

Technische Universität Kaiserslautern

Optimierung und Wirkungsgradmessungen an Ofenanlagen

-

Optimization and Efficiency Measurement at Furnace Systems

Forschungsprojekt

am

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

Prof. Dr.-Ing Rudolf Flierl

Betreuer: Dipl.-Ing Alexander Holzer

Verfasser: Michael Ollinger, B.Sc.

Matr.-Nr.: 373503

Lindenstraße 13a

66663 Merzig

Wirtschaftsingenieurwesen – Maschinenbau (Master); 5. Fachsemester

Eidesstattliche Versicherung

Name:	Ollinger	Studiengang:	WI-Maschinenbau
Vorname:	Michael	Matrikelnummer:	373503
Geburtsort:	Saarbrücken-Dudweiler	Geburtsdatum:	06.09.1987

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich das vorliegende Forschungsprojekt mit dem Titel

„Optimierung und Wirkungsgradmessungen an Ofenanlagen – Optimization and Efficiency Measurement at Furnace Systems“

selbstständig, ohne unzulässige fremde Hilfe erbracht habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie sinngemäße Zitate kenntlich gemacht. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Merzig, den 01.02.2016

Ort, Datum

Unterschrift

Zusammenfassung

Im Verlauf dieser Arbeit wurden zwei zukünftige, in Entwicklungsländern zum Einsatz kommende Ofentypen mit jeweils unterschiedlichen Funktionen auf ihre Effizienz geprüft und Vorschläge bezüglich ihrer Optimierung gemacht.

Bei dem Ofentyp Rocket Stove, welcher zum Backen und Heizen eingesetzt werden soll, wurde festgestellt, dass eine Feuerungsöffnung von 100 mm Durchmesser die besten Ergebnisse bezüglich des Brennstoffverbrauchs mit sich bringt. Weiterhin sorgt das teilweise Abdecken der Brennkammer für eine gleichmäßige Temperaturverteilung auf der Oberfläche der zum Backen benutzten Platte. Der Aufbau des Ofenrohres hat einen geringeren Einfluss auf den Brennstoffverbrauch, kann jedoch einen zusätzlichen Heizzweck erzielen und somit den Gesamtwirkungsgrad des Rocket Stove erhöhen.

Am zweiten, zum Kochen und Backen zu nutzenden Ofentyp, dem Chigr Fechi, wurde ein Water Boiling Test durchgeführt. Die Ergebnisse dieses Tests dienen dazu den in dieser Versuchsreihe eingesetzten Grundtyp des Chigr Fechi mit seinen sich im Umlauf befindlichen Modifikationen, sowie mit anderen Ofentypen zu vergleichen.

Inhalt

Zusammenfassung	I
Inhalt.....	II
Abbildungsverzeichnis.....	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Formelverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	VIII
1. Einleitung und Zielsetzung.....	1
2. Stand des Wissens.....	3
2.1 Wärme.....	3
2.1.1 Wärmeübertragung.....	4
2.2 Der Verbrennungsprozess	9
2.2.1 Vollständige Verbrennung und Sauerstoffbedarf	9
2.2.2 Brennwert und Heizwert	12
2.3 Schornsteintechnische Grundlagen	12
3. Material und Methoden.....	15
3.1 Material.....	15
3.1.1 Rocket Stove.....	15
3.1.2 Chigr Fечи.....	18
3.1.3 Messgeräte	21
3.1.4 Verwendete Brennstoffe	22
3.2 Methoden	24
3.2.1 Wirkungsgradermittlung am Rocket Stove	25
3.2.2 Ermittlung der optimalen Ofenrohrlänge.....	26
3.2.3 Optimierung der Oberflächentemperaturverteilung der Injeraplatte.....	26

3.2.4 Water Boiling Test am Chigr Fечи	26
4. Ergebnisse und Diskussion	30
4.1 Rocket Stove	30
4.1.1 Ergebnisse der Wirkungsgradermittlung am Rocket Stove	37
4.1.2 Ergebnisse der Ermittlung der optimalen Ofenrohrlänge	39
4.1.3 Ergebnisse der Optimierung der Oberflächentemperaturverteilung der Injeraplatte.....	48
4.2 Ergebnisse des Water Boiling Tests am Chigr Fечи.....	50
5. Zusammenfassung und Ausblick.....	53
Quellen – und Literaturverzeichnis	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wärmeleitung durch eine Wand (4)	5
Abbildung 2: Wärmeübertragung eines strömenden Fluides auf eine Wand (4).....	6
Abbildung 3: Wärmedurchgang (4).....	7
Abbildung 4: Druckverhältnisse im Schornstein (7)	13
Abbildung 5: Skizze Rocket Stove (links) / Grundaufbau Rocket Stove (rechts)	17
Abbildung 6: Messstellenplan Rocket Stove (links) / Messstellen der Injerplatte (rechts)	18
Abbildung 7: Bau des Chigr Fечи (links) / Grundmodell des Chigr Fечи (rechts) ...	18
Abbildung 8: Chigr Fечи Draufsicht (links) / Chigr Fечи Skizze (rechts).....	19
Abbildung 9: Chigr Fечи Messstellenplan.....	20
Abbildung 10: Anzündwürfel (links) / Anzündholz (rechts).....	23
Abbildung 11: Hartholzbriketts.....	23
Abbildung 12: Offenes Gate (links) / halboffenes Gate (rechts).....	31
Abbildung 13: 100 mm Gate	31
Abbildung 14: Offene Brennkammer mit Überstromwulst.....	32
Abbildung 15: Kleine Platte (links) / große Platte (rechts).....	33
Abbildung 16: Ofenrohrverlauf Iso. 2m/1m der Ofenvarianten V2 bis V4	34
Abbildung 17: Ofenrohrverlauf Iso. 2,5m/4x90°/1,5m der Ofenvarianten V5 und V6	35
Abbildung 18: Ofenrohrverlauf Iso. 1,5m/1,5m/90° der Ofenvarianten V7 und V8....	36
Abbildung 19: Temperaturverlauf Testdurchlauf V1	39
Abbildung 20: Temperaturverlauf Isoliert 2m/1m RS offenes Gate V2	41
Abbildung 21: Temperaturverlauf Isoliert 2m/1m RS halboffenes Gate V3	42
Abbildung 22: Temperaturverlauf Isoliert 2m/1m RS 100mm Gate V4	43
Abbildung 23: Temperaturverlauf Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS offen V5.....	44
Abbildung 24: Temperaturverlauf Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS 100mm V6.....	45
Abbildung 25: Temperaturverlauf Isoliert 1,5m/1,5m RS kP 100mm V7.....	46

Abbildung 26: Temperaturverlauf Isoliert 1,5m/1,5m RS gP 100mm V8	47
Abbildung 27: Mittelwerte Oberflächentemperatur Injeraplatte	48

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Massenanteile Hartholzbriketts (16).....	24
Tabelle 2: Übersicht Testvarianten Rocket Stove	30
Tabelle 3: Brennstoffeinsparungen der Testvarianten des Rocket Stove	37
Tabelle 4: Temperaturmittelwerte Testdurchlauf RS	39
Tabelle 5: Temperaturmittelwerte Isoliert 2m/1m RS offenes Gate V2.....	41
Tabelle 6: Temperaturmittelwerte Isoliert 2m/1m RS halboffenes Gate V3	42
Tabelle 7: Temperaturmittelwerte Isoliert 2m/1m RS 100mm Gate V4.....	43
Tabelle 8: Temperaturmittelwerte Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS offen V5	45
Tabelle 9: Temperaturmittelwerte Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS 100mm V6	45
Tabelle 10: Temperaturmittelwerte Isoliert 1,5m/1,5m RS kP 100mm V7	46
Tabelle 11: Temperaturmittelwerte Isoliert 1,5m/1,5m RS gP 100mm V8	47
Tabelle 12: Mittelwerte Oberflächentemperatur Injerplatte	48
Tabelle 13: Temperaturabweichungen bezogen auf Plattenmittentemperatur T9	49
Tabelle 14: Ergebnisse WBT Chigr Fечи.....	51

Formelverzeichnis

Formel 1: Wärme	3
Formel 2: Joule in Newtonmeter	3
Formel 3: Kilokalorien in Kilojoule	4
Formel 4: Wärmestrom Q	4
Formel 5: Wärmestrom Q bei Wärmeleitung	5
Formel 6: Wärmestrom Q bei Konvektion	6
Formel 7: Wärmestrom Q beim Wärmedurchgang	7
Formel 8: Wärmedurchgangskoeffizient k	8
Formel 9: Bestandteile des Wärmestroms durch Strahlung	8
Formel 10: Wärmestrom durch Strahlung	8
Formel 11: Spezifischer Sauerstoffbedarf (6)	11
Formel 12: Spezifische Mindestluftmasse (6)	11
Formel 13: Mindestluftmenge	11
Formel 14: Heizwert	12
Formel 15: Lokaler Siedepunkt	27

Abkürzungsverzeichnis

° C	Grad Celsius
C	Kohlenstoff
cal	Kalorie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
e.V.	eingetragener Verein
g	Gramm
gP	große Platte
h	Stunde
H	Wasserstoff
H ₂ O	Wasser
J	Joule
K	Kelvin
kcal	Kilokalorie
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
kP	kleine Platte
kW	Kilowatt
m	Meter
mm	Millimeter
Nm	Newtonmeter
O	Sauerstoff
RS	Rocket Stove
s	Sekunde
S	Schwefel
SI	Internationales Einheitensystem
SO ₂	Schwefeldioxid
V ...	Variante ...
W	Watt
WBT	Water Boiling Test

1. Einleitung und Zielsetzung

Energie spielte jeher und spielt besonders heutzutage eine essenzielle Rolle in der Geschichte der Menschheit. Neben Verkehr und Industrie sind vor allem private Haushalte auf Energie angewiesen, sei es zum Kochen, zum Heizen oder um anderen, weniger essenziellen Tätigkeiten nachzugehen. Die Nachfrage nach Energie kann aber nicht überall auf der Erde in einem gleichen Maße befriedigt werden.

In vielen unterentwickelten Teilen der Erde wird noch mit offenen Feuerstellen gekocht oder geheizt. Durch die offenen Feuerstellen geht ein großer Teil der freiwerdenden Wärmeenergie verloren. Das wertvolle Brennholz, welches als Brennstoff dient, wird somit sehr ineffizient genutzt. Da die Waldbestände in den betroffenen Ländern nicht nachhaltig bewirtschaftet werden reduzieren sich somit auch die Bestände der Energiequellen.

Zudem bergen die offenen Feuerstellen auch gesundheitliche Risiken. Vor allem kleine Kinder krabbeln oder fallen in das offene Feuer und erleiden dadurch schwere Verbrennungen, welche meist nicht zeitnah behandelt werden und zu schwersten körperlichen Behinderungen bis hin zum Verlust der Gliedmaßen führen. Neben den direkten Beeinträchtigungen durch den Rauch im Wohnbereich, wie zum Beispiel die Reizung von Augen und Atemwegen, werden bei den Bewohnern, welche ihr Leben lang dem dichten Qualm in den Häusern ausgesetzt sind, auch gesundheitliche Langzeitschäden beobachtet. Diese Langzeitschäden treten in Form von Bronchialleiden, arteriellen Gefäßerkrankungen und Lungenkrebs auf. (1)

Zur Reduzierung dieser negativen Folgen des Kochens am offenen Feuer wurde im Jahr 2010 der Verein Die Ofenmacher e.V. mit Sitz in München gegründet. Zweck des Vereins „ist die Verbreitung rauchfreier Küchenöfen in ländlichen Haushalten, vor allem in Entwicklungsländern“ (2) wie Nepal, Äthiopien und Kenia. Der Verein entwickelt Öfen, welche die offenen Feuerstellen ersetzen sollen und bildet Einheimische zum Bau dieser Öfen aus. Bis Oktober 2015 wurden durch die Arbeit der Ofenmacher 35.749 Öfen errichtet. (2) Diese Öfen weisen bereits eine Brennstoffeinsparung von zum Teil über 60 % (3) auf und verringern durch ihre geschlossene Bauweise und durch die Verwendung eines Schornsteins die angesprochenen gesundheitlichen Risiken in einem erheblichen Maße.

Ziel dieser Arbeit ist es, zwei neue Ofenkonzepte der Ofenmacher in ihrem Basisdesign zu vermessen und konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung der Wirkungsgrade durchzuführen. Dabei werden beide Öfen, welche zum Einsatz in Äthiopien vorgesehen sind, am Standort der Technischen Universität Kaiserslautern errichtet und die Messungen in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt

2. Stand des Wissens

Im folgenden Kapitel sollen die Grundlagen der Wärmeübertragung und Verbrennung erläutert werden. Zudem wird auf die Luftströmung und den sogenannten Schornsteineffekt eines Ofens eingegangen. Diese Prozesse sind neben Verbrennung und Wärmeübertragung ausschlaggebend für die Optimierung der Öfen.

2.1 Wärme

Die „Wärme ist eine Energieform, die durch die Art ihrer Übertragung definiert ist“ (4). Sie tritt zwischen zwei Systemen unterschiedlicher Temperaturen in Erscheinung und ermöglicht den Energietransport zwischen den Systemen. Dabei reduziert sie die Energie des einen Systems um den Betrag, um den die Energie des anderen Systems zunimmt. Es fließt solange Wärme von den wärmeren zu den kälteren Systemen, bis alle dieselbe Temperatur aufweisen (Nullter Hauptsatz der Thermodynamik). Die Wärme lässt sich über den ersten Hauptsatz der Thermodynamik auch quantitativ erfassen als

$$Q_{12} = U_2 - U_1 - W_{12}.$$

Formel 1: Wärme

Die Einheit der Wärmemenge wurde als Kalorie (cal) beziehungsweise Kilokalorie (kcal) festgelegt. Die Kalorie beziehungsweise Kilokalorie bezeichnet dabei die Wärmemenge, welche benötigt wird um die Temperatur von 1 g bzw. 1 kg Wasser von 14,5 °C auf 15,5 °C zu erhöhen. Die Einheit der Wärmemenge wurde mit der Einführung des Internationalen Einheitensystems (SI) durch die Einheit Joule (J) als Wärmewert eines Newtonmeters (Nm) neu definiert.

$$1 J = 1 Nm$$

Formel 2: Joule in Newtonmeter

Eine Kilokalorie lässt sich dabei mit der Einheitengleichung (Formel 3)

$$1 \text{ kcal} = 4186,8 \text{ Nm} = 4,1868 \text{ kJ}$$

Formel 3: Kilokalorien in Kilojoule

in die Einheit Kilojoule umrechnen. (4)

2.1.1 Wärmeübertragung

Besteht zwischen zwei Systemen eine Temperaturdifferenz so kommt es zu einem Wärmetransfer vom wärmeren zum kälteren System den man Wärmeübertragung nennt. Die Wärmeübertragung ist ein zeitabhängiger Prozess. Um die pro Zeiteinheit t übertragene Wärmemenge Q zu erhalten, bedient man sich dem Wärmestrom \dot{Q} , welcher als

$$\dot{Q} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Formel 4: Wärmestrom \dot{Q}

definiert ist. (4)

Es existieren drei Arten der Wärmeübertragung, die Wärmeleitung, die Wärmeübertragung durch Konvektion und die Wärmeübertragung durch Strahlung.

2.1.1.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den in Abbildung 1 dargestellten Prozess des Wärmetransports durch eine ruhende Fluidschicht oder eine Wand von einem System in ein anderes System.

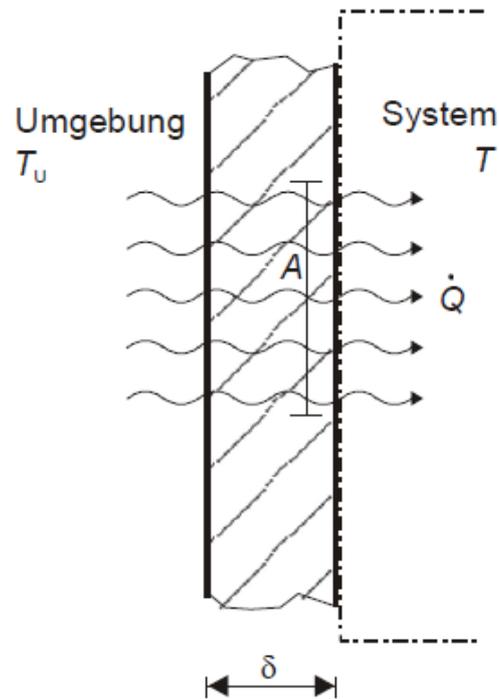


Abbildung 1: Wärmeleitung durch eine Wand (4)

Dabei fließt von einer Umgebung mit der Temperatur T_U ein Wärmestrom \dot{Q} „durch eine ebene Wand der Dicke δ über eine Fläche A in ein System der Temperatur T “ (4). Dieser Wärmestrom \dot{Q} ist definiert als

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T - T_U}{\delta}$$

Formel 5: Wärmestrom \dot{Q} bei Wärmeleitung

mit λ als Wärmeleitfähigkeit des Stoffes der Wand in (J/s)/(mK) oder W/(mK). (4)

2.1.1.2 Wärmeübertragung durch Konvektion

Die Wärmeübertragung durch Konvektion beschreibt den Wärmetransfer von einem an einer Wand vorbeiströmenden Fluides auf die Wand. In Abbildung 2 sind neben

dem eigentlichen Prozess der Wärmeübertragung durch Konvektion auch der Temperatur- und Geschwindigkeitsverlauf eines längs einer ebenen Wand strömenden Fluides zu sehen.

