuch 4 nach 20000 Sekunden. [19]	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung von feuchter und trockener Probe	21
Tabelle 3-2: Rohdaten der gebrannten Proben	23
Tabelle 3-3: Daten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit.....	26
Tabelle 3-4: Verteilung der Probenanteile auf die einzelnen Korngrößen	28
Tabelle 3-5: Bestimmung von Massenanteil, Durchgang und Rückstand für Probe 1, feucht	29
Tabelle 4-1: Positionierung der Messpunkte.....	38
Tabelle 4-2: Geometrische Abmessungen des Versuchsaufbaus	40
Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der vier Versuche	59

1 Einleitung

In-Situ-Verfahren zur Reinigung von kontaminierten Böden beruhen sowohl auf physikalischen, chemischen als auch biologischen Prozessen und führen zu einer Entfernung, Umwandlung (Reduktion, Oxidation) oder Immobilisierung (beispielsweise Sorption oder Fällung) von Schadstoffen im Untergrund. [3]

Die Kontamination mit mittel- bis schwerflüchtigen Schadstoffen von gering durchlässigen Bodenbereichen ist zurzeit ein Problem, für welches bislang kein anwendungsreifes In-Situ Sanierungsverfahren vorhanden ist, das in der Lage wäre, Schadstoffe innerhalb kurzer Zeit aus dem Untergrund zu entfernen. Um dem entgegenzusteuern, wird der Eintrag thermischer Energie durch elektrisch betriebene feste Wärmequellen, mit denen lokal Bodentemperaturen von weit über 100 °C erreicht werden können, forciert. Dies soll zu einer Verdampfung der Schadstoffe aus dem Boden und zu ihrem Austrag über die Bodenluft führen [3]. Zudem kommt es neben dem Einsatz von festen Wärmequellen auch zur Anwendung von Dampf-Luft-Injektionen. Für hydraulische Verfahren, die auf Basis der klassischen Pump-and-Treat Variante (P&T) funktionieren, wurden zur Steigerung der Austragsraten Verfahren für die Erhöhung oder die Mobilisierung der Löslichkeit (Solubilisierung) entwickelt. [4]

Bei leichtflüchtigen Schadstoffen und gut luftdurchlässigen Böden ist die Technik der Bodenluftabsaugung bereits ein bewährtes Verfahren, da die Massenausträge von der Flüchtigkeit der Schadstoffe sowie dem geologischen Bodenaufbau abhängig sind und sich oft über viele Jahre erstrecken können. Das Einbringen von thermischer Energie in den Untergrund, zusätzlich zur kalten Bodenluft, sorgt jedoch für eine erhebliche Verkürzung der Sanierungszeit, da durch den Temperaturanstieg die Flüchtigkeit der Schadstoffe erhöht wird, was zu einer Vervielfachung der Massenausträge führt. Dies wiederum sorgt für eine Ausdampfung von Schadstoffen aus dem Untergrund, die bei normalen Bodentemperaturen

von ca. 10 °C nicht erfasst werden. Anschließend erfolgt durch Bodenluftabsaugung (BLA) die Entfernung dieser Stoffe. Das schematische Wirkprinzip einer solchen Bodenaufheizung mittels Heizlanzen ist in **Abbildung 1-1** dargestellt. [3]

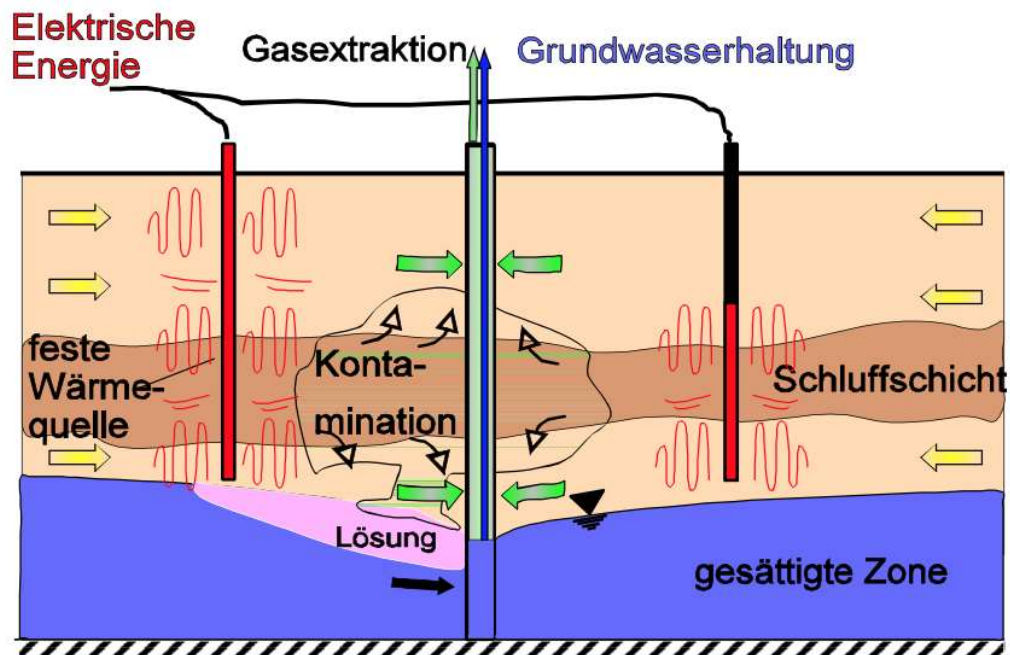


Abbildung 1-1: Prinzipskizze für den Einsatz fester Wärmequellen bzw. Heizlanzen [3]

Die Entscheidung, ob eine Sanierung In-Situ oder On-Site / Off-Site erfolgt, ist nicht nur von den Schadstoffen, sondern auch von der Lage der Kontamination im Untergrund, den Untergrundverhältnissen und den örtlichen bzw. planungstechnischen Randbedingungen abhängig. Bei der Wahl der Verfahrenstechnologie handelt es sich immer um Einzelfallentscheidungen, die diverse Aspekte, wie beispielsweise Sanierungsdauer, Verhältnismäßigkeit (Geeignetheit, Erforderlichkeit, Angemessenheit), Ökonomie, Nachhaltigkeit und Ökobilanz berücksichtigen. [4]

Diese Arbeit dient als Vorstudie für den praktischen Einsatz fester Wärmequellen oder Heizlanzen zur Unterstützung der Bodenluftabsaugung. Zudem kommt es zur Untersuchung, inwieweit das Einblasen und Wiederabsaugen von Luft den konvektiven Wärmetransport erhöht und welche Auswirkungen dadurch hinsichtlich der Trocknung und Pyrolyse des Erdreichs zu erwarten sind.

2 Theorie

Um die Grundlagen abzudecken, wird zu Beginn dieser Masterarbeit ein Überblick über den Wärmetransport im Allgemeinen vermittelt, der durch Konvektion, Wärmeleitung oder Wärmestrahlung erfolgen kann. Es kommt außerdem zur Erörterung der thermodynamischen Hauptsätze, welche die Richtung, des Wärmetransports festlegen.

Anschließend erfolgt eine genauere Betrachtung des Wärmetransports in Schüttgütern, gefolgt von deren Trocknung und einem Überblick über die Pyrolyse. Abschließend kommt es zu einer Betrachtung des Durchströmungsverhaltens, das mittels Ergun und Darcy Gleichung erläutert wird.

2.1 Wärmetransport

Wärmetransport erfolgt stets in Richtung der abnehmenden Temperatur, was im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik thematisiert wird. Es erfolgt jedoch weder eine Aussage darüber, wie viel Wärme in Abhängigkeit des Temperaturgradienten bzw. der Temperaturdifferenz transportiert wird, noch wie die transportierte Wärmemenge von etwaigen Randbedingungen, beispielsweise der Geometrie oder dem Material, abhängt. Um diese Abhängigkeiten herauszufinden, wird ein VDI-Wärmeatlas [5] zur Betrachtung herangezogen. Es werden im Allgemeinen drei Arten des Wärmetransports unterschieden [6]:

- Wärmeleitung
- Konvektion
- Wärmestrahlung

2.1.1 Wärmeleitung

Unter Wärmeleitung wird der Wärmetransport zwischen zwei benachbarten Molekülen in einem Material verstanden, hervorgerufen durch einen Temperaturgradienten. Diese Moleküle bewegen sich. Je höher dabei die Temperatur ist, desto höher ist auch die kinetische Energie. Aufgrund molekularer Wechselwirkungen zwischen den Molekülen erfolgt der Energietransport. Parallel wird Energie vom höheren zum niedrigeren Niveau übertragen.

Wärmeleitung kann in allen Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern stattfinden und ist unabhängig von einer makroskopischen Bewegung der Substanz. [6]

In Metallen wird die Energie auch durch freie Elektronen übertragen, während in strahlungsundurchlässigen Körpern der Energietransport ausschließlich durch Wärmeleitung erfolgt. In Flüssigkeiten und Gasen kommt es zu einer Überlagerung des Energietransports durch Wärmeleitung mit dem Energietransport durch Konvektion sowie Wärmestrahlung. Diese Faktoren führen dazu, dass eine Erfassung des Mechanismus der Wärmeleitung in Fluiden und Festkörpern schwierig zu registrieren ist. [7]

Stationäre Wärmeleitung

Generell erfolgt eine Unterscheidung der Wärmeleitfähigkeit im stationären Zustand eines Körpers und der Wärmeleitfähigkeit im instationären Zustand. Das *Fourier'sche Gesetz* ist in **Gleichung (2-1)** zu sehen. [8]

$$\vec{q} = -\lambda \text{ grad } T \quad (2-1)$$

Dieses Gesetz bildet die Grundlage für die Berechnung aller Wärmeleitungsvorgänge. Im Falle einer stationär vorliegenden Wärmeleitung in einfachen geometrischen Konfigurationen ist es möglich, analytische Lösungen abzuleiten, zum Beispiel für die eindimensionale, stationäre Wärmeleitung durch eine Wand. Herrscht auf der einen Seite der Wand die konstante Oberflächentemperatur T_1 und auf der anderen Seite die konstante Oberflächentemperatur T_2 , wobei gilt $T_1 > T_2$, so vereinfacht sich das *Fourier'sche Gesetz* aufgrund der Eindimensionalität des Wärmetransports zu **Gleichung (2-2)**. [8]

$$\dot{q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2-2)$$

Dabei ist \dot{q} die Wärmestromdichte, die als der Wärmestrom, der je Flächeneinheit über eine Fläche hinweg übertragen wird, definiert ist. $\partial T / \partial x$ ist der lokale Temperaturgradient in Richtung der Ortskoordinate x , die normal zur Wandoberfläche steht. Die Wärmestromdichte

\dot{q} hängt bei reiner Wärmeleitung nur von einem einzigen Stoffwert, der Wärmeleitfähigkeit λ ab. Das negative Vorzeichen der Gleichung kommt daher, dass ein positiver Wärmestrom immer in Richtung eines negativen Temperaturgradienten zeigt. [6], [8]

In Wandnormalrichtung muss bei stationärer Wärmeleitung **Gleichung (2-3)** gelten, wobei A die Wandfläche ist.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (2-3)$$

Wird die Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von der Temperatur vernachlässigt oder ein konstanter mittlerer Wert der Wärmeleitfähigkeit zwischen T_1 und T_2 eingesetzt, so ergibt sich die Integration von **Gleichung (2-2)** vom ersten zum zweiten Ort entlang der X -Koordinate. Für die Wärmestromdichte, mit der eine Überleitung der Wärme von der heißen zur kalten Oberfläche erfolgt, ergibt sich **Gleichung (2-4)** und in weiterer Folge für den Wärmestrom durch eine solche Wand **Gleichung (2-5)**. δ ist hierbei die Dicke der Wand. [8]

$$\dot{q} = \lambda \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad (2-4)$$

$$\dot{Q} = \lambda A \frac{T_1 - T_2}{\delta} \quad (2-5)$$

Instationäre Wärmeleitung

Im Gegensatz zur stationären Wärmeleitung ist hier die Temperatur T nicht nur eine Funktion des Ortes, sondern auch der Zeit t . Instationäre Temperaturfelder treten auf, wenn sich die thermischen Umgebungsbedingungen des Körpers ändern. Wenn also ein Körper, der eine konstante Anfangstemperatur besitzt, einer Umgebung ausgesetzt wird, die eine abweichende Temperatur aufweist, ergibt sich ein Wärmefluss über die Körperoberfläche und die Temperatur im Körper ändert sich mit der Zeit. Nach Beendigung dieses Vorgangs stellt sich erneut eine stationäre Temperaturverteilung ein. Es ergibt sich folgende, in **Gleichung (2-6)** dargestellte Energiebilanz, die die *Fourier'sche Wärmeleitung* berücksichtigt [7] [8].

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}[a * \text{grad}(T)] + \frac{\dot{q}_s}{\rho c} \quad (2-6)$$

\dot{q}_s ist ein volumetrischer Quellterm für die innere thermische Energie des betrachteten Elements. Dieser Term ermöglicht beispielsweise die Beschreibung der Energiefreisetzung durch exotherme Reaktionen oder die Energiebindung durch einen Phasenwechsel. Beim Stoffwert a handelt es sich um die Temperaturleitfähigkeit. [8]

Für technische Anwendungen spielen die Berechnungen zeitlich veränderlicher Temperaturfelder oft eine entscheidende Rolle. Sie ermöglichen beispielsweise die Bestimmung folgender Parameter [10]:

- Dauer von Aufheiz- oder Abkühlvorgängen
- Aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge
- Ort im Innern eines Körpers, an dem zu einer bestimmten Zeit eine maximale Temperatur auftritt

2.1.2 Konvektion

Konvektion bezeichnet den Energietransport, der an den Stofftransport gekoppelt ist. In einem Fluid trägt jedes Volumenelement innere Energie mit sich, die durch Strömung weitertransportiert und als Wärme an einen festen Körper übertragen wird. Der Wärmetransport durch Konvektion hängt somit nicht nur von den Stoffparametern des Fluids, sondern auch von Prozessparametern, wie beispielsweise dem Turbulenzgrad oder der Strömungsgeschwindigkeit ab. *Konvektiver Wärmeübergang* bezeichnet den Wärmetransport zwischen einem strömenden Fluid und der Wand. [6], [9]

Um die Vorgänge in einer Grenzschicht mathematisch zu beschreiben, dient die *Grenzschichttheorie*. Ein konvektiver Wärmeübergang zwischen Fluid und Wand führt bei $T_F < T_W$ dazu, dass Energie von der Wand ins Fluid übertragen wird, im Falle von $T_F > T_W$ erfolgt ein Entzug von Energie aus dem Fluid. T_F ist die Temperatur des Fluids, T_W diejenige der Wand. Die Wärmestromdichte \dot{q} dient dem Transport der Energie zur Wand und ist abhängig von der Temperaturdifferenz $T_W - T_F$. Mittels dieser Temperaturdifferenz kann ein einfacher Zusammenhang formuliert werden, **Gleichung (2-7)**. Bei α handelt es sich um den Wärmeübergangskoeffizienten in $W/(m^2/K)$. [6]

$$\dot{q} = \alpha(T_W - T_F) \quad (2-7)$$

Abbildung 2-1 zeigt das Strömungsprofil (links) und das Temperaturprofil (rechts), die sich in einer parallelen, wandnahen Strömung einstellen. y stellt hierbei den Wandabstand im Fluid dar. T_F bezeichnet die Temperatur, die das Fluid fernab der Wand aufweist, während w_F die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids fernab der Wand abbildet. T_W ist die Temperatur an der Wandoberfläche. Als *Geschwindigkeitsgrenzschicht* oder *Strömungsgrenzschicht* (in der Abbildung gekennzeichnet durch δ_w) bzw. *Temperaturgrenzschicht* oder *thermische Grenzschicht* (in der Abbildung gekennzeichnet durch δ_T) werden die wandnahen Bereiche

bezeichnet, in denen große Geschwindigkeits- bzw. Temperaturgradienten auftreten. In diesen wandnahen Bereichen herrscht Wärmeleitung [6]

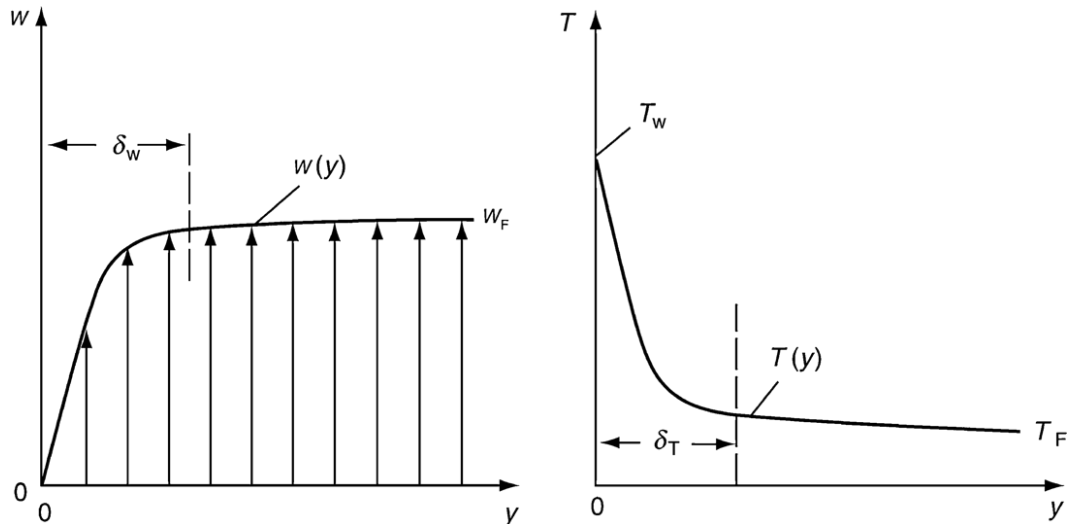


Abbildung 2-1: Grafische Darstellung von Strömungsgrenzschicht (links) und thermischer Grenzschicht (rechts) [6]

Um die Dicke der thermischen Grenzschicht δ_T zu beschreiben, kann diese näherungsweise der Dicke einer fiktiven, unbeweglichen Fluidgrenzschicht gleichgesetzt werden. In dieser würde mittels reiner Wärmeleitung bei gleicher Temperaturdifferenz $T_w - T_F$ die gleiche Wärmestromdichte \dot{q} wie beim konvektiven Wärmeübergang, **Gleichung (2-7)**, hervorgerufen werden. Dieser Zusammenhang ist in **Abbildung 2-2** verdeutlicht. Hier zeigt sich, dass aus dem Temperaturverlauf $T(y)$, der sich beim konvektiven Wärmeübergang ergibt, durch einen linearen Temperaturabfall $T_w - T_F$ in der unbeweglichen, fiktiven Grenzschicht eine konstante Fluidtemperatur T_F außerhalb resultiert. [6]

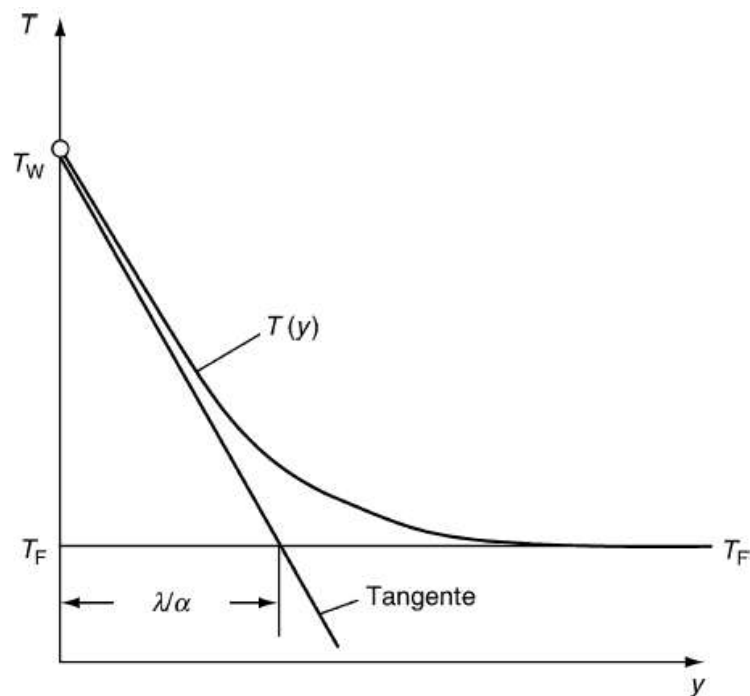


Abbildung 2-2: Darstellung der Dicke der thermischen Grenzschicht [6]

Grundsätzlich lassen sich zwei Arten der Konvektion unterscheiden, die freie und die erzwungene Konvektion. Der freien Konvektion liegt ein Dichteunterschied in einem Schwerfeld zugrunde, das eine Strömung des Fluids hervorruft. Diese Dichteunterschiede entstehen im Allgemeinen durch Temperaturunterschiede, die wiederum im Schwerfeld der Erde Auftriebskräfte hervorrufen. Bei Gemischen von Fluiden können solche Dichteunterschiede auch durch Konzentrationsgradienten ausgelöst werden. Erzwungene Konvektion ruft eine Fluidströmung durch äußere Krafteinwirkungen hervor, beispielsweise durch die Druckerhöhung einer Pumpe oder durch einen Ventilator. [6] [9]

Um konvektive Vorgänge darstellen zu können, sind diverse dimensionslose Kennzahlen notwendig. Die Darstellung des Wärmeübergangskoeffizienten α in dimensionsloser Form erfolgt durch die Nusselt-Zahl, **Gleichung (2-8)**. [6]

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (2-8)$$

L beschreibt hierbei die charakteristische Länge des betrachteten Wärmeübergangs, und λ die Wärmeleitfähigkeit des Fluids. α ist der Wärmeübergangskoeffizient. Dieser hängt von Geometrie und Oberflächenrauigkeit der Wand, temperaturabhängigen Stoffwerten des Fluids sowie Prozessparametern der Strömung (z.B. Turbulenzgrad, Geschwindigkeit, Ausrichtung der Strömung relativ zur Wand, Temperatur, ...) ab. Eine weitere wichtige dimensionslose Kennzahl zur Bestimmung des konvektiven Wärmeübergangs ist die Reynoldszahl,

Gleichung (2-9). Durch diese wird das Verhältnis der Trägheitskräfte zu den Reibungskräften in der Strömung dargestellt. Sie ist für die Charakterisierung einer erzwungenen Strömung maßgeblich. [6] [9]

$$Re = \frac{wL}{\nu} \quad (2-9)$$

Dabei ist L die charakteristische Länge des betrachteten Wärmeübergangsproblems, w die charakteristische Strömungsgeschwindigkeit und ν die kinematische Viskosität des Fluids. Weitere wichtige dimensionslose Kennzahlen sind die Grashof-Zahl, die die Strömungscharakteristik bei freier Konvektion beschreibt oder die Prandtl-Zahl, die aufzeigt, dass der konvektive Wärmeübergang vom Verhältnis der kinematischen Viskosität des Fluids zu seiner Temperaturleitfähigkeit abhängt. [6]

Das *Zweifilmmodell* beschreibt den Dampf-flüssig- / Gas-flüssig- Stoffdurchgang. Es wird die Annahme getroffen, dass stagnierende Fluidfilme an beiden Seiten der Phasengrenzflächen existieren, die für den gesamten Stoffübergangswiderstand verantwortlich sind. Zudem kommt es zur Annahme, dass das Phasengleichgewicht an der Phasengrenzfläche eingestellt wird. Der Stofftransport durch die Filme findet mittels molekularer Diffusion statt und kann über das erste *Fick'sche Gesetz* beschrieben werden, **Gleichung (2-10).** [11]

$$J_j = \frac{D_j}{\delta} * \Delta C_j = \frac{D_j}{\delta} * (C_j^* - C_{j0}) \quad (2-10)$$

Bei D_j handelt es sich um den molaren Diffusionskoeffizienten, der in $[m^2/s]$ angegeben wird. δ ist die effektive Filmdicke in $[m]$ und ΔC_j die Konzentrationsdifferenz zwischen der Kernphase (C_{j0}) und der Phasengrenzfläche (C_j^*) in $[mol/m^3]$. Dadurch, dass keine Unstetigkeiten, wie ein stagnierender Film mit einer gleichmäßigen Dicke, an den Grenzflächen gebildet werden, ist das Zweifilmmodell unrealistisch. Sein Vorteil besteht jedoch darin, dass es zwar sehr einfach ist, aber dennoch vergleichbare Ergebnisse, beispielsweise komplexere bzw. realistischere physikalische Modelle, liefert. [11]

2.1.3 Wärmestrahlung

Ein Körper gibt Energie nicht nur direkt, sondern auch in Form elektromagnetischer Wellen an seine Umgebung ab. Dies geschieht schon allein aufgrund der positiven thermodynamischen Temperatur des Körpers. Bezeichnet wird diese Strahlung als *Wärmestrahlung* bzw. *Temperaturstrahlung*. Je größer die Temperatur des Körpers ist, desto größer ist auch die Strahlung. Diese Art des Energietransports ist - anders als bei

Wärmeleitung oder Konvektion - nicht an ein Medium gebunden, da eine Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auch im Vakuum erfolgen kann. Sobald diese Wellen auf Materie treffen, absorbiert diese einen Teil der transportierten Energie. Die restliche Energie wird reflektiert oder durchgelassen. Für den absorbierten Teil der Strahlungsenergie erfolgt die Umwandlung in die innere Energie des Körpers. [6] [7]

Ein Körper, von dem die maximale Strahlung ausgeht, wird als *Schwarzer Strahler* bezeichnet, das bedeutet, dass von der Oberfläche des Körpers eine maximale Energiestromdichte in Höhe des *Gesetzes von Stefan Boltzmann* emittiert werden kann, **Gleichung (2-11)**. Generell gibt dieses Gesetz die Gesamtstrahlung wieder, die von einem schwarzen Körper je Flächeneinheit emittiert werden kann. Dieser Körper lässt sich näherungsweise realisieren, indem eine Oberfläche beispielweise mit Ruß geschwärzt wird oder auch durch einen Hohlraum, dessen Wände überall dieselbe Temperatur aufweisen und der eine kleine Öffnung zum Austritt der Strahlung hat. [9] [6]

$$\dot{q}_s = \dot{e}_s = \sigma T^4 \quad (2-11)$$

\dot{e}_s ist die Energiestromdichte bzw. Emission eines schwarzen Körpers, die bei Wärmetransportvorgängen mit der Wärmestromdichte \dot{q}_s gleichzusetzen ist, mit der ein solcher Körper Wärme an seine Umgebung abgibt. σ bezeichnet die *Stefan-Boltzmann-Konstante*, sie beträgt $\sigma = 5,67 * 10^{-8} W/(m^2 K^4)$. T ist die thermodynamische Temperatur des strahlenden Körpers. Nur von dieser hängt die Emission \dot{e}_s ab. [6] [7] [9]

Das *Planck'sche Strahlungsgesetz* weist nach, dass die in den Halbraum emittierte spektrale flächenspezifische Ausstrahlung M_λ^s eines schwarzen Körpers nur von der Wellenlänge und der absoluten Temperatur des Körpers abhängt. Die Gleichung von Max Planck berechnet sich demnach wie folgt, **Gleichung (2-12)**. [12]

$$M_\lambda^s(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda * T}\right) - 1 \right]} \quad (2-12)$$

Die Einheit von M_λ^s ist $\frac{W}{m^2 * \mu m}$. Die beiden Konstanten c_1 und c_2 sind auf fundamentale Naturkonstanten zurückzuführen und ergeben sich wie folgt aus **Gleichung (2-13)** und **Gleichung (2-14)**. [12]

$$c_1 = 2\pi c_0^2 h = 3,7417708 * 10^8 \frac{W}{m^2} * \mu m^4 \quad (2-13)$$

$$c_2 = \frac{c_0 h}{k} = 14387,75 \mu m K \quad (2-14)$$

In den obigen Gleichungen ist c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum in m/s , h die *Planckkonstante* bzw. das *Planck'sche Wirkungsquantum* in $J\cdot s$ und k die *Boltzmann Konstante* in J/K . [12]

Die Strahlung realer Körper weicht jedoch von jener eines schwarzen Strahlers ab. Hierfür wird das Gesetz von Stefan Boltzmann in **Gleichung (2-15)** um eine Variable ε erweitert, die den Emissionsgrad darstellt. [6]

$$\dot{e}_s = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2-15)$$

Es gilt für reale Körper $0 \leq \varepsilon \leq 1$, wobei ε vom Material des Körpers und von dessen Oberflächenbeschaffenheit abhängt. Der Emissionsgrad kann außerdem eine Funktion der Strahlungsrichtung, der Temperatur und des Wellenlängenspektrums der Strahlung sein. Bei guter Näherung kann jedoch von der Annahme ausgegangen werden, dass $\varepsilon \approx 1$. Dies gilt für Körper, die als *Graue Strahler* bezeichnet werden. [6]

2.2 Wärmetransport in Schüttgütern

Die Berechnung des Stoff- und Energietransports in porösen Feststoffen bzw. zwischen der Oberfläche des Feststoffs und seiner Umgebung ist in der Verfahrenstechnik von großer Bedeutung, unter anderem bei der Trocknung, der Pyrolyse und der Vergasung fester Brennstoffe. Dieses Kapitel dient dazu, einen Überblick über die verschiedenen Ansätze der Modellierung von Energieströmen am Einzelpartikel zu erhalten.

Bei der Beschreibung des Energietransports in porösen Feststoffen bzw. zwischen der Oberfläche des Feststoffs und seiner Umgebung ist bei den verschiedenen Partikelmodellen kaum eine grundlegende Unterscheidung möglich. Hinsichtlich der Berechnung des Wärmeübergangs zwischen der Partikeloberfläche und der Umgebung wird meist nicht nur die Konvektion, sondern auch die Wärmestrahlung berücksichtigt. Die Energiebilanz für das Partikelinnere erfolgt mittels Wärmeleitung und Wärmetransport durch auftretende Stoffströmungen. Dabei kann der kinetische Anteil des Energieanteils der Stoffströme gegenüber ihrem Wärmeinhalt vernachlässigt werden. Grundsätzliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Partikelmodellen lassen sich an der Partikeloberfläche, bei der Berechnung des tatsächlichen konvektiven Wärmeübergangs, feststellen. Obwohl bei der Bilanzierung des Wärmetransports im Partikelinneren der Energieinhalt der Stoffströme berücksichtigt wird, kommt den Stoffströmen in der Strömungsgrenzschicht um das Partikel bei der Berechnung des konvektiven Wärmeübergangs zwischen der Partikeloberfläche und

seiner Umgebung im Allgemeinen eine eher untergeordnete Bedeutung zu. Meist unterscheidet sich jedoch bei thermischen Vorgängen an einem Einzelpartikel die Temperatur von Partikeloberfläche und -umgebung erheblich. Aus diesem Grund wird ein aus dem Partikel austretender Stoffstrom in der Strömungsgrenzschicht auf die Umgebungstemperatur erwärmt bzw. abgekühlt. Dies hat eine Beeinflussung des Temperaturprofils der Grenzschicht und des tatsächlichen konvektiven Wärmeübergangs zur Folge. Besonders bei raschen Pyrolyse- und Trocknungsprozessen treten sehr große Stoffströme (Pyrolyseprodukte und Wasserdampf) an der Feststoffoberfläche auf. Der Einfluss des Stoffstroms N_t kommt zur Anwendung, um die effektive Wärmeübergangszahl α_{eff} mittels Wärmeübergangszahl α aus der Nusselt Beziehung zu bestimmen. Dabei dient cp_g der Berücksichtigung der Wärmekapazität, **Gleichung (2-17):** [13]

$$\alpha_{eff} = \alpha \frac{\frac{N_t * cp_g}{\alpha}}{e^{\left(\frac{N_t * cp_g}{\alpha}\right)} - 1} \quad (2-16)$$

Diese Ableitung basiert auf den Modellvorstellungen der Filmtheorie und auf einer Energiebilanz, die um die Grenzschicht des Partikels angesetzt ist. Es ist allerdings davon auszugehen, dass der Stoffstrom, der an der Partikeloberfläche austritt, auch das Strömungsbild des Partikels in der Grenzschicht stark beeinflusst, weshalb die mit Hilfe der Nusseltbeziehung berechneten Wärmeübergangszahlen α bloß Anhaltswerte sind. Dennoch sind diese Berechnungsmethoden für den konvektiven Wärmeübergang in der Literatur bislang die genauesten. [13]

Für die Berechnung des Wärmetransports in feuchten, porösen Feststoffen ist die Wärmeleitfähigkeit und ihre Abhängigkeit unter anderem vom Feuchtegehalt, von der Porosität und von der Temperatur des Feststoffs von sehr großer Bedeutung. Das kommt daher, dass sehr viele Vorgänge an großen Einzelpartikeln (z.B. Pyrolyse oder Trocknung) wesentlich vom Wärmetransport im Partikel beeinflusst werden. Nichtsdestotrotz erfolgt die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit und ihre Veränderung während eines Vorgangs oft nur mit sehr einfachen und unzureichenden Beziehungen. [13]

Tatsächlich entsteht die Wärmeleitung in einem porösen, feuchten Feststoffsystem (Schüttung oder Partikel) zum größten Teil sowohl im Feststoff als auch in der Flüssigphase des Porensystems, wobei die Wärmeleitfähigkeit der Fest- und Flüssigphase meist etwa um den Faktor 10 höher ist als jene der Gasphase. Da der Feststoff als kontinuierlich angenommen wird, ist es notwendig, bestimmten Volumenelementen des Feststoffs eine bestimmte effektive Wärmeleitfähigkeit zuzuordnen. Bei Feststoffschüttungen kommt es bei der Beschreibung des Wärmetransports sowohl zur Berücksichtigung der Wärmestrahlung als

auch der Wärmeleitung. Die äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{str} lässt sich durch den Vergleich der Beziehungen für den durch Leitung und Strahlung transportierten Wärmestrom ableiten, **Gleichung (2-17)**. [13]

$$\lambda_{str} = 4 \frac{\varepsilon}{2 - \varepsilon} \sigma T^3 d_p \quad (2-17)$$

σ ist in dieser Gleichung die Strahlungskonstante, ε das Emissionsverhältnis, T die Temperatur und d_p die charakteristische Weglänge. Handelt es sich beim Feststoff um einen porösen Feststoff, so ist für die charakteristische Weglänge der gewöhnlich sehr kleine mittlere Porendurchmesser einzusetzen, wodurch der berechnete Wert für den zusätzlichen Strahlungsanteil vernachlässigbar klein wird. [13]

Die Wärmeleitfähigkeit einer porösen Schüttung hängt von zahlreichen Einflussgrößen ab. Diese umfassen folgende Vorgänge [14]:

- Wärmeübertragung durch Strahlung: Die Intensität dieser Art der Wärmeübertragung hängt von den optischen Eigenschaften des Fluids, der Temperatur T , der Partikeloberfläche und von der Größe der Hohlräume bzw. dem Partikeldurchmesser d ab.
- Druckabhängigkeit: Die Wärmeleitfähigkeit eines unendlich ausgedehnten, verdünnten Gases ist laut kinetischer Gastheorie vom Druck abhängig. Wenn das Gas allerdings von festen Oberflächen umschlossen ist, wie das bei Schüttungen der Fall ist, so nimmt die Wärmeleitfähigkeit des Gases mit zunehmendem Druck ab. Das Ausmaß der Druckabnahme hängt vom Partikeldurchmesser d und der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle ab. Dabei besteht ebenfalls ein Zusammenhang zwischen der mittleren freien Weglänge und der Temperatur sowie der Art und den thermodynamischen Eigenschaften des Gases.
- Wärmeübertragung aufgrund abgeflachter Kontakte zwischen den Partikeln: Das Eigengewicht der Schüttung oder auch externe Kräfte können zu einer Abflachung der Partikel um ihre Kontaktstellen führen. Dabei hängt das Ausmaß der Abflachung und die Intensität der Wärmeübertragung mit den mechanischen Eigenschaften der Feststoffe und der Beschaffenheit der Partikeloberfläche zusammen.

2.3 Trocknung von Schüttgütern

Unter Trocknung wird der Entzug von Flüssigkeit aus einem Feststoff verstanden. Sie erfolgt grundlegend in drei Schritten [15]:

1. Wasserverdunstung an der Oberfläche
2. Absinken des Trocknungsspiegels in das Feststoffinnere
3. Molekulare Diffusion des Wassers, das im Feststoff gebunden ist

Dabei ist es wichtig, eine Unterscheidung zwischen Nässe und Feuchte zu definieren. Nässe bezeichnet die Beladung der Nassgutseite (in *kg Wasser / kg Reinluft*) während Feuchte die Feuchtluftseite (in *kg Wasser / kg Reinluft*) beschreibt. Der Trennprozess, der bei der Trocknung stattfindet, kann thermisch oder auch mechanisch (z.B. durch Schleudern und Pressen) erfolgen. Die thermische Trocknung ist dabei die am häufigsten eingesetzte Variante. Hier wird bei porösen Feststoffen die Flüssigkeit (Feuchte) in den gasförmigen Aggregatzustand überführt und somit gleichzeitig vom Feststoff getrennt. [13] [15]

Die Gründe, die für eine Trocknung sprechen, können sein [15]:

- Siebbarkeit: Eine vorherige Trocknung von Sand bzw. Steinen kleiner Korngrößen verhindert eine Verstopfung des Siebes. Dabei sollte die Feuchtigkeit < 5 % sein.
- Haltbarkeit: Die Lebensdauer von beispielsweise Lebensmitteln wird durch eine Trocknung verlängert
- Chemische Reaktionen: Bedingt durch die Feuchtigkeit kann es zu einer Veränderung der Produkte kommen, z.B. verklumpen, abbinden etc.

2.3.1 Bindungsarten der Feuchte am Schüttgut

Wenn eine Flüssigkeit nur mit ihrer eigenen Dampfphase im Gleichgewicht steht, herrscht über ihrer freien, ebenen Oberfläche der von der Temperatur abhängige Sattdampfdruck p^S . Sind die porösen Feststoffe nicht vollständig mit Flüssigkeit beladen, stellt sich das Gleichgewicht zwischen Dampf- und Flüssigphase in den engen Kapillaren und nicht an einer freien, ebenen Oberfläche ein. Daraus resultiert, dass der Gleichgewichtsdampfdruck p^* nicht nur von der Temperatur, sondern auch wesentlich von der Geometrie des Porensystems sowie den Bindungskräften zwischen Feuchte und Feststoffoberfläche abhängig ist. Der Bereich, in dem p^* deutlich geringer als p^S ist, wird als hygroskopischer Feuchtebereich bezeichnet,

während unter Sorption die Bindung der Feuchte verstanden wird. Wasser, das in einem porösen Feststoff gebunden ist, kann vorliegen [13]:

- als Kapillarflüssigkeit
- in absorbierter Form an der inneren und äußeren Partikeloberfläche
- als Haftflüssigkeit an der äußeren Oberfläche
- in dampfförmiger Form im freien Gasraum des Porensystems

Die chemische Adsorption bzw. Feuchtebindung (z.B. Hydrate und Kristallwasser) stellt die stärkste Form der Feuchtebindung durch den Feststoff dar, ist jedoch für die meisten industriellen Trocknungsprozesse von untergeordneter Bedeutung. Der weitaus größte Teil der Feuchte liegt in Form von sehr schwach gebundener Kapillarflüssigkeit im Porensystem des Feststoffs vor. Aufgrund der Oberflächenspannung der Feuchte und der daraus resultierenden Kapillarkraft nimmt jedoch mit kleiner werdendem Porendurchmesser der Dampfdruck der Kapillarflüssigkeit deutlich ab. Aufgrund der starken Überlappung der einzelnen Mechanismen bei der Feuchtebindung ist eine exakte Abgrenzung nur schwer möglich. [13]

2.3.2 Sorptionsisotherme und Bindungsenergie

Sorptionsisothermen beschreiben üblicherweise die Abhängigkeit des Feuchtegehalts des Feststoffs X , in *kg Feuchte / kg trockener Feststoff*, vom Gleichgewichtsdampfdruck bzw. der relativen Feuchtigkeit φ der den Feststoff umgebenden Gasphase bei einer bestimmten Temperatur. Die Bestimmung von Sorptionsisothermen erfolgt experimentell. Die benötigten Parameter sind dabei den Messwerten anzupassen. Es ist zudem von Bedeutung, ob die Isothermen bei der Befeuchtung (Adsorption) oder bei der Trocknung (Desorption) bestimmt werden. Der Unterschied, der sich bei der Messung der Gleichgewichtsfeuchte des Feststoffs bei Adsorption und Desorption ergibt, wird als *Hysterese* bezeichnet. Dabei liegt dieser Wert bei der Adsorption meist etwas unter jenem der Desorption. Je nach Art der Bindung der Feuchte an den Feststoff stellen Sorptionsisothermen typische Formen bzw. Abschnitte dar, mit deren Hilfe Aussagen über die Wechselwirkung der Feuchte mit dem Feststoff getroffen werden können. [13]

2.4 Pyrolyse

In diesem Kapitel wird speziell auf die Pyrolyse großer Brennstoffpartikel bzw. Biomasse eingegangen und die wichtigsten Mechanismen sowie die in der Literatur bekannten Ansätze zu deren Beschreibung behandelt. Wie bei der Trocknung und der Vergasung handelt es sich auch bei der Pyrolyse um das Problem des Stoff- und Energietransports in porösen Feststoffen bzw. zwischen der Oberfläche des Feststoffs und seiner Umgebung, zusätzlich zu dem Phänomen der chemischen Reaktionen bzw. des Phasenwechsels. Bei der Pyrolyse und auch der thermischen Zersetzung eines Feststoffes, erfolgt der Phasenwechsel vom Feststoff zur Gasphase. Die Erwärmung des Feststoffs, wie beispielsweise Holz oder Kohle, auf Temperaturen zwischen 200 °C und 350 °C sorgt für die Zersetzung organischer Substanzen, wobei flüchtige wasserstoff- und sauerstoffreiche Kohlenstoffverbindungen abgespalten werden. Dadurch nimmt der Kohlenstoffgehalt des verbleibenden Feststoffes zu. Die flüchtigen Komponenten sind charakterisiert durch einen kondensierbaren Teeranteil mit hohem mittleren Molekulargewicht und einer nicht kondensierbaren Gasfraktion (CO₂, CO, CH₄, H₂, ...). [13]

Bei der Erwärmung des Bodens mittels einer festen Wärmequelle, kommt es in deren Umgebung zunächst zur Verdampfung von Porenwasser und Schadstoffen. Diese strömen mit der Bodenluft entlang des sich von der Wärmequelle zur kälteren Umgebung hin ausbreitenden Temperaturgradienten. Energie in Form von Verdampfungsenthalpie wird zusammen mit dem Gasstrom transportiert und bei Kondensation in den kühleren Randbereichen wieder frei. Dies bewirkt eine schnelle Aufheizung des Bodenkörpers. In bindigen Böden wird zeitgleich durch Kapillarkräfte Wasser aus den kälteren, feuchten Randbereichen in Flüssigphase entgegen den Temperaturgradienten in den heißen Bereich transportiert und hier erneut verdampft. Dort wo diese Zirkulationsströmung herrscht, überwiegt durch die Strömung der Flüssig- und Gasphase der konvektive Wärmetransport, während in anderen Bereichen Konduktion herrscht. Die anfänglich schnelle Abnahme der Sättigung der Flüssigphase bewirkt eine Erhöhung der Gasdurchlässigkeit. Erst wenn eine vollständige Trocknung des Porenraums erreicht ist, kann ein Anstieg der Temperatur auf > 100 °C erfolgen, was eine Verdampfung von schwerflüchtigen Bestandteilen mit sich bringt. [4]

2.5 Durchströmung von Schüttgütern

Die vielfältigen Anwendungen, wie Reaktionen im Festbettreaktor, tertiäre Erdölförderung oder Trocknungsprozesse sorgen für eine große Bedeutung von Mehrphasenströmungen durch poröse Medien auf dem Gebiet der Verfahrenstechnik. Um strömungsmechanische Vorgänge zu charakterisieren und Maßnahmen für die Prozessintensivierung zu ermöglichen, ist eine detaillierte Beschreibung mehrphasiger Durchströmungen kompressibler und heterogener poröser Medien notwendig. [16]

Die Klassifikation als Mehrphasensystem kommt bei der Beschreibung von Böden zum Tragen, die aus festen Teilchen sowie einer gasförmigen und einer flüssigen Phase bestehen. Die gasförmige Phase stellt die zwischen den Teilchen vorhandene Bodenluft dar, während die flüssige Phase aus dem vorliegenden Wasser besteht. Böden, die unterhalb des Grundwasserspiegels liegen, weisen in der Regel nur zwei Phasen auf, flüssig und fest, da die Hohlräume zwischen den festen Teilchen komplett mit Wasser gesättigt sind. [17]

2.5.1 Einphasige Strömungen in Schüttungen

Die Grundlage für die Formulierung von Impulsbilanzen bildet das *Darcy Gesetz*, das auf experimentellen Untersuchungen der Durchströmung einer homogenen Sandschüttung mit Wasser beruht. Dabei lässt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Ausströmgeschwindigkeit w bezogen auf den Leerrohrquerschnitt und dem Druckabfall $\partial p/\partial x$ beobachten, siehe **Gleichung (2-19)**. [16]

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} w \quad (2-18)$$

Mit dieser Gleichung zeigt Darcy auf, dass für laminare Strömungen ($Re < 3$) der Druckabfall proportional zur Ausströmgeschwindigkeit w des Fluids ist und nur von der Permeabilität K sowie der dynamischen Viskosität μ abhängt. Die Ausströmgeschwindigkeit eines Fluids ist durch den Volumenstrom bezogen auf den gesamten Querschnitt der Schüttung definiert. Daher ist die Ausströmgeschwindigkeit immer geringer als die tatsächliche Geschwindigkeit des Fluids. Die Permeabilität berücksichtigt die Querschnittsverengung und die Verlängerung des Strömungswegs für das strömende Fluid und beschreibt außerdem die Durchlässigkeit des porösen Mediums für dieses Fluid aufgrund seiner geometrischen Eigenschaften. [18]

Da das Darcy Gesetz nur für langsame Strömungen angewendet werden kann, bei denen die Reibungskräfte dominieren, kommt für höhere Strömungsgeschwindigkeiten, bei denen die

Trägheitseinflüsse nicht vernachlässigt werden können, die Ergänzung durch *Ergun* zum Tragen, siehe **Gleichung (2-20)**. In dieser Formel wird ein quadratischer Geschwindigkeitsterm hinzugefügt, der den Einfluss der Trägheitskräfte auf den Druckabfall berücksichtigt. [16] [18]

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\mu}{K} w + \frac{\rho}{\eta} w^2 \quad (2-19)$$

Der Geschwindigkeitsterm ergänzt die Gleichung von Darcy um die Passabilität η und die Dichte ρ . K und η hängen ausschließlich von der Porosität, der Poren- oder Partikelgrößenverteilung sowie der Oberfläche und der Form der Partikel ab. [16]

Die einphasige Darcy- bzw. Ergun-Gleichung gilt für die Bestimmung des Druckabfalls als sehr zuverlässig und findet in der chemischen Verfahrenstechnik eine breite Anwendung. Das führt zu einer guten Anpassung von Permeabilität und Passabilität an unterschiedliche Versuchsbedingungen. Zur Berechnung dieser beiden Parameter werden **Gleichung (2-20)** und **Gleichung (2-21)** herangezogen. [18]

$$K = \frac{d_p^2 \varepsilon^3}{C_1 (1 - \varepsilon)^2} \quad (2-20)$$

$$\eta = \frac{d_p \varepsilon^3}{1,75(1 - \varepsilon)} \quad (2-21)$$

Bei d_p und ε handelt es sich um geometrische Eigenschaften der Schüttung. C_1 ist der Kozeny-Karman-Parameter, für den bei Kugelschüttungen ein Wert zwischen 150 und 180 verwendet wird. [18]

2.5.2 Mehrphasige Strömungen in Schüttungen

Von einer Mehrphasenströmung wird gesprochen, wenn mehrere fluide Phasen im Haufenwerk vorliegen, die sich das für die Durchströmung zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen teilen müssen. Dabei beeinflussen sich diese Phasen gegenseitig, was zu Wechselwirkungen an den Phasengrenzflächen führt. Aus diesem Grund kommt es zur Einführung der effektiven Kenngrößen $K_{eff,i}$ und $\eta_{eff,i}$ in der Impulsbilanz, die den zusätzlichen Druckverlust berücksichtigen, siehe **Gleichung (2-22)** und **(2-23)**. [16]

$$K_{eff,i} = K k_{rel,i} \quad (2-22)$$

$$\eta_{eff,i} = \eta \eta_{rel,i} \quad (2-23)$$

In diesen beiden Gleichungen sind die relative Permeabilität $k_{rel,i}$ und die relative Passabilität $\eta_{rel,i}$ enthalten, die beide im Wesentlichen von der Verteilung der fluiden Phasen im Hauptwerk, den Oberflächenspannungen, den Benetzungswinkeln und den Verhältnissen der fluiden Dichten abhängen [16]. Die beiden relativen Größen berücksichtigen den Einfluss der zusätzlichen Phase gegenüber der Einphasenströmung, der durch die Querschnittsverengung sowie die Verwindung der Strömungspfade hervorgerufen wird. Die Berechnung des maximal abführbaren Wärmestroms aus der Schüttung hängt im Wesentlichen von der Wahl der relativen Permeabilität und der der relativen Passabilität ab. [18]

3 Charakterisierung des Bodens

Dieses Kapitel dient dazu, einen Überblick über die wichtigsten Parameter der verwendeten Bodenprobe, die aus Erdaushub besteht, zu erhalten. Zu Beginn der Versuchsreihe erfolgt die Bestimmung folgender Größen:

- Feuchtegehalt
- Organischer Anteil
- Wärmeleitfähigkeit
- Korngrößenverteilung
- Druckverlust durch die Probe

Diese Versuche finden mit kleineren Referenzmengen der Proben im Labor des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik statt. Hierfür werden jeweils drei Kübel mit ungefähr einem Kilogramm Probe aus einem der Bigbags entnommen, gewägt, gesiebt, getrocknet und im Ofen von organischen Bestandteilen befreit. Der Versuchsablauf sieht zu Beginn vor, dass zur Bestimmung des Volumens von jeder Probe 1000 g entnommen und in einen Maßkolben gefüllt werden. Anschließend erfolgt die Ermittlung von Wärmestrom und Temperaturdifferenz jeder Probe mittels Heizplatte. Diese beiden Werte, die digital erfasst werden, ermöglichen dann die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit. Nach diesem Versuch findet die Siebung jeder Probe, zur Bestimmung der Korngrößenverteilung, statt. Die einzelnen Kornklassen jeder Probe werden anschließend wieder separat zusammengemischt und über Nacht in den Trockenschrank gegeben. Die Entnahme der Proben und deren Auskühlung erfolgt am nächsten Tag und der Ablauf beginnt von neuem. Nach Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit sowie der Siebung kommt es zur Eingabe der Proben in den Muffelöfen, wo die organischen

Bestandteile entfernt werden sollen. Nach der Entnahme der Proben beginnt der Versuchsablauf von vorne und ist nach Erledigung des letzten Siebdurchgangs beendet, so dass die Auswertung der Daten erfolgen kann.

3.1 Feuchtegehalt

Die Bestimmung der Feuchte der Proben erfolgt, indem der prozentuale Massenverlust nach der 24 stündigen Trocknung bei 115 °C im Trockenschrank bestimmt wird. Dieser Versuchsablauf wiederholt sich für alle drei Proben, wobei zusätzlich über die Bestimmung des Volumens eine Ermittlung der Dichte erfolgt. Es ergeben sich folgende, in **Tabelle 3-1** ersichtliche Werte:

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung von feuchter und trockener Probe

	m [g]	V [l]	ρ [g/l]
Probe 1 feucht	1000,4	0,9	1111,56
Probe 1 trocken	822,4	0,8	1028,00
Feuchtegehalt		21,6 [%]	
Probe 2 feucht	1000,1	0,9	1111,22
Probe 2 trocken	825,6	0,8	1032,00
Feuchtegehalt		21,2 [%]	
Probe 3 feucht	1000,3	0,9	1111,44
Probe 3 trocken	825,1	0,76	1085,66
Feuchtegehalt		21,2 [%]	
Durchschnittlicher Feuchtegehalt		21,3 [%]	

Die Berechnung der Dichte ρ , **Gleichung (3-1)**, und des Feuchtegehalts X , **Gleichung (3-2)**, in % ergeben sich wie folgt:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3-1)$$

$$X = \frac{m_{ft} - m_{tr}}{m_{tr}} * 100 \quad (3-2)$$

m_{ft} ist die Masse der feuchten Probe, m_{tr} die der trockenen Probe, beide jeweils in g.

3.2 Organischer Anteil

Um den organischen Anteil des Bodens zu ermitteln, werden die getrockneten Proben bei 650 °C für 24 Stunden in einen Muffelofen gegeben, siehe **Abbildung 3-1**. Während dieser Zeit kommt es zum Verbrennen der organischen Bestandteile.



Abbildung 3-1: Bodenproben im Muffelofen zur Verbrennung der organischen Bestandteile

Bei diesem Versuch kann ein durchschnittlicher Anteil von 5,2 % an organischem Material bezogen auf die getrocknete Probe festgestellt werden. Dieser Wert resultiert aus dem Durchschnitt von drei Versuchen mit drei Proben.

Insgesamt ergibt sich ein durchschnittlicher Masseverlust von 21,8 % bezogen auf die ursprüngliche feuchte Probe. In **Tabelle 3-2** sind die Rohdaten der Versuche dargestellt. **Gleichungen (3-3)** und **(3-4)** bieten die Grundlage für die Berechnung der Massenverluste

bezogen auf die feuchte (Y_{ft}) und die trockene Probe (Y_{tr}). m_{br} ist die Masse der Probe nach Eingabe in den Muffelofen. Für die Berechnungen sind erneut die Trockenmassen und die feuchten Massen der jeweiligen Proben vonnöten, welche in **Tabelle 3-1** im vorherigen Kapitel (3.1 Feuchtegehalt) aufgelistet sind.

Tabelle 3-2: Rohdaten der gebrannten Proben

	m [g]	Massenverlust ft.	Massenverlust tr.
Probe 1	781,4	21,9 [%]	5,0 [%]
Probe 2	781,5	21,9 [%]	5,3 [%]
Probe 3	782,4	21,8 [%]	5,2 [%]

$$Y_{ft} = 1 - \frac{m_{br}}{m_{ft}} * 100 \quad (3-3)$$

$$Y_{tr} = 1 - \frac{m_{br}}{m_{tr}} * 100 \quad (3-4)$$

3.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt, indem die Proben (feucht, trocken und verbrannt) auf eine Heizplatte gegeben werden, deren Temperatur bei 40 °C liegt. Sobald die Heizplatte die Endtemperatur erreicht, wird ein Thermoelement mit Klebeband an dieser befestigt. Um die Probe in einer stabilen Form zu halten, ist die Benutzung eines Metallrings, der als Halterung dient, notwendig. Das zweite Thermoelement wird ebenfalls durch Klebeband an einer Metallplatte befestigt, die auf die Bodenprobe im Ring gelegt wird. Auf dieser Platte erfolgt zudem die Befestigung der Messvorrichtung für die Wärmestrombestimmung. In **Abbildung 3-2** ist der prinzipielle Aufbau dieses Versuches dargestellt, in **Abbildung 3-3** der tatsächliche Versuchsaufbau. Eingezeichnet sind hier die beiden Temperaturen T_1 und T_2 sowie die Wärmestromdichte \dot{q} .

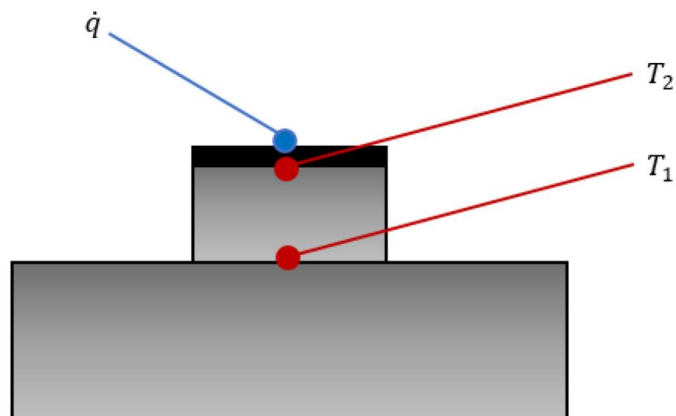


Abbildung 3-2: Prinzipieller Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Schematisch dargestellt ist die Heizplatte ganz unten, darauf die Probe, oben befindet sich die Metallplatte.



Abbildung 3-3: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit. Zu sehen ist am ersten Bild die Probe im Metallring mit aufliegender Metallplatte, die anderen beiden Bilder zeigen die Isolierung des Mantels mit Dämmwolle. [19]

Zunächst wird die Bodenprobe in den auf der Heizplatte aufliegenden Metallring gefüllt und mit der Metallplatte, an der Thermoelement und Messvorrichtung befestigt sind, bedeckt. Für die Messung erfolgt anschließend eine Notierung der Temperatur in regelmäßigen 1-2 Minutenabständen, jeweils eine halbe Stunde lang. Nach dieser Zeit stellt sich ein überwiegend stationärer Wert der Temperaturdifferenz ein. Sie bleibt also über mehr als eine Minute konstant und ändert sich nicht mehr. Die Temperaturen und der Wärmestrom nach einer halben Stunde werden für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit λ in W/mK verwendet.

Diese wird nach **Gleichung (3-5)** berechnet, wobei H die Schütthöhe der Proben in m ist, T_1 die Temperatur direkt an der Heizplatte, T_2 die Temperatur an der Oberseite der Probe (beide jeweils in $^{\circ}C$) und \dot{q} die Wärmestromdichte in W/m^2 .

$$\lambda = \dot{q} * H \frac{1}{T_1 - T_2} \quad (3-5)$$

Um das Verhalten der Wärmeleitfähigkeit bei steigenden Temperaturen beobachten zu können, kommt es zu einer Erhöhung der Heizplattentemperatur auf $200^{\circ}C$. Es erfolgt eine erneute Versuchsdurchführung für die trockene und die verbrannte Probe bei dieser Temperatur. Da hier eine höhere Temperaturdifferenz vorliegt und somit die Durchwärmung des Materials mehr Zeit benötigt, wird die Messung für 60 Minuten durchgeführt. **Tabelle 3-3** stellt die ermittelten Werte sowie die berechnete Wärmeleitfähigkeit einander gegenüber.

Tabelle 3-3: Daten zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

	T_1 [°C]	T_2 [°C]	h [m]	\dot{q} [W/(m ²)]	λ [W/(mK)]
Feuchte Proben					
Probe 1	36,1	23,9	0,060	12,5	0,061
Probe 2	32,8	21,9	0,060	14,2	0,078
Probe 3	33,9	21,8	0,060	10,4	0,052
Trockene Proben					
Probe 1	37,4	25,8	0,045	14,9	0,058
Probe 2	37,4	24,7	0,045	8,4	0,030
Probe 3	37,6	25,4	0,045	8,3	0,031
Gebrannte Proben					
Probe 1	37,5	23	0,045	13,5	0,042
Probe 2	37,7	24,3	0,045	10	0,034
Probe 3	37,1	24,4	0,045	1,7	0,006
Versuch mit trockener Probe bei 200°C Heizplattentemperatur					
Probe 1	196,8	39,6	0,045	354	0,100
Versuch mit gebrannter Probe bei 200°C Heizplattentemperatur					
Probe 1	194,6	62,7	0,045	445,6	0,150

In **Abbildung 3-4** ist die grafische Auswertung der Daten zu sehen.

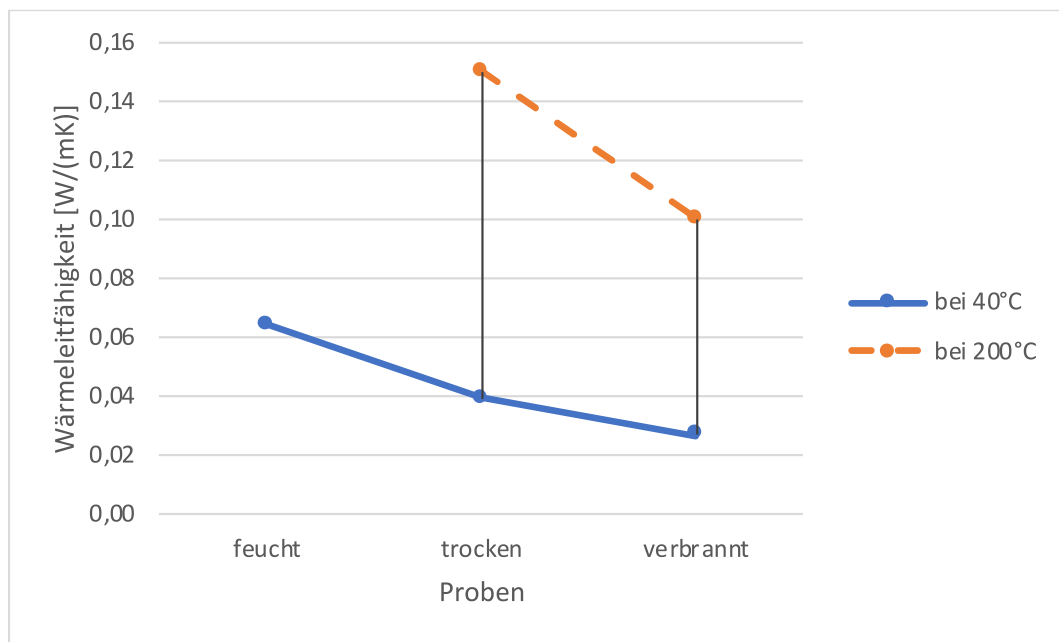


Abbildung 3-4: Ergebnisse zur Messung der Wärmeleitfähigkeit. Die strichlierte Linie in der Abbildung stellt die Versuchsdurchführung bei einer Heizplattentemperatur von 200 °C dar, während die durchgehende Linie den Versuch bei 40 °C abbildet.