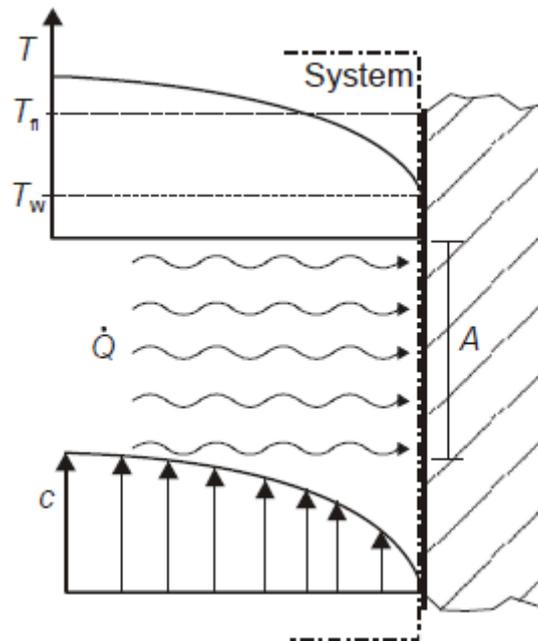


Abbildung 2: Wärmeübertragung eines strömenden Fluides auf eine Wand (4)

Der Wärmestrom \dot{Q} wird über die mittlere Temperatur des Fluides T_{fl} , die Oberflächentemperatur der Wand T_w , die angeströmte Fläche A der Wand sowie über einen Wärmeübertragungskoeffizienten α zu

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_w - T_{fl})$$

Formel 6: Wärmestrom \dot{Q} bei Konvektion

Dabei hängt der Wärmeübertragungskoeffizient α , welcher die Einheit $W/(m^2K)$ besitzt, in einer komplizierten Weise vom Geschwindigkeitsprofil der Strömung in Wandnähe sowie von verschiedenen Stoffparametern des Fluides, wie Dichte und Zähigkeit ab. Die Strömungsgeschwindigkeit in unmittelbarer Wandnähe ist gleich null. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass reale Fluide aufgrund ihrer Zähigkeit an festen Wänden

haften. Wächst der Abstand der Strömung zur Wand, so steigt die Geschwindigkeit an. Die Wandtemperatur hat zudem einen prägenden Einfluss auf das Geschwindigkeits- und Temperaturprofil der Strömung. (4)

2.1.1.3 Wärmedurchgang

Treten Wärmeleitung und Wärmeübertragung durch Konvektion gemeinsam auf, so spricht man von einem Wärmedurchgang. Dabei wird Wärme von einem strömenden Fluid in eine Wand geleitet. Von dort erfolgt dann die Übertragung auf ein anderes strömendes Fluid. Abbildung 3 stellt den Vorgang des Wärmedurchgangs samt dem Temperaturverlauf dar.

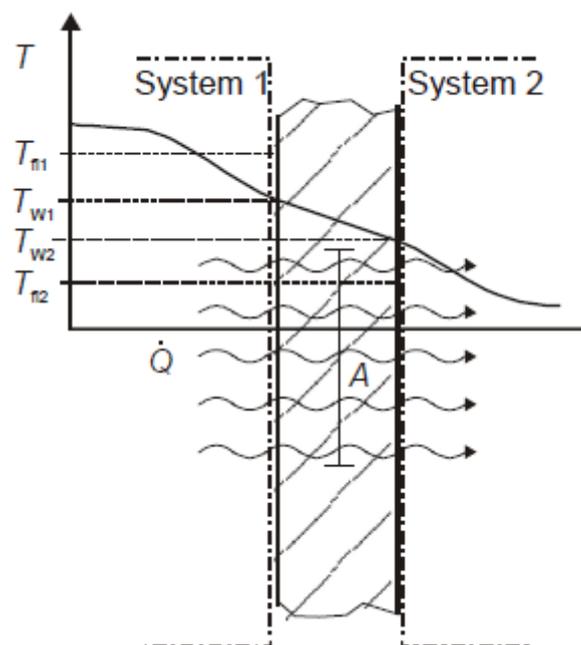


Abbildung 3: Wärmedurchgang (4)

Der Wärmestrom \dot{Q} berechnet sich beim Wärmedurchgang zu

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (T_{f11} - T_{f12}).$$

Formel 7: Wärmestrom Q beim Wärmedurchgang

Dabei sind T_{fl1} die Temperatur des strömenden Fluides aus System 1 und T_{fl2} die Temperatur des strömenden Fluides aus System 2. Mit k wird der sogenannte Wärmeübergangskoeffizient umschrieben, der mit den Wärmedurchgangskoeffizienten α_1 und α_2 der beiden Fluidströme sowie mit der Wärmeleitfähigkeit λ der Wand entsprechend Formel 8 verknüpft ist.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Formel 8: Wärmedurchgangskoeffizient k

2.1.1.4 Wärmeübertragung durch Strahlung

Die Wärmeübertragung durch thermische Strahlung erfolgt über ein kontinuierliches Spektrum elektromagnetischer Wellen im Wellenlängenbereich zwischen $0,76 \mu\text{m}$ und $360 \mu\text{m}$. Diese Wellen werden im Allgemeinen bei ihrer Emission aus innerer Energie erzeugt. Bei der Absorption werden die elektromagnetischen Wellen wieder in innere Energie umgewandelt. Mit zunehmender Temperatur steigt auch die Energie der Strahlung stark an.

Der Wärmestrom \dot{Q} , der durch Strahlung auf einen Körper trifft, wird zu einem Teil $r\dot{Q}$ reflektiert, zu einem Teil $a\dot{Q}$ absorbiert und zu einem Teil $d\dot{Q}$ hindurchgelassen, wobei

$$r + a + d = 1$$

Formel 9: Bestandteile des Wärmestroms durch Strahlung

ist.

Reflektiert ein Körper jegliche Strahlung ($r = 1, d = a = 0$), so spricht man von einem idealen Spiegel. Von einem schwarzen Körper spricht man, wenn dieser die auftreffende Strahlung komplett absorbiert ($a = 1, d = r = 0$). Einen Körper, der alle Strahlung durchlässt, nennt man diatherman ($d = 1, a = r = 0$).

Der Wärmestrom \dot{Q} durch Strahlung ergibt sich zu

$$\dot{Q} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Formel 10: Wärmestrom durch Strahlung

mit dem Strahlungskoeffizient $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, auch Stefan-Boltzmann-Konstante genannt, der Emissionszahl ε , der Fläche A und der Temperatur T . (4) (5)

2.2 Der Verbrennungsprozess

Eine Verbrennung ist durch eine stark exotherm ablaufende Reaktion eines Brennstoffes, im Allgemeinen Kohlenstoff, Wasserstoff und Kohlenwasserstoffe mit Sauerstoff gekennzeichnet. Die Reaktionsprodukte werden im Allgemeinen als Abgas oder Verbrennungsgas bezeichnet. Bei festen Brennstoffen kommen nichtverbrannte oder nicht brennbare Bestandteile hinzu, welche als Asche bezeichnet werden. Als Sauerstoff wird in den meisten Fällen atmosphärische Luft verwendet. Der molare Sauerstoffanteil der atmosphärischen Luft ist $x_{O_2}^L = 0,20947$ und der Sauerstoffmassenanteil beträgt $\xi_{O_2}^L = 0,23141$.

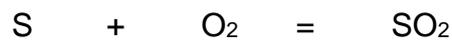
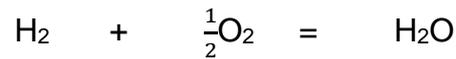
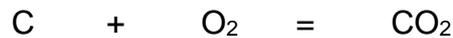
Um die Verbrennung einzuleiten muss der Brennstoff auf Zündtemperatur gebracht werden. Dies geschieht meist durch die Zuführung von Wärme. Die Zündtemperatur hängt dabei von der Art des Brennstoffes ab. Der Brennstoff kann in einer festen (z.B. Kohle, Holz), flüssigen (z.B. Heizöl, Benzin) oder gasförmigen (z.B. Erdgas) Form vorliegen. (5) (6)

2.2.1 Vollständige Verbrennung und Sauerstoffbedarf

Eine Verbrennung kann vollständig oder unvollständig ablaufen. Bei einer vollständigen Verbrennung werden alle brennbaren Bestandteile des Brennstoffes vollständig oxidiert. Eine unvollständige Verbrennung ist dadurch gekennzeichnet, dass das Abgas noch nicht vollständig oxidierte Bestandteile wie zum Beispiel Kohlenstoffmonoxid (CO) enthält, welches noch zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) oxidiert werden kann. Da bei einer unvollständigen Verbrennung die chemische Energie der nichtverbrannten Brennstoffe und der noch brennbaren Bestandteile der Abgase ungenutzt bleibt, versucht man diese zu vermeiden. Dementsprechend muss der Verbrennung genügend Sauerstoff zugeführt werden. (6)

Wenn dem Verbrennungsprozess gerade genug Sauerstoff zugeführt wird, dass die Verbrennung vollständig ablaufen kann, so spricht man von einer stöchiometrischen Verbrennung. Weiterhin kann auch ein Luftüberschuss vorliegen. Hierbei handelt es sich um einen Sauerstoffüberschuss, bei welchem auch nach der vollständigen Verbrennung noch Sauerstoff übrig ist. Ebenso kann aber auch ein Luftmangel vorliegen. Hier liegt aufgrund des Sauerstoffmangels eine unvollständige Verbrennung vor.

Bei vollständiger Verbrennung werden die in den Brennstoffen vorkommenden Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Schwefel (S) zu Kohlenstoffdioxid (CO₂), Wasser (H₂O) und Schwefeldioxid (SO₂) oxidiert, wobei letzteres ein unerwünschtes Nebenprodukt darstellt. Hierbei gelten die folgenden Reaktionsgleichungen, welche auch als Verbrennungsgleichungen bezeichnet werden:



Anhand dieser Reaktionsgleichungen lassen sich die Stoffmengenverhältnisse $v_{\text{O}_2}^K$ (K=C, H₂, S) zu

$$v_{\text{O}_2}^{\text{C}} = 1$$

$$v_{\text{O}_2}^{\text{H}_2} = \frac{1}{2}$$

$$v_{\text{O}_2}^{\text{S}} = 1$$

ermitteln. Hieraus lässt sich das für weitere Berechnungen benötigte Massenverhältnis $\mu_{\text{O}_2}^K$ ermitteln. Für den zur Oxidation von Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid benötigten Sauerstoff ergibt sich ein Massenverhältnis von

$$\mu_{\text{O}_2}^{\text{C}} := \frac{m_{\text{O}_2}^{\text{C}}}{m_{\text{C}}} = \frac{M_{\text{O}_2} \cdot n_{\text{O}_2}^{\text{C}}}{M_{\text{C}} \cdot n_{\text{C}}} = \frac{31,9988 \text{ kg/kmol}}{12,0107 \text{ kg/kmol}} \cdot v_{\text{O}_2}^{\text{C}} = 2,6642,$$

was bedeutet, dass zur Oxidation von einem Kilogramm Kohlenstoff zu Kohlenstoffdioxid 2,6642 Kilogramm Sauerstoff benötigt werden. Für die Massenverhältnisse bei der vollständigen Oxidation von Wasserstoff und Schwefel gelten in analoger Weise

$$\mu_{\text{O}_2}^{\text{H}_2} := \frac{m_{\text{O}_2}^{\text{H}_2}}{m_{\text{H}_2}} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{H}_2}} \cdot v_{\text{O}_2}^{\text{H}_2} = 7,9366$$

$$\mu_{\text{O}_2}^{\text{S}} := \frac{m_{\text{O}_2}^{\text{S}}}{m_{\text{S}}} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{S}}} \cdot v_{\text{O}_2}^{\text{S}} = 0,9979. \quad (6)$$

Nun gilt es die für die stöchiometrische Verbrennung benötigte Mindestluftmenge zu berechnen. Baehr und Kabelac definieren die erforderliche Mindestluftmenge wie folgt:

„Die Mindestluftmenge ist jene Menge trockener Luft, die gerade soviel Sauerstoff enthält, wie zur vollständigen Oxidation des Brennstoffs erforderlich ist.“ (6)

Zur Berechnung der Mindestluftmenge benötigt man den spezifischen Sauerstoffbedarf o_{min} , welchen wir mit Hilfe der zuvor ermittelten Massenverhältnisse zu

$$o_{min} := \frac{m_{O_2}^{min}}{m_B} = 2,6642\gamma_C + 7,9366\gamma_{H_2} + 0,9979\gamma_S - \gamma_{O_2}$$

Formel 11: Spezifischer Sauerstoffbedarf (6)

mit

- γ_C als Massenanteil an Kohlenstoff im Brennstoff,
- γ_{H_2} als Massenanteil an Wasserstoff im Brennstoff,
- γ_S als Massenanteil an Schwefel im Brennstoff und
- γ_{O_2} als Massenanteil an Sauerstoff im Brennstoff

ermitteln.

Die Massenanteile des Brennstoffes lassen sich durch eine Elementaranalyse feststellen. Mit Hilfe des spezifischen Sauerstoffbedarfs lässt sich die spezifische Mindestluftmasse

$$l_{min} := \frac{m_L^{min}}{m_B} = \frac{o_{min}}{\xi_{O_2}^L} = \frac{o_{min}}{0,23141}$$

Formel 12: Spezifische Mindestluftmasse (6)

berechnen, anhand derer sich die zur vollständigen Verbrennung einer bestimmten Brennstoffmenge m_B benötigte Mindestluftmenge

$$m_L^{min} = m_B \cdot \frac{o_{min}}{0,23141}$$

Formel 13: Mindestluftmenge

ermitteln lässt.

Trotz der Zufuhr der errechneten Mindestluftmenge kann es vorkommen, dass der Brennstoff nicht vollständig verbrennt. Der Grund hierfür liegt darin, dass es aufgrund einer ungleichmäßigen Verteilung von Brennstoff und Luft innerhalb der Feuerung zu örtlichem Luftmangel und Luftüberschuss kommen kann. Aus diesem Grund werden

technische Feuerungen im Allgemeinen mit einem Luftüberschuss betrieben. Das Luftverhältnis λ gibt hierbei das Verhältnis der eingesetzten Luftmenge m_L zur erforderlichen Mindestluftmenge m_L^{min} an. Dabei bedeuten

$\lambda < 1$ einen Luftmangel,

$\lambda = 1$ ein stöchiometrisches Luftverhältnis und

$\lambda > 1$ einen Luftüberschuss.

2.2.2 Brennwert und Heizwert

Um die Effizienz einer Verbrennung zu bestimmen, muss bekannt sein, wie viel Energie im Brennstoff gespeichert ist. Hierzu bedient man sich dem spezifischen Heizwert, der die Wärmemenge angibt, die bei vollkommener Verbrennung pro Kilogramm Brennstoff abgegeben wird. Dabei lässt sich zwischen dem Brennwert H_O , auch oberer Heizwert genannt, und dem Heizwert H_U , der als unterer Heizwert bezeichnet wird, unterscheiden. Der Brennwert H_O ist diejenige Wärmemenge, die bei einer vollständigen Verflüssigung des in den Verbrennungsgasen gebundenen Wasserdampfes freigesetzt wird. Er ist um die Verdampfungsenthalpie $\Delta h_D(T_0)$ des Wassers größer als der Heizwert H_U . Der Heizwert ergibt sich somit zu

$$H_U = H_O - \mu_{H_2O/B} \cdot \Delta h_D(T_0)$$

Formel 14: Heizwert

mit $\mu_{H_2O/B}$ als spezifischer Massenanteil von Wasser im Brennstoff. (4)

2.3 Schornsteintechnische Grundlagen

Der Schornstein ist neben der Brennkammer ein essenzieller Bestandteil einer effizienten Feuerungsanlage. Durch ihn werden nicht nur die Verbrennungsabgase abtransportiert, er beeinträchtigt bei raumluftversorgten Feuerungsanlagen auch den Verbrennungsvorgang in der Brennkammer. Hierbei spielen die unterschiedlichen Temperaturen im Ofensystem sowie die unterschiedlichen Druckverhältnisse am Eingang der Brennkammer und am Ende des Schornsteins eine Rolle.