3.4 Korngrößenverteilung

Um eine qualitative Aussage über die Bodenproben gewährleisten zu können, ist eine Bestimmung der Korngrößenverteilung notwendig. Dazu erfolgt die Siebung der Proben mit einem Siebturm, der die folgenden Korngrößenabstufungen für jede Probe von oben nach unten aufweist, **Tabelle 3-4:**

Tabelle 3-4: Verteilung der Probenanteile auf die einzelnen Korngrößen

KG [mm]	< 0,25	0,25	0,5	1,0	2,0	3,15	4	6,3
Feuchte Proben								
Probe 1 [g]	2,1	42,7	115,3	115,1	73,3	38,4	63,8	30,3
Probe 2 [g]	11,2	70,3	82,9	107,7	79,3	36,4	54,0	32,5
Probe 3 [g]	23,0	62,6	79,3	106,8	77,4	39,5	54,2	28,6
Trockene Proben								
Probe 1 [g]	34,4	46,6	66,7	94,6	66,8	31,7	48,7	22,7
Probe 2 [g]	36,5	49,3	66,5	90,9	68,5	30,0	42,6	27,0
Probe 3 [g]	41,9	49,2	64,5	91,3	67,3	31,5	44,7	21,4
Gebrannte Proben								
Probe 1 [g]	195,8	116,4	151,9	158,1	79,7	22,1	31,4	24,4
Probe 2 [g]	200,4	114,4	139,5	160,9	86,6	23,6	36,7	17,3
Probe 3 [g]	205,9	123,4	142,3	152,7	80,5	24,0	31,4	18,0

Mithilfe der gewägten Massen auf den jeweiligen Sieben ist es möglich, den Massenanteil M_i und in weiterer Folge den Durchgang D_i und den Rückstand R_i zu bestimmen. Die Bestimmung erfolgt nach **Gleichung (3-6)**, **(3-7)** und **(3-8)**.

$$M_i = \frac{m_i}{m_{ges}} \quad (3-6)$$

$$D_i = M_i + D_{i,n-1} \quad (3-7)$$

$$R_i = 1 - D_i \quad (3-8)$$

Mithilfe dieser Gleichungen kann eine grafische Auswertung erstellt werden, welche anhand von Probe 1 beispielhaft in **Abbildung 3-5** zu sehen ist. In dieser Abbildung sind sowohl der Durchgang als auch der Rückstand und die Kennzeichnung der mittleren Korngröße zu sehen. Der Rückstand ist der Anteil der Probe, der auf dem jeweiligen Sieb verblieben ist, während der Durchgang der Anteil ist, der das jeweilige Sieb passiert hat. Für die feuchten Proben liegt die mittlere Korngröße bei 1,9 mm. Dies geht aus dem Mittelwert aus drei Versuchen hervor.

Ebenfalls für Probe 1 ist die Bestimmung der genannten Daten in **Tabelle 3-5** abgebildet.

Tabelle 3-5: Bestimmung von Massenanteil, Durchgang und Rückstand für Probe 1, feucht

KG [mm]	< 0,25	0,25	0,5	1,0	2,0	3,15	4	6,3
M_i [/]	0,004	0,089	0,240	0,239	0,152	0,080	0,133	0,063
D_i [/]	0,004	0,093	0,333	0,572	0,725	0,804	0,937	1,000
R_i [/]	0,996	0,907	0,667	0,428	0,275	0,196	0,063	0,000

Der Versuch läuft ab, indem zunächst jede Probe für zehn Minuten mittels Rüttelpult gesiebt wird. Anschließend kommt es zur Nachsiebung der einzelnen Fraktionen per Hand und zur Wägung jeder Fraktion. Durch die so erhaltenen Daten lässt sich die Korngrößenverteilung ermitteln, die mit Hilfe von Microsoft Excel grafisch dargestellt werden kann. Dieser Vorgang wird für jede Probe wiederholt. Danach werden die Ergebnisse verglichen und der mittlere Korngrößendurchmesser aus den drei Proben für die jeweiligen Zustände (feucht, trocken und verbrannt) bestimmt.

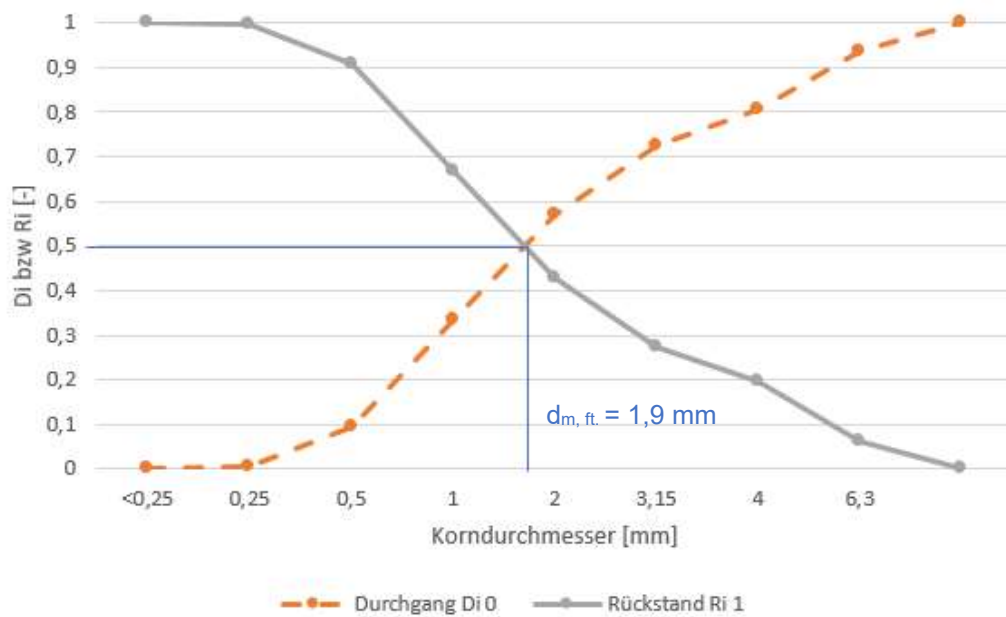


Abbildung 3-5: Sieblinie von Probe 1, feucht. Die durchgängige Linie stellt hier den Rückstand dar, die strichlierte Linie bildet den Durchgang ab. Der mittlere Korndurchmesser ist durch die blaue Linie gekennzeichnet

Für die trockenen und die verbrannten Proben wird dieser Versuch in derselben Reihenfolge wiederholt. Hierbei ergeben sich mittlere Korngrößen von 1,8 mm (trocken) bzw. 1,1 mm (verbrannt), siehe **Abbildung 3-6** bzw. **Abbildung 3-7**.

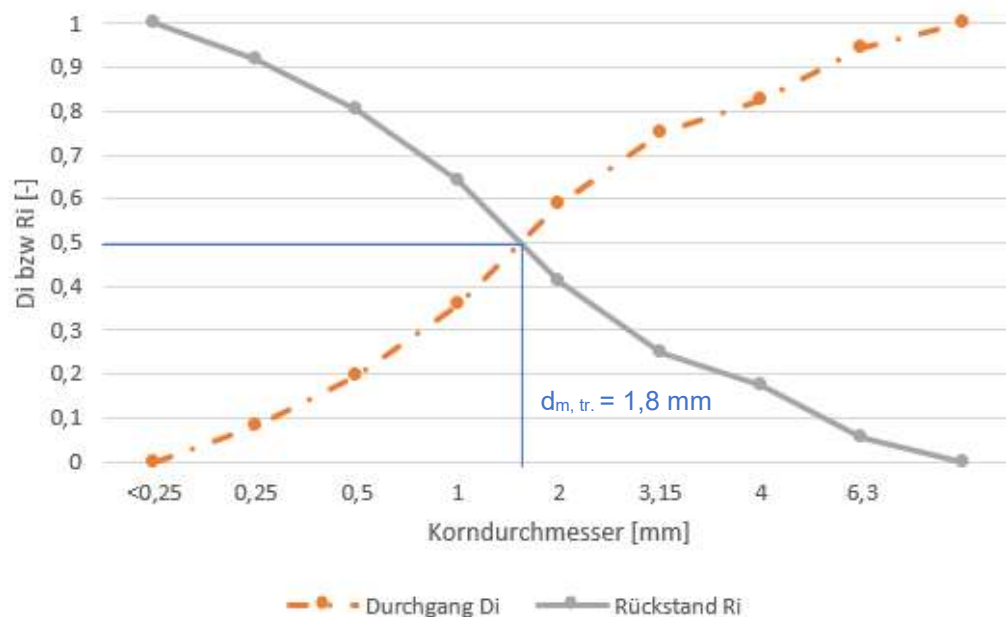


Abbildung 3-6: Sieblinie von Probe 1, trocken. Die dargestellten Linien (strichliert und grau) zeigen Durchgang und Rückstand sowie die mittlere Korngröße (in blau) der Probe an.

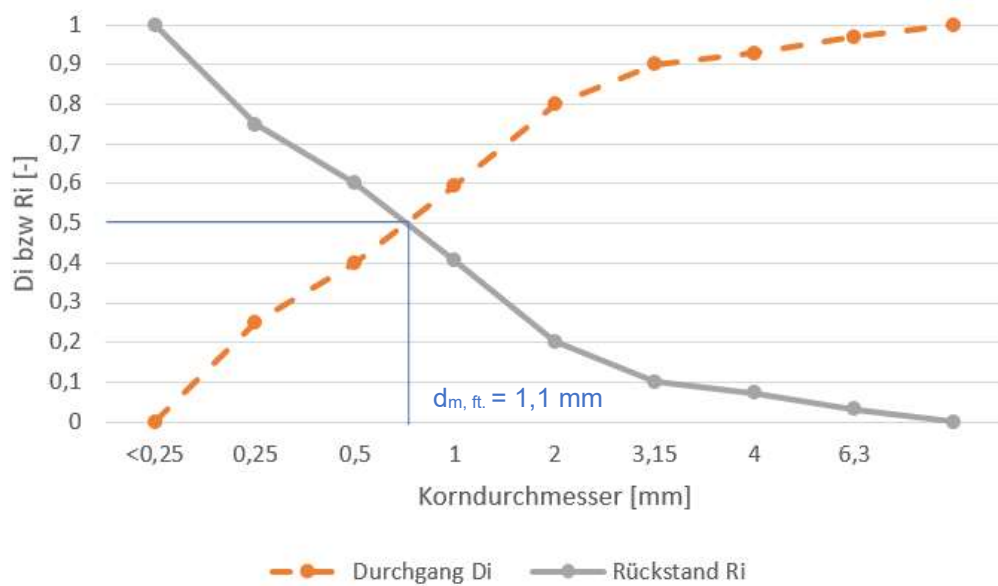


Abbildung 3-7: Sieblinie von Probe 1, gebrannt. Die dargestellten Linien (strichliert und grau) zeigen Durchgang und Rückstand sowie die mittlere Korngröße (in blau) der Probe an.

Wie in den drei oberen Abbildungen erkennbar, nimmt die mittlere Korngröße nach jeder Versuchsstufe ab, so dass in der verbrannten Probe letztendlich ein erhöhter Sandanteil vorhanden ist. Als Vergleich hierfür dienen die nachfolgenden Grafiken, **Abbildung 3-8** und **Abbildung 3-9**.



Abbildung 3-8: Probe vor der Trocknung



Abbildung 3-9: Probe nach Herausnahme aus dem Muffelofen bei 650 °C

3.5 Druckverlust

Die Bestimmung des Druckverlusts durch die Probe findet mittels Füllrohr statt. Dafür wird eine bestimmte Menge der Probe auf den Siebboden in ein Rohr gegeben, das einen Durchmesser von 530 mm besitzt. Unterhalb dieses Siebbodens erfolgt die Zufuhr von Druckluft. Diese kann über eine Dreiharmatur geregelt und mittels Durchflussmessgerät abgelesen werden. Zudem gibt es unterhalb dieses Siebbodens eine Druckmessstelle. Die zweite Druckmessstelle befindet sich oberhalb der Probe. Auf einem Messgerät wird die Druckdifferenz des jeweiligen Volumenstroms angezeigt, die händisch notiert wird. In **Abbildung 3-10** ist dieser Aufbau dargestellt. Für das Erlangen der Daten werden möglichst viele Messpunkte für einen steigenden Volumenstrom erfasst.

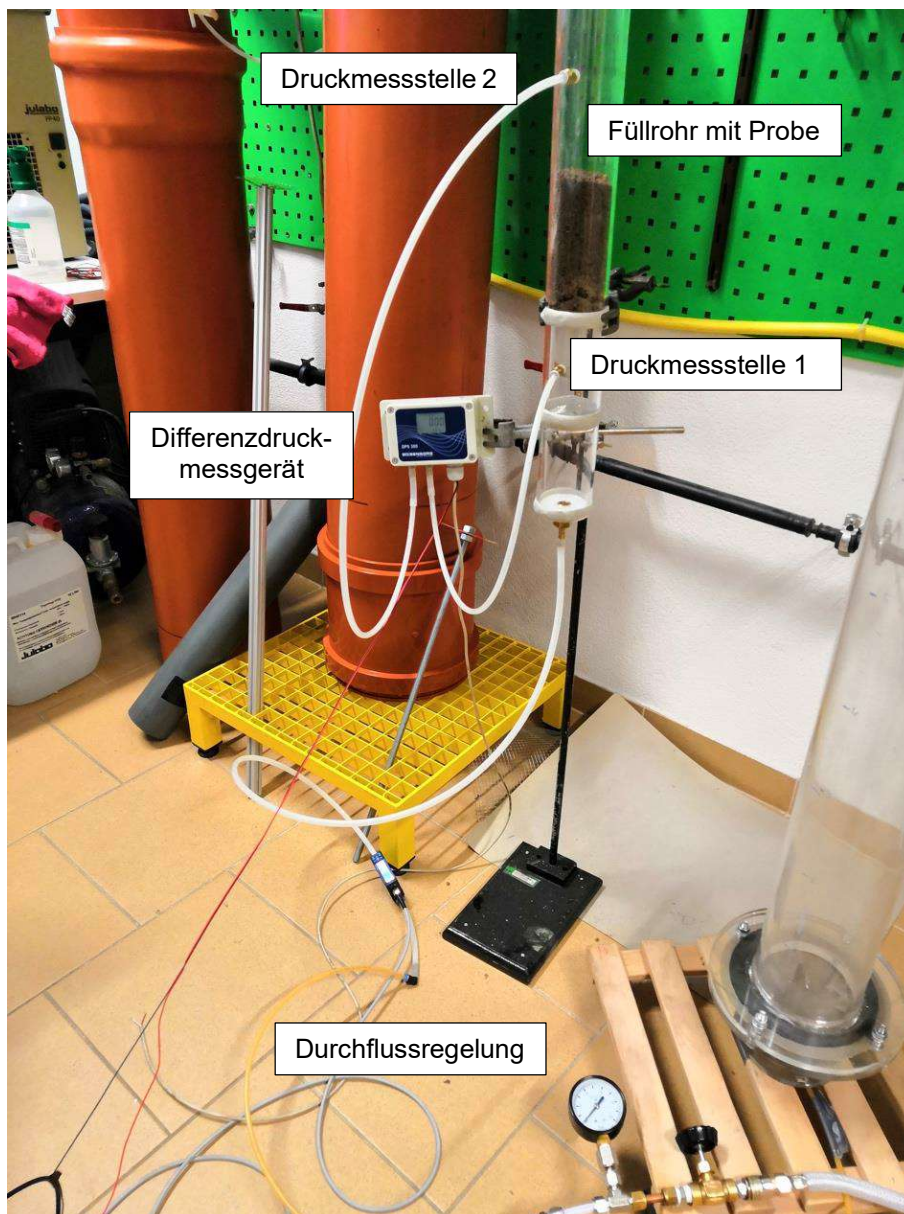


Abbildung 3-10: Aufbau zur Messung des Druckverlustes. Zu sehen ist hier das Füllrohr, das die Probe beinhaltet, sowie die dazugehörigen Mess- und Regelungsgeräte.

Während die Messung des Volumenstroms \dot{V} in Nl/min erfolgt, wird die Druckdifferenz Δp , die durch den Unterdruck zustande kommt, in $mbar$ bereitgestellt. Nach der Umrechnung des Volumenstroms von Nl/min in m^3/s und der Bestimmung des Rohrdurchmessers d kann die Leerrohrgeschwindigkeit u ermittelt werden. Die Berechnung ergibt sich aus folgender Formel, **Gleichung (3-9)**.

$$u = \frac{\dot{V}}{d} \quad (3-9)$$

Die Darstellung im Diagramm mittels Excel wird in **Abbildung 3-11** veranschaulicht. Hier ist der Anstieg der Leerrohrgeschwindigkeit mit steigender Druckdifferenz dargestellt. Dieses Diagramm bildet die Druckdifferenzmessung in der ursprünglichen feuchten Probe ab.

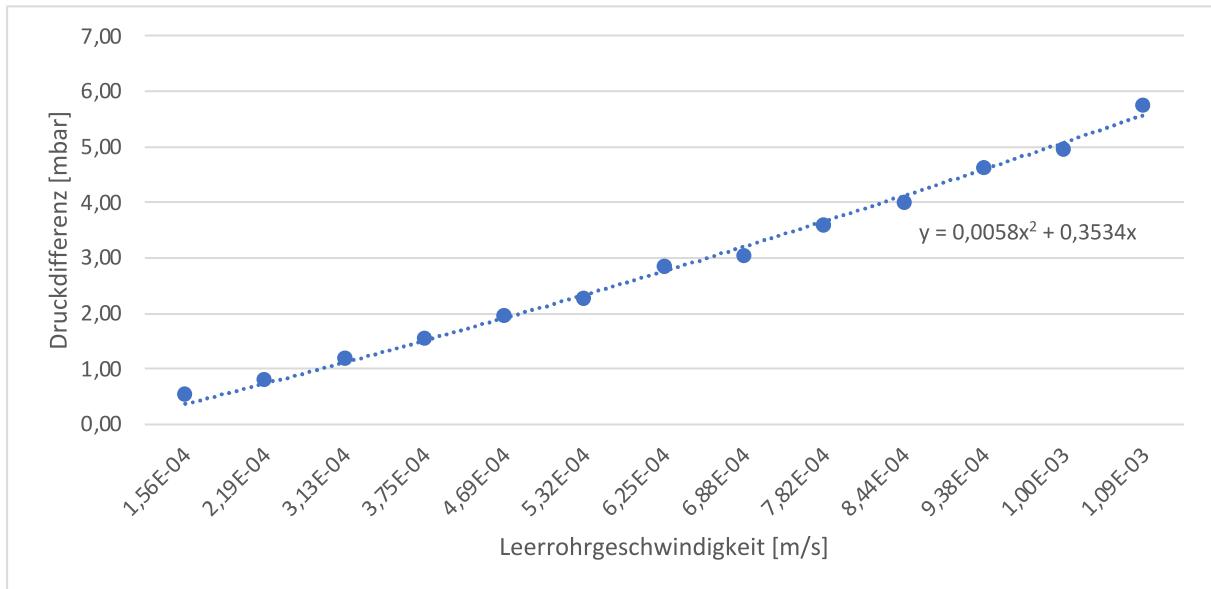


Abbildung 3-11: Druckdifferenzmessung der feuchten Probe. Es ist erkennbar, dass mit zunehmender Druckdifferenz auch die Leerrohrgeschwindigkeit ansteigt, die auf der X-Achse aufgetragen ist.

Es ist zu erkennen, dass der Anstieg der Messpunkte zunächst linear ist und bei höheren Drücken Ansätze einer Exponentialfunktion annimmt. Dieser Trend ist auch bei der getrockneten sowie der verbrannten Probe zu beobachten, siehe **Abbildung 3-12** und **Abbildung 3-13**.

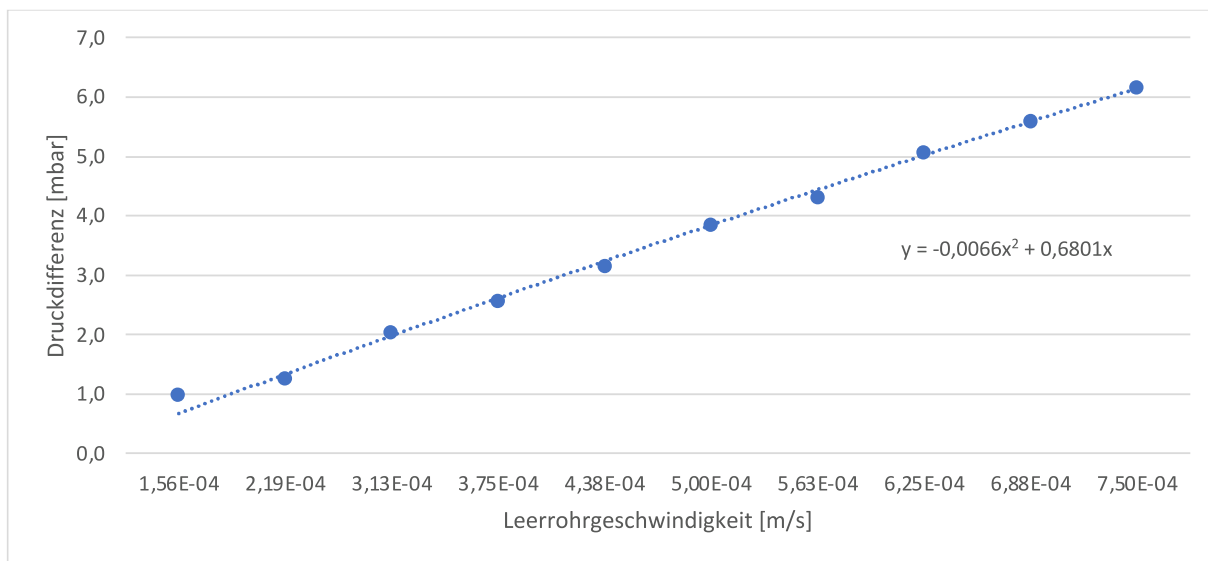


Abbildung 3-12: Druckdifferenzmessung der trockenen Probe. Der quadratische Term der Gleichung ist dieses Mal negativ und sehr klein, was auf einen annähernd linearen Verlauf schließen lässt.

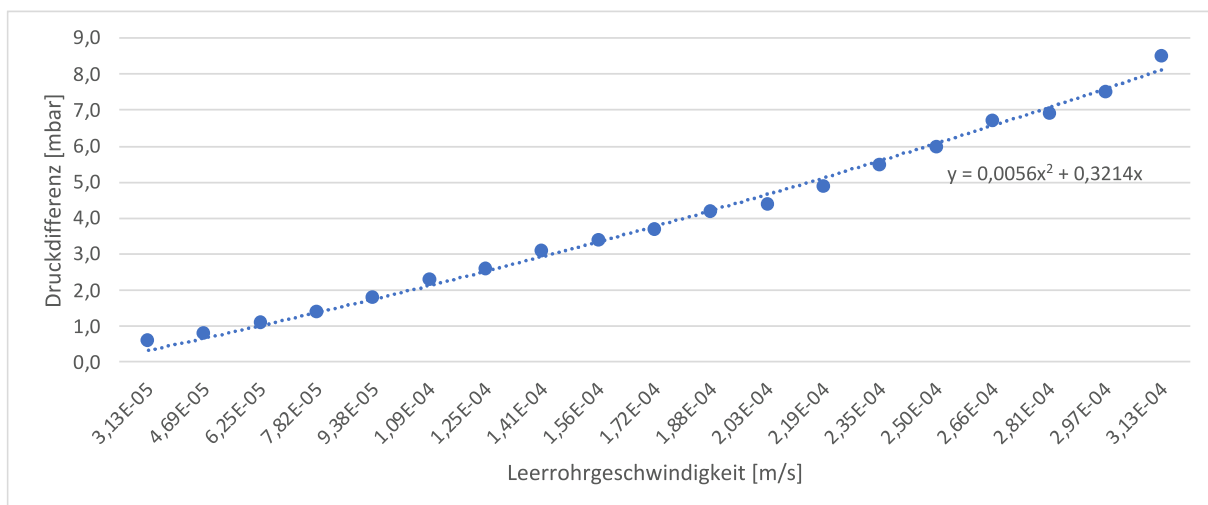


Abbildung 3-13: Druckdifferenzmessung der verbrannten Probe. Ansätze einer Exponentialfunktion im Diagramm sind erkennbar.

4 Versuche zur transienten Erwärmung des Bodens

Für die Versuche im Technikumsmaßstab zur transienten Erwärmung des Bodens wird der Versuchsstand in der Barbarahalle des Lehrstuhls für Thermodynamik an der Montanuniversität Leoben aufgebaut. Beim Boden handelt es sich um nicht kontaminiertes Erdreich aus Kraubath in der Steiermark. Die Daten werden über mehrere Stunden mittels LabView ermittelt, während der Boden mithilfe einer Heizlanze verschiedenen Temperaturstufen ausgesetzt wird. Im Verlauf des Versuchs kommt es zunächst zu einer Trocknung der Probenbereiche und anschließend erfolgt eine teilweise Pyrolyse. In den folgenden Unterkapiteln wird auf den Versuchsaufbau sowie die Durchführung der einzelnen Versuche genauer eingegangen.

4.1 Versuchsablauf

Der Ablauf gestaltet sich für alle vier Versuchstage wie folgt:

Als erstes wird die Erde händisch vom Bigbag mittels Schaufeln in den Behälter eingebracht. Dabei ist darauf zu achten, dass die Lanze nicht verschoben oder beschädigt wird. Sobald der Behälter gefüllt ist, muss dafür gesorgt werden, dass die Oberfläche eben und nicht höher als die Wand des Stahl tanks ist, der dann mit einem Deckel verschlossen wird. Die Thermoelemente müssen jeweils 25 cm tief im Boden versenkt werden, damit sie sich für die Messung in der Probenmitte befinden. Dann erfolgt das Aufheizen der Heizlanze über die Steuervorrichtung auf die jeweilige Endtemperatur. Über das Messprogramm LabView werden

die Daten der Messung über zwölf Stunden aufgezeichnet. Nach Beendigung des Versuchs erfolgt das Ausschalten aller Geräte und der Stopp der Datenaufzeichnung. Heizlanze und Boden werden bis zum nächsten Tag abgekühlt und dann der Behälter geleert. Anschließend kann der Versuch von Neuem beginnen.

Allen vier Versuchen ist gemein, dass die verwendeten Messpunkte wie folgt aufgeteilt werden, **Tabelle 4-1**:

Tabelle 4-1: Positionierung der Messpunkte

Messstelle	Position
Erster Messpunkt	Ø 320 mm
Zweiter Messpunkt	Ø 520 mm
Dritter Messpunkt	Ø 720 mm
Vierter Messpunkt	Ø 920 mm

4.2 Versuchsreihe 1

Für den Versuchsaufbau wird eine wassergekühlte Stahlkonstruktion gewählt, deren prinzipieller Aufbau in **Abbildung 4-1** dargestellt ist. Zu sehen ist in dieser Abbildung ein zylindrischer Aufbau, der zur einfachen Be- und Entladung auf zwei parallel angeordneten Schienen aufgebracht ist und mit einem Stahldeckel verschlossen wird. In der Mitte der Konstruktion befindet sich der Eingang für die Heizlanze. Davon ausgehend im Viertelkreis verteilen sich die Bohrungen für die Thermoelemente. Die Laschen, die an der Seite sowie am Deckel zu finden sind, dienen ebenfalls der Befüllung und Entleerung des Zylinders. Der Mantel des Zylinders ist wassergekühlt.

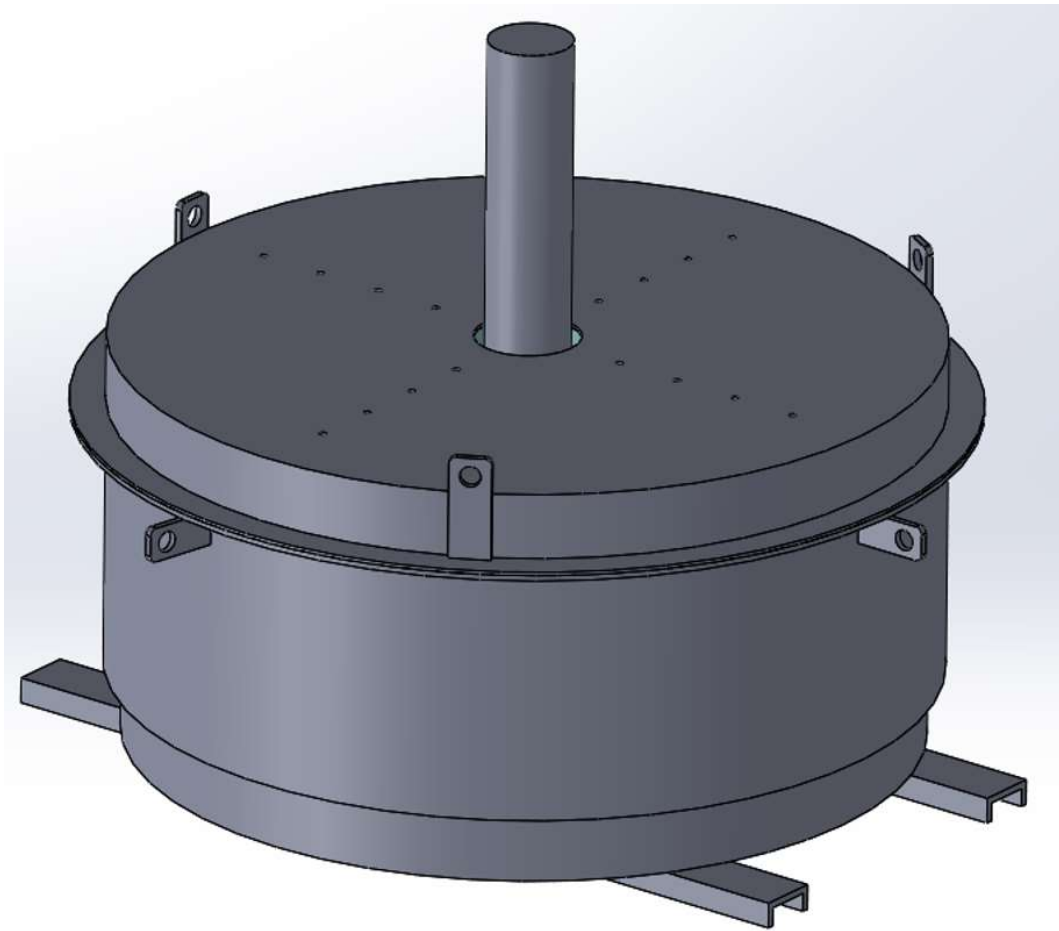


Abbildung 4-1: Modell der Stahlkonstruktion für die Großversuche

Im Querschnitt ist der Aufbau in **Abbildung 4-2** zu sehen. Hier sind die unterschiedlichen Elemente der zylinderförmigen Konstruktion in Detail dargestellt.

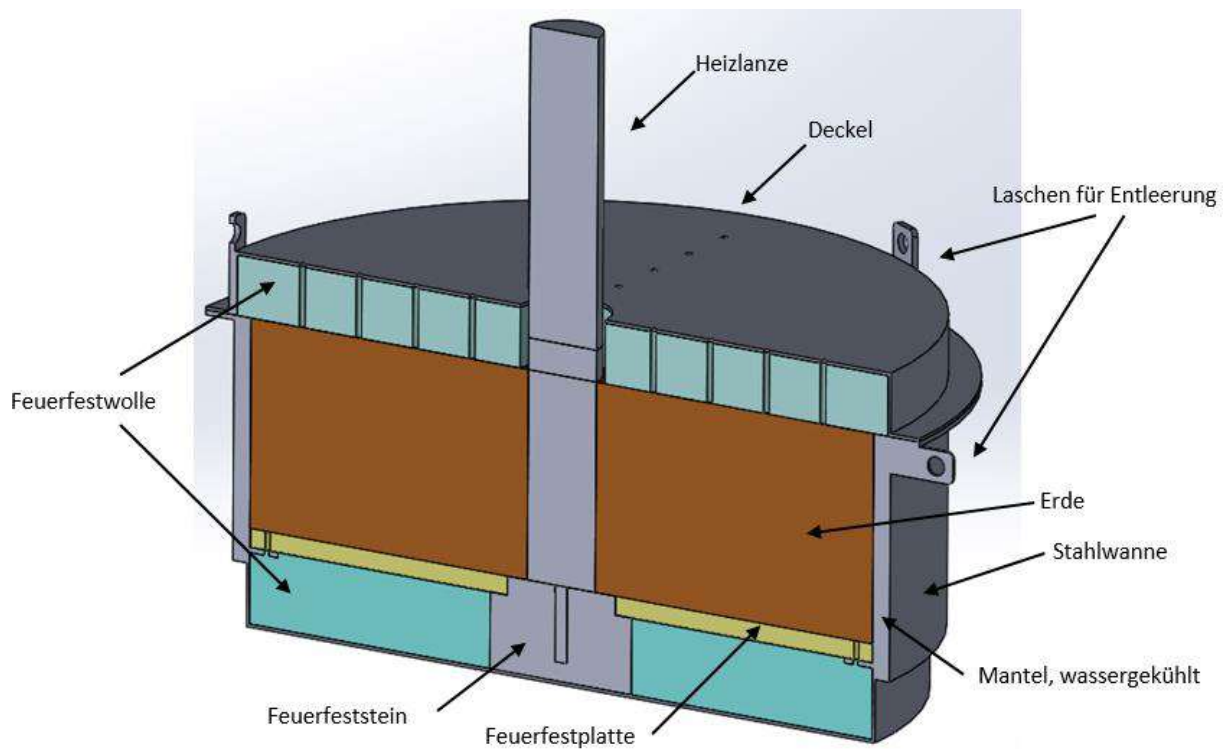


Abbildung 4-2: Querschnitt des Versuchsaufbaus, inklusive Beschriftung der einzelnen Elemente

Die geometrischen Abmessungen des Aufbaus sind in **Tabelle 4-2** dargestellt.

Tabelle 4-2: Geometrische Abmessungen des Versuchsaufbaus

Bezeichnung	Abmessung
Innendurchmesser Zylinder	1,10 m
Durchmesser Heizlanze	0,12 m
Höhe Heizzone	0,30 m
Höhe Feuerfestwolle	0,10 m

In **Abbildung 4-3** ist der Aufbau des Versuchs zu sehen. Erkennbar sind hier die Thermoelemente, die bereits in die Bodenprobe eingebracht wurden, sowie die Heizlanze.

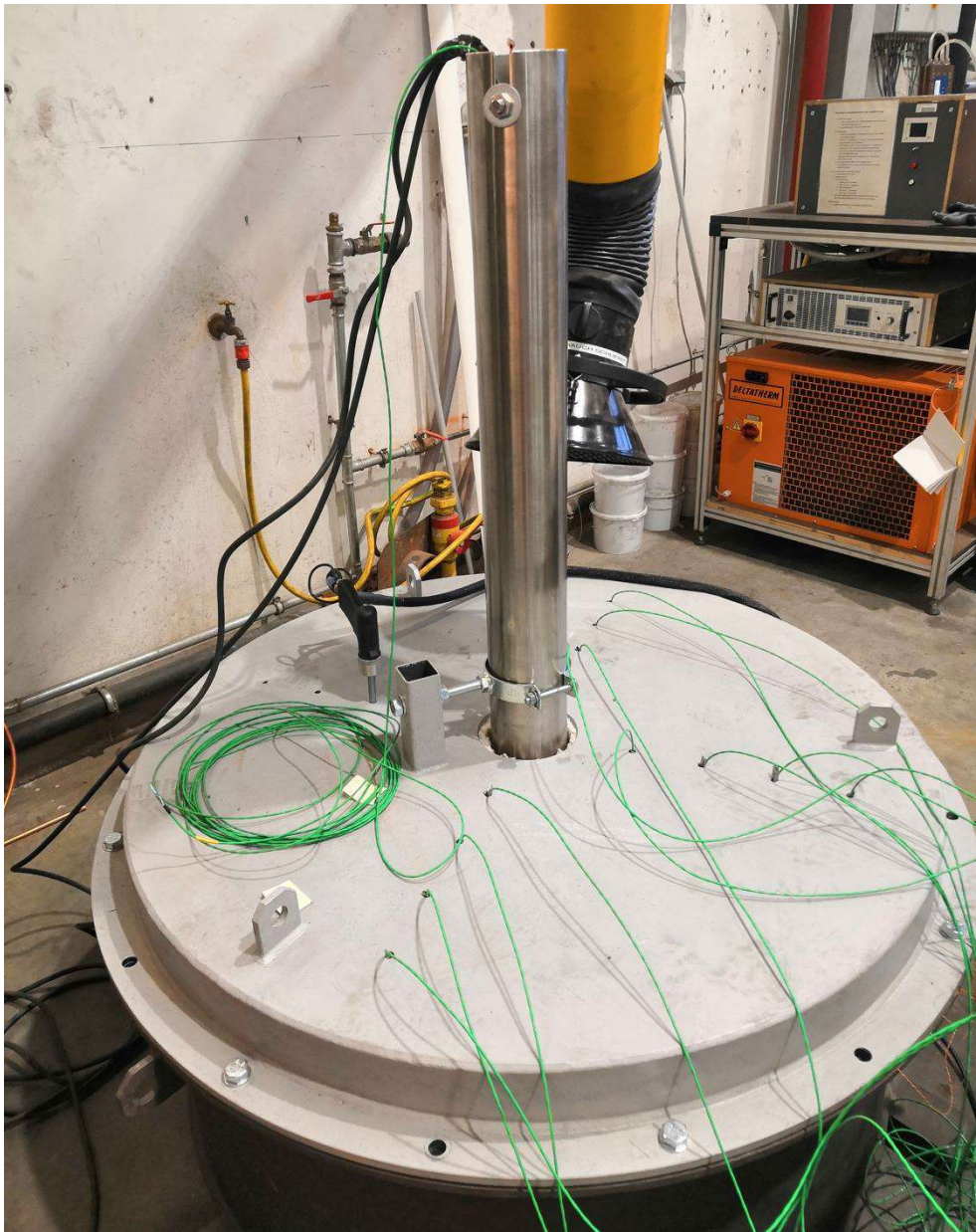


Abbildung 4-3: Aufbau des Versuchs, ersichtlich ist die bereits verschlossene Konstruktion mit Heizlanze und eingebrachten Thermoelementen.

Zusätzlich zu den 16 Thermoelementen, deren Einbringung in die Probe von oben erfolgt, sind weitere vier Thermoelemente am Boden des Zylinders angebracht, um eine Vergleichbarkeit der Temperaturverteilung zu ermöglichen.

4.2.1 Versuch 1

In **Abbildung 4-4** ist der Temperaturverlauf der Lanze und in weiterer Folge (ab ca. 10:30 Uhr) auch jener des Thermoelements dargestellt. Beide Temperaturwerte wurden manuell in einem zeitlichen Abstand von zu Beginn fünf, später dann zehn Minuten, notiert. Für den ersten Versuch wird die Heizlanze um 08:50 Uhr auf 600 °C erhitzt. Bei diesem Versuch konnte festgestellt werden, dass die Heizsteuerung eine sehr hohe Ungenauigkeit aufweist, weswegen ein zusätzliches Thermoelement an der Lanze befestigt wird. Um 09:50 Uhr kommt es zur Feststellung, dass das zusätzlich befestigte Thermoelement zu schmelzen beginnt, weswegen der Versuch für 15 Minuten unterbrochen wird, was in **Abbildung 4-4** durch den rechteckigen Bereich gekennzeichnet ist. In dieser Zeit wird das Thermoelement dahingehend bearbeitet, dass der für die Messung benötigte Metallstift verlängert wird und somit die Isolierung nicht mehr in direktem Kontakt mit der Heizlanze steht.

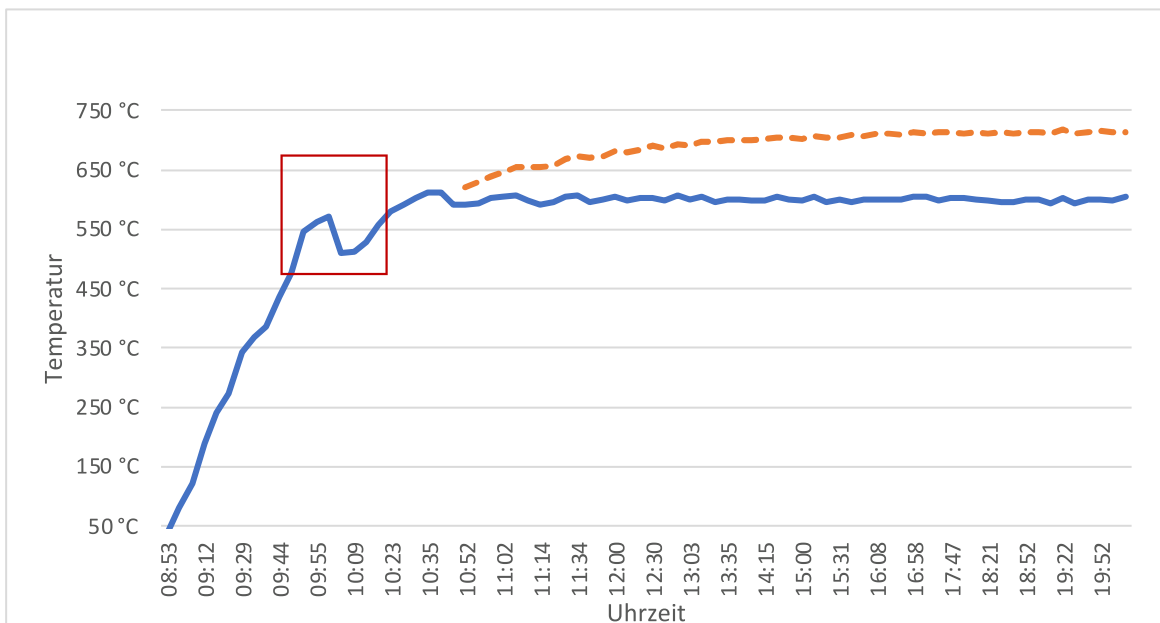


Abbildung 4-4: Temperaturverlauf von Heizlanze und Thermoelement, inklusive Kennzeichnung des Bereichs der Versuchsunterbrechung

Die strichlierte Linie im Diagramm stellt den gemessenen Temperaturverlauf der Heizlanze über das Thermoelement dar. Die durchgängige Linie jenen, der direkt mittels Steuereinrichtung gemessen wurde. Der rechteckige Bereich fasst den Zeitraum ein, in dem es zur Unterbrechung der Heizleistung, aufgrund des Austauschs des Thermoelements, gekommen ist.

Der Temperaturverlauf des Erdreichs, dessen Messung direkt mittels LabView erfolgt, ist in den folgenden Abbildungen, **Abbildung 4-5**, **Abbildung 4-6**, **Abbildung 4-7** und **Abbildung 4-8** zu sehen.

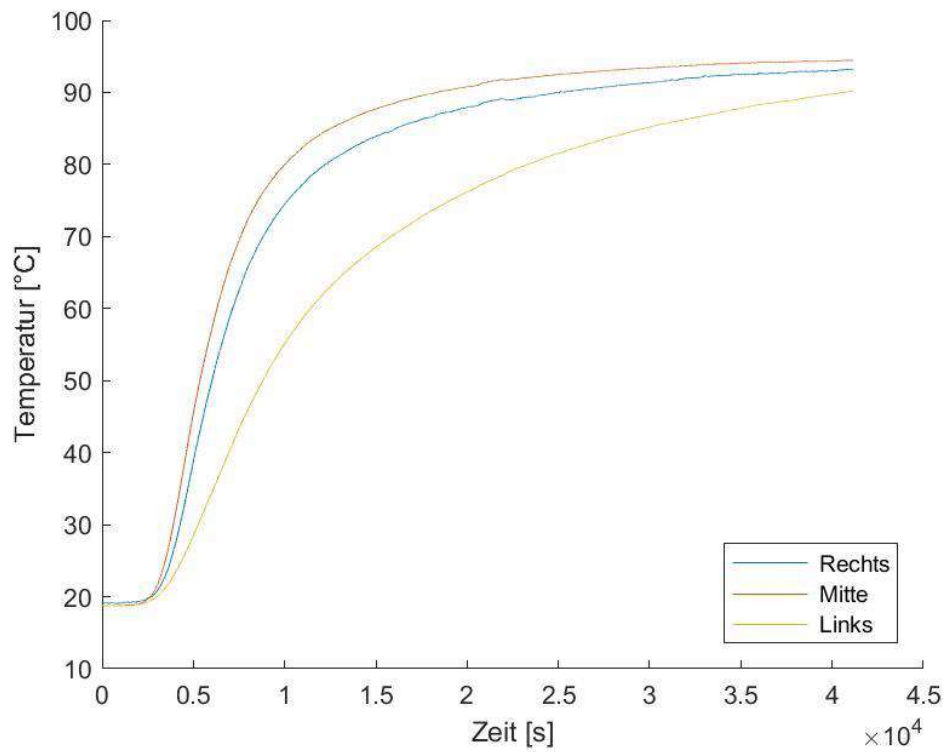


Abbildung 4-5: Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 1

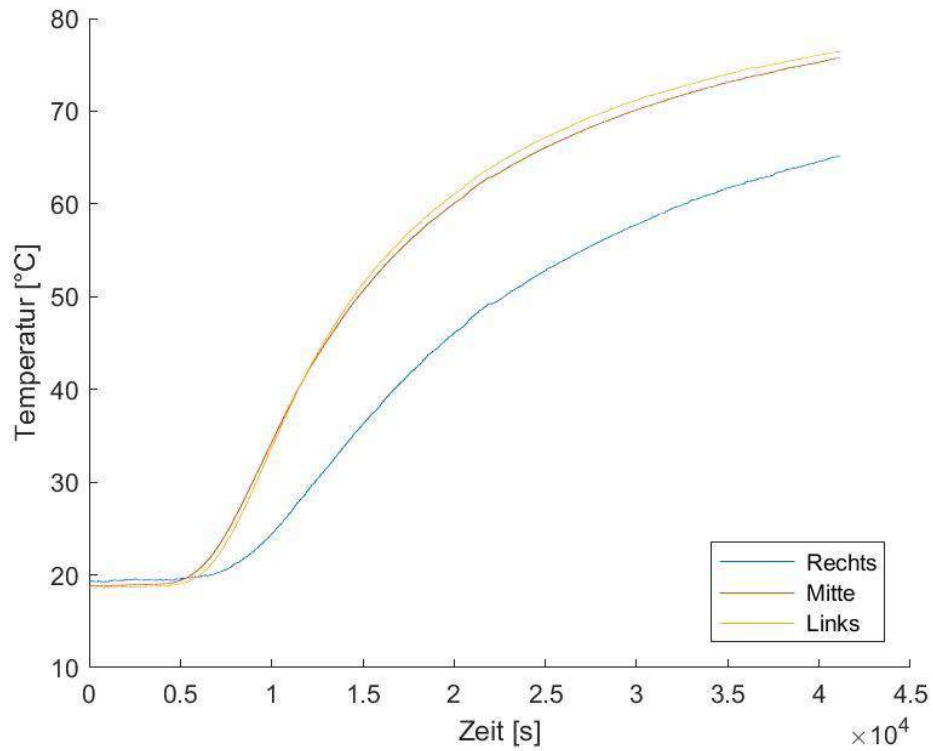


Abbildung 4-6: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 1

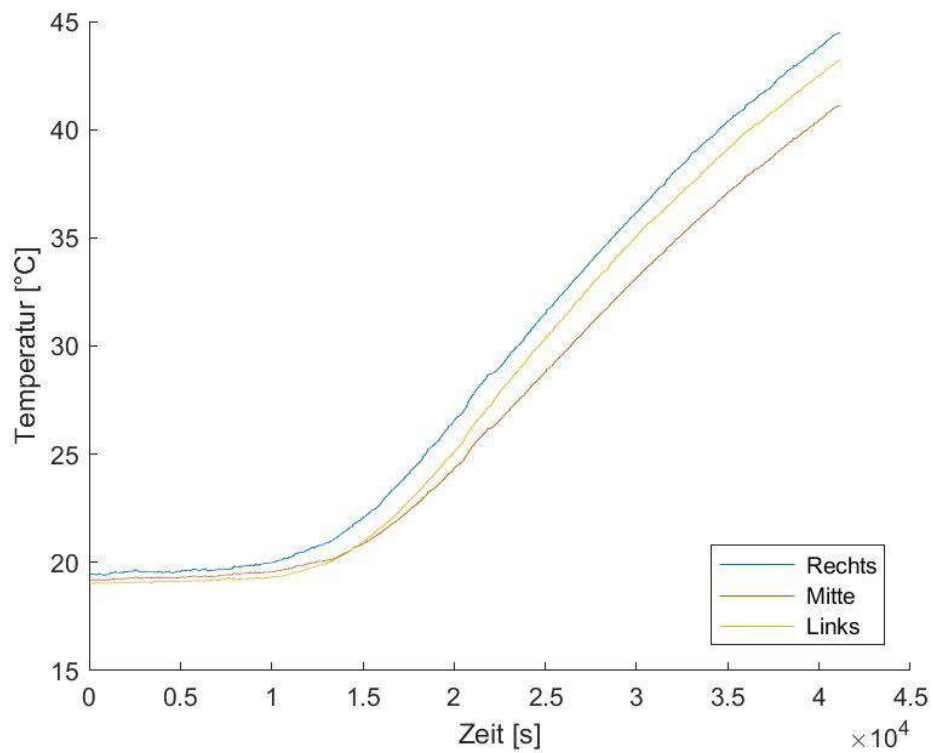


Abbildung 4-7: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 1

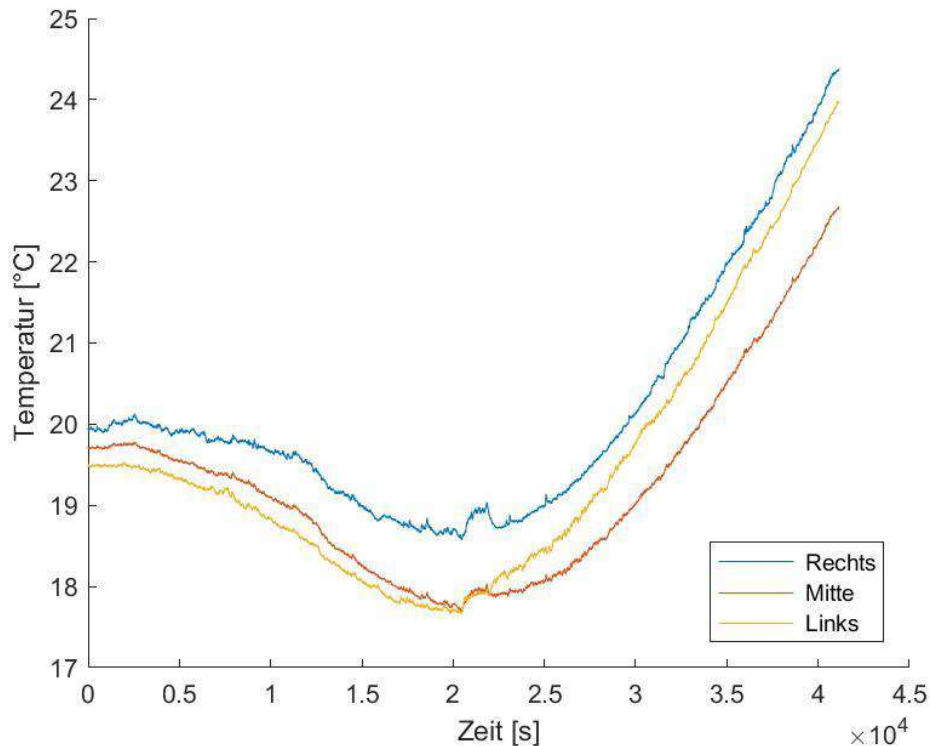


Abbildung 4-8: Temperaturverlauf des Erdreichs am vierten Messpunkt, Versuch 1. Erkennbar ist der Abfall der Temperatur, sowie die erneute Aufheizung

Die blaue Linie in den Abbildungen stellt jeweils den rechten Messpunkt dar, die orange Linie den mittleren und die gelbe Linie den linken. In **Abbildung 4-8** ist zudem erkennbar, dass der Verlauf der Temperatur zunächst sinkt, bevor er erneut zu steigen beginnt. Da sich der vierte Messpunkt am weitesten entfernt von der Heizlanze und am nächsten am wassergekühlten Mantel befindet, tritt zuerst die Kühlung, hervorgerufen durch das Wasser, auf, bevor es im Verlauf der Zeit zu einer Erwärmung des Bodens durch die Heizlanze kommt.

In **Abbildung 4-9** ist die Probe in der feuerfesten Wanne nach Abkühlung und Entnahme von Deckel und Lanze ersichtlich. Auf dem linken Bild ist der äußerste hellgraue Ring, der den getrockneten Bodenbereich darstellt, gut ersichtlich. Der dunkelgraue Bereich des zweiten Ringes stellt die beginnende Pyrolyse dar, ganz innen ist bereits die gesinterte Zone zu sehen.



Abbildung 4-9: Erdreich nach Beendigung von Versuch 1

4.2.2 Versuch 2

Für den zweiten Versuch wird die Heizlanze auf ungefähr 300 °C erhitzt. Der genaue Temperaturverlauf ist in **Abbildung 4-10** dargestellt. Die Erfassung der Heizlanzentemperatur erfolgt ab diesem Versuch, aufgrund der ungenügenden Genauigkeit der Steuereinrichtung, digital mittels Thermoelement und LabView [1].

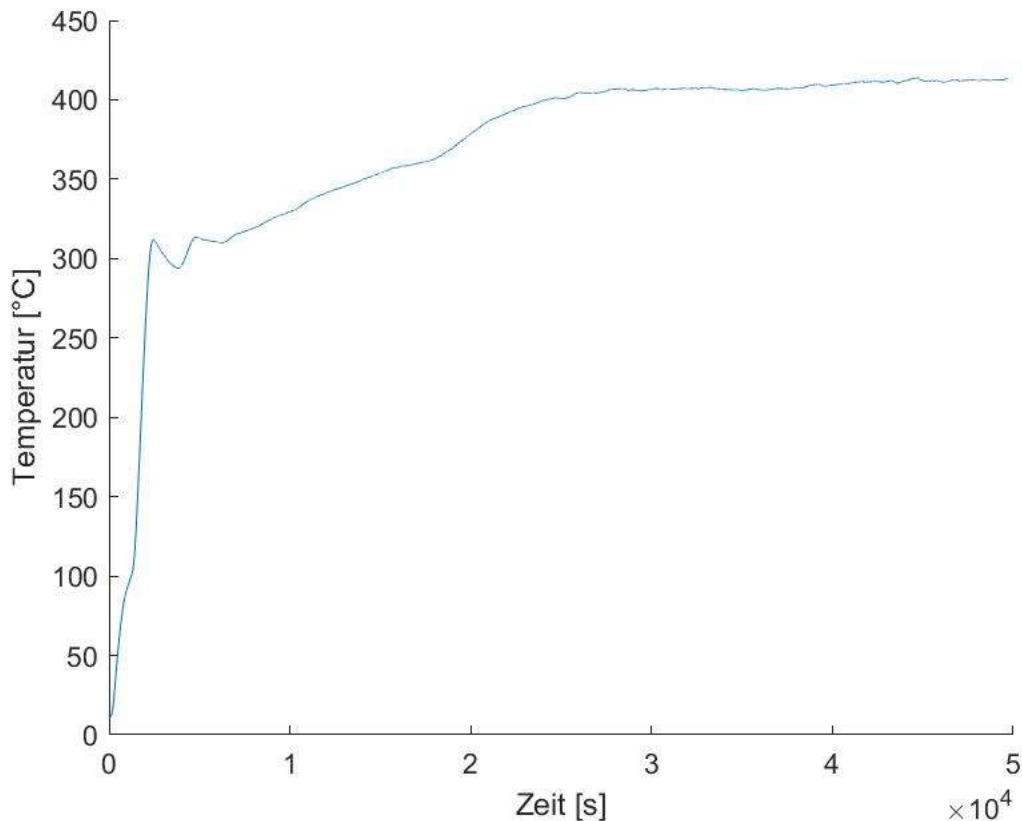


Abbildung 4-10: Temperaturverlauf der Heizlanze für Versuch 2, der Sprung im Verlauf zu Beginn ist durch eine Störung der Regelung zu erklären

Der Verlauf der Temperatur im Erdreich ist in den folgenden Abbildungen, **Abbildung 4-11**, **Abbildung 4-12**, **Abbildung 4-13** und **Abbildung 4-14**, dargestellt. Bei diesem Versuch ist eine zusätzliche Linie zu sehen, die den Temperaturverlauf am Boden des Erdreichs darstellt. Es ist zu erkennen, dass die Temperatur des Erdreichs am Boden der Konstruktion immer über den restlichen Messpunkten liegt. Das liegt daran, dass es am Tag der Durchführung dieses Versuchs sehr kalt war und somit die im Freien gelagerte Probe eine Anfangstemperatur von ungefähr 10 °C aufgewiesen hat. Da die Halle jedoch annähernd Raumtemperatur besitzt und somit auch deren Boden wärmer ist, ist auch der unterste Teil der Probe, dessen Temperatur durch am Boden des Versuchsstands anliegende Thermoelemente erfasst wird, zu Beginn des Versuchs ein paar Grad wärmer als die obere Schicht.

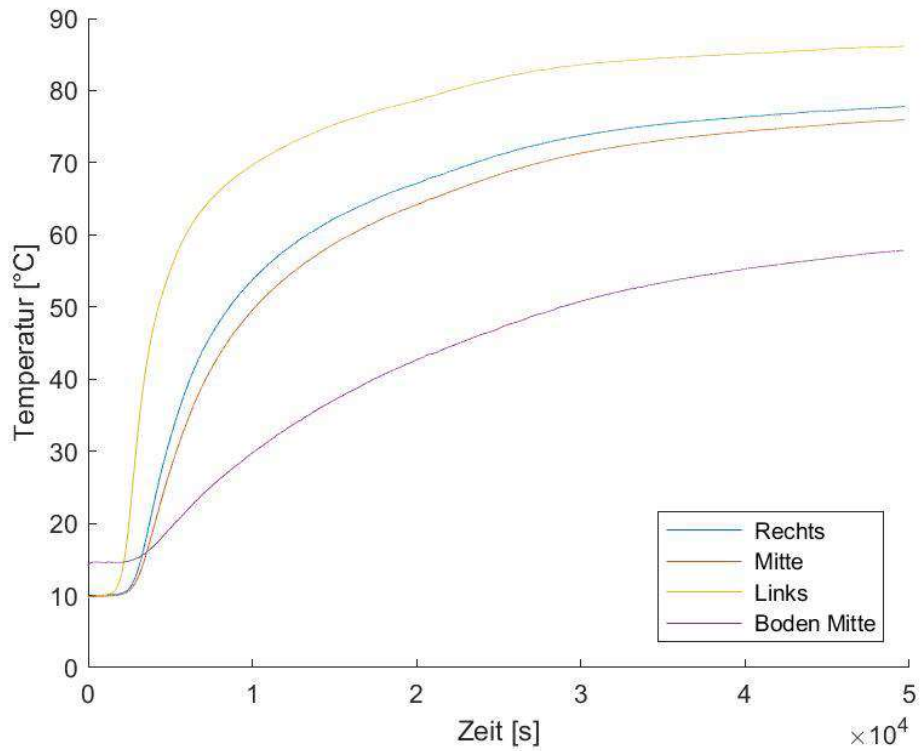


Abbildung 4-11: Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 2

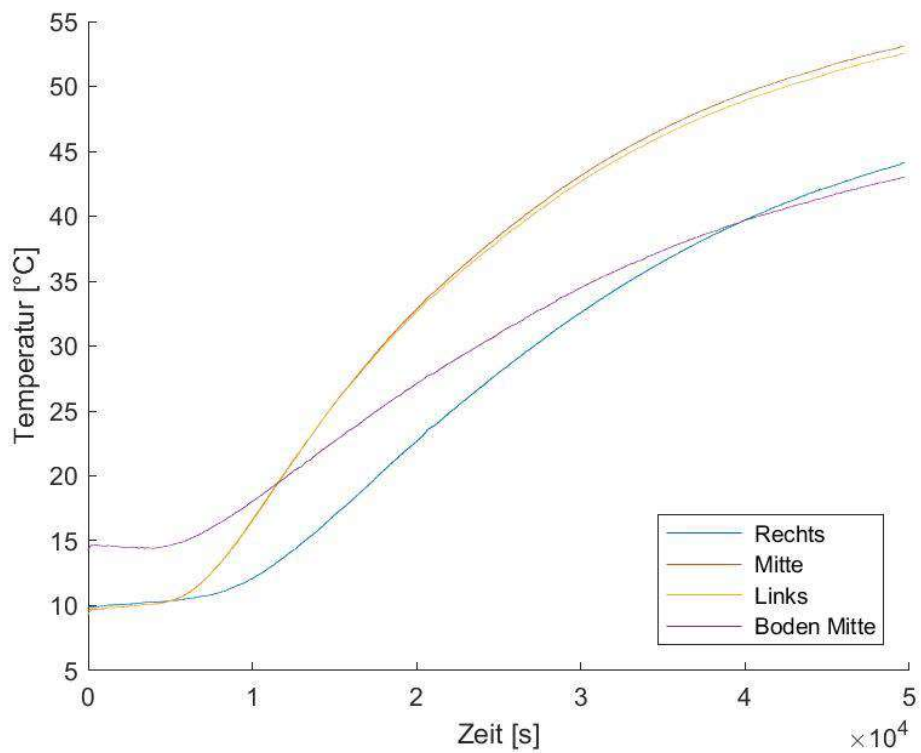


Abbildung 4-12: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 2

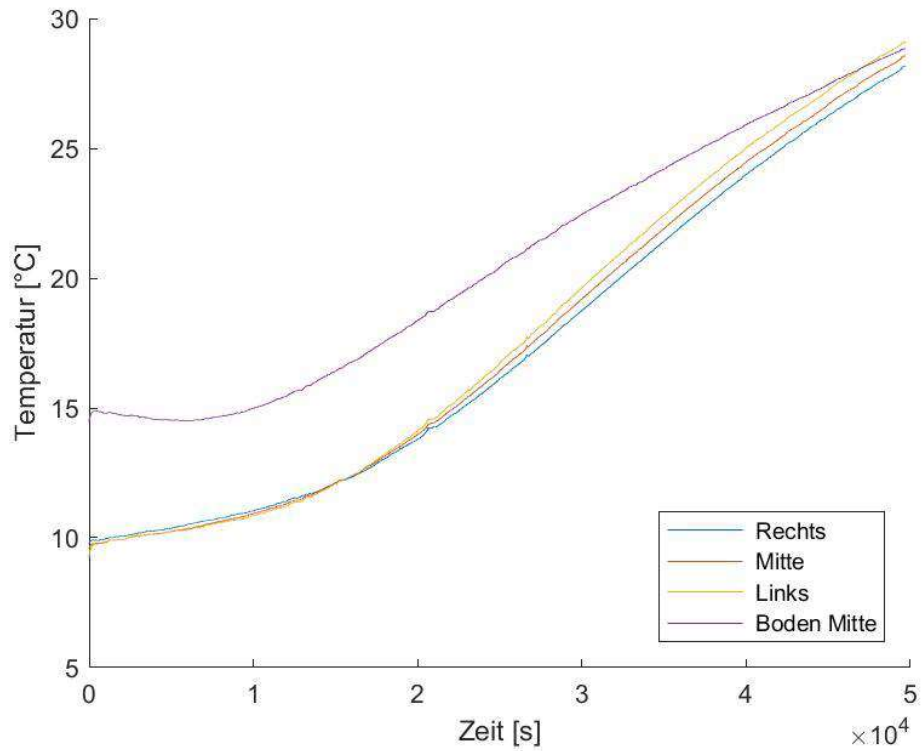


Abbildung 4-13: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 2

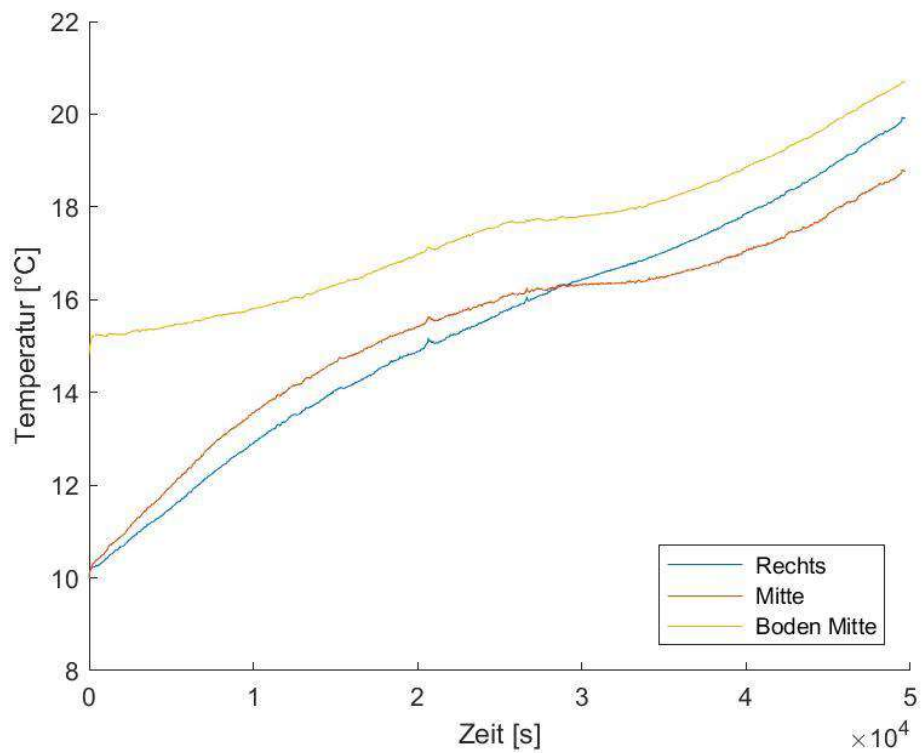


Abbildung 4-14: Temperaturverlauf des Erdreichs am vierten Messpunkt, Versuch 2

Abbildung 4-15 zeigt das Versuchsmaterial nach dem Abkühlen und dem Entfernen von Deckel und Lanze. Aufgrund der geringen Temperatur, mit der dieser Versuch gefahren wurde, ist der hellgraue Bereich, der die Trocknung darstellt hier maßgeblich, während der pyrolysierte und gesinterte Bereich nur einen sehr kleinen Teil darstellen.