Der Schornstein macht sich das Bestreben der warmen Luft nach oben zu steigen zu nutze. Hierdurch wird das Abgas aus der Brennkammer transportiert und durch den in der Brennkammer entstehenden Unterdruck kann neue atmosphärische Verbrennungsluft in die Brennkammer nachströmen. Bei einer nicht komplett abgedichteten Feuerungsanlage kann die Verbrennungsluft auch über die undichten Stellen in die Brennkammer strömen. Dieser Eintritt der Verbrennungsluft verhindert ein Austritt der Abgase an diesen undichten Stellen.

Der Unterdruck in der Brennkammer erreicht sein Maximum am Schornsteineingang und nimmt von dort über die Länge des Schornsteins ab. Am Schornsteinende herrscht wieder Umgebungsdruck. Abbildung 4 zeigt schematisch die Unterdruckverhältnisse in einem mit Umgebungsluft betriebenen Naturzugkessel. (7)

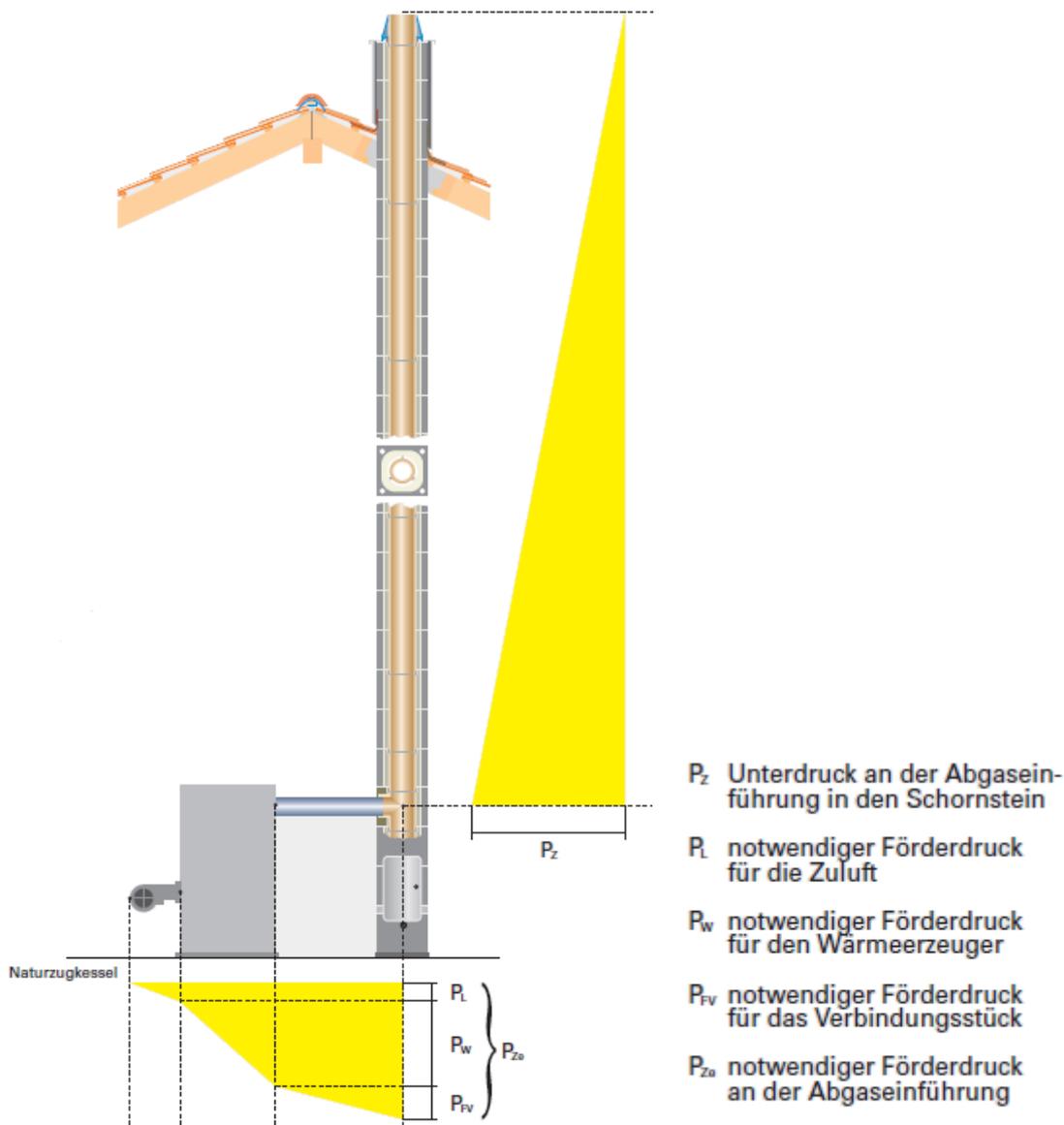


Abbildung 4: Druckverhältnisse im Schornstein (7)

Der entstehende Unterdruck hängt von der Temperatur und Geschwindigkeit des Abgases ab. Diese können durch konstruktive Maßnahmen beeinflusst werden. Konstruktive Maßnahmen können zum Beispiel eine Änderung

- des Schornsteindämmung,
- der Schornsteinmaterials,
- des horizontalen Schornsteinverlaufs,
- des vertikalen Schornsteinverlaufs oder
- des Schornsteindurchmessers

sein. Die Schornsteindämmung sorgt dafür, dass es zu ungewollten Wärmeübertragungen in die Schornsteinumgebung kommt, hat jedoch dadurch auch einen Einfluss auf die Abgastemperatur, welche um diese nicht entstandenen Wärmeverluste höher ist. Durch die vier zuletzt genannten Maßnahmen wird der Rohrwiderstand verändert und somit auch die entsprechende Abgasgeschwindigkeit und die Verweildauer des Abgases im Schornstein. Diese hat wiederum einen direkten Einfluss auf die Abgastemperatur, da bei einer längeren Verweildauer im Schornstein eine höhere Wärmemenge an die Schornsteinwände abgegeben werden kann.

3. Material und Methoden

In diesem Kapitel wird das für die Durchführung der Messungen benutzte Material sowie die verschiedenen Messmethoden vorgestellt. Bei der Vorstellungen des Materials wird speziell auf die beiden Ofentypen eingegangen. Die verwendeten Messinstrumente werden kurz technisch erläutert.

3.1 Material

Nachfolgend werden die beiden Ofentypen sowie die Technik der verwendeten Messinstrumente vorgestellt. Bei den Ofentypen handelt es sich um den Typ Rocket Stove, welcher zum Kochen und Heizen Verwendung finden soll sowie um den Typ Chigr Fechi (zu Deutsch „Problemlöser“ (8)), welcher zum Kochen verwendet wird. Beide Ofentypen sollen überwiegend in Äthiopien zum Einsatz kommen.

3.1.1 Rocket Stove

Als Rocket Stove bezeichnet man einen Ofen, der wie ein Wassereimer aussieht und in dessen Inneren ein Feuer betrieben wird. Der ausschlaggebende Punkt für die Ofenmacher zur Verwendung dieses Ofens waren die Erdbeben in Nepal vom 25. April und 12. Mai 2015. Durch die Zerstörung vieler Unterkünfte und damit auch vieler Öfen mussten die Menschen vor Ort zum Teil in Behelfsunterkünfte umziehen. Die Errichtung von gängigen Lehmöfen war jedoch aus Platzgründen nicht möglich. Ebenso wäre das Kochen mit einem offenen Feuer sehr gefährlich, da Funkenflug die Zeltplanen der Behelfsunterkünfte entzünden könnte. Aus diesen Gründen bediente man sich vor Ort dem Konzept eines mobilen Rocket Stove, der eine Kochstelle aufweist und über keinen Kamin verfügt. Den Boden des mobilen Rocket Stove bildet eine Metallplatte. Aufgrund seiner Kompaktheit und seines geringen Gewichtes lässt sich dieser mobiler Rocket Stove auch ohne große Mühen transportieren. (9)

Aufgrund der hohen Akzeptanz und Begeisterung des Ofens sowie seiner Brennstoffeinsparung gegenüber einer offenen Feuerstelle soll das Konzept des mobilen Rocket Stove nun auf einen stationären Ofen übertragen werden. Der Prototyp des stationären Rocket Stove, nachfolgend der Einfachheit wegen nur Rocket Stove genannt, wurde

am 21. Juli 2015 neben einer Versuchshalle des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Kaiserslautern in Kaiserslautern errichtet. Als Ausgangsmaterial wurden in diesem Fall Lehmziegel (Länge x Breite x Höhe = 254 mm x 127 mm x 63,5 mm) zweier älterer Ofenmodelle aus vorherigen Versuchsreihen verwendet, welche am Tag zuvor demontiert wurden.

Der Rocket Stove wurde auf Holzpaletten errichtet. Eine Schicht luftdurchströmte Ziegelsteinplatten, auf der sich wiederum eine Schicht feuerfester Steine befindet, sorgt für die nötige Wärmeisolierung gegenüber den Holzpaletten, welche den Ofen von unten gegen Feuchtigkeit, im speziellen Regenwasser schützen. Die Basis des Rocket Stove bildet eine zirka 430 mm hohe, zylindrische Brennkammer mit einem Innendurchmesser von zirka 230 mm. Die Wand der Brennkammer weist, bedingt durch die Verwendung der Lehmziegel, eine Dicke von zirka 63,5 mm auf. Der äußere Durchmesser der Brennkammer beträgt somit zirka 360 mm. Zum Nachlegen von Brennstoff ist die Brennkammer mit einem 210 mm hohen Tor, nachfolgend Gate genannt, ausgestattet, welches 120 mm nach vorne herausragt. Die Brennkammer ist nach oben hin geöffnet und besitzt an der Oberkante eine Überstromwulst. Das Abgas der Brennkammer kann somit in den äußeren Zylinder des Rocket Stove, nachfolgend Abgaskammer genannt, strömen. Dieser hat eine Höhe von zirka 450 mm und ist durch eine 40 mm dicke Schamottplatte abgedeckt. Die Schamottplatte dient zum Backen von Injera, einem Fladenbrot welches traditionell in Äthiopien verzehrt wird. Aus diesem Grund wird diese Art von Platte nachfolgend ihrer Funktion entsprechend Injeraplatte genannt. (10) Die Überstromwulst der Brennkammer soll zu einer möglichst gleichmäßigen Wärmeverteilung an der Oberfläche der Injeraplatte führen. Der Innendurchmesser der Abgaskammer beträgt zirka 475 mm. Die Außenwand des Rocket Stove besteht wie die Brennkammer aus Lehmziegeln. Der Rocket Stove besitzt einen Gesamtdurchmesser von 600 mm und schließt bündig mit dem Gate ab. Auf der Rückseite des Rocket Stove befindet sich in 140 mm Höhe der Abgasausgang, welcher mit einem 90-Grad-Winkel-Rohrstück mit einem Durchmesser von 120 mm beginnt und nach rechts gerichtet ist. Der Boden der Brennkammer wird durch eine einfache, wenige Millimeter dicke Lehmschicht gebildet. Der Boden der Abgaskammer weist eine Dicke von zirka 130 mm auf. Abbildung 5 verdeutlicht den Aufbau des Rocket Stove und zeigt den aufgebauten Rocket Stove in seiner Grundausführung.

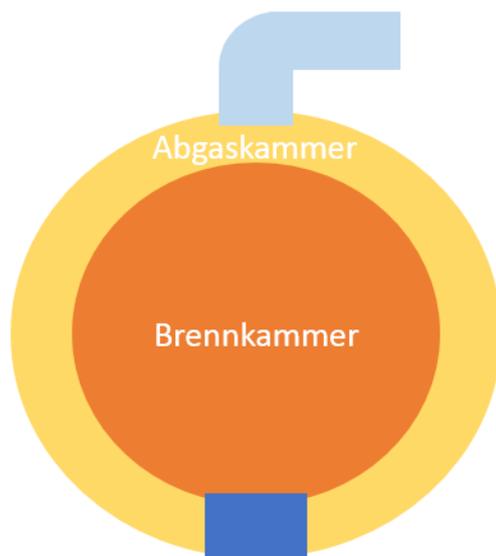


Abbildung 5: Skizze Rocket Stove (links) / Grundausführung Rocket Stove (rechts)

Der Kamin des Rocket Stove besteht aus 120 mm dicken Edelstahlrohren, welche mit Steinwolle umwickelt sind. Die Steinwolle der Firma Rockwool besitzt eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,035 \text{ W/(mK)}$. Die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Lehmziegel (Dichte zirka 1600 kg/m^3), aus denen später die Kamine der Rocket Stoves gebaut werden sollen, liegt hingegen bei $\lambda = 0,756 \text{ W/(mK)}$. Die Wärmedämmung und -speicherung des Kamins lässt sich also in der hier durchgeführten Versuchsreihe nicht korrekt wiedergeben. Ein Kamin aus Lehmziegeln konnte aufgrund der fehlenden Materialien vor Ort und der gewünschten Variabilität der Ofenrohlänge zu Testzwecken nicht errichtet werden. Die Verwendung der Steinwolle ist jedoch trotzdem sinnvoll, da das reine Edelstahlrohr eine Wärmeleitfähigkeit von 15 bis 25 W/(mK) aufweist. (11)

Im Rocket Stove sind insgesamt fünf Messstellen (T1 bis T5) entsprechend dem Messstellenplan aus Abbildung 6 (links) fest installiert. Weiterhin sind in den Teilstücken des Ofenrohrs drei Messstellen variabel angebracht. Die Oberflächenmessung der Injerpelatte erfolgt durch ein optisches Thermometer an fünf Stellen (T9 bis T13) entsprechend Abbildung 6 (rechts), wobei der Kreis, auf dem die Messstellen markiert sind, einen Durchmesser von 360 mm aufweist.

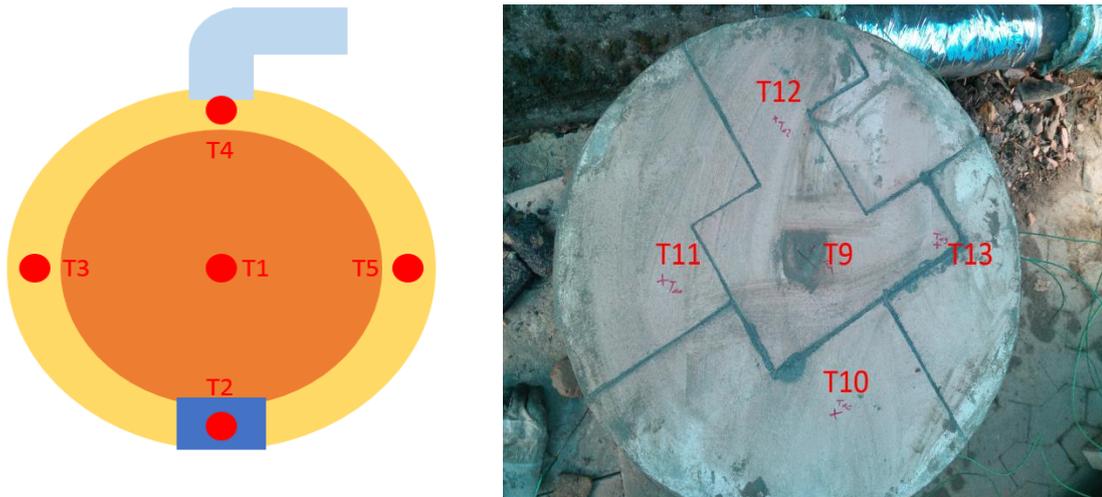


Abbildung 6: Messstellenplan Rocket Stove (links) / Messstellen der Injerplatte (rechts)

3.1.2 Chigr Fechi

Das Konzept des Chigr Fechi basiert auf einem äthiopischen Ofen mit zwei Kochstellen und einer Injerplatte. Um Kosten zu vermeiden soll der Chigr Fechi mit geringem Arbeits- und Materialaufwand errichtet werden. Aus diesem Grund wird er nicht aus Lehmziegeln errichtet, sondern wird, wie in Abbildung 7 (links) zu sehen ist, mit losem Lehm von Hand geformt. Nach einer Trocknungszeit von zirka drei bis vier Wochen und entsprechender Nachbesserung der bei dem Trocknungsvorgang entstandenen Risse kann das Grundmodell des Chigr Fechi (siehe Abbildung 7 (rechts)) in Betrieb genommen werden.



Abbildung 7: Bau des Chigr Fechi (links) / Grundmodell des Chigr Fechi (rechts)

Zur Erläuterung der Funktionsweise des Chigr Fechi dient Abbildung 8. Abbildung 8 (links) zeigt den Chigr Fechi in der Draufsicht ohne Injeraplatte und Abbildung 8 (rechts) den Chigr Fechi als Skizze. Der Chigr Fechi besitzt zwei separate Brennkammern, die je nach Bedarf benutzt werden. Beide Brennkammern verfügen jeweils über ein Gate (Abb. 8 (rechts) dunkelblaue Rechtecke), durch welches Brennmaterial nachgelegt und Asche entfernt werden kann. Das Gate der Brennkammer der Injeraplatte (Abb. 8 (rechts) Backen) hat die Form einer halben Ellipse, das Gate der Brennkammer der ersten Kochstelle (Abb. 8 (rechts) Kochen 1) weist die Form eines Halbkreises auf. Beide Brennkammern verfügen über separate Durchgänge (Abb. 8 (rechts) hellblaue Rechtecke) zur zweiten Kochstelle (Abb. 8 (rechts) Kochen 2), durch welche die Abgase geleitet werden. Durch eine entsprechende Luftführung, nachfolgend „Baffle“ genannt (Abb. 8 (rechts) grünes Rechteck), werden die Abgase direkt unter den Kochtopf der zweiten Kochstelle geleitet. Von hier aus gelangt das Abgas über einen weiteren Durchgang in den Kamin, welcher von einer Lehmkammer in ein vertikales, mit Steinwolle gedämmtes Edelstahlrohr übergeht. In Abbildung 8 (links) ist das Edelstahlrohr jedoch noch im ungedämmten Zustand zu sehen.

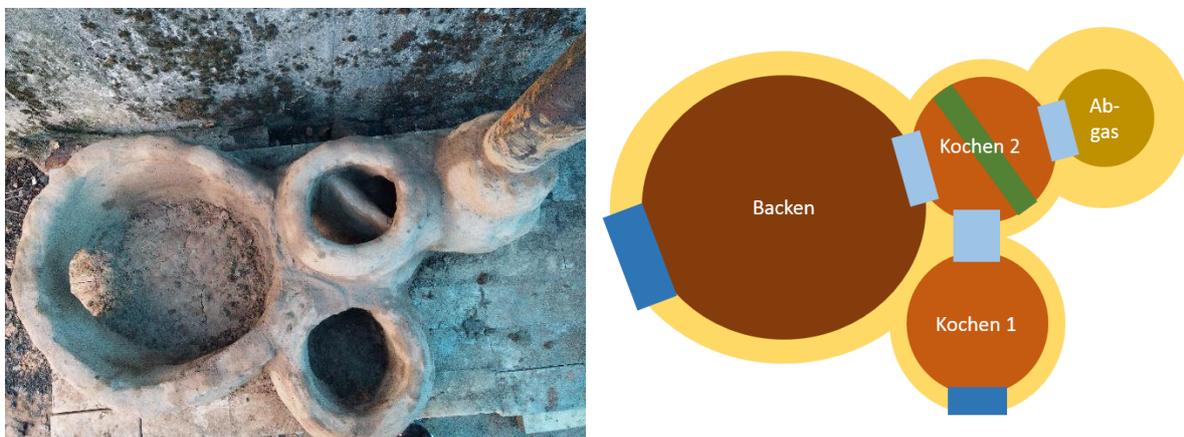


Abbildung 8: Chigr Fechi Draufsicht (links) / Chigr Fechi Skizze (rechts)

Da die Versuche an beiden Öfen nacheinander durchgeführt werden, wird beim Chigr Fechi dieselbe Injeraplatte verwendet, die auch beim Rocket Stove zum Einsatz kommt. Die Injeraplatte weist somit ebenfalls einen Durchmesser von 600 mm auf, der Innendurchmesser des Brennraums der Injeraplatte ist dadurch mit einem Durchmesser von zirka 580 mm etwas kleiner als die Platte. Die Höhe der Brennkammer beträgt 300 mm, was ebenfalls der Höhe der ersten Kochstelle entspricht. Diese weist einen

Durchmesser von 240 mm auf. Der Durchmesser der zweiten Kochstelle beträgt 180 mm. Nach oben hin wurde er jedoch auch auf 240 mm vergrößert und so umgebaut dass ein Topf mit einem Durchmesser von 240 mm versenkt werden kann. Nach den Erkenntnissen vorangegangener Messungen trägt dies zu einer nicht unwesentlichen Wirkungsgradsteigerung bei. (3) Die zweite Kochstelle liegt zirka 100 mm höher als die erste Kochstelle. Der Baffle hat eine Höhe von 300 mm und ist in einem Winkel von zirka 110 ° angestellt. Der Kamin weist einen Innendurchmesser von 120 mm auf. Seine Höhe beträgt zirka 1500 mm. An dem höchsten Punkt des Kamins ist ein 90 °-Winkel angebracht, von wo aus das Ofenrohr wiederum einen 1500 mm langen, horizontalen Verlauf aufweist und in einem 90 °-Winkel endet.

Im Chigr Fечи sind drei Messstellen (T1 bis T3) entsprechend dem Messstellenplan (Abbildung 9 rote Punkte) verbaut. Im Kaminverlauf befinden sich drei weitere Messstellen, eine kurz vor dem ersten Winkelement, eine kurz vor dem zweiten Winkelement und eine nach dem zweiten Winkelement. Zudem werden zwei Messstellen in den Kochtöpfen selbst benötigt.

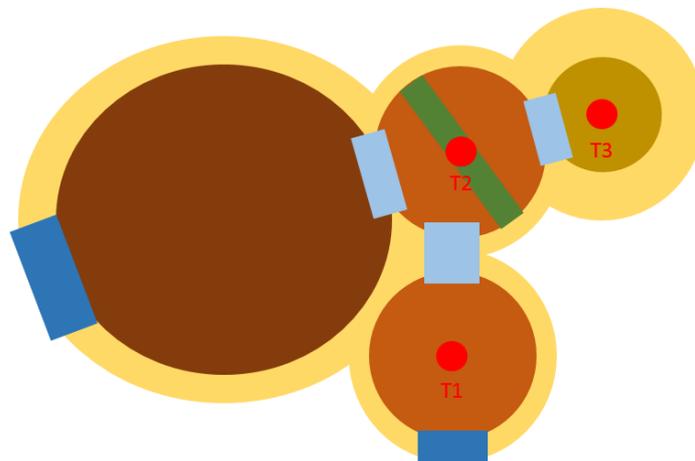


Abbildung 9: Chigr Fечи Messstellenplan

Der Raum der Injerplatte wird in den Versuchen nicht befeuert und somit wird dort auch keine Messstelle eingerichtet.

3.1.3 Messgeräte

Zur Durchführung der Messungen werden drei Typen von Temperaturmessgeräten, ein Feuchtigkeitsmessgerät und eine Waage benutzt. Die Daten der Temperaturmessgeräte wurden zum Teil in regelmäßigen Abständen handschriftlich notiert und zum Teil automatisch erfasst.

3.1.3.1 Temperaturmessgeräte

Zur Temperaturmessung werden drei unterschiedliche Typen von Messgeräten verwendet. Im Inneren der Öfen und im Kaminverlauf werden bis zu acht Temperatursensoren, sogenannte Thermoelemente verbaut. Die Anzahl der installierten Thermoelemente ist auf acht beschränkt, da der verwendete Analog-Digitalwandler keine zusätzlichen Anschlüsse aufweist und am Lehrstuhl keine weiteren Analog-Digitalwandler zur Verfügung standen. Es werden Thermoelemente der Firma Thermocoax vom Typ TKI verwendet, die auf einer Nickel-Chrom-Nickel-Verbindung basieren. Sie sind für Temperaturen bis zirka 1100 °C ausgelegt. Es existieren unterschiedliche Thermoelemente, die sich je nach Bedarf in der Dicke und Länge der Sensoren sowie in der Bauweise ihres Anschlusses unterscheiden. Durch Bohrungen werden die Thermoelemente im Ofen selbst oder im Ofenrohr angebracht. Die Ofenbohrungen werden durch Lehm abgedichtet. An den Bohrungen des Ofenrohrs wird jeweils ein Bolzen mit Innenbohrung und Außengewinde angeschweißt. In der Innenbohrung des Bolzens werden eine Dichtung und das Thermoelement eingeführt. Am Thermoelement befindet sich eine Mutter welche mit dem Außengewinde des Bolzens verschraubt wird.

Die Messung der Oberflächentemperatur der Injeraplatte erfolgt berührungslos über ein Infrarot-Thermometer der Firma Voltcraft® vom Typ IR 900-30s. Der Temperaturmessbereich liegt laut Hersteller zwischen -50 °C und 900 °C mit einer Abweichung von $\pm 2\%$ des Messwertes bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C bis 25 °C. (12) Zur Messung wird ein Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,91$ eingestellt. Die Messung erfolgt an den fünf Messstellen der Injeraplatte mit einem Abstand von zirka 200 mm bis 300 mm zur Plattenoberfläche.

Zur Vergleichsmessung der Wassertemperatur wird ein Pt100-Sensor der Firma Greisinger vom Typ GES 401 verwendet. Der Sensor misst Temperaturen im Bereich von

– 50 °C bis + 400 °C und weist eine Sensorgenauigkeit von $\pm 0,3$ °C auf. Die Ansprechzeit des Sensors beträgt zehn Sekunden. (13)

3.1.3.2 Feuchtigkeitsmessgerät

Zur Messung der Feuchtigkeit des Anzündholzes wird ein Feuchtigkeitsmessgerät der Firma Brennstuhl vom Typ Feuchtigkeits-Detector MD verwendet. Das Messgerät weist einen Messbereich von fünf bis 50 % Feuchtigkeit für Holz bei einer Genauigkeit von ± 3 % auf. (14)

3.1.3.3 Waage

Das Gewicht des Brennstoffes, der Brennstoffrestmasse und des zum Kochen verwendeten Wassers wird mit einer Waage der Firma Mettler vom Typ PE 6000 ermittelt. Mit ihr lassen sich Massen von bis zu 6100 g bestimmen. Die Genauigkeit beträgt $\pm 0,1$ g. (15)

3.1.4 Verwendete Brennstoffe

Zur Durchführung der Versuche werden drei verschiedene Arten auf Holz basierender Brennstoffe genutzt, die jeweils eine spezielle Funktion aufweisen. Für den Anzündvorgang werden auf Holz und Wachs basierende Anzündwürfel verwendet. Ein einzelner Würfel ist 30 mm lang, 20 mm breit und 18 mm hoch. Die Würfel sind in einer Tafel von 32 Würfeln gebündelt und lassen sich einzeln herausbrechen. Abbildung 10 (links) zeigt einen herausgebrochenen Block zu vier Würfeln. Die Würfel Entzünden sich relativ schnell und sorgen dafür, dass die Flamme relativ schnell auf das um die Würfel gestapelte Anzündholz übergreifen kann.

Als Anzündholz werden kleine, rindenlose Nadelholzscheite verwendet (Abbildung 10 (rechts)), welche je nach Tageswitterung eine Feuchtigkeit von sechs bis 16 % aufweisen. Die durchschnittliche Länge der Anzündhölzer beträgt 170 mm bis 190 mm.



Abbildung 10: Anzündwürfel (links) / Anzündholz (rechts)

Trockenes Nadelholz hat im Allgemeinen einen Heizwert von zirka 19.500 kJ/kg, was bei einer durchschnittlichen Holzfeuchte von rund 11 % einem Heizwert von 17.100 kJ/kg entspricht.

Auf dem Anzündholzbett befinden sich Hartholzbriketts, welche durch längeren Kontakt mit einer Flamme entzündet werden. Zudem können sie sich auch durch kurzen Kontakt mit heißer Glut entzünden. Die achteckigen Briketts (Abbildung 15) haben eine Länge von 225 mm und eine Breite von 65 mm. Mittig entlang der Längsachse befindet sich ein zylindrischer Durchgang mit einem Durchmesser von 25 mm.



Abbildung 11: Hartholzbriketts

Der Heizwert der Hartholzbriketts liegt bei zirka 18.500 kJ/kg. Die Feuchtigkeit liegt bei unter 5 % und kann aus diesem Grund nicht mit dem vorhandenen Messgerät ermittelt

werden. Entsprechend einer Elementaranalyse des Technologie- und Förderzentrum (TFZ) im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, Straubing, setzen sich die zum Einsatz kommenden Hartholzbriketts entsprechend Tabelle 1 zusammen.

	Masse-%	Massenanteil γ
Kohlenstoff	50,00%	0,5000
Wasserstoff	4,25%	0,0425
Schwefel	0,01%	0,0001
Sauerstoff	44,50%	0,4450
Asche	0,66%	0,0066
Sonstige	0,58%	0,0058
SUMME	100,00%	1,0000

Tabelle 1: Massenanteile Hartholzbriketts (16)

Dementsprechend lässt sich die spezifische Mindestluftmasse, welche für eine stöchiometrische Verbrennung der Hartholzbriketts notwendig ist, nach Formel 11 zu

$$l_{min} = \frac{2,6642\gamma_C + 7,9366\gamma_{H_2} + 0,9979\gamma_S - \gamma_{O_2}}{0,23141} = 5,29127 \frac{kg \text{ Luft}}{kg \text{ Brennstoff}}$$

ermitteln.

Die elementare Zusammensetzung des Anzündholzes weicht nur gering von der elementaren Zusammensetzung der Holzbriketts ab. Zudem ist der Einsatz des Anzündholzes in Bezug auf die eingesetzte Brikettmenge gering. Aus diesen Gründen wird sich in den weiteren Berechnungen nur auf die elementare Zusammensetzung der Hartholzbriketts bezogen. Die eingesetzte Anzündholzmasse wird entsprechend ihrem Heizwert in Brikettmasse umgerechnet.

3.2 Methoden

Im Fokus der Betrachtung soll der Rocket Stove stehen. Hier soll der Gesamtwirkungsgrad der Back- und Heizfunktion sowie eine optimale Ofenrohrlänge ermittelt werden. Zudem ist die gleichmäßige Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Injerplatte ausschlaggebend für die Akzeptanz bei den äthiopischen Hausfrauen. Diesbezüglich soll der Rocket Stove ebenfalls optimiert werden. Am Chigr Fechi soll ein Water Boling

Test durchgeführt werden, um seine Effizienz mit anderen Öfen vergleichen zu können. Nachfolgend werden die einzelnen Methoden genauer erläutert.

3.2.1 Wirkungsgradermittlung am Rocket Stove

Die Wirkungsgradermittlung sollte zunächst zusammen mit einer Leistungsermittlung mit Hilfe der eingesetzten Energie, abzüglich der Abgasenergie, erfolgen. Wärmeverluste durch Konvektion und Strahlung hätten hierbei vernachlässigt werden können, da diese Wärmeanteile zum größten Teil in den fiktiven Wohnraum abgeführt worden wären und somit dem Heizzweck gedient hätten. Aufgrund fehlender Messinstrumente konnte jedoch die Abgasmenge nicht bestimmt werden. Dies war auch bereits bei den vorangegangenen Versuchen von Forster (3) der Fall. Um die Öfen mit ihren Injeraplatten trotzdem vergleichen zu können führte Forster einen Vergleich des Brennstoffeinsatzes durch. Diese Methode kommt hier ebenfalls zum Einsatz.