Abbildung 4-15: Erdreich nach Beendigung von Versuch 2

4.2.3 Versuch 3

Für den dritten Versuch wird die Heizlanze auf ca. 900 °C aufgeheizt. Der tatsächliche Temperaturverlauf über die Zeit ist in **Abbildung 4-16** aufgetragen. Zu sehen ist hier ein Knick im exponentiellen Verlauf, gleich zu Beginn des Versuchs, was auf eine Ungenauigkeit in der Regelung der Heizlanze zurückgeführt werden kann.

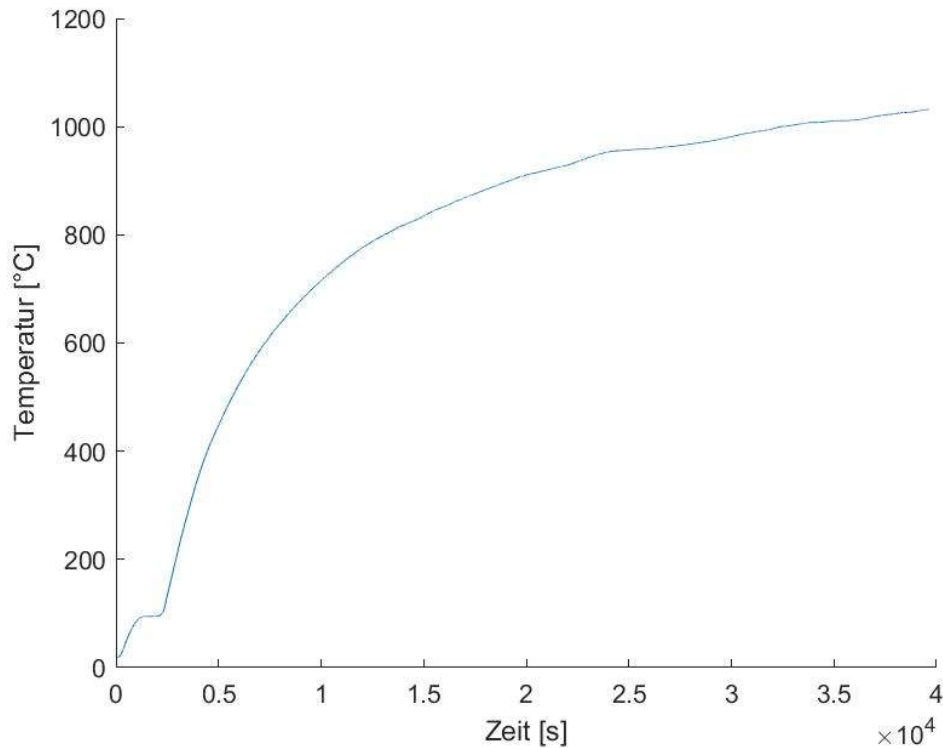


Abbildung 4-16: Temperaturverlauf der Lanze bei Versuch 3

Der Verlauf der Temperatur im Erdreich ist in den folgenden Abbildungen, **Abbildung 4-17**, **Abbildung 4-18**, **Abbildung 4-19** und **Abbildung 4-20**, dargestellt.

Abbildung 4-17 stellt anschaulich den Bereich der Trocknung beim ersten Messpunkt dar. Zunächst ergibt sich aus dem exponentiellen Temperaturverlauf eine horizontale Gerade, die dann erneut steil ansteigt, sobald die vollständige Trocknung erreicht wurde.

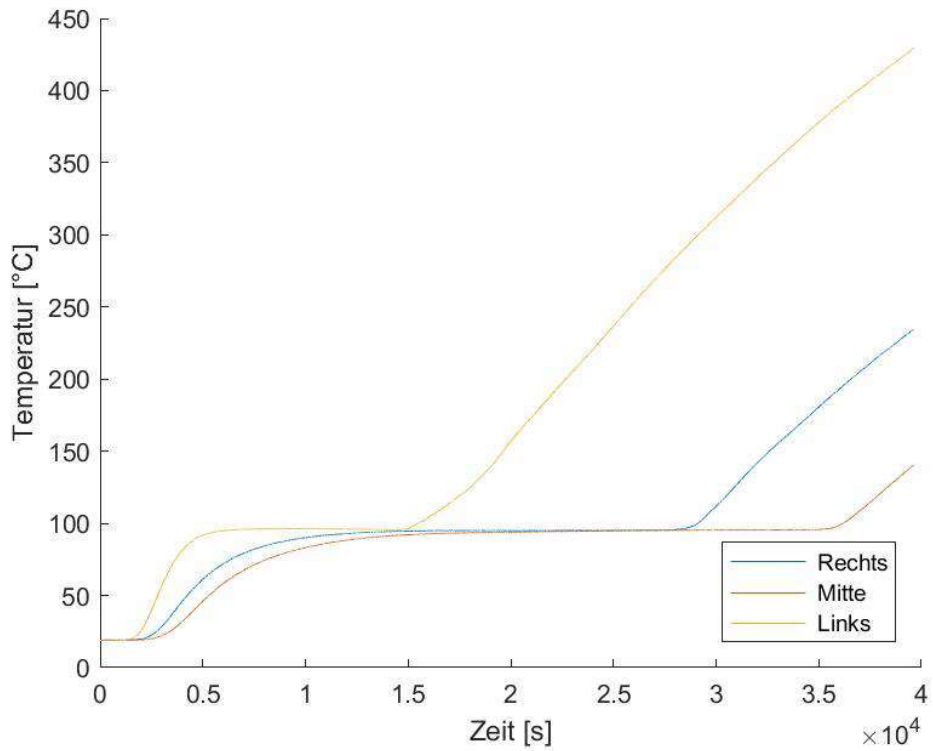


Abbildung 4-17 Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 3. Zu sehen ist hier der Trocknungsbereich sowie die erneute Aufheizung des Erdreichs

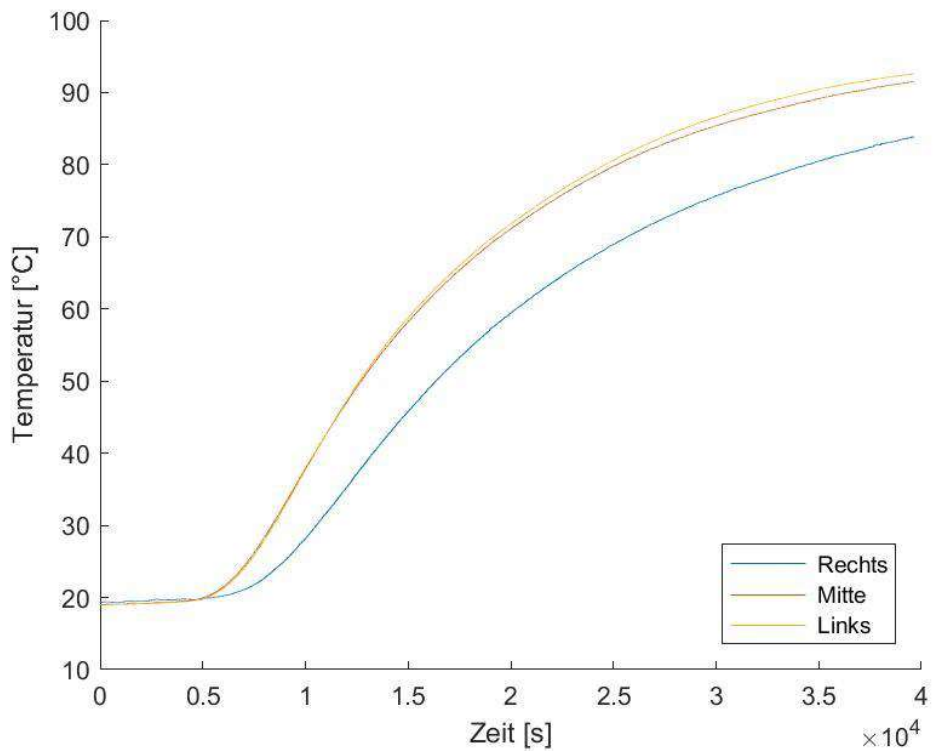


Abbildung 4-18: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 3

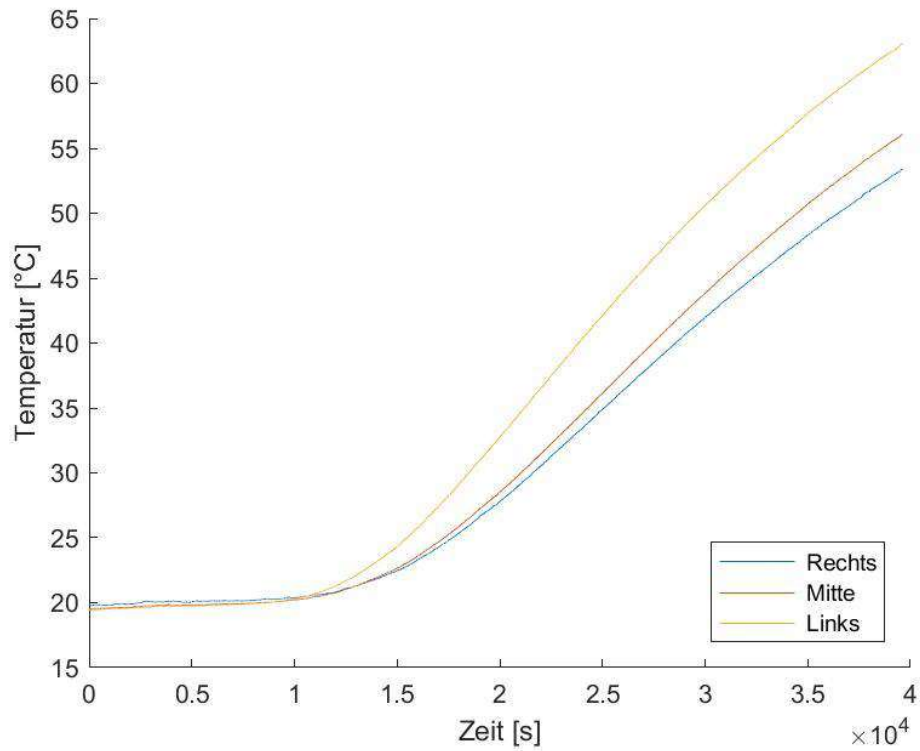


Abbildung 4-19: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 3

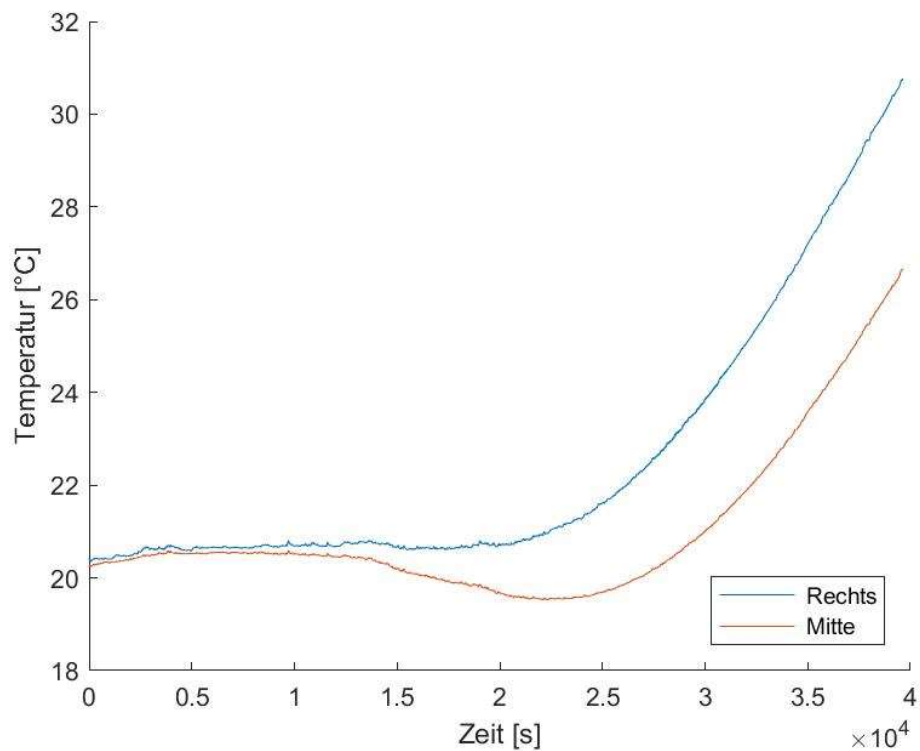


Abbildung 4-20: Temperaturverlauf des Erdreichs am vierten Messpunkt, Versuch 3. Aufgrund des Ausfalls des linken Thermoelements sind hier nur zwei Temperaturverläufe zu sehen

Wegen der hohen Temperaturen, die hier vorherrschen, sind für diesen Versuch keine Daten vom Boden der Schüttung vorhanden. In **Abbildung 4-21** ist das Erdreich nach dem Abkühlen und dem Entfernen des Deckels dargestellt. Der äußerste Ring stellt wieder den getrockneten Bereich dar, während weiter innen das Erdreich in hohen Anteilen pyrolysiert vorliegt. Die gesinterte schwarze Zone, am rechten Bild sehr gut erkennbar, ist hier aufgrund der hohen Temperaturen besonders groß.



Abbildung 4-21: Erdreich nach Beendigung von Versuch 3

4.3 Versuchsreihe 2

Um eine bessere Wärmeleitfähigkeit gewährleisten zu können, muss der konvektive Wärmeübergang verbessert werden. Dies geschieht durch das Einblasen von Luft in die Bodenprobe, die so schneller austrocknen und entgasen kann. In **Abbildung 4-22** ist die Erweiterung der bestehenden Konstruktion zu sehen. Der Schlauchkreis in der Mitte dient dem Einblasen der Luft in den Boden. Der äußere Kreis ist für die Wiederabsaugung zuständig, was für einen durchgängiger Luftkreislauf sorgen soll. Aufgrund der Feuchte der Erde kommt es im äußeren Kreis mitunter zur Abscheidung von Wasser durch die Schläuche, welches ebenfalls mitabgesaugt und über einen Filter abgeschieden wird.

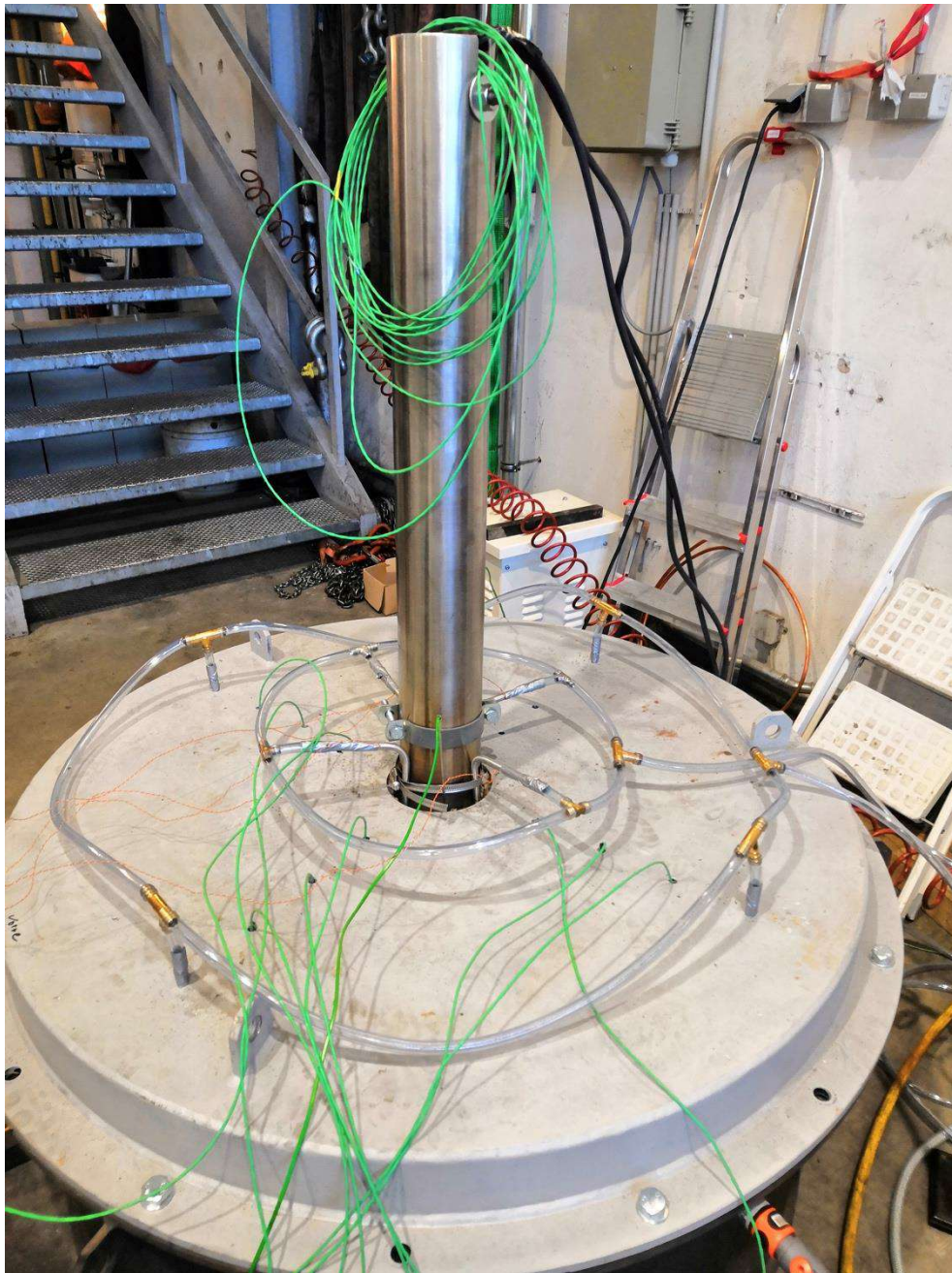


Abbildung 4-22: Erweiterung der Konstruktion um einen Luftkreislauf, der der Erhöhung des konvektiven Wärmeübergangs dient

4.3.1 Versuch 4

Für den vierten Versuch wird der konvektive Wärmeübergang mittels Luft erhöht. Dies führt dazu, dass die Trocknung des Bodens schneller erfolgen kann. Der genaue Aufbau ist in **4.3 Versuchs** beschrieben. Aufgrund der Durchströmung ist der Verlauf der Lanzentemperatur bei etwa 800 °C annähernd sinusförmig, wie in **Abbildung 4-23** zu sehen ist.

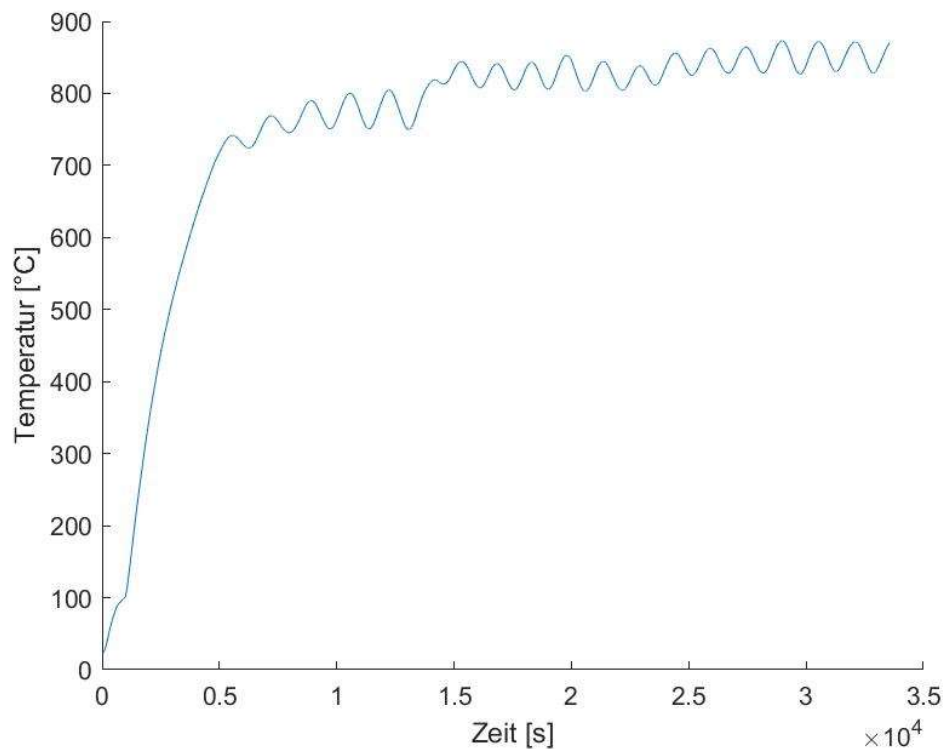


Abbildung 4-23: Temperaturverlauf der Lanze bei Versuch 4

Der Verlauf der Temperatur im Erdreich ist in den folgenden Abbildungen, **Abbildung 4-24**, **Abbildung 4-25** und **Abbildung 4-26**, dargestellt. Da die äußeren Messstellen für das Absaugen der Luft verwendet wurden, sind für diesen Versuch nur drei Messpunkte jeweils links, rechts und in der Mitte vorhanden. Die Temperaturmesspunkte am Boden des Erdreichs sind bei diesem Versuch nicht auswertbar.

In **Abbildung 4-24** ist erneut der Bereich der Trocknung durch den horizontalen Temperaturverlauf gut erkennbar. Die Trocknung geschieht in diesem Versuch wesentlich schneller, aufgrund des konvektiven Wärmeübergangs.

In **Abbildung 4-26** kann ein Sprung im Verlauf der Temperatur sowohl für den linken als auch für den rechten Messpunkt festgestellt werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass es bei beiden Thermoelementen zu einem zwischenzeitlichen Ausfall gekommen ist.

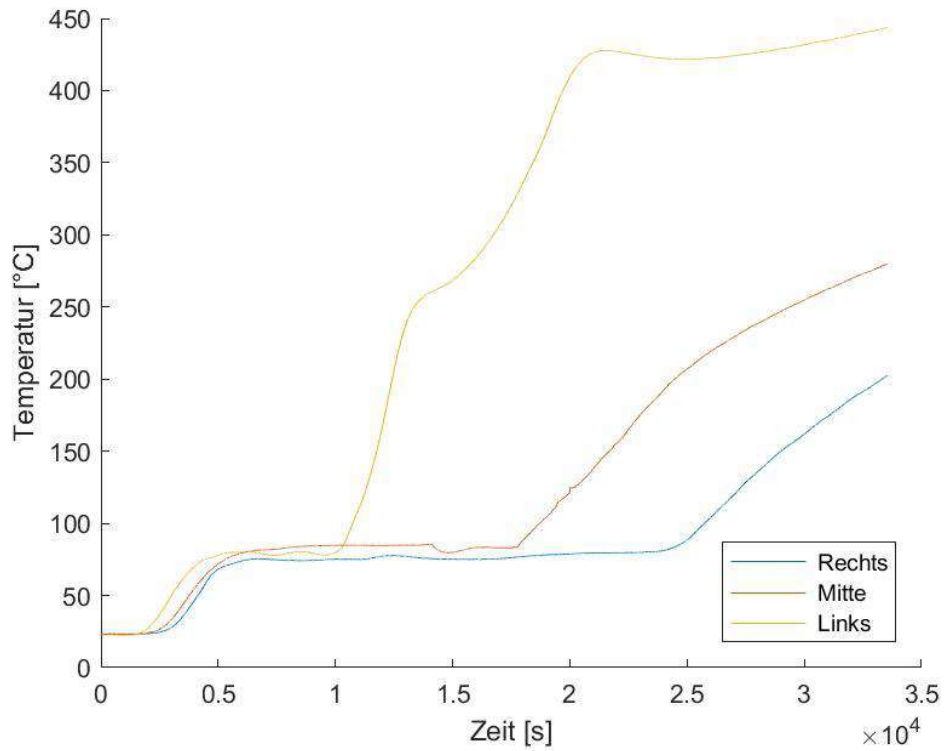


Abbildung 4-24: Temperaturverlauf des Erdreichs am ersten Messpunkt, Versuch 4. Zu sehen ist ein rascher Anstieg der Temperatur nach der Trocknung des Bodens

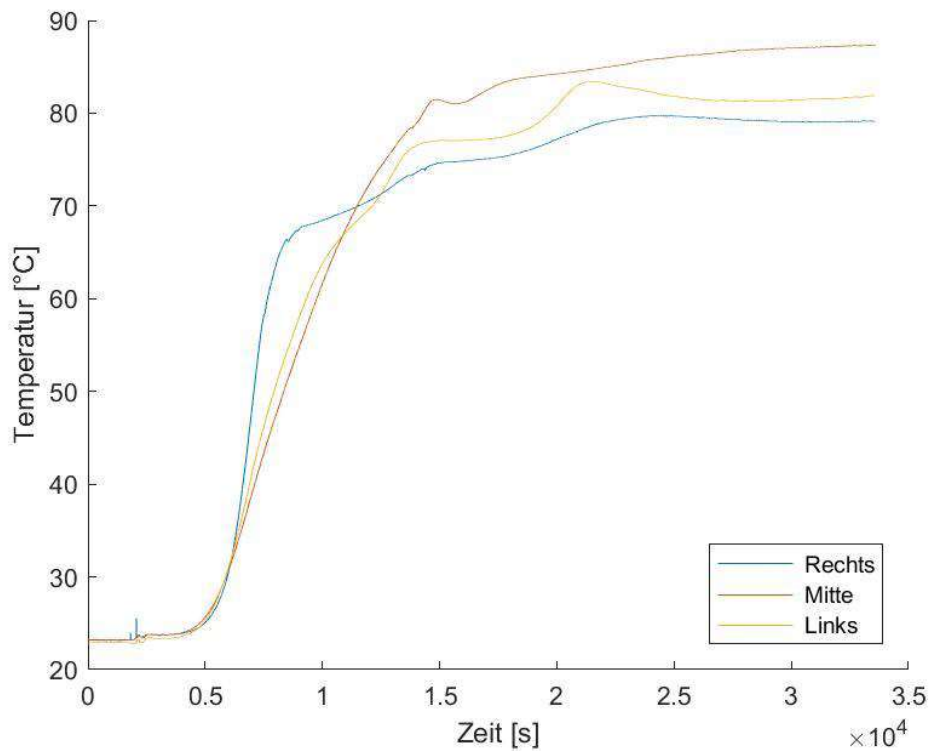


Abbildung 4-25: Temperaturverlauf des Erdreichs am zweiten Messpunkt, Versuch 4

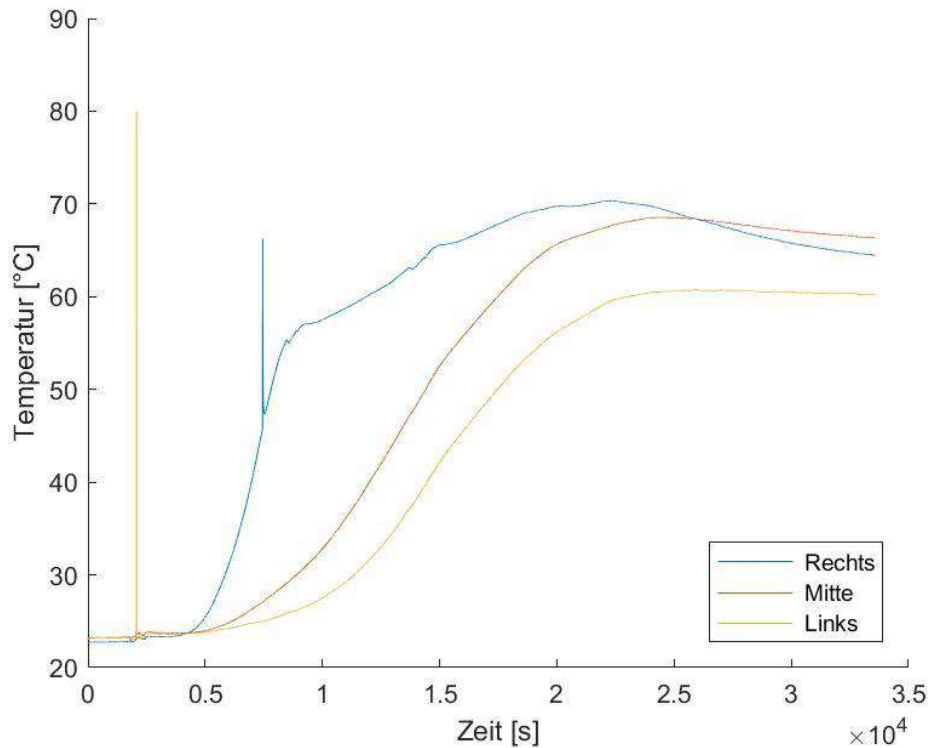


Abbildung 4-26: Temperaturverlauf des Erdreichs am dritten Messpunkt, Versuch 4. Gut erkennbar sind hier die zwischenzeitlichen Ausfälle der Thermoelemente

In **Abbildung 4-27** ist das Erdreich nach dem Abkühlen und dem Entfernen des Deckels dargestellt. Deutlich zu erkennen ist hier, dass der getrocknete Bereich, der durch den äußersten Ring gekennzeichnet ist, sehr groß ist. Dies kommt durch die konvektive Wärmeübertragung zustande. Die inneren Ringe, in dunkelgrau und rot, stellen den pyrolysierten Bereich des Bodens dar.