Der Versuch gliedert sich in zwei Phasen, die Aufheizphase und den Zweistudentest. Vor Beginn des Versuchs wird der Ausgangsbrennstoff gewogen. Das eingesetzte Anzündholz wird über den Heizwert in Brikettmasse umgerechnet. In der Aufheizphase wird der Ofen auf seine Betriebstemperatur gebracht. Diese ist erreicht, sobald die Injeraplatte in ihrer Plattenmitte eine Oberflächentemperatur von 250 °C aufweist. Der sich im Ofen befindliche Brennstoff sowie die bereits vorhandene Glut werden nach Erreichen der Betriebstemperatur entnommen und gewogen. Aus der Differenz von eingesetztem Brennstoff und dem nach Abschluss der Aufheizphase vorhandenem Brennstoff lässt sich der Brennstoffeinsatz ermitteln. Nach der Berechnung des Brennstoffeinsatzes der Aufheizphase wird dem Ofen wieder eine zuvor bestimmte Menge Brennstoff hinzugefügt, welche direkt entzündet werden sollte. Im Falle der Holzbriketts kann die sofortige Entzündung durch die Zugabe von einer vorher bestimmten Menge an Glut eingeleitet werden. Nach der Entzündung des Brennstoffes folgt der Zweistudentest (2h-Test). In dieser Versuchsphase soll die Oberflächentemperatur der Injeraplatte in Plattenmitte über einen Zeitraum von zwei Stunden annähernd bei 250 °C gehalten werden. Nach Abschluss des 2h-Tests werden der noch im Ofen verbleibende, restliche Brennstoff sowie die Glut gewogen. Wie bereits bei der Aufheizphase wird der Brennstoffeinsatz aus Differenz von eingesetztem und restlichem Brennstoff ermittelt.

3.2.2 Ermittlung der optimalen Ofenrohrlänge

Ziel der Ermittlung der optimalen Ofenrohrlänge ist es das Ofenrohr über eine möglichst lange Strecke horizontal durch den Raum verlaufen zu lassen um somit eine möglichst große Wärmemenge in den Wohnraum abzuführen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass kein Rauch durch das Gate und somit in den Wohnraum entweicht. Die Ermittlung der Ofenrohrlänge erfolgt subjektiv durch den Umbau des Ofenrohres und das Beobachten des Ofenverhaltens. Hierbei stehen Ofenrohrstücke mit Längen von 500 mm und 1000 mm, sowie 90 °-Winkel zur Verfügung.

3.2.3 Optimierung der Oberflächentemperaturverteilung der Injeraplatte

Die Optimierung der Temperaturverteilung erfolgt durch Messung der Oberflächentemperatur während des 2h-Tests und anschließenden bautechnischen Veränderungen des Gates sowie der Brenn- und Abgaskammer. Die Temperaturmessung erfolgt viertelstündig an den fünf Messstellen der Injeraplatte (vgl. Kapitel 3.1.1 Abbildung 6 (links)) mittels Infrarot-Thermometer (vgl. Kapitel 3.1.3.1). Die Messwerte werden handschriftlich festgehalten und im Anschluss an die Messung digitalisiert.

3.2.4 Water Boiling Test am Chigr Fечи

Der Water Boiling Test (WBT) ist in drei direkt aufeinanderfolgenden Phasen untergliedert und sollte mindestens dreimal für einen Ofentyp durchgeführt werden, was einem Versuchsdurchgang entspricht. Zur Durchführung des Tests werden folgende Materialien benötigt:

- Brennstoff
- Töpfe
- Wasser
- Kohlenpfanne
- Waage
- Temperaturmessgeräte

Der Test sollte gut vorbereitet werden, da der Übergang der einzelnen Phasen schnell stattfinden muss. Der Brennstoff soll bereits vor Beginn des WBT gebündelt und abgewogen werden. Ebenso sollen vor Beginn des WBT die Massen der einzelnen Gefäße ermittelt werden. Vor der Durchführung des Tests werden die Umgebungstemperatur T_U und der lokale Siedepunkt T_B bestimmt. Letzterer kann über die Höhe h des Testortes über Normalhöhennull (NHN) durch Anwendung von Formel 15 berechnet werden.

$$T_B = \left(100 - \frac{h}{300}\right)^\circ C.$$

Formel 15: Lokaler Siedepunkt

Ein WBT-Durchgang besteht aus zwei „high-power“ und einer „simmer“ Phase. Die einzelnen Phasen werden wie folgt durchgeführt:

1. Cold-start high-power Phase

Zu Beginn der ersten Phase befindet sich der Ofen auf Raum- beziehungsweise Umgebungstemperatur. Der Tester entzündet den Brennstoff in der Brennkammer und misst die Zeit bis das Wasser des Kochtopfes der ersten Kochstelle den lokalen Siedepunkt erreicht hat. Nun misst der Tester direkt die Massen der Kochtöpfe inklusive Wasser sowie die Masse des restlichen Brennstoffes und notiert diese.

2. Hot-start high-power Phase

Die hot-start high-power Phase folgt direkt auf die cold-start high-power Phase, also dann wenn der Ofen noch heiß ist. Das Wasser der Kochtöpfe wird nach der ersten Phase durch die gleiche Menge an frischem Wasser ersetzt. Der Tester entzündet erneut den Brennstoff in der Brennkammer und misst die Zeit bis das Wasser im ersten Kochtopf den lokalen Siedepunkt erreicht hat. Im Anschluss werden erneut die Masse der Kochtöpfe inklusive Wasser sowie die übriggebliebene Brennstoffmasse gewogen und notiert.

3. Simmer Phase

Für die simmer Phase wird dasselbe Wasser verwendet, welches in der hot-start high-power Phase verwendet wurde. Diese Phase simuliert einen 45-minütigen Garprozess. Dabei wird die Wassertemperatur zirka drei Grad Celsius unter der lokalen Siedetemperatur gehalten. Dies geschieht durch die kontrollierte

Zufuhr von kaltem Wasser zum Senken der Temperatur oder durch die Zufuhr von Brennstoff zum Erhöhen der Temperatur. Das Verwenden des Wassers aus Phase zwei erspart das erneute Erwärmen des Wassers. Im Anschluss werden die Massen der Kochtöpfe inklusive Wasser sowie die restliche Brennstoffmasse erneut abgewogen. Wichtig ist hierbei auch die Massen des zugeführten Wassers und des zugeführten Brennstoffes zu notieren. (17) (18)

Die Durchführung des WBT in Kaiserslautern wird mit 1,5 Liter Wasser je Kochtopf durchgeführt. Der lokale Siedepunkt T_B beträgt in Kaiserslautern bei einer Höhe h von 251 m ü. NHN nach Formel 15 99,163 °C. Der Anzündprozess erfolgt, wie bereits in Kapitel 3.1.4 beschrieben, durch ein Bett von Anzündhölzern mit mittig platzierten Anzündwürfeln. Auf das Bett von Anzündhölzern wird ein Hartholzbrikett gelegt. Die Brennstoffmassen des Anzündvorgangs werden in etwa gleich groß sein. Der Zündvorgang der Hartholzbriketts der simmer Phase erfolgt durch das Hinzufügen von Glutteilen aus Phase zwei. Das Gewicht der Glut wird in der Auswertung ebenfalls berücksichtigt.

Die Messwerte werden in eine bereitgestellte Exceltabelle eingetragen. Die Tabelle errechnet automatisch die nachfolgenden Werte, die zum Vergleich mit anderen Ofentypen herangezogen werden können:

- Kochdauer Topf 1
Die Kochdauer Topf 1 gibt die Zeit an, die für die Durchführung der jeweiligen Versuchsphase benötigt wird.
- Zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1
Die zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1 gibt ebenfalls die Zeit an, die für die Durchführung der jeweiligen Versuchsphase benötigt wird. Bei diesem Wert wird das Ergebnis jedoch auf eine Änderung der Temperatur um 75 °C beschränkt, nämlich von 25 °C bis 100 °C. Diese Ergebnisänderung dient dazu die Ergebnisse zu standardisieren.
- Feuerrate
Die Feuerrate gibt den Brennstoffeinsatz pro Zeiteinheit an.

- **Thermischer Wirkungsgrad**
Der thermische Wirkungsgrad ist das Verhältnis der zum Erhitzen und Verdampfen aufgewendeter Arbeit zur eingesetzten Energie des Brennstoffes.
- **Spezifischer Brennstoffverbrauch**
Der spezifische Brennstoffverbrauch ist hier als diejenige Brennstoffmenge definiert, die benötigt wird um einen Liter Wasser zum Kochen zu bringen.
- **Zeitkorrigierter spezifischer Brennstoffverbrauch**
Der zeitkorrigierte spezifische Brennstoffverbrauch gibt diejenige Brennstoffmenge an, die benötigt wird um einen Liter Wasser von 25 °C auf 100 °C zu erhitzen.
- **Leistung/ Feuerkraft**
Die Leistung bzw. Feuerkraft gibt die pro Zeiteinheit konsumierte Energie des Ofens an.
- **Turn Down Verhältnis**
Das Turn Down Verhältnis ist das Verhältnis der Leistung bzw. der Feuerkraft des Hot Start High Power Test zur Leistung bzw. Feuerkraft der Simmer Phase.

4. Ergebnisse und Diskussion

Im nachfolgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen und Optimierungen dargestellt, erläutert und diskutiert. Dabei wird zuerst auf den Rocket Stove und im Anschluss auf den Chigr Fechi eingegangen.

4.1 Rocket Stove

Entsprechend der Gliederung von Kapitel 3.2 werden nachfolgend zuerst die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung des Rocket Stove beschrieben, erläutert und diskutiert. Anschließend folgen die Ergebnisse der Optimierung der Ofenrohrlänge, die zum Teil bereits in die Ergebnisse der Wirkungsgradmessung einfließen. Zuletzt wird auf die Ergebnisse der Oberflächentemperaturverteilung der Injeraplatte eingegangen.

Getestet wurden verschiedene Varianten des Rocket Stove, welche verschiedene Modifizierungen in der Größe des Gates, der Brennkammer und des Ofenrohrverlaufs aufwiesen. Eine Übersicht der einzelnen Varianten ist in Tabelle 2 gegeben, in welcher den einzelnen Varianten eine eindeutige Nummer zugeordnet wird.

Nummer	Bezeichnung	Gate	Brennkammer	Ofenrohr horizontal/vertikal
V1	3m RS offen	offen	offen	3m/0m
V2	Isoliert 2m/1m RS offen	offen	offen	Iso. 2m/1m
V3	Isoliert 2m/1m RS halboffen	halboffen	offen	Iso. 2m/1m
V4	Isoliert 2m/1m RS 100mm	100mm	offen	Iso. 2m/1m
V5	Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS offen	offen	offen	Iso. 2,5m/4x90°/1,5m
V6	Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS 100mm	100mm	offen	Iso. 2,5m/4x90°/1,5m
V7	Isoliert 1,5m/1,5m RS kP 100mm	100mm	kleine Platte	Iso. 1,5m/1,5m/90°
V8	Isoliert 1,5m/1,5m RS gP 100mm	100mm	große Platte	Iso. 1,5m/1,5m/90°

Tabelle 2: Übersicht Testvarianten Rocket Stove

Man erkennt an Tabelle 2 dass drei Varianten des Gates, drei Varianten der Brennkammer und vier Varianten des Ofenrohres jeweils in unterschiedlichen Kombinationen getestet wurden. Die Versuchsdauer betrug jeweils zwei Stunden pro Durchgang.

Modifikation des Gates

Die Modifikation des Gates bestand in der Änderung seiner Größe und Form. Die Ausgangsgröße des offenen Gates betrug zirka 210 mm in der Höhe und zirka 160 mm in der Breite (vgl. Abbildung 12 links). Durch einen Ziegelstein, welcher quer auf zwei weitere Ziegelsteine gestapelt wurde, wurde das Gate zu einem halboffenen Gate verkleinert (vgl. Abbildung 12 rechts).



Abbildung 12: Offenes Gate (links) / halboffenes Gate (rechts)

Die Reduzierung des Gates auf einen 100 mm Kreisdurchmesser wurde mit Hilfe des bereits von Forster (3) genutzten 100 mm Kreisdurchmesser-Zuschnittes, bestehend aus einem Stück Steinwolle, durchgeführt (vgl. Abbildung 13).



Abbildung 13: 100 mm Gate

Modifikation der Brennkammer

Die Ausgangsvariante der Brennkammer besaß am Übergang zur Abgaskammer eine Überstromwulst aus Lehm, welche eine bessere Verteilung des Verbrennungsgases an die Außenflächen der Injeraplatte bewirken sollte (vgl. Abbildung 14). Die Verbrennungsgase, welche aus der Brennkammer in die Abgaskammer strömten, trafen zudem ungehindert auf die Injeraplatte, welche einen Abstand von zirka 30 mm zum höchsten Punkt der zirka 20 mm dicken Überstromwulst aufwies. Die Ofenvarianten V2 bis V6 wurden mit dieser Variante der Brennkammer betrieben.



Abbildung 14: Offene Brennkammer mit Überstromwulst

Die Brennkammern der Ofenvarianten V7 und V8 wurden modifiziert. Auf der Öffnung der Brennkammer von Ofenvariante V7 wurde eine Schamottplatte mit drei Ausläufern angebracht, welche im Durchmesser um 30 mm kleiner war als der Innendurchmesser der Brennkammer (kleine Platte, vgl. Abbildung 15 links). Somit entstand zwischen Brennkammer und kleiner Platte ein Spalt, durch den das Verbrennungsgas in die Abgaskammer strömen konnte. Die Ziegel der Brennkammer wurden an der Innenseite in einem 45°-Winkel abgeschrägt um den Abstand zwischen der Oberseite der kleinen Platte und der Unterseite der Injeraplatte zu vergrößern. Auf dieser Schräge wurde die

kleine Platte mit ihren drei Ausläufern platziert und mit Lehm fixiert. Der Abstand zwischen der Oberseite der kleinen Platte und der Unterseite der Injeraplatte betrug zirka 40 mm.



Abbildung 15: Kleine Platte (links) / große Platte (rechts)

Über der Brennkammer der Ofenvariante V8 wurde eine Schamottplatte mit einem Durchmesser von 370 mm platziert, welche an drei Stellen auf der Oberkante der Brennkammer auf Lehmkugeln auflag. Die „große“ Schamottplatte wies somit einen um 10 mm größeren Durchmesser auf als die Außenwand der Brennkammer. Da der Abstand zwischen der Oberseite der großen Platte und der Unterseite der Injeraplatte zu gering wurde, wurde die Injeraplatte durch eine zirka 30 mm dicke Lehmschicht angehoben (vgl. Abbildung 15 rechts). Der Abstand der beiden Platten zueinander betrug somit zirka 20 mm bis 30 mm. Durch den Spalt zwischen der Wand der Brennkammer und der Unterseite der großen Platte konnte das Verbrennungsgas in die Abgaskammer gelangen.

Modifikation des Ofenrohres

Das Ofenrohr in seinem Ausgangszustand (Ofenvariante V1) wies einen horizontalen Verlauf von 3.000 mm auf. Es folgen drei Modifikationen des Ofenrohres. Das Ofenrohr der Ofenvarianten V2, V3 und V4 wurde in seinem horizontalen Verlauf um 1.000 mm gekürzt. An dem verbleibenden 2.000 mm langen, horizontalen Ofenrohr

wurde mit Hilfe eines 90°-Winkels ein 1.000 mm Rohrstück vertikal angebracht. Zudem wurde das Ofenrohr mit Steinwolle isoliert.