Abbildung 4-27: Erdreich nach Beendigung von Versuch 4.

4.4 Gegenüberstellung aller Versuche

Dieses Unterkapitel dient dem Vergleich der erfolgten Versuche. Um eine Übersicht über die Lanzentemperatur, die Versuchsdauer und den getrockneten Bodenbereich zu ermöglichen, dient **Tabelle 4-3**. Hier wird deutlich, dass der vierte Versuch, der mittels Luftdurchströmung für einen konvektiven Wärmeübergang gesorgt hat, zwar die kürzeste Laufzeit hatte, aber dennoch den größten Trockenbereich liefern konnte.

Tabelle 4-3: Gegenüberstellung der vier Versuche

Versuch	Temperatur Lanze	Versuchsdauer	Trockener Durchmesser
1	600 °C	11h 25 min	42 cm
2	300 °C	13h 48 min	33 cm
3	900 °C	11h 06 min	57 cm
4	600 °C	09h 19 min	85 cm

In obiger Tabelle ist ersichtlich, dass aus einer extremen Steigerung der Temperatur eine Vergrößerung des trockenen Bereichs resultiert, die Versuchsdauer aber dennoch nur gering verkürzt wird. Zudem tritt bei 900 °C eine nicht gewünschte Aufschmelzung des Bodens auf und auch der Energieverbrauch in Bezug auf die Heizleistung ist um ein Vielfaches höher.

In **Abbildung 4-28** ist eine Gegenüberstellung des Erdreichs jeweils nach Beendigung des Versuchs zu sehen. Bild 1 stellt die Probe nach dem ersten Versuch dar, wobei der getrocknete Bereich ganz außen, sowie die pyrolysierte Zone im Inneren gut zu erkennen sind. Bild 2 zeigt, dass beim 300 °C Versuch der betroffene Bereich hauptsächlich getrocknet vorliegt, während nur wenig pyrolysiertes Material zu sehen ist. In Bild 3 erkennt man, dass bei 900 °C größere Mengen pyrolysierte und gesinterte Probe vorliegen und auch der Trocknungskreis ist gut ersichtlich. Der Versuch, der durch Konvektion unterstützt wurde, ist in Bild 4 dargestellt, wo eine deutliche Ausweitung der getrockneten Zone zu erkennen ist.

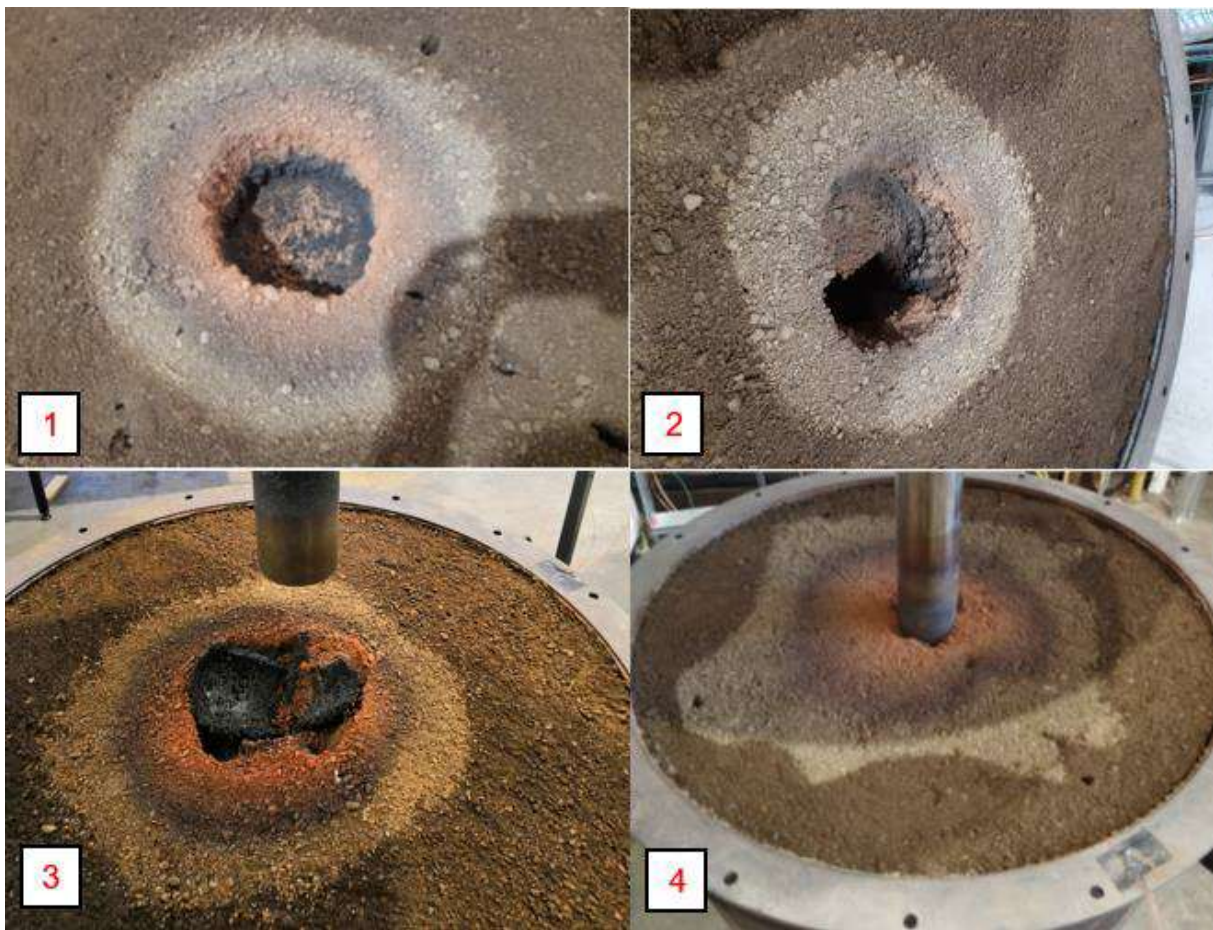


Abbildung 4-28: Vergleich des Erdreichs der vier Versuche jeweils nach Versuchsende, gekennzeichnet durch Nummerierung. Zu sehen ist der getrocknete sowie der pyrolysierte und der gesinterte Bereich.

5 Gegenüberstellung mit Simulationsdaten

Um ein besseres Verständnis für Versuchsergebnisse zu erlangen, kommt es zunächst zur Simulation der Daten. Dafür wird jeder der vier Versuche theoretisch modelliert und mit den erfolgten Durchläufen in der Barbarahalle verglichen. Alle Simulationsdaten sind aus dem *Zwischenbericht Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung – InnoBLA* [19] entnommen.

5.1 Versuch 1

Für den ersten Versuch wird für die Lanzentemperatur ein Polynom vorgegeben, das auf den Messdaten des Experiments basiert. Der Temperaturverlauf der Heizlanze sowie das dazugehörige Polynom sind in **Abbildung 5-1** zu sehen.

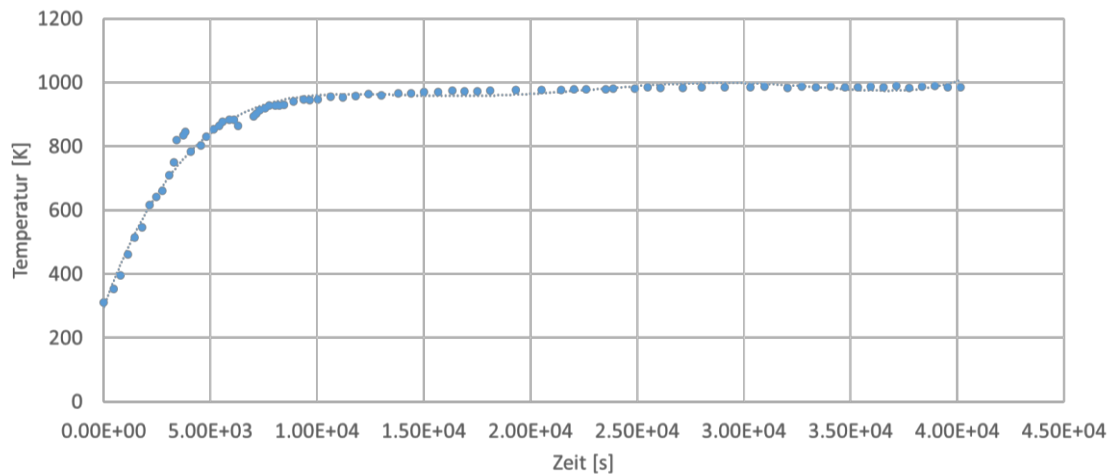


Abbildung 5-1: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 1, basierend auf den Daten der Simulation [19]

Die zeitlichen Vergleiche der Temperaturen der Messstellen des Modells sind in **Abbildung 5-2**, **Abbildung 5-3**, **Abbildung 5-4** und **Abbildung 5-5** dargestellt. Es lässt sich eine starke Abweichung der Messungen untereinander beobachten, welche sich durch die Inhomogenität des Bodens erklären lässt. Die Messungen der ersten beiden Messstellen, **Abbildung 5-2** und **Abbildung 5-3**, lassen sich sehr gut durch das Modell abbilden. Bei den äußeren Messstellen, **Abbildung 5-4** und **Abbildung 5-5**, ist der Temperaturverlauf bis 25.000 Sekunden gut wieder spiegelt. Danach ist die Wärmeabfuhr im Kühlmantel des Modells größer, als jene der Messung und es kommt zur Modellierung von zu geringen Temperaturen. Eine Korrektur könnte durch die Implementierung eines Wärmeübergangs zwischen Mantel und Boden erreicht werden, was jedoch messtechnisch schwer zu bestimmen wäre.

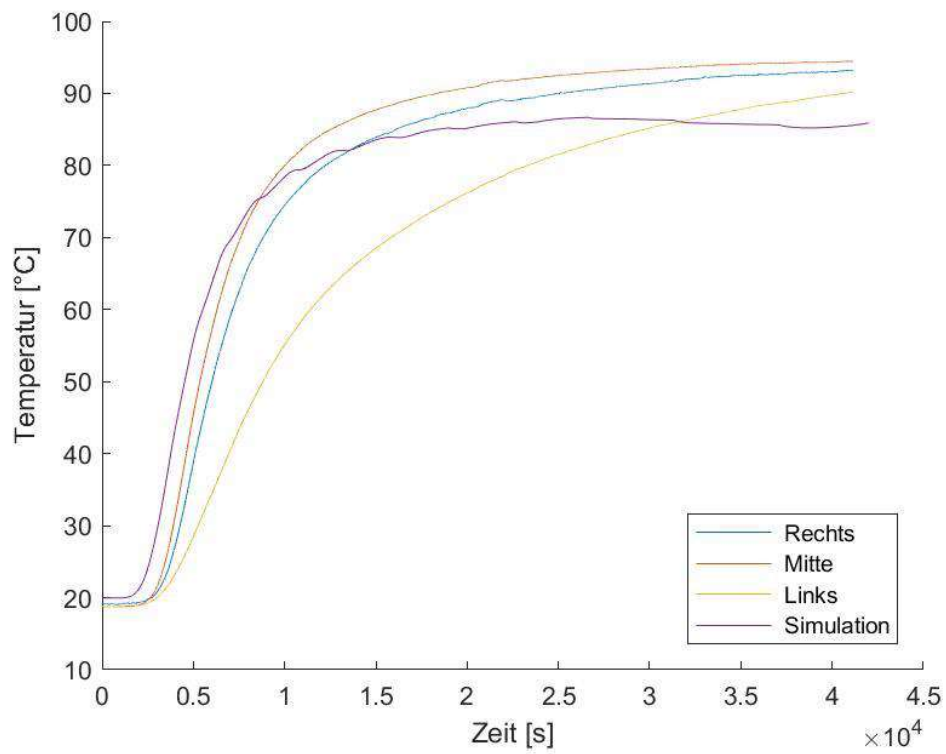


Abbildung 5-2: Temperaturvergleich Modell - Messung am ersten Messpunkt, Versuch 1 [19]

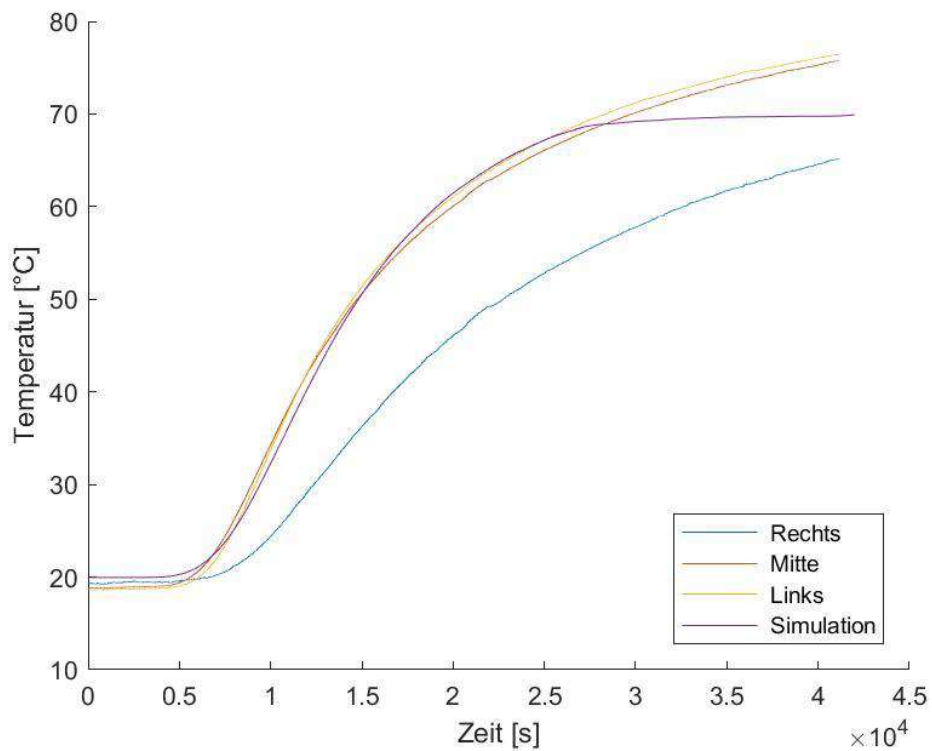


Abbildung 5-3: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 1 [19]

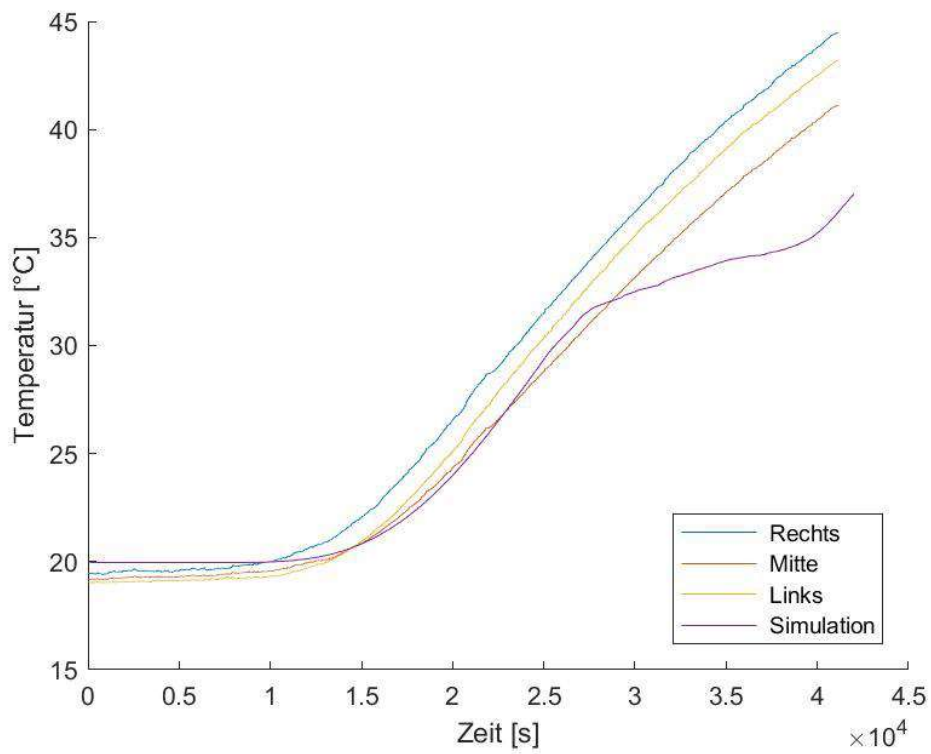


Abbildung 5-4: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 1 [19]

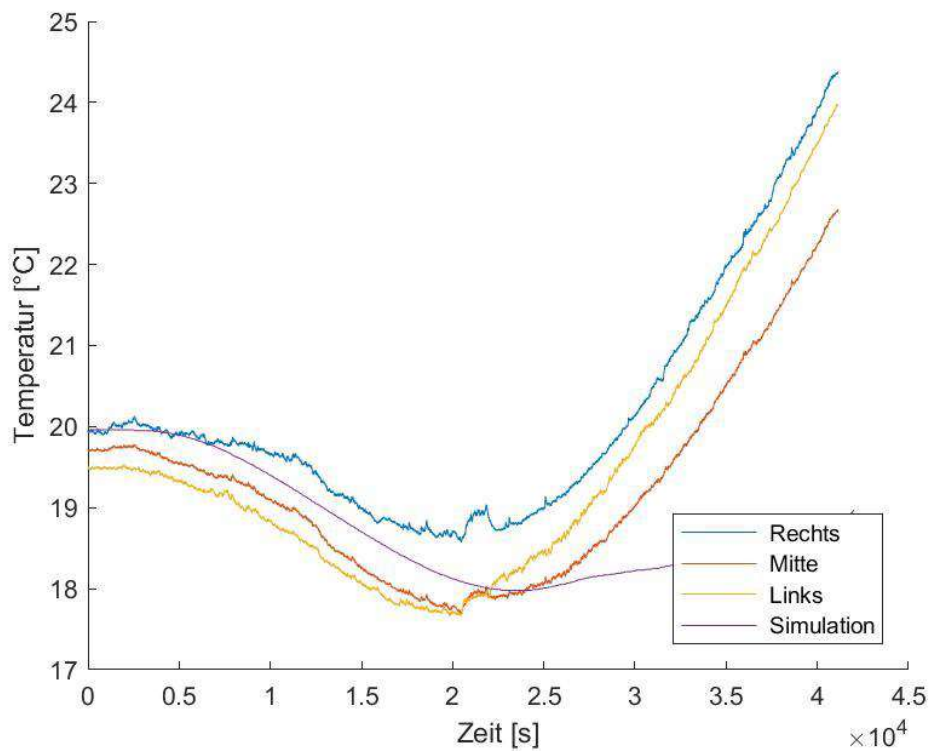


Abbildung 5-5: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 1 [19]

5.2 Versuch 2

Die Simulation des zweiten Versuchs unterscheidet sich durch den zeitlichen Temperaturverlauf der Lanze vom ersten Versuch, siehe **Abbildung 5-6**. Die restlichen Parameter wurden übernommen. In der Grafik ist ebenfalls das Polynom ersichtlich, das als Randbedingung für das Modell dient.

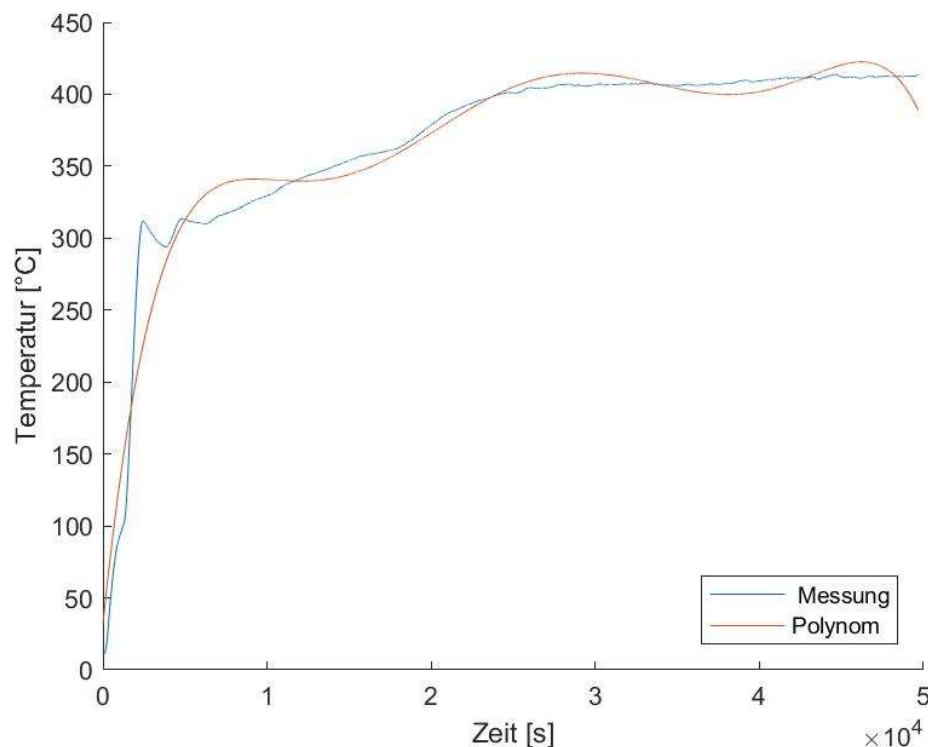


Abbildung 5-6: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 2 [19]

In **Abbildung 5-7**, **Abbildung 5-8**, **Abbildung 5-9** und **Abbildung 5-10** sind die zeitlichen Vergleiche der Temperaturen der Messstellen des Modells dargestellt. Die Messstellen sind dabei mit identischem Abstand zur Lanze im jeweiligen Diagramm ersichtlich. Analog zu Versuch 1 kann eine starke Abweichung der Messungen untereinander beobachtet werden, wobei die ersten beiden Messungen (**Abbildung 5-7** und **Abbildung 5-8**) sehr gut durch das Modell abbildbar sind, während bei den äußeren Messstellen (**Abbildung 5-9** und **Abbildung 5-10**) der zeitliche Temperaturanstieg unterschätzt wird. Dies ist auf den fehlenden Wärmeübergang zwischen Mantel und Boden zurückzuführen.

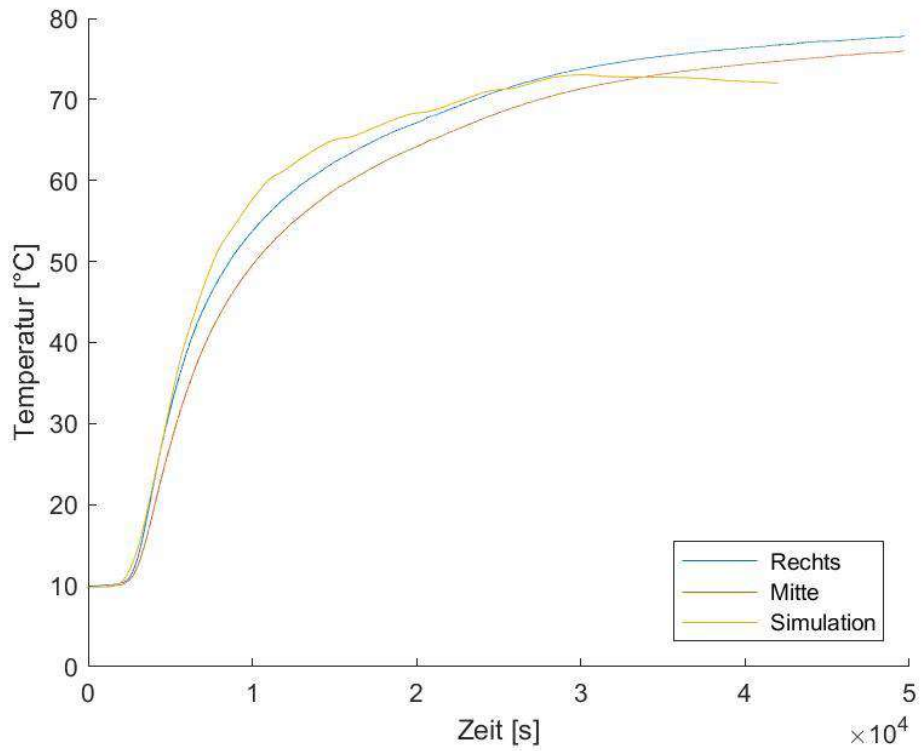


Abbildung 5-7: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 2 [19]

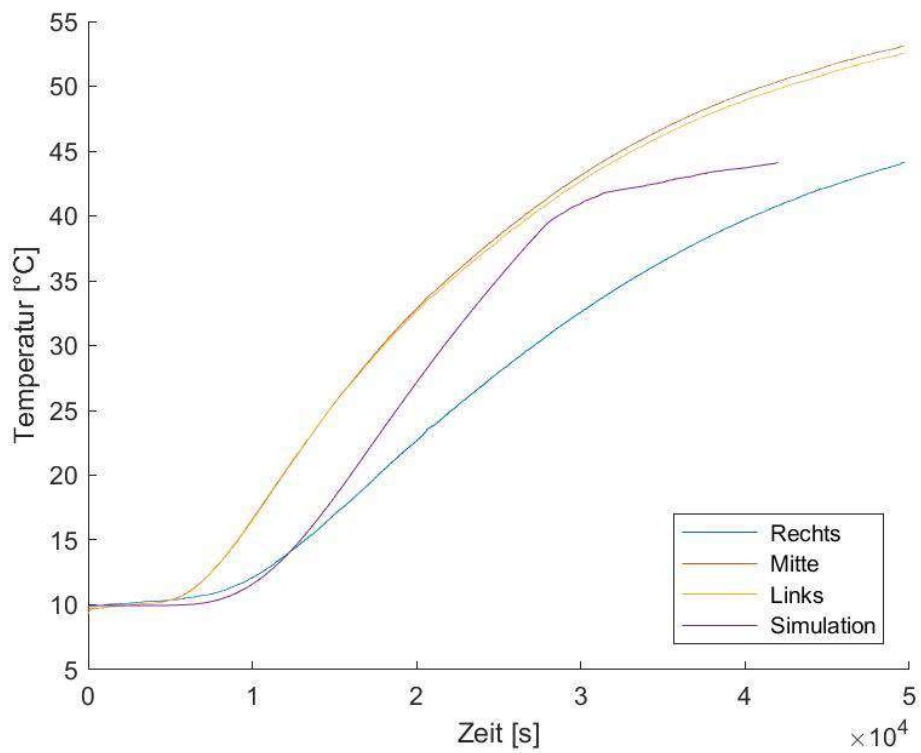


Abbildung 5-8: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 2 [19]

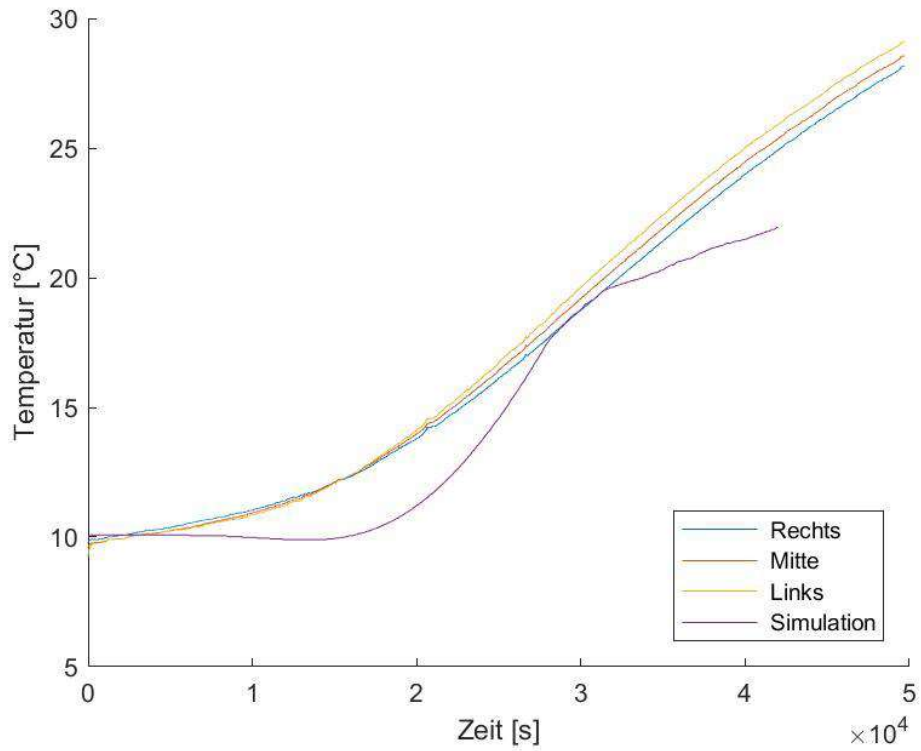


Abbildung 5-9: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 2 [19]

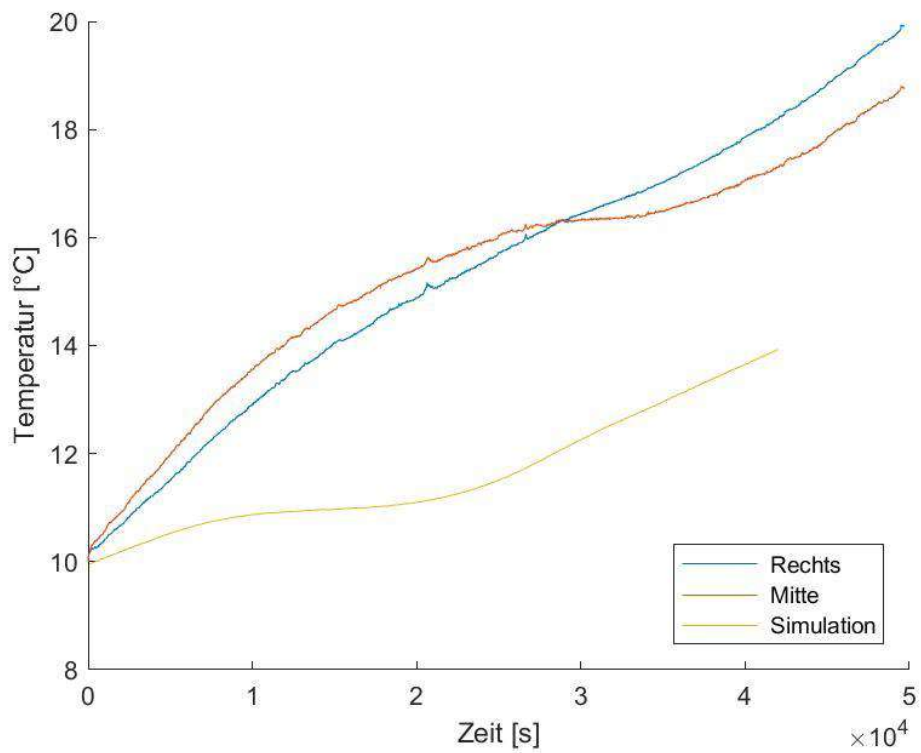


Abbildung 5-10: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 2 [19]

5.3 Versuch 3

Die Simulation des dritten Versuchs unterscheidet sich durch den zeitlichen Temperaturverlauf der Lanze vom ersten Versuch und ist in **Abbildung 5-11** zu sehen. Die restlichen Parameter wurden vom ersten Versuch übernommen. In der Grafik ist ebenfalls das Polynom ersichtlich, das als Randbedingung für das Modell dient.