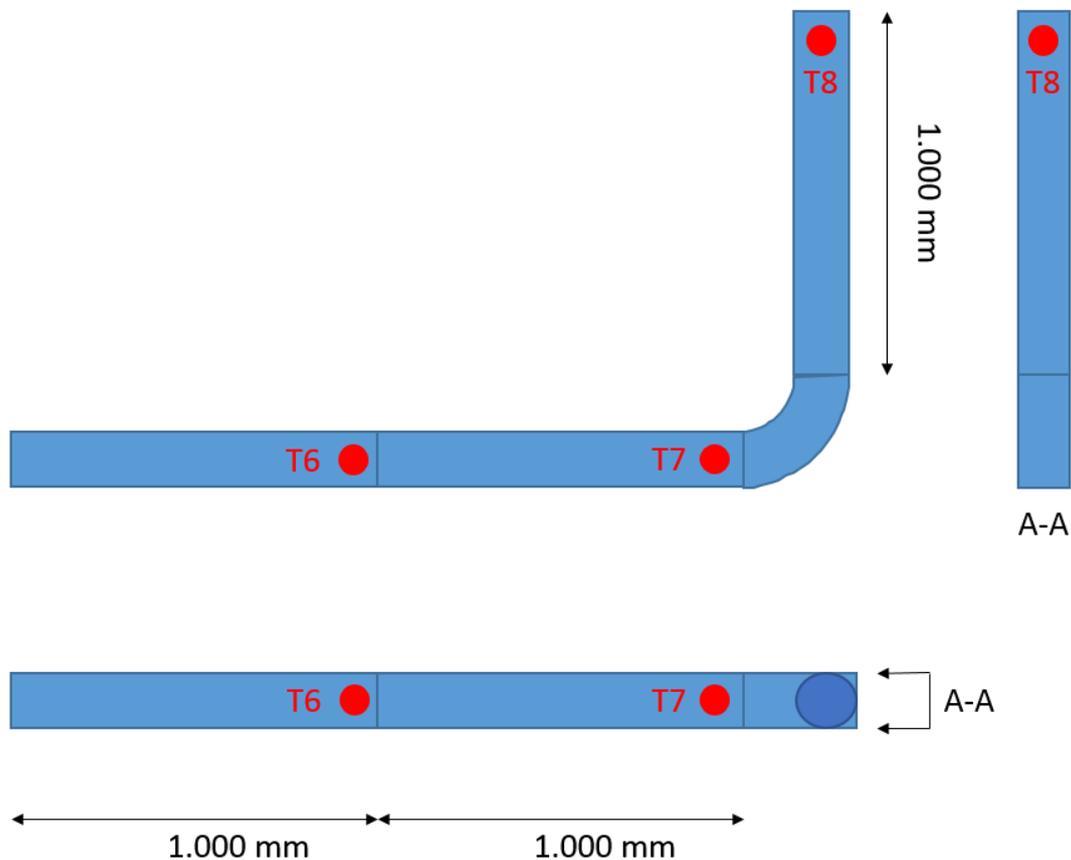


Abbildung 16: Ofenrohrverlauf Iso. 2m/1m der Ofenvarianten V2 bis V4

Abbildung 16 zeigt den Ofenrohrverlauf der Ofenvarianten V2 bis V4 in seiner Draufsicht (unten), seiner Vorderansicht (oben links) und seiner Ansicht von rechts (oben rechts, A-A). Der Rocket Stove befindet sich in dieser Skizze links, d.h. das Abgas strömt von links nach rechts/ rechts oben. Die Punkte T6, T7 und T8 sind die Temperaturmessstellen. Die Messstelle T6 wurde zirka 950 mm hinter dem Ofenrohreintritt installiert. T7 befand sich 1.000 mm hinter T6. 50 mm vor dem Ofenrohraustritt wurde die Messstelle T8 installiert. Der Abstand zum direkten Ende des Ofenrohres war notwendig, um die Messergebnisse nicht durch den Windeinfluss am Ofenrohrende zu verfälschen.

Die zweite Modifikation des Ofenrohrverlaufs betraf die Ofenvarianten V5 und V6. Das Ofenrohr wurde, wie in der Variante zuvor, ebenfalls isoliert. Der horizontale Ofenrohrverlauf bestand aus einer 2.500 mm langen Rohrstrecke, gefolgt von vier 90°-Winkeln. Der vierte 90°-Winkel war für die Richtungsänderung des Rohrverlaufs in vertikaler Richtung zuständig. Hier schloss sich eine 1.500 mm vertikaler Rohrverlauf an (vgl. Abbildung 17).

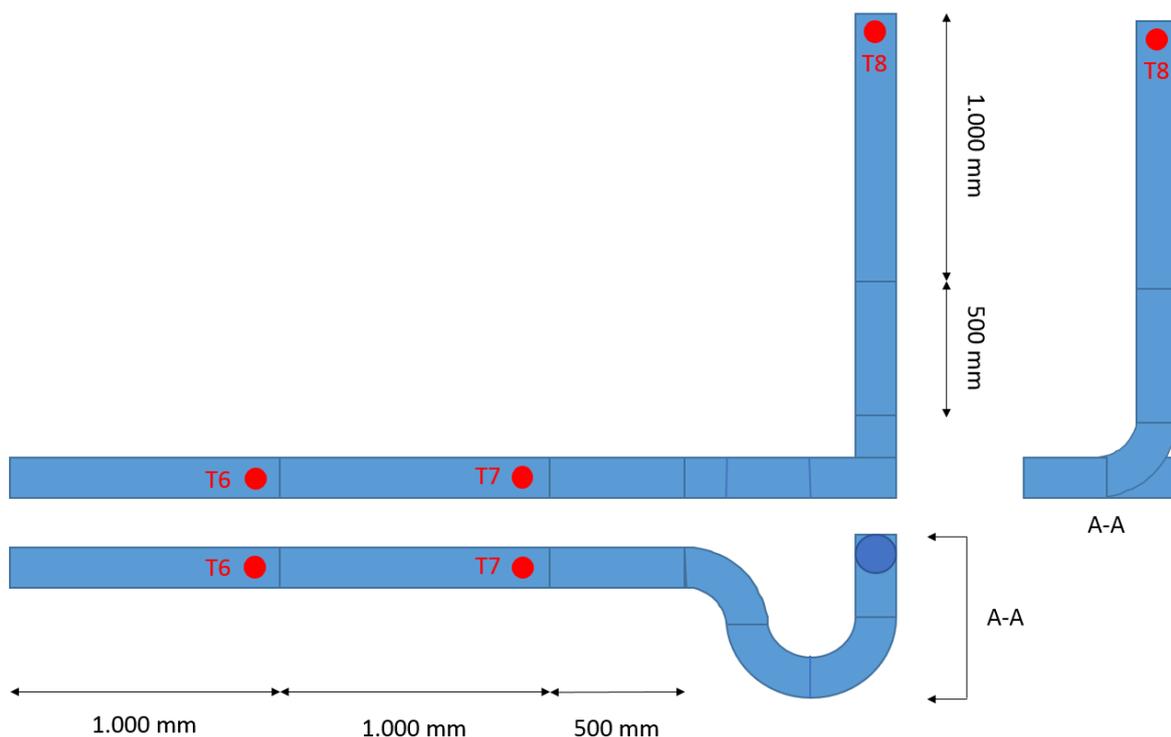


Abbildung 17: Ofenrohrverlauf Iso. 2,5m/4x90°/1,5m der Ofenvarianten V5 und V6

Die Ansichten in Abbildung 17 entsprechen denen in Abbildung 16. Die Temperaturmessstellen T6, T7 und T8 wurden an denselben Stellen angebracht, wie es bei den Ofenvarianten V2 bis V4 der Fall war. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die Rohrstrecke zwischen den Punkten T7 und T8 abgeändert wurde und die Strecke zwischen den beiden Punkten entsprechend verlängert wurde. Die längere Strecke sollte zu Heizzwecken genutzt werden. Unter äthiopischen Bedingungen wird Lehm zum Kaminbau eingesetzt. Der Lehm nimmt die Wärme besser auf als die Steinwolle und speichert diesen auch. Damit soll bezweckt werden, dass die durch den Rocket Stove erzeugte Wärme auch nach dem Backvorgang weiterhin in den Wohnraum abgegeben wird.

Die dritte Modifikation und somit vierte Ofenrohrvariante wurde nach einem Telefonat mit Christoph Ruopp (19) umgesetzt. Dieser Ofenrohrverlauf sollte somit am ehesten mit gängigen Ofenrohrverläufen vor Ort übereinstimmen. Das Ofenrohr verläuft 1.500 mm horizontal und geht dann über einen 90°-Winkel in einen 1.500 mm langen vertikalen Verlauf über. Am Rohrende ist ein weiterer 90°-Winkel angebracht, welcher als Ersatz für das unter vor-Ort-Bedingungen verwendete T-Rohrstück dient. Abbildung 18 gibt den Rohrverlauf wieder, mit dem die Ofenvarianten V7 und V8 getestet wurden.

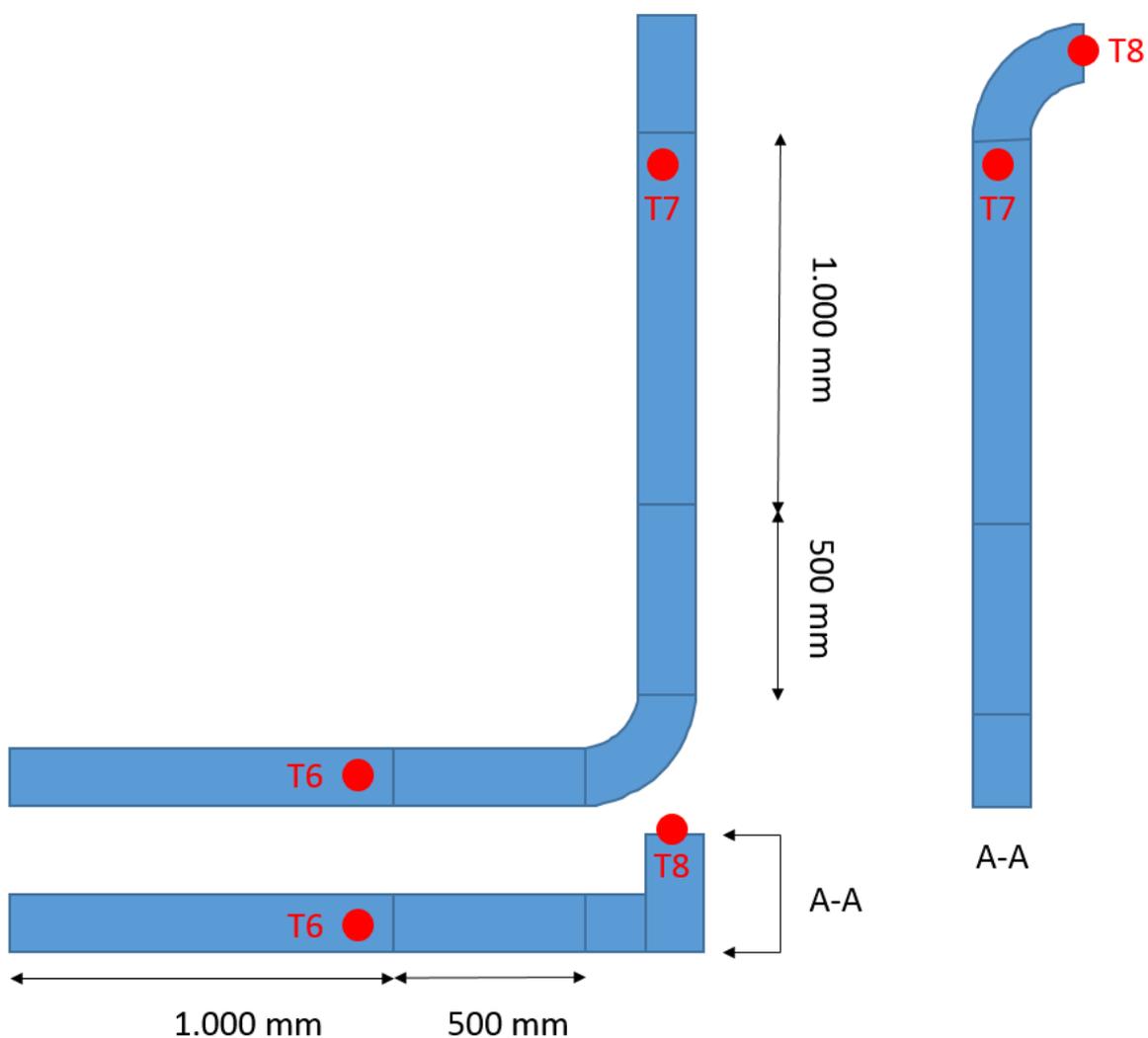


Abbildung 18: Ofenrohrverlauf Iso. 1,5m/1,5m/90° der Ofenvarianten V7 und V8

Die Ansichten des Rohrverlaufes in Abbildung 18 entsprechen denen der Abbildungen 16 und 17, ebenso die Position der Messstelle T6. Die Messstelle T7 wurde zirka

50 mm vor dem Ende des letzten geraden, vertikalen Ofenrohrstückes installiert. Direkt am Ende des Ofenrohrausgangs und somit am Ende des 90°-Winkels befindet sich die Messstelle T8. Diese ist, nicht wie die Messstellen T8 der beiden anderen Ofenrohrmodifikationen, durch ihre Position am direkten Ende des Rohres größeren Einflüssen durch Wind und Wetter ausgesetzt.

4.1.1 Ergebnisse der Wirkungsgradermittlung am Rocket Stove

Die Wirkungsgradermittlung am Rocket Stove erfolgte, wie bereits in Kapitel 3.2.1 erläutert, als Vergleichsbetrachtung des Brennstoffeinsatzes des Rocket Stove gegenüber einer Injeraplatte, die über einem offenem Feuer betrieben wird. Da eine Messung mit offenem Feuer aufgrund der Witterungsbedingungen zu einem stark verfälschten Ergebnis geführt hätte, wurde beschlossen sich an den Messergebnissen von Forster zu orientieren. Sein Brennstoffeinsatz betrug 8044 g in der Aufheizphase und 9859 g beim 2h-Test bei einer Injeraplatte über offenem Feuer. Da die Massenangaben sich hier auf Briketts mit einem Heizwert von 18.700 kJ/kg bezogen, mussten sie in eine Masse umgerechnet werden, die Briketts mit einem Heizwert von 18.500 kJ/kg entsprechen (3). Für die Aufheizphase ergab sich somit ein Brennstoffeinsatz von rund 8131 g Briketts und im 2h-Test ein Brennstoffeinsatz von rund 9966 g Briketts.

In Tabelle 3 sind die Brennstoffeinsätze der unterschiedlichen Ofenvarianten als Massenangabe sowie ein Massenvergleich und die Einsparung gegenüber einer Durchführung unter offenem Feuer einzusehen.

	Aufheizphase [g]	Vergleich	Ersparnis	2h-Test [g]	Vergleich	Ersparnis
offenes Feuer	8.131	----	----	9.966	----	----
V 2	4.144	50,97%	49,03%	5.005	50,22%	49,78%
V 3	4.487	55,18%	44,82%	5.114	51,31%	48,69%
V 4	----	----	----	4.167	41,81%	58,19%
V 5	----	----	----	4.473	44,88%	55,12%
V 6	2.969	36,51%	63,49%	4.088	41,02%	58,98%
V 7	3.029	37,25%	62,75%	4.179	41,93%	58,07%
V 8	4.792	58,93%	41,07%	5.102	51,19%	48,81%

Tabelle 3: Brennstoffeinsparungen der Testvarianten des Rocket Stove

Es ist zu erkennen, dass mit dem Rocket Stove eine Brennstoffeinsparung von mindestens 48 % in der Betriebsphase (2h-Test) erreicht werden konnte. Die durchschnittliche Brennstoffeinsparung betrug in der Aufheizphase rund 52 % und in den 2h-Tests rund 53 %. Für V4 und V5 fanden keine Aufheizphasen statt, da hier vor der Durchführung des 2h-Tests bereits weitere 2h-Tests stattfanden und die Injeraplatte somit schon aufgeheizt war. Es ist zu erkennen, dass bei den Durchführungen mit einem Gate mit 100 mm Durchmesser die höchsten Brennstoffeinsparungen vorlagen. Dies könnte dem Sachverhalt geschuldet sein, dass weniger Wärme aus dem Gate abstrahlte, die Wärme somit stärker im Ofen gehalten wurde und die Injeraplatte somit besser erwärmt wurde. Durch die Variation des Gates konnten somit bei den getesteten Varianten bis zu 9,5 % an Brennstoffen eingespart werden. Die Variation des Ofenrohres führt auch wiederum zu einer Verbesserung des Brennstoffverbrauchs. Hier konnte bei den getesteten Varianten eine zusätzliche Brennstoffeinsparung von bis zu 5,43 % erzielt werden. Bei optimiertem Gate führte die Änderung des Ofenrohres jedoch nur noch zu Brennstoffeinsparungen von knapp einem Prozent. Vergleicht man die Variante V7 mit der Variante V8 erkennt man gut, dass der Einbau der größeren Brennraumabdeckung in Variante V8 dazu führte, dass die Injeraplatte nicht so schnell erwärmt wurde wie in Variante V7, bei der eine kleinere Platte den Brennraum nur teilweise verdeckte. Variante V7 wies hierbei mit Brennstoffeinsparungen von 58,07 % eine um 9,26 % höhere Brennstoffeinsparung auf als Variante V8. Auch die Brennstoffeinsparung in der Aufheizphase war bei Variante V7 mit 62,75 % gegenüber einem offenen Feuer um 21,68 % höher als bei Variante V8. Variante V6 wies die höchsten Brennstoffeinsparungen auf (Aufheizphase 63,49 % / 2h-Test 58,98 %). Aufgrund der Aussage von Christoph Ruopp (19), dass der Ofenrohraufbau in der Praxis dem der Varianten V7 und V8 entsprechen würde, wurde keine Kombination aus einem Ofenaufbau nach Variante V7 und einem Ofenrohraufbau nach Variante V6 getestet.