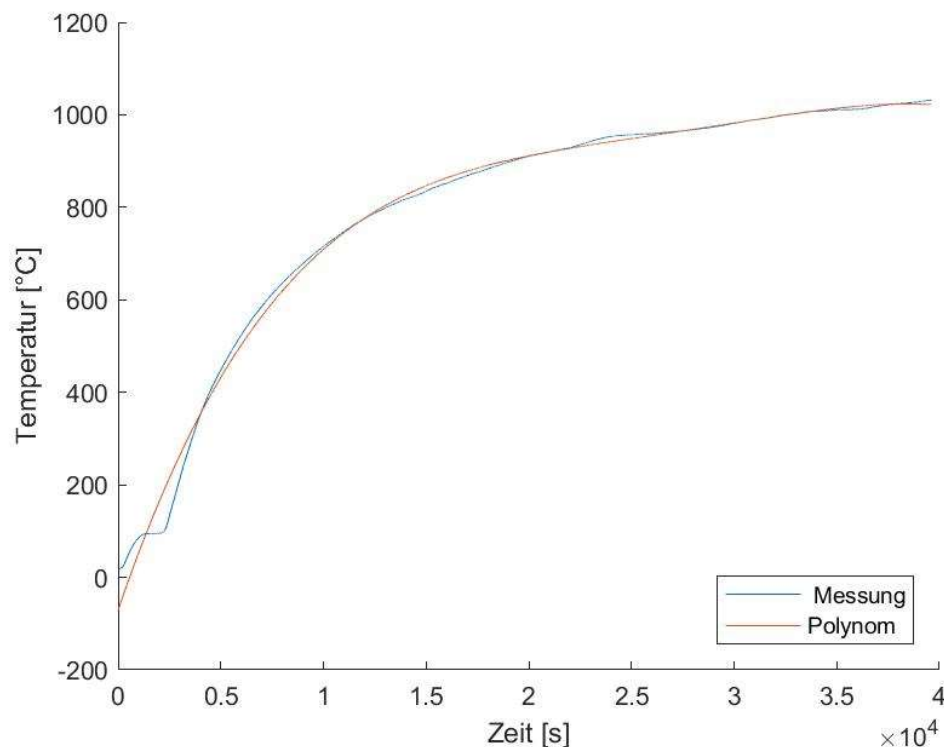


Abbildung 5-11: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 3 [19]

In den folgenden Grafiken, **Abbildung 5-12**, **Abbildung 5-13**, **Abbildung 5-14** und **Abbildung 5-15**, ist der zeitliche Verlauf der Temperaturen der Messpunkte des Modells dargestellt. Die Messstellen wurden mit identischem Abstand zur Lanze in den Grafiken abgebildet. Bei den inneren Messpunkten (**Abbildung 5-12**) variieren die Daten sehr stark. Das Modell zeigt hier ein identes Verhalten zu den Versuchen und liegt innerhalb der Messdaten. Da bei diesen Temperaturen der Wärmeübergang zum Mantel eine untergeordnete Rolle spielt, sind im Gegensatz zu den ersten beiden Versuchen hier auch die äußeren Messwerte reproduzierbar, siehe **Abbildung 5-14** und **Abbildung 5-15**.

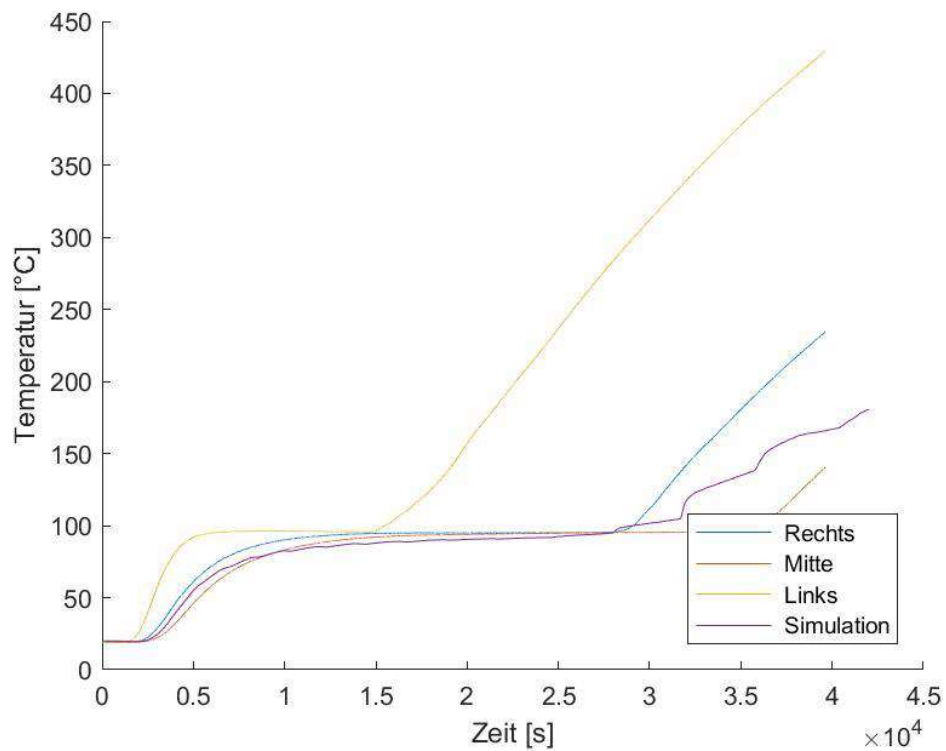


Abbildung 5-12: Temperaturvergleich Modell - Messung am ersten Messpunkt, Versuch 3 [19]

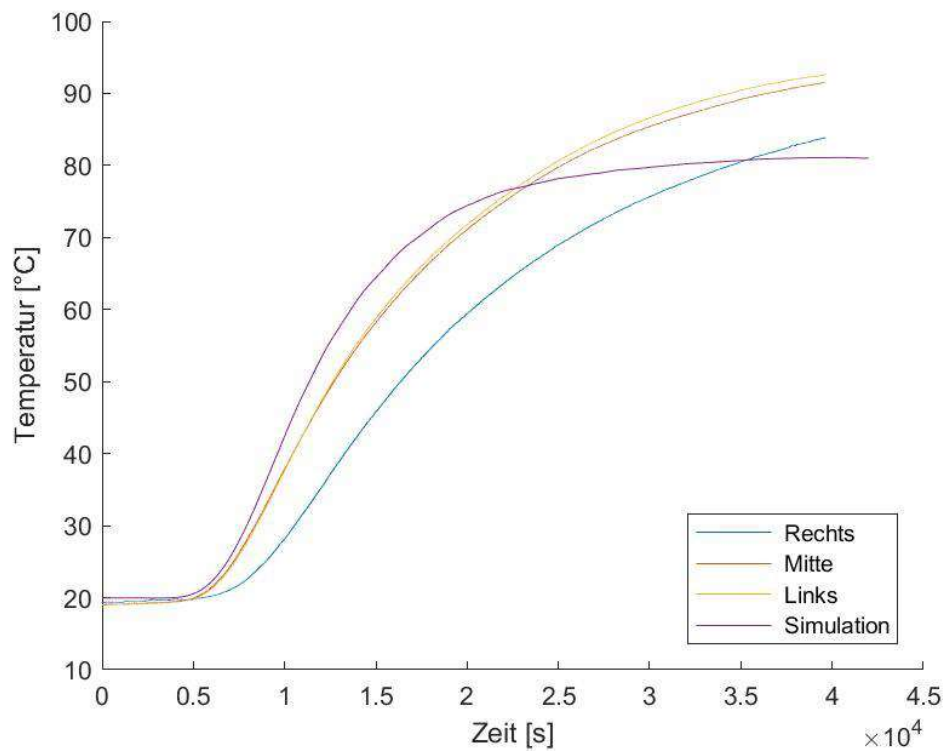


Abbildung 5-13: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 3 [19]

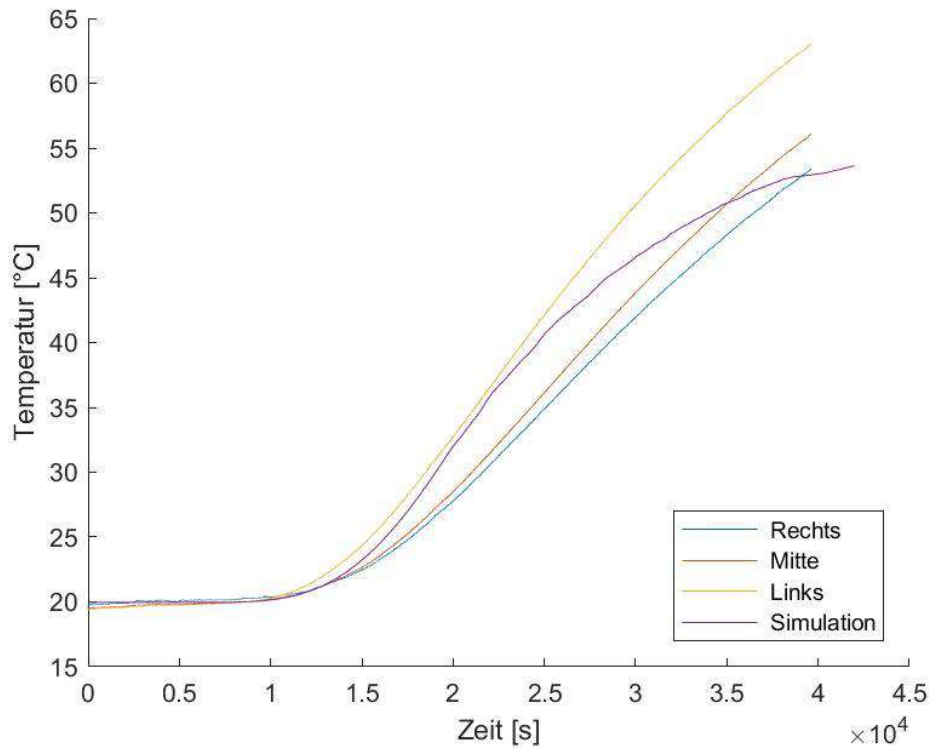


Abbildung 5-14: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 3 [19]

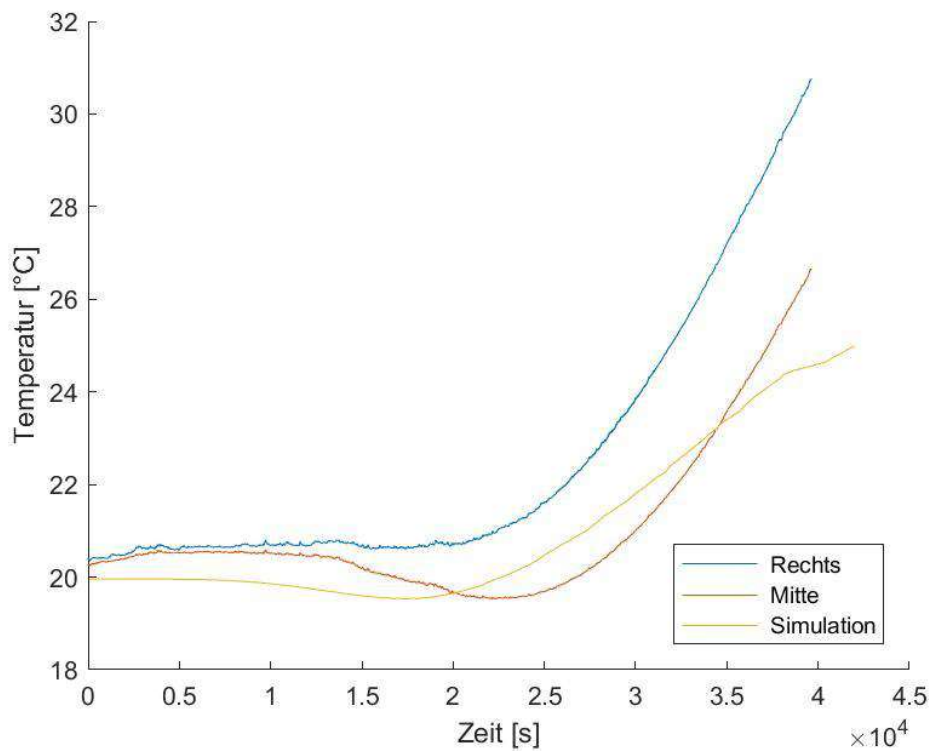


Abbildung 5-15: Temperaturvergleich Modell - Messung am vierten Messpunkt, Versuch 3 [19]

5.4 Versuch 4

Beim vierten Versuch erfolgt eine Luftinjektion sowie eine Luftabsaugung. Der Volumenstrom beträgt je Rohr $18,75 \text{ NI/min}$. Als Randbedingung für die Lanze kommt erneut ein Polynom der Temperatur, basierend auf den Messdaten, zur Anwendung. Auch die Temperatur der injizierten Luft wurde erfasst, kann jedoch je nach Stelle der Injektion stark schwanken, weswegen der Mittelwert zur Bildung des Polynoms genutzt wird. Der Temperaturverlauf der Lanze ist in **Abbildung 5-16** dargestellt. Die einzelnen Temperaturmessungen sowie das Polynom sind in **Abbildung 5-17** zu sehen.

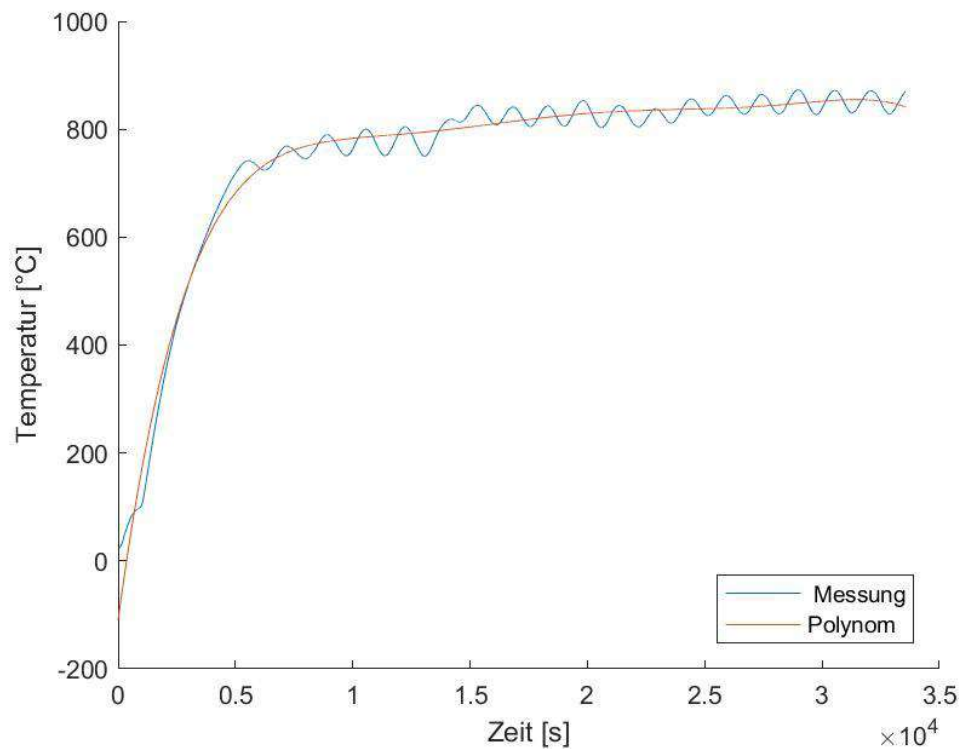


Abbildung 5-16: Temperaturverlauf der Heizlanze bei Versuch 4 [19]

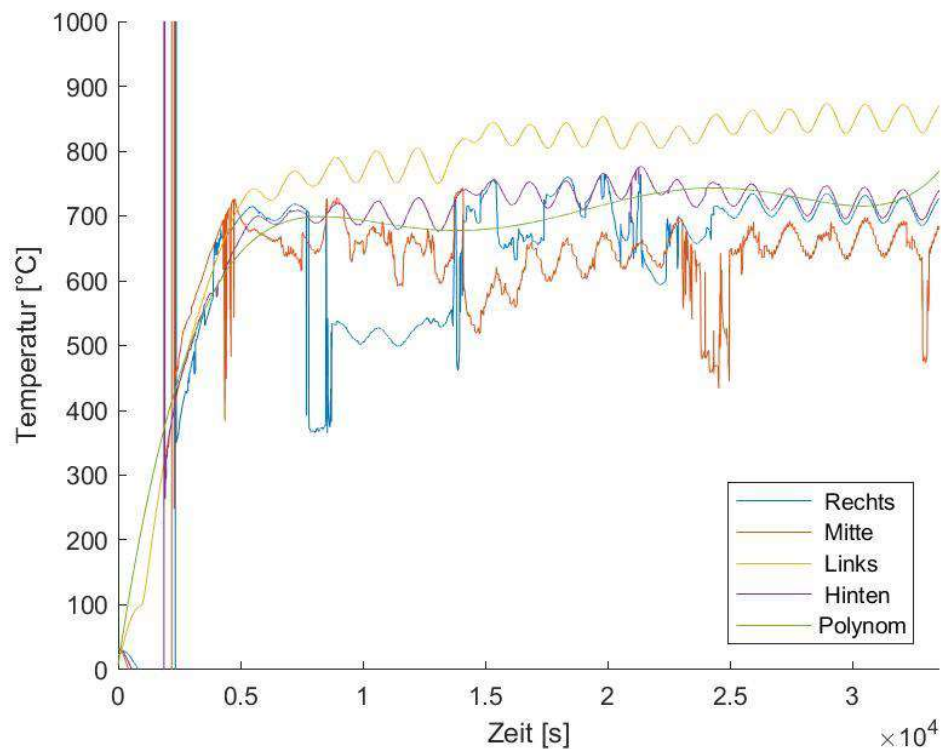


Abbildung 5-17: Temperatur der injizierten Luft der Messung an allen vier Injektoren sowie das Polynom der Eingangsdaten der Simulation [19]

In **Abbildung 5-18**, **Abbildung 5-19** und **Abbildung 5-20** ist der Vergleich der Messdaten mit dem Modell dargestellt. Es zeigt sich, dass die Erwärmung im Versuch deutlich schneller voranschreitet als im Modell. Die Begründung liegt darin, dass der Wärmetransport primär über Konvektion erfolgt und in der Mitte des Reaktors im Modell, in der sich auch die Messfühler befinden, eine sehr geringe Strömungsgeschwindigkeit bzw. im Fall des ersten Messpunktes (**Abbildung 5-18**) sogar eine Rückströmung vom Boden aus auftritt.

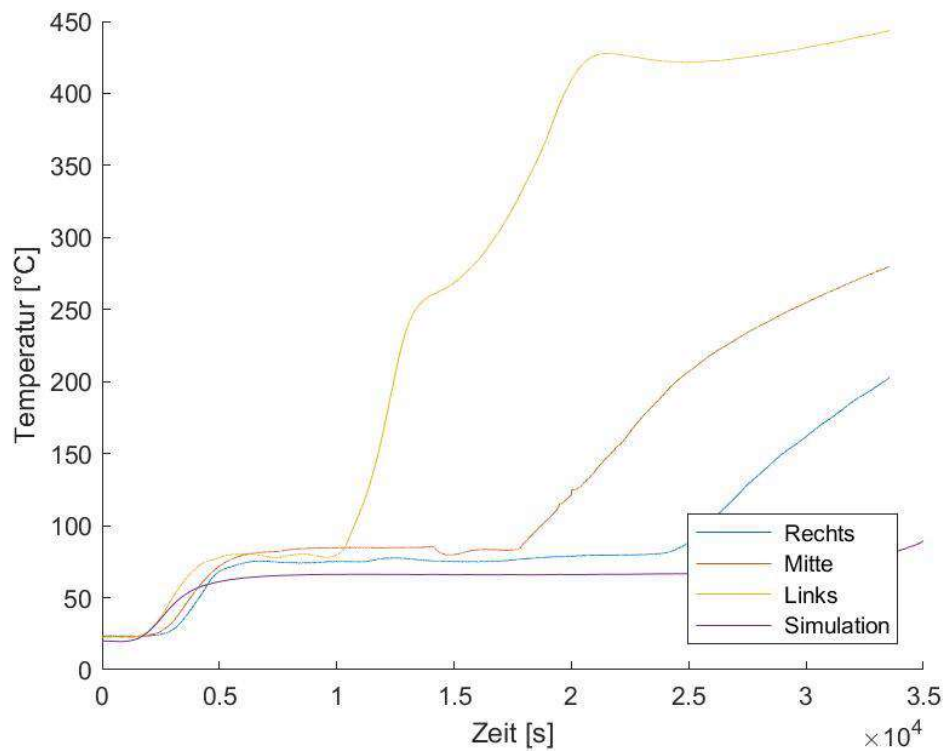


Abbildung 5-18: Temperaturvergleich Modell - Messung am ersten Messpunkt, Versuch 4 [19]

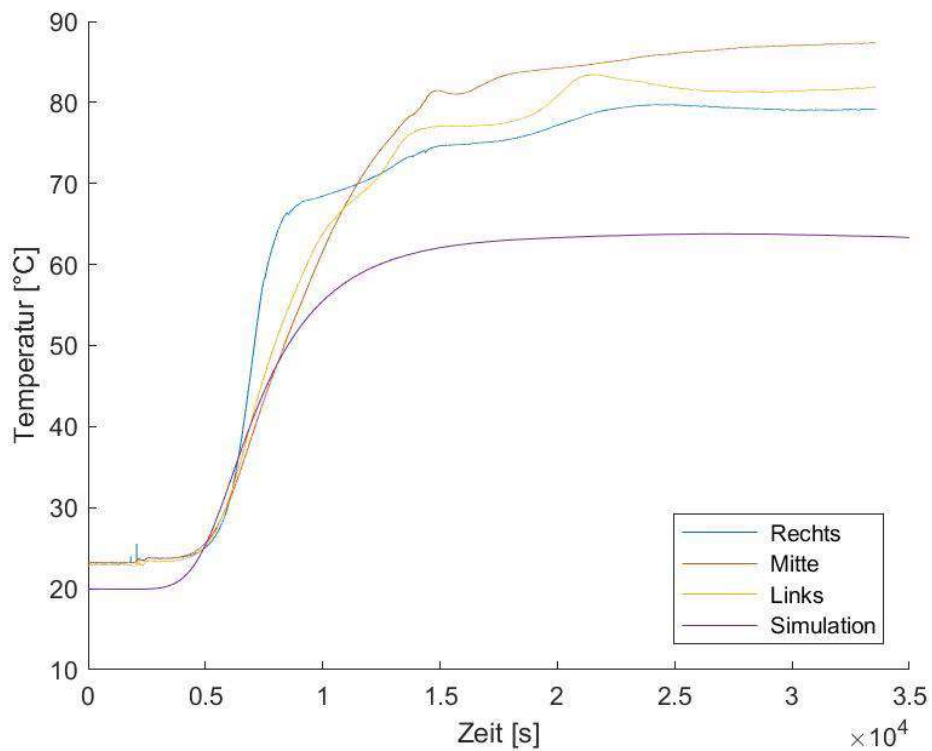


Abbildung 5-19: Temperaturvergleich Modell - Messung am zweiten Messpunkt, Versuch 4 [19]

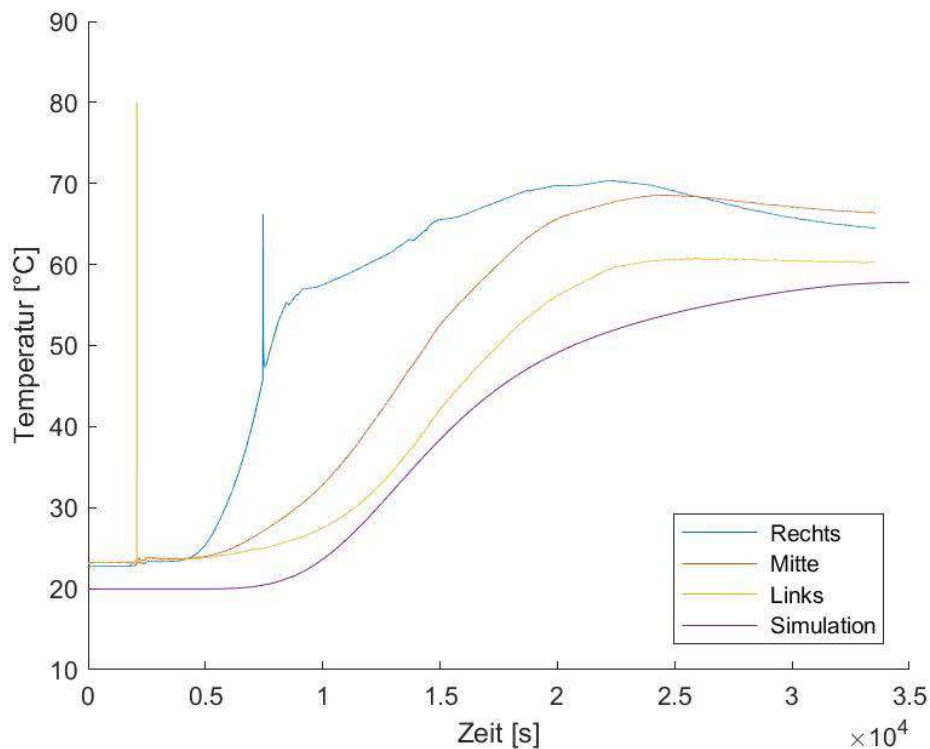


Abbildung 5-20: Temperaturvergleich Modell - Messung am dritten Messpunkt, Versuch 4 [19]

5.5 Phänomenologische Betrachtung der Versuche anhand der Simulationsergebnisse

Die phänomenologische Betrachtung der Versuche findet anhand des Wärmeprofils von Versuch 1 und Versuch 4 statt, die beide jeweils mit 600 °C stattgefunden haben. Dabei erfolgt bei Versuch 1 der Wärmetransport nur über Wärmeleitung, während für Versuch 4 ein konvektiver Wärmetransport simuliert wird. Diese Betrachtung dient dem besseren Verständnis der physikalischen Vorgänge, die hinter der Trocknung stehen.

5.5.1 Phänomenologische Betrachtung für Versuch 1

Wird der Versuch gestartet, ist gleich eine schnelle Erwärmung des lanzennahen Bereichs erkennbar, die jedoch durch die Verdunstung des Wassers gebremst wird. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit von 0,08 W/(mK) des trockenen Bodens, wirkt dieser isolierend und verringert somit die Wärmestromdichte. Zu erkennen ist dies in **Abbildung 5-21**, **Abbildung 5-22** und **Abbildung 5-23**. Diese Grafiken stellen das Temperaturfeld, die

spezifische Masse des flüssigen Wassers und die Wärmeleitfähigkeit des Bodens nach 1300 Sekunden dar.