Die größte Brennstoffeinsparung kann beim Rocket Stove durch eine Verkleinerung des Gates erreicht werden. Die Änderung des Ofenrohres hin zu einer längeren Abgasstrecke führt ebenfalls zu geringen Brennstoffeinsparungen. Es sollte jedoch beachtet werden, dass ebenso externe Faktoren wie die Qualität des Brennstoffes sowie das Nutzerverhalten Einflüsse auf die genutzte Brennstoffmenge haben können.

4.1.2 Ergebnisse der Ermittlung der optimalen Ofenrohrlänge

Der Aufbau des Ofenrohres wurde im Verlauf der Messungen mehrmals verändert. Der Testdurchlauf V1 des Ofens diente als erste Ermittlungsgrundlage. Er wurde mit einem drei Meter langen horizontalen Ofenrohr ohne Isolierung und einem vollständig geöffneten Gate durchgeführt. Der Temperaturverlauf des Testdurchlauf ist Abbildung 19 und die durchschnittlichen Temperaturen sind Tabelle 4 zu entnehmen. Dabei sind die vereinzelt erkennbaren Temperaturschwankungen im Diagramm auf Einstellungsänderungen der Messvorrichtung zurückzuführen.

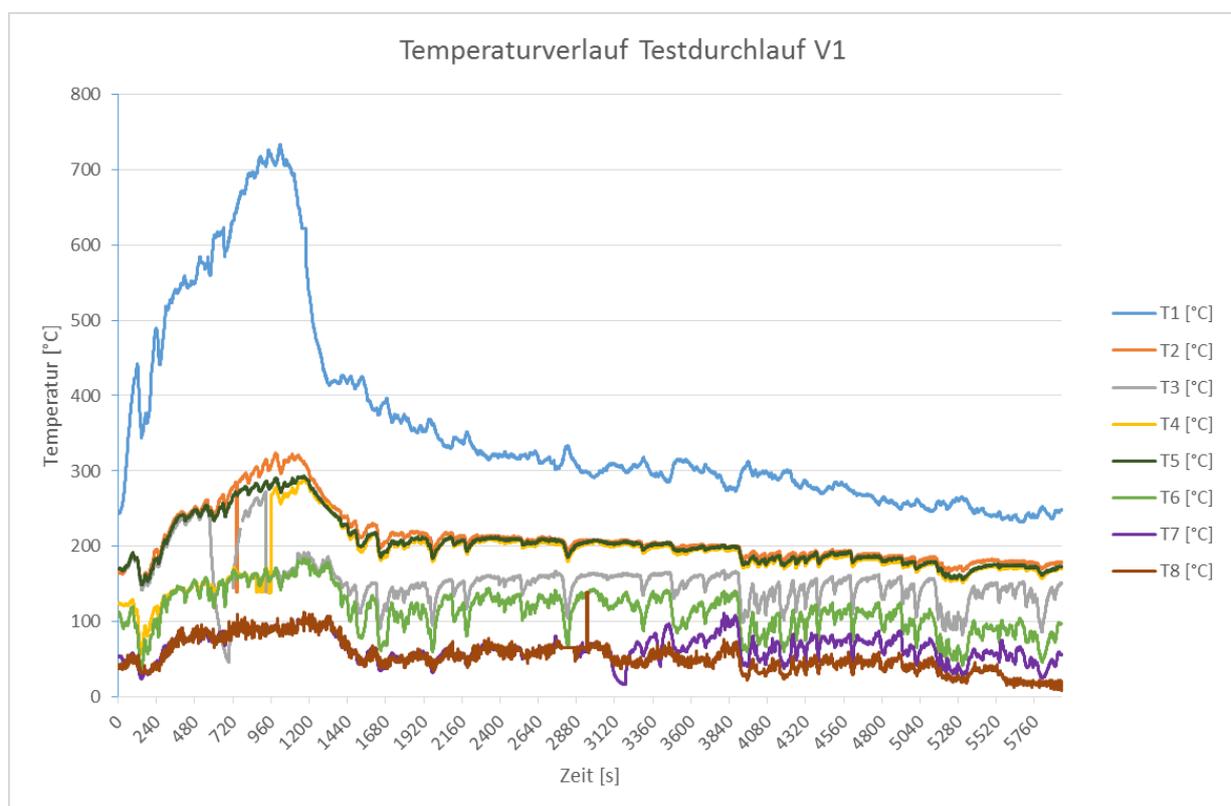


Abbildung 19: Temperaturverlauf Testdurchlauf V1

T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]
359,25	211,05	154,31	186,71	204,47	114,94	65,43	54,26

Tabelle 4: Temperaturmittelwerte Testdurchlauf V1

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Abgastemperatur am Ofenrohr Austritt (T8) durchschnittlich zirka 54 °C beträgt, die durchschnittliche Temperatur am Ofenaustritt (T4) beträgt hingegen rund 187 °C. Die Messpunkte T4, T6, T7 und T8 waren jeweils mit

einem Abstand von einem Meter zueinander angebracht. Man erkennt, dass der Temperaturabfall auf den ersten beiden Rohrmetern rund 50 °C bis 70 °C pro Meter Rohrlänge betrug. Die hohe Temperaturdifferenz und der damit einhergehende Wärmeverlust waren auf die fehlende Isolierung zurückzuführen, was man im Vergleich mit späteren Messungen erkennen kann. Das Edelstahlrohr gab somit einen großen Teil der Abgaswärme an die Umgebung ab. Hinzu kam, dass durch die rein horizontale Lage des Ofenrohres bei entsprechenden Witterungsverhältnissen Luft vom Ofenrohrende in die Brennkammer gedrückt wurde. Somit konnte das Abgas nicht mehr über das Ofenrohr entweichen und wurde über das Gate in den fiktiven Wohnraum transportiert. Das Errichten einer Mauer mit einem kurzen Abstand zum Ofenrohrende half hier zwar weiter, löste das Problem des Abgasrückflusses jedoch nicht vollständig. Durch entsprechende Luftverwirbelung zwischen Ofenrohrende und Mauer kam es immer noch teilweise vor, dass das Abgas zurück in die Brennkammer gedrückt wurde.

Eine weitere Variante (V2 – V4) des Ofenrohrverlaufs war die Isolierung des Ofenrohres. Die Isolierung erfolgte mit einer 30 mm bis 40 mm dicken Schicht Steinwolle. Einzelheiten zum verwendeten Material wurden bereits in Kapitel 3.1.1 erläutert. Weiterhin wurde das letzte Rohrstück vertikal verlegt um den Rückfluss des Abgases zu vermeiden. Das Ofenrohr wies nun eine horizontale Länge von zwei Metern auf, gefolgt von einem ein Meter langen, vertikalen Rohrstück (vgl. Abbildung 16). Der Temperaturverlauf bei offenem Gate (V3) sowie die Temperaturmittelwerte sind der nachfolgenden Abbildung 20 sowie Tabelle 5 zu entnehmen.

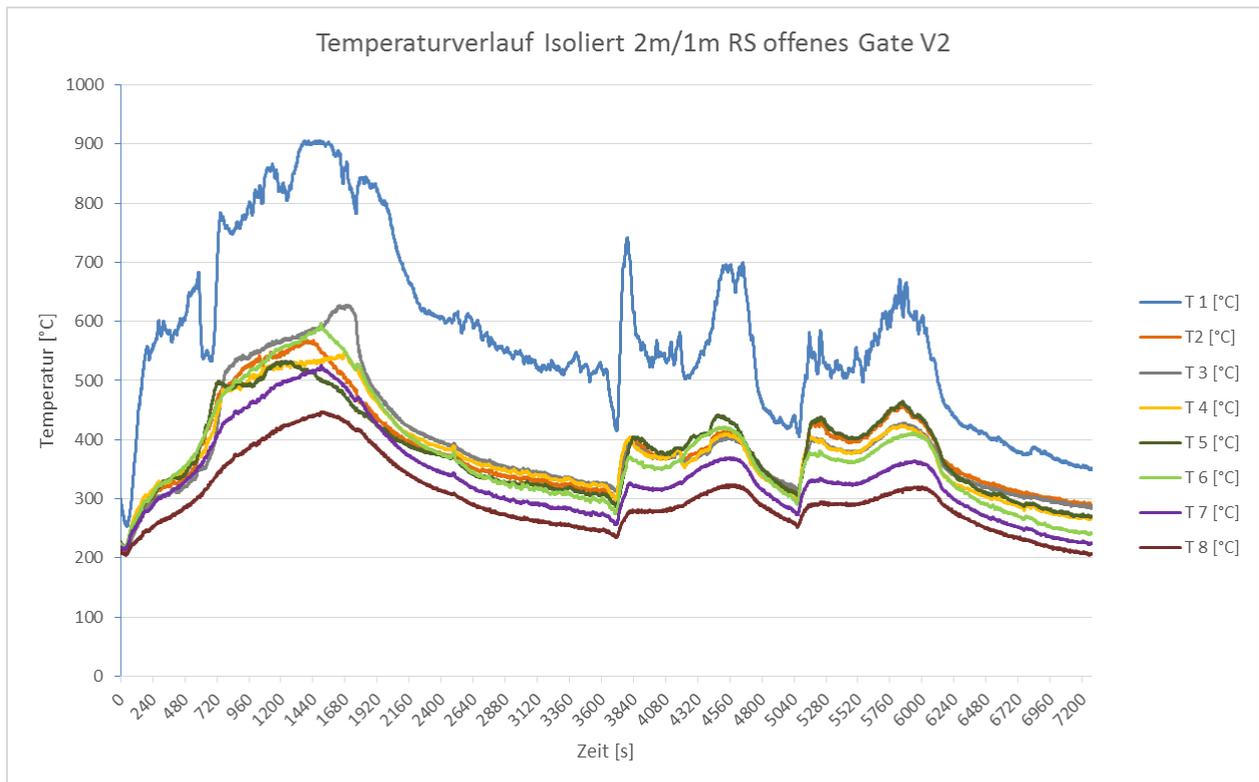


Abbildung 20: Temperaturverlauf Isoliert 2m/1m RS offenes Gate V2

T 1 [°C]	T 2 [°C]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T 7 [°C]	T 8 [°C]
580,53	384,24	389,11	378,86	378,83	373,74	338,69	300,80

Tabelle 5: Temperaturmittelwerte Isoliert 2m/1m RS offenes Gate V2

Hier fallen sofort die höheren Temperaturwerte von T4, T6, T7 und T8 auf. Zwar wurde der Ofen bei diesem Versuchsdurchlauf länger betrieben und stärker beheizt als bei dem ersten Testversuch wodurch auch höhere Temperaturen und Temperaturmittelwerte erreicht wurden, jedoch war der Wärmeverlust zwischen Ofenausgang und Ofenrohrende geringer. Zudem wurde durch die vertikale Lage des letzten Rohrabschnittes das Abgas nicht mehr zurück in die Brennkammer gedrückt.

Des Weiteren wurde dieser Ofenrohrverlauf auch mit halboffenem Gate (V3, Abbildung 21, Tabelle 6) und einem Gate mit 100 mm Durchmesser (V4, Abbildung 22, Tabelle 7) durchgeführt.

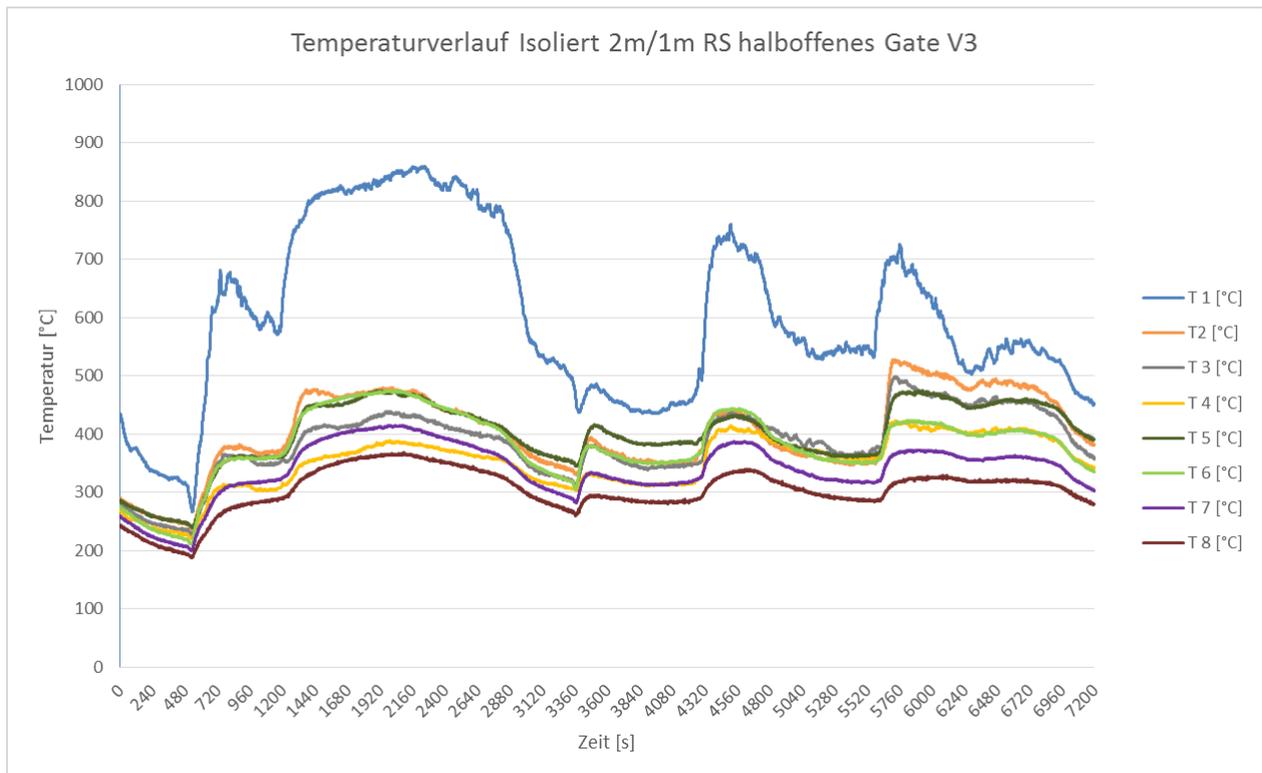


Abbildung 21: Temperaturverlauf Isoliert 2m/1m RS halboffenes Gate V3

T 1 [°C]	T 2 [°C]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T 7 [°C]	T 8 [°C]
601,32	402,65	384,61	350,81	399,29	381,12	338,93	303,19

Tabelle 6: Temperaturmittelwerte Isoliert 2m/1m RS halboffenes Gate V3

Beim halboffenen Gate sind die Temperaturen bis auf T4 im Gegensatz zum offenen Gate leicht erhöht, die Temperaturen im Ofenrohr sind annähernd gleich. Der Brennstoffeinsatz ist bei beiden Varianten annähernd gleich.