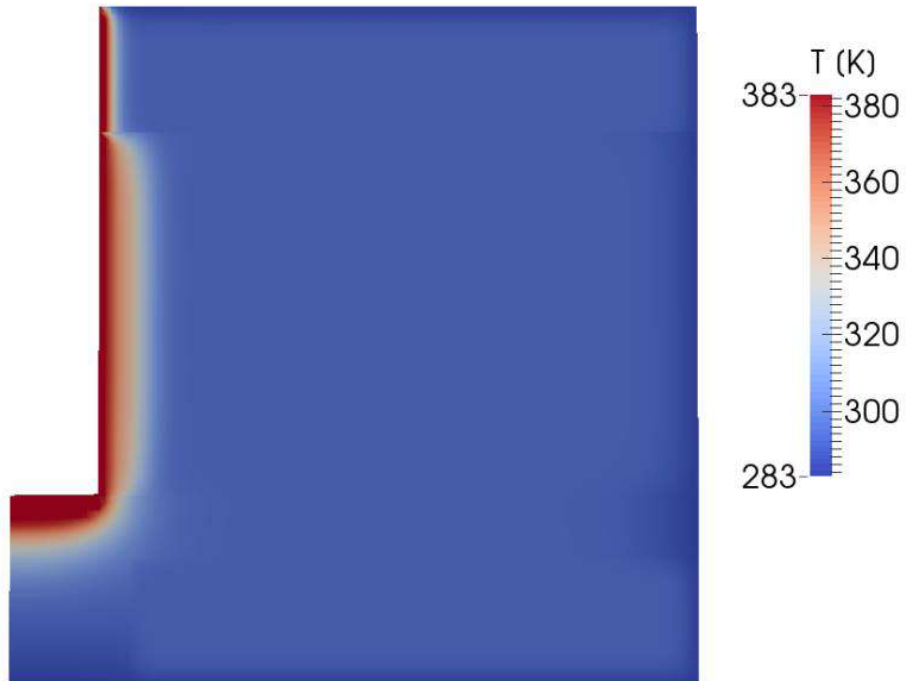


Abbildung 5-21: Temperaturfeld von Versuch 1 nach 1300 Sekunden. Die erste Zellreihe zeigt eine Überschreitung der Temperaturmarke von 100 °C. [19]

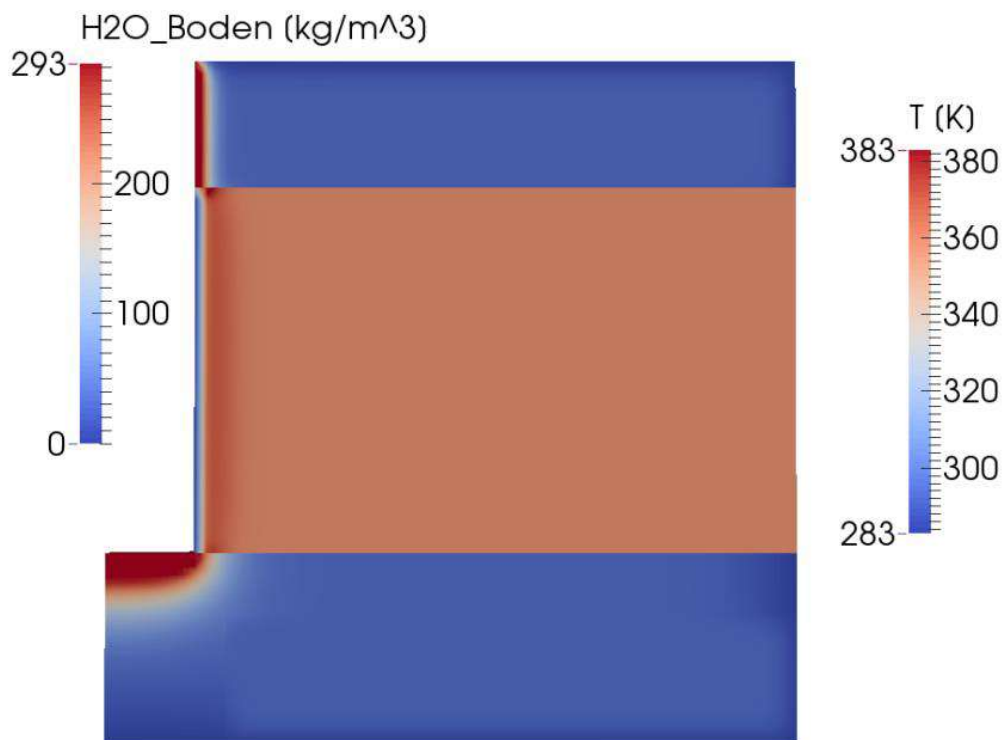


Abbildung 5-22: Spezifische Masse des flüssigen Wassers nach 1300 Sekunden bei Versuch 1. Es ist die komplette Trocknung der ersten Zellreihe zu erkennen. [19]

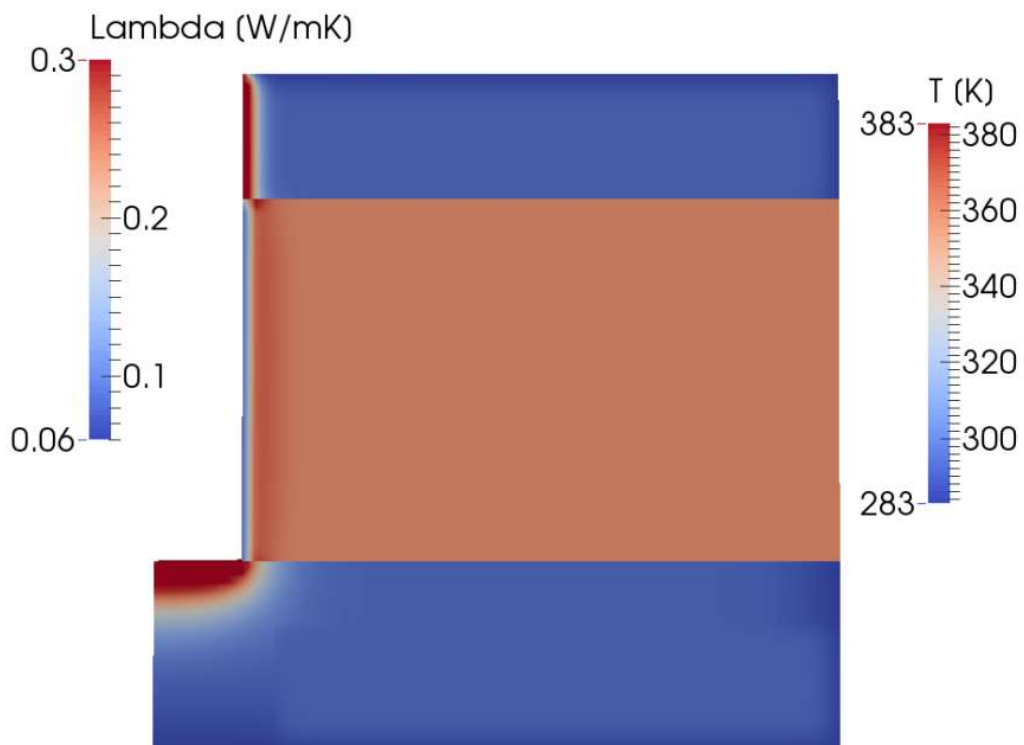


Abbildung 5-23: Wärmeleitfähigkeit des Bodens nach 1300 Sekunden, Versuch 1. Die Wärmeleitfähigkeit sinkt aufgrund des trockenen Bodens und eine Isolationsschicht ist erkennbar. [19]

Mit zunehmender Trocknung nimmt auch die isolierende Schicht des Erdreichs zu, was dazu führt, dass der Prozess nur sehr langsam fortschreiten kann. Die Leichtzustellung und der Feuerfestbeton im Boden besitzen jeweils eine höhere Wärmeleitfähigkeit als der trockene bzw. pyrolysierte Boden, das sorgt für eine Ausbreitung der trockenen Regionen an der Oberfläche sowie im Boden. Dargestellt ist dies in **Abbildung 5-24** und **Abbildung 5-25**.

In **Abbildung 5-26** ist zu sehen, dass sich der pyrolysierte Bereich analog dazu verhält, da die Pyrolyse die Wärmeleitfähigkeit auf $0,06 \text{ W/(mK)}$ absinken lässt. Alle drei nachfolgenden Abbildungen stellen den jeweiligen Zustand nach 20000 Sekunden dar.

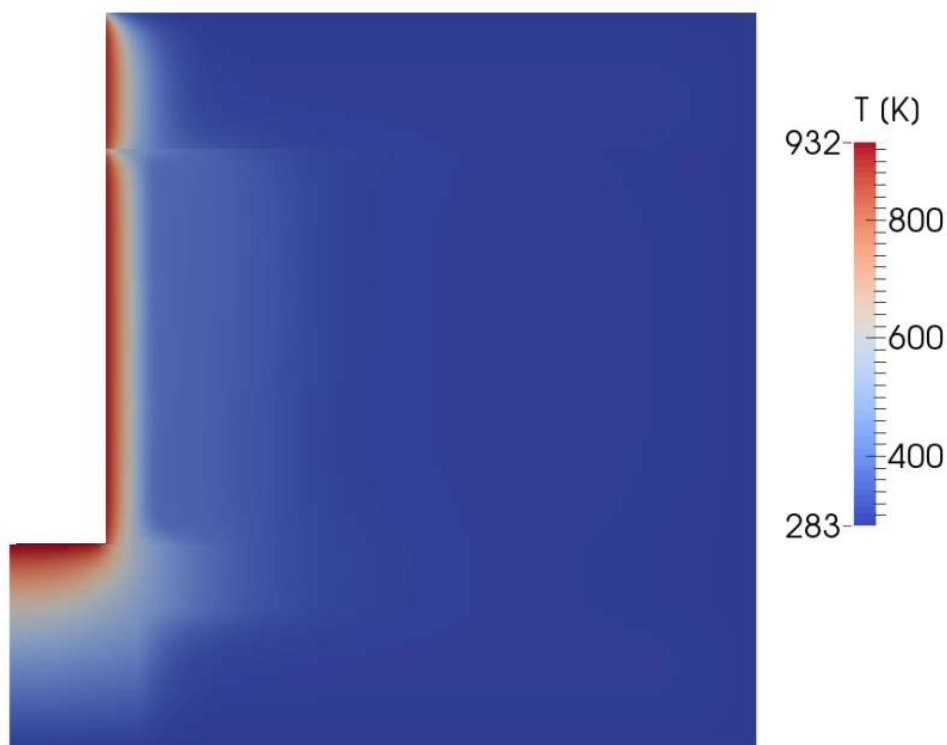


Abbildung 5-24: Temperaturfeld von Versuch 1 nach 20000 Sekunden. [19]

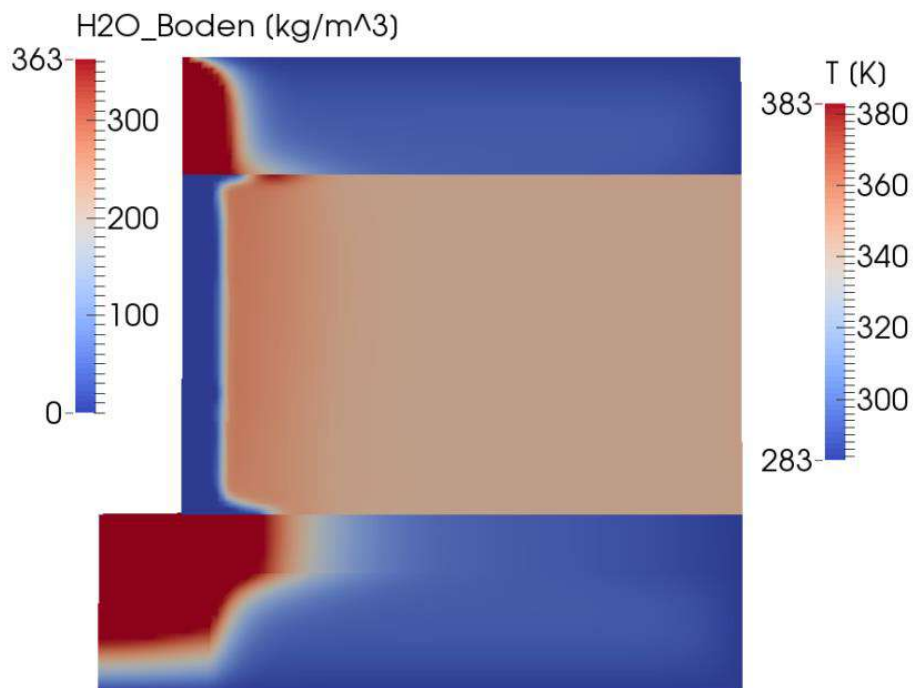


Abbildung 5-25: Spezifische Masse des flüssigen Wassers bei Versuch 1 nach 20000 Sekunden. Erkennbar ist, dass die trockene Schicht an Stärke gewonnen hat und Konzentrationszonen sowohl am Deckel als auch im Boden auftreten. [19]

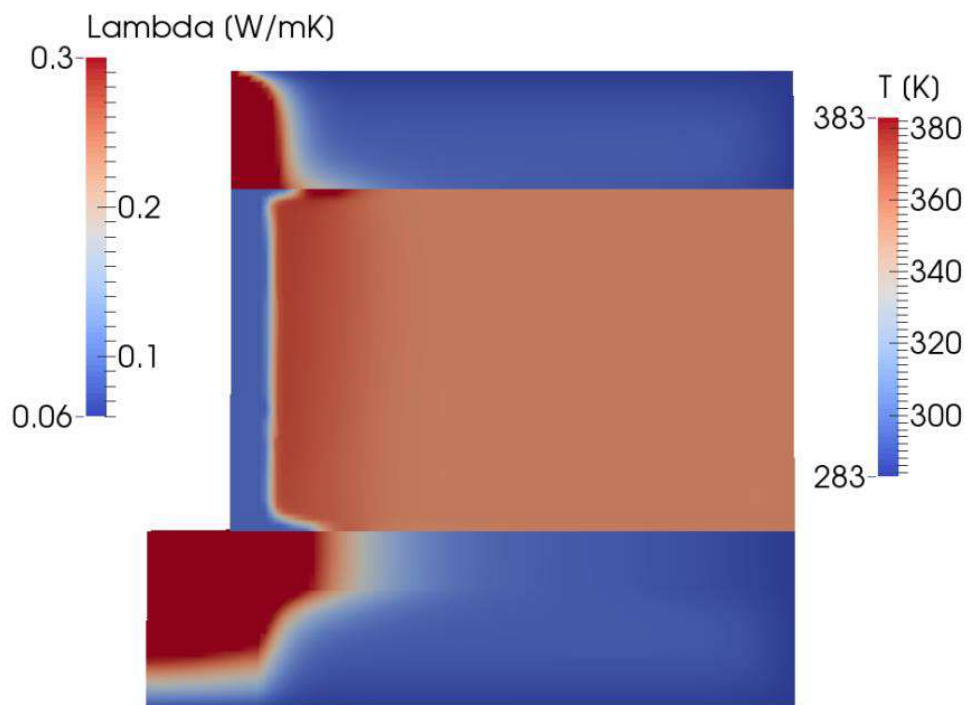


Abbildung 5-26: Wärmeleitfähigkeit des Bodens bei Versuch 1 nach 20000 Sekunden. Die Isolierung nimmt mit zunehmender Stärke der trockenen Schicht zu. [19]

5.5.2 Phänomenologische Betrachtung für Versuch 4

Das Temperaturprofil sowie die generelle Trocknung in diesem Versuch kommen primär durch die Konvektion zustande, sodass der Widerstand, der durch die Wärmeleitfähigkeit des trockenen bzw. pyrolysierten Bodens hervorgerufen wird, weitgehend vernachlässigt werden kann. In **Abbildung 5-27** und **Abbildung 5-28** sind die Temperaturprofile des Versuchs nach 10000 Sekunden sowie nach 20000 Sekunden zu sehen. Verglichen mit dem ersten Versuch, der mit identer Lanzentemperatur durchgeführt wurde, ergibt sich hier ein wesentlich größerer trockener Bereich, der sich aufgrund der Strömung primär am Reaktorboden ausbildet.

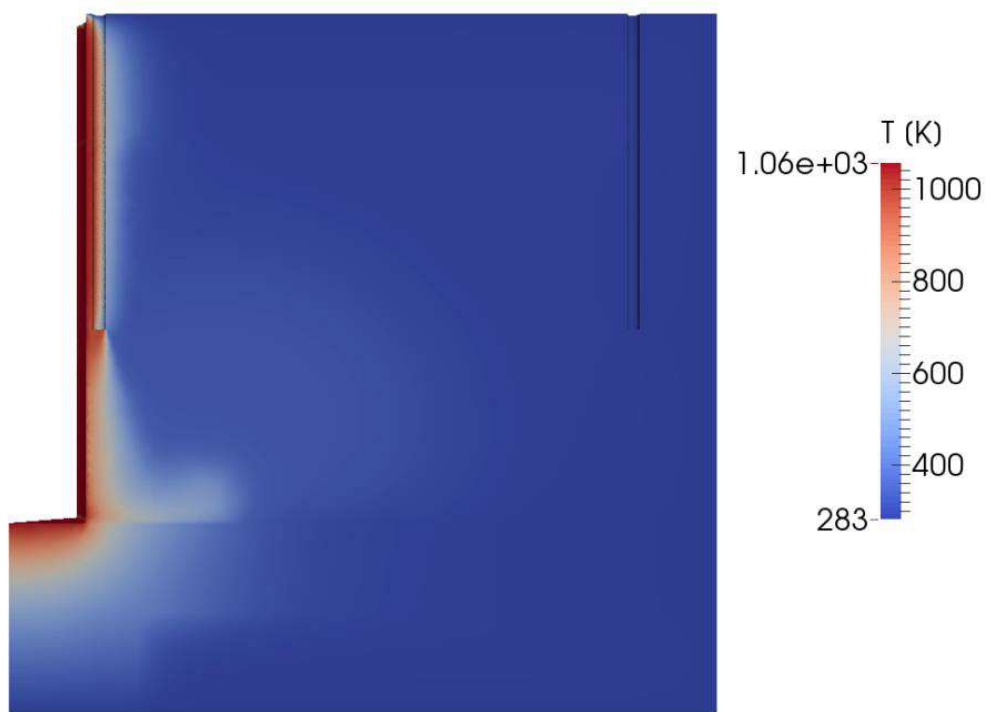


Abbildung 5-27: Temperaturprofil von Versuch 4 nach 10000 Sekunden. [19]

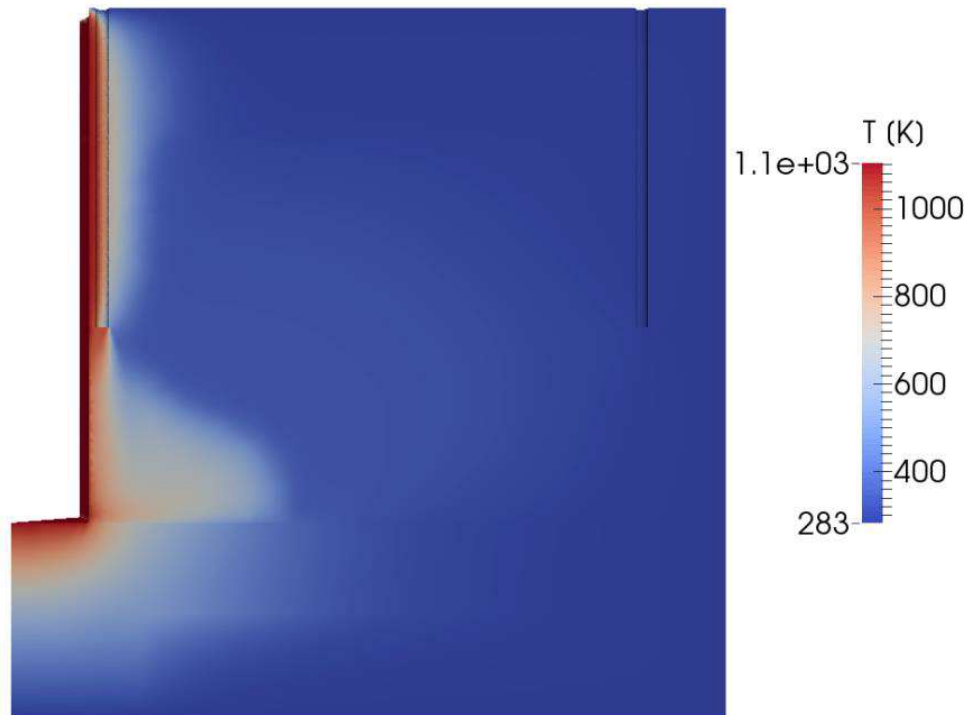


Abbildung 5-28: Temperaturprofil von Versuch 4 nach 20000 Sekunden. [19]

Die Verdunstung des Wassers, die in erster Linie durch den Wärmestrom zustande kommt, folgt ebenfalls dem konvektiven Strömungsfeld. In **Abbildung 5-29** und **Abbildung 5-30** ist die spezifische Masse an Wasser nach 10000 Sekunden sowie nach 20000 Sekunden dargestellt.

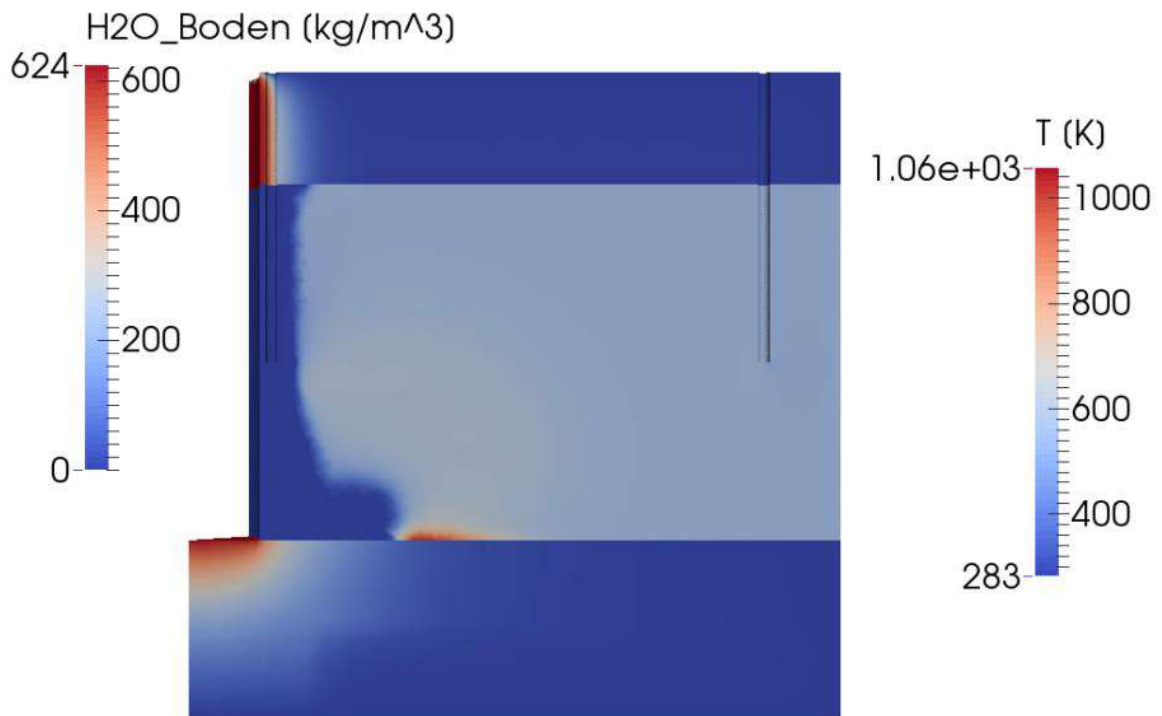


Abbildung 5-29: Spezifische Masse des flüchtigen Wassers bei Versuch 4 nach 10000 Sekunden. [19]

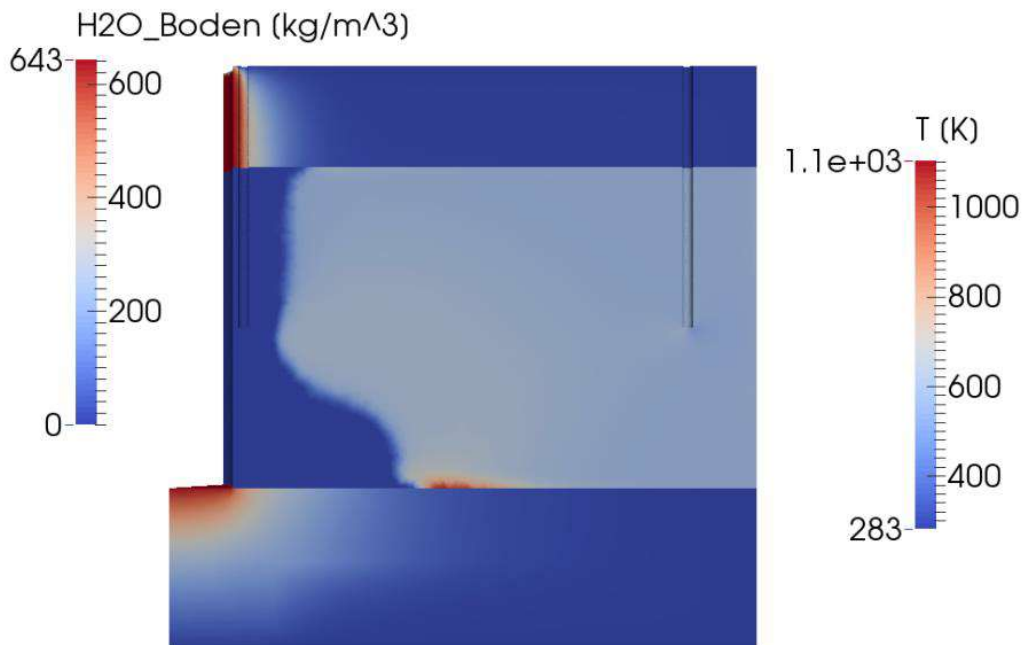


Abbildung 5-30: Spezifische Masse des flüchtigen Wassers bei Versuch 4 nach 20000 Sekunden. [19]

6 Diskussion und Ausblick

Im Zuge dieser Arbeit wurden Versuche im Labor zur Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit von organischem Boden durchgeführt. Diese Experimente dienten als Vorversuche für jene, die im größeren Maßstab in der Barbarahalle des Lehrstuhls für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben erfolgten. Für die Versuche im Technikumsmaßstab fungierte eine eigens angefertigte Versuchskonstruktion aus Stahl sowie eine Heizlanze, mit deren Hilfe eine Erwärmung des Bodens bewirkt werden sollte. Um herauszufinden, ob eine thermische Sanierung von Böden künftig auch in der Praxis angedacht werden kann, wurden Untersuchungen zur Feststellung des Wärmetransports im Erdreich angestellt.

Bei der Betrachtung der Wärmeleitfähigkeit fällt auf, dass diese sowohl bei den Versuchen im Labor als auch bei jenen in der Barbarahalle sehr klein ausfällt. Die geringe Wärmeleitfähigkeit, die in den Vorversuchen festgestellt werden konnte, stellt beim trockenen Boden ein Problem dar für den Energietransport. Dies konnte durch die Versuche am Versuchsstand deutlich gezeigt werden. Hier stellt die getrocknete Erdschicht eine Dämmung dar, die einen Wärmetransport mittels Wärmeleitung erschwert. Je größer diese trockene Zone ist, desto langsamer erwärmt sich das restliche Erdreich.

Anders verhält es sich hingegen beim letzten Versuch, bei dem der Wärmetransport durch Konvektion erhöht werden konnte. Hier fand eine deutlich schnellere Trocknung eines wesentlich größeren Bereichs der Probe statt, als bei den drei vorhergehenden Versuchen. Auch der Versuch, der bei 900 °C durchgeführt wurde, erreicht diese Ergebnisse nicht, obwohl er einen wesentlich höheren Anteil an Energie in Form von Heizleistung benötigt. Es lässt sich also daraus schließen, dass künftige Großversuche mit geringerer Temperatur, dafür aber mit Konvektion ausgeführt werden sollten, um bestmögliche Ergebnisse zu liefern.

Zudem ist es denkbar, die Versuche so zu variieren, dass die Absaugung symmetrisch, also direkt bei der Heizlanze, oder asymmetrisch, weiter entfernt von der Heizlanze, erfolgt.

Bisherige Versuche zur Bodenerwärmung durch Heizelemente haben gezeigt, dass das Prinzip des konduktiven Wärmeübertrags ins Erdreich das Herauslösen von Schadstoffen unterschiedlicher Volatilität und deren Überführung in die Gasphase beschleunigt [4]. Dies konnte auch in den Versuchen festgestellt werden, die im Zuge dieses Projektes zur Durchführung kamen. Jedoch ist die stationäre Wärmeleitung im Erdreich sehr gering, so dass künftige Versuche eine Verbesserung der Resultate vor allem durch konvektiven Wärmeübergang erzielen können.

Weiters erfolgte während der Versuche die Feststellung, dass der konvektive Wärmeübergang zwar die Trocknung des Erdreichs beschleunigt, jedoch auch zu einer Verdrängung des Wassers aus den getrockneten Bereichen führt. Dieser Effekt konnte ebenfalls durch die Simulation nachgewiesen werden und ist in **Abbildung 5-29** und **Abbildung 5-30** verdeutlicht. Nach Beendigung des Konvektions-Versuchs wurde erfasst, dass die randnahen Bodenbereiche sehr viel durchnässter waren, als dies zu Beginn des Versuchs der Fall war. Das lässt darauf schließen, dass durch das Wasser eine isolierende Schicht im Boden entsteht, die die Durchströmung der Luft verhindern könnte. Hierzu müssen künftige Feldversuchen erfolgen, die sich dieser Thematik widmen und untersuchen, inwieweit sich diese Schicht auf die Durchströmung des Erdreichs auswirkt.

Literaturverzeichnis

- [1] Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M. (2006). LabVIEW: Advanced programming techniques. Crc Press.
- [2] MATLAB. (2010). version 7.10.0 (R2010a). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- [3] Winkler A., Koschitzky, H.-P., Theurer, T., Schmidt, R. (2021): Technologieentwicklung zur thermischen In-situ-Sanierung gering durchlässiger Böden. Institut für Wasserbau, Lehrstuhl für Hydraulik und Grundwasser, Universität Stuttgart.
- [4] Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (2010): Innovative In-situ-Sanierungsverfahren
- [5] Gesellschaft, VDI (2005): VDI Wärmeatlas. Wiesbaden. Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Stephan P. (2018): Die Energieform Wärme und verschiedene Arten der Wärmeübertragung. In: Stephan P., Mewes D., Kabelac S., Kind M., Schaber K., Wetzel T. (eds) VDI-Wärmeatlas. Springer Reference Technik. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52991-1_3-2.
- [7] Baehr H. D., Stephan K. (2009): Wärme und Stoffübertragung. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-3-540-87688-5.
- [8] Stephan P. (2013): B2 Grundlagen der Berechnungsmethoden für Wärmeleitung, konvektiven Wärmeübergang und Wärmestrahlung. In: VDI e. V. (eds) VDI-Wärmeatlas. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_4.
- [9] Stephan K., Stephan P. (2007): Thermodynamik. In: Grote KH., Feldhusen J. (eds) Dubbel. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68191-5_4.

- [10] Martin H. (2013): E2 Instationäre Wärmeleitung in ruhenden Körpern. In: VDI e. V. (eds) VDI-Wärmeatlas. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_36.
- [11] Behr A., Agar D. W., Jörissen J., Vorholt, A. J. (2016): Einführung in die Technische Chemie. doi:10.1007/978-3-662-52856-3
- [12] Kabelac S., Vortmeyer D. (2018): K1 Wärmestrahlung technischer Oberflächen. In: VDI e. V. (eds) VDI-Wärmeatlas. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_102.
- [13] Rummer B. (1998): Dissertation Simulation der Trocknung, Pyrolyse und Vergasung großer Brennstoffpartikel, am Institut für Aapparatebau, Mechanische Verfahrenstechnik und Feuerungstechnik der Technischen Universität Graz.
- [14] Tsotsas E. (2018): M11 Wärmeleitfähigkeit von Schüttichten. In: VDI e. V. (eds) VDI-Wärmeatlas. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19981-3_102.
- [15] Stockhammer T. (2005): Der Trommeltrockner - ein wirtschaftliches Aggregat zur Trocknung von Schüttgütern. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 150, Nr. 6 (Juni 2005): 222–25. <http://dx.doi.org/10.1007/bf03165794>.
- [16] Neumann T., Bergins C., Strauß K. (2006): Mehrphasige Durchströmung kompressibler und heterogener poröser Medien. In: Chemie Ingenieur-Technik, S 701-708. DOI: 10.1002/cite.200500167.
- [17] Bauer A. (2016): Aspekte zur Sicherheitsbeurteilung eines Staudammes mit und ohne Sickerwassermessung. In: Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft (TU München). DOI: 10.13140/RG.2.2.20516.99202.
- [18] Schäfer P. (2005): Dissertation Experimentelle Untersuchungen zur Kühlbarkeit volumetrisch beheizter Schüttbetten, am Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der Universität Stuttgart.
- [19] Vollprecht D., Kern J., Sattler T., Raupenstrauch H., Spijker C., Scholger R., Caspari E., Mori G., Riedl J., Schönberg A., Plessl K., Beutle G., Bittens M. (2021): Zwischenbericht Innovationen für die thermisch unterstützte Bodenluftabsaugung – InnoBLA.