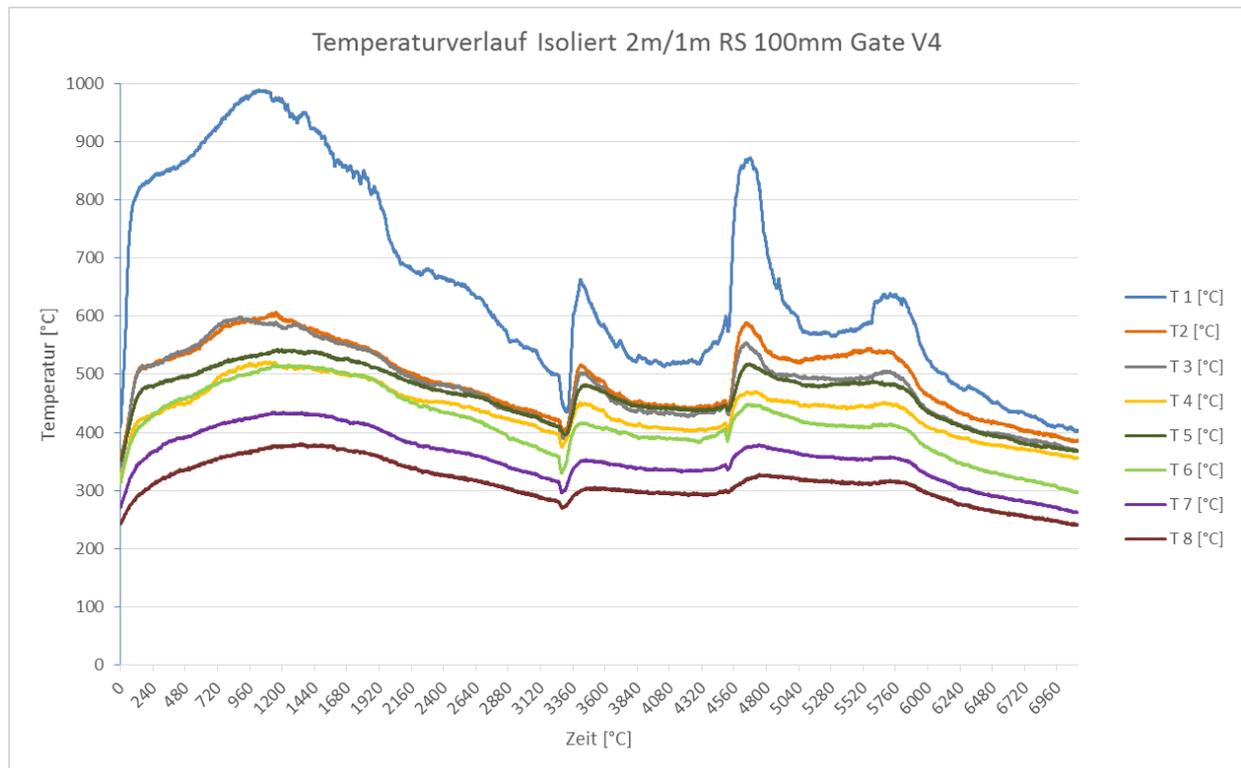


Abbildung 22: Temperaturverlauf Isoliert 2m/1m RS 100mm Gate V4

T 1 [°C]	T 2 [°C]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T 7 [°C]	T 8 [°C]
657,25	494,50	480,96	438,03	465,70	416,17	356,66	313,63

Tabelle 7: Temperaturmittelwerte Isoliert 2m/1m RS 100mm Gate V4

Bei Reduzierung der Größe des Gates auf einen Kreis mit 100 mm Durchmesser stiegen die Temperaturen im Ofen stark an. In der Brennkammer wurden Temperaturhöchstwerte von fast 1000 °C erreicht. Während die Temperaturmittelwerte im Ofen je nach Messstelle um rund 55 °C bis 95 °C im Vergleich zum offenen und halboffenen Gate anstiegen, stieg der Temperaturmittelwert am Ofenrohrausgang nur um rund 10 °C an. Der Brennstoffeinsatz war bei der Variante V4 mit 100 mm Gatedurchmesser um 18 bis 20 % geringer als bei den anderen beiden Varianten V3 und V4 (vgl. Tabelle 3). Die höheren Temperaturen bei geringerem Brennstoffeinsatz sind wahrscheinlich auf den geringeren Wärmeverlust des Gates zurückzuführen.

Eine weitere Variation des Rohrverlaufs war der Einbau von 90°-Winkeln. Die 90°-Winkel sollten den Rohrwiderrstand erhöhen und somit die Abgasgeschwindigkeit reduzieren. Durch die somit längere Verweildauer des Abgases im Ofen sollte mehr Wärme über die Ofenrohre in den Wohnraum abgegeben werden. Insgesamt wurden

drei Winkelstücke mit horizontaler Ausrichtung und ein Winkelstück mit vertikaler Ausrichtung direkt hintereinander verbaut (vgl. Abbildung 17). Den Winkelstücken ging das horizontale Ofenrohr voran, welches um 500 mm auf eine Gesamtlänge von 2.500 mm exklusive Winkel verlängert wurde. Aus Platz- und Materialgründen konnten keine Winkel vor oder zwischen dem horizontalen Rohrverlauf verbaut werden. Hinter den Winkelstücken folgte der vertikale Rohrverlauf, welcher ebenfalls um 500 mm auf eine Gesamtlänge von 1.500 mm verlängert wurde. Eine weitere Verlängerung des horizontalen Rohrverlaufs wurde nicht durchgeführt, da bereits bei 3.000 mm horizontaler Ofenrohrlänge Probleme mit der Luftversorgung der Brennkammer auftraten. Das vertikale Ofenrohr konnte aus rein praktischen Gründen nicht verlängert werden, da die Kabel der Messinstrumente nicht lang genug waren und durch zwischengeschaltete Kabel zu große Spannungsschwankungen zwischen Thermoelement und Analog-Digitalwandler auftraten. Diese Variation des Rohrverlaufs wurde mit offenem Gate (V5, Abbildung 23, Tabelle 8) und einem 100 mm Gatedurchmesser (V6, Abbildung 24, Tabelle 9) getestet.

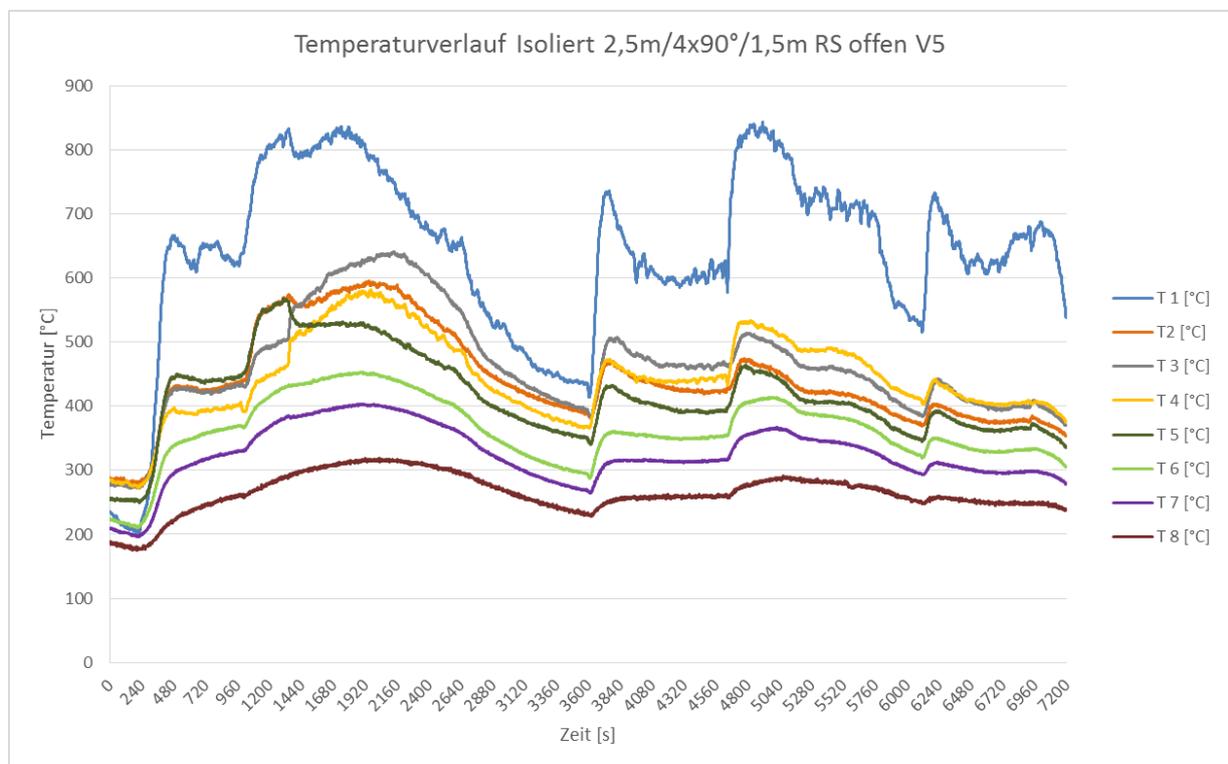


Abbildung 23: Temperaturverlauf Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS offen V5

T 1 [°C]	T 2 [°C]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T 7 [°C]	T 8 [°C]
640,33	442,52	464,13	445,02	416,03	362,20	324,89	264,38

Tabelle 8: Temperaturmittelwerte Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS offen V5

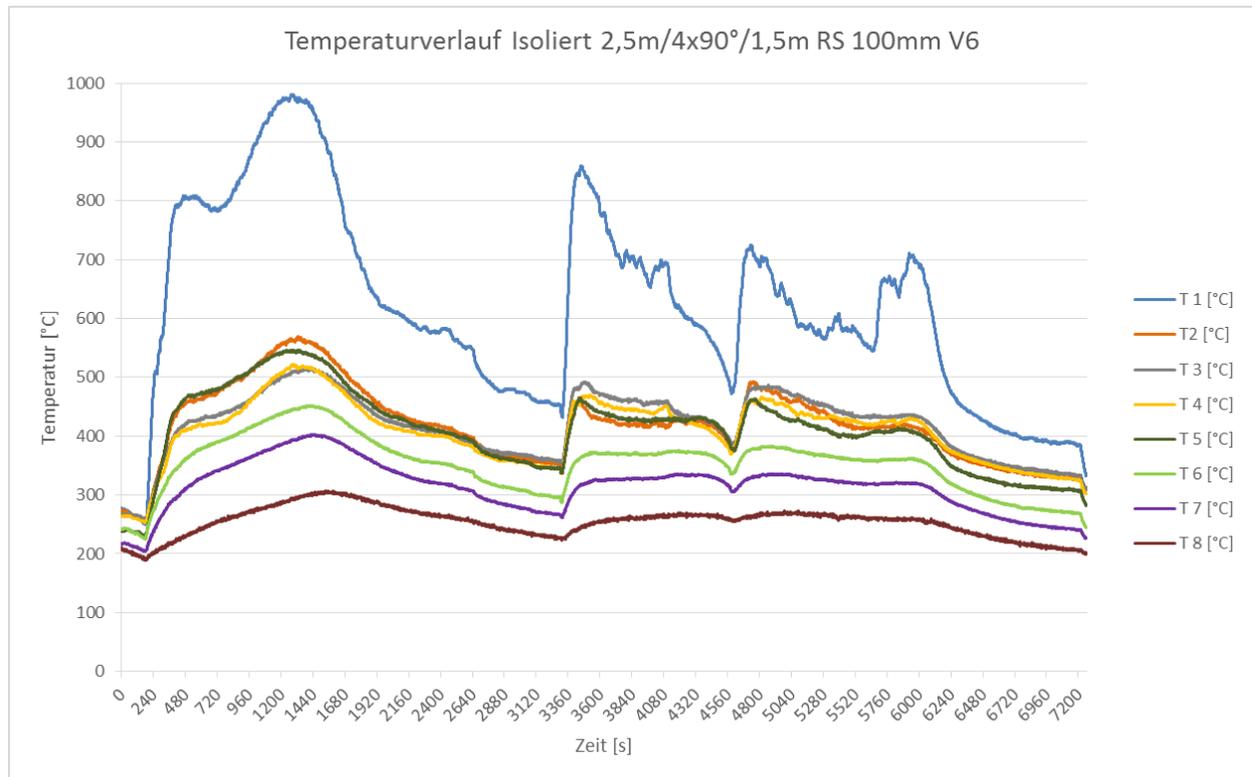


Abbildung 24: Temperaturverlauf Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS 100mm V6

T 1 [°C]	T 2 [°C]	T 3 [°C]	T 4 [°C]	T 5 [°C]	T 6 [°C]	T 7 [°C]	T 8 [°C]
618,08	419,24	418,32	408,17	409,34	352,21	314,14	253,70

Tabelle 9: Temperaturmittelwerte Isoliert 2,5m/4x90°/1,5m RS 100mm V6

Es ist zu erkennen, dass bei dieser Rohrausführung die Austrittstemperatur am Ofenrohrende erneut gesenkt werden konnte. Betrachtet man die Temperaturwerte T7 und T8 aller Messungen, so kann man jedoch davon ausgehen, dass die Temperaturdifferenz und somit die Wärmeabgabe hauptsächlich dem verlängerten Ofenrohrstück und nicht den 90 °-Winkeln (diese befinden sich direkt hinter Messpunkt T7) geschuldet ist. In Tabelle 7 (Temperaturmittelwerte V4) beträgt der Unterschied der Temperaturmittelwerte zwischen T7 und T8 rund 40 °C, in Tabelle 9 (Temperaturmittelwerte V6) rund 60 °C. In beiden Fällen beträgt der Temperaturabfall pro Meter Rohrlänge 40 °C/m.

Daraus kann man schließen, dass 90 °-Winkel in diesem Fall keinen, oder nur einen sehr geringen Einfluss auf das Abgasverhalten hatten.

Die letzten getesteten Ofenrohrvarianten V7 und V8 orientierten sich stark an den Gegebenheiten vor Ort. Das Ofenrohr wurde hier 1.500 mm horizontal und anschließend 1.500 mm vertikal verlegt. Am Ende des Ofenrohres wurde ein 90 °-Winkel befestigt (vgl. Abbildung 18). Der Temperaturfühler T8 wurde hierbei am Ende des 90 °-Winkels angebracht und nicht wie bei den anderen Varianten durch eine Bohrung im Rohr zirka 40 mm vor Rohrende. Abbildung 25 und 26 sowie die Tabellen 10 und 11 zeigen die Temperaturverläufe und -mittelwerte der Varianten V7 und V8. Auffällig ist hierbei der unruhige Verlauf von T8. Dieser ist auf die oben beschriebene Anbringung des Temperaturfühlers in Kombination mit den außen herrschenden Windverhältnissen zurückzuführen. Der Wind bewirkte zum einen eine Abkühlung des Temperaturfühlers und zum anderen eine schnelle Verdrängung des Abgases vom Ofenrohrende.

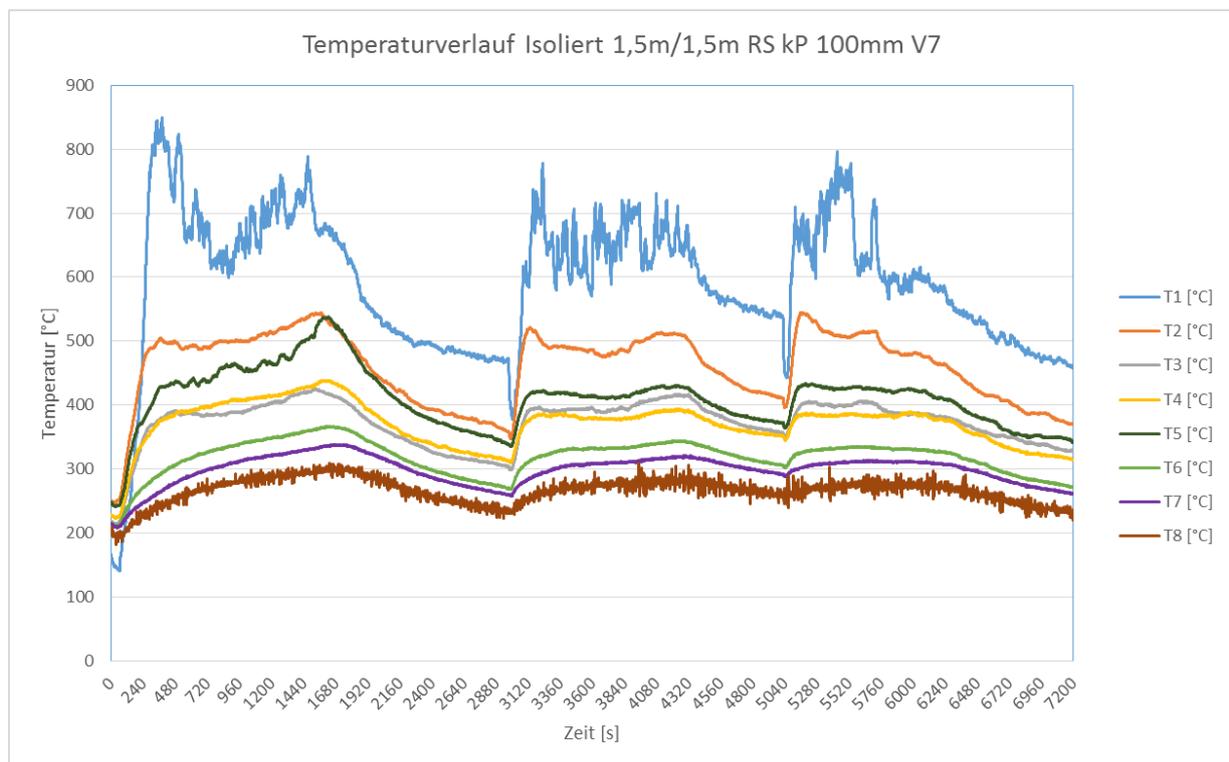


Abbildung 25: Temperaturverlauf Isoliert 1,5m/1,5m RS kP 100mm V7

T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]
590,03	459,45	372,74	370,11	409,80	318,09	298,14	265,21

Tabelle 10: Temperaturmittelwerte Isoliert 1,5m/1,5m RS kP 100mm V7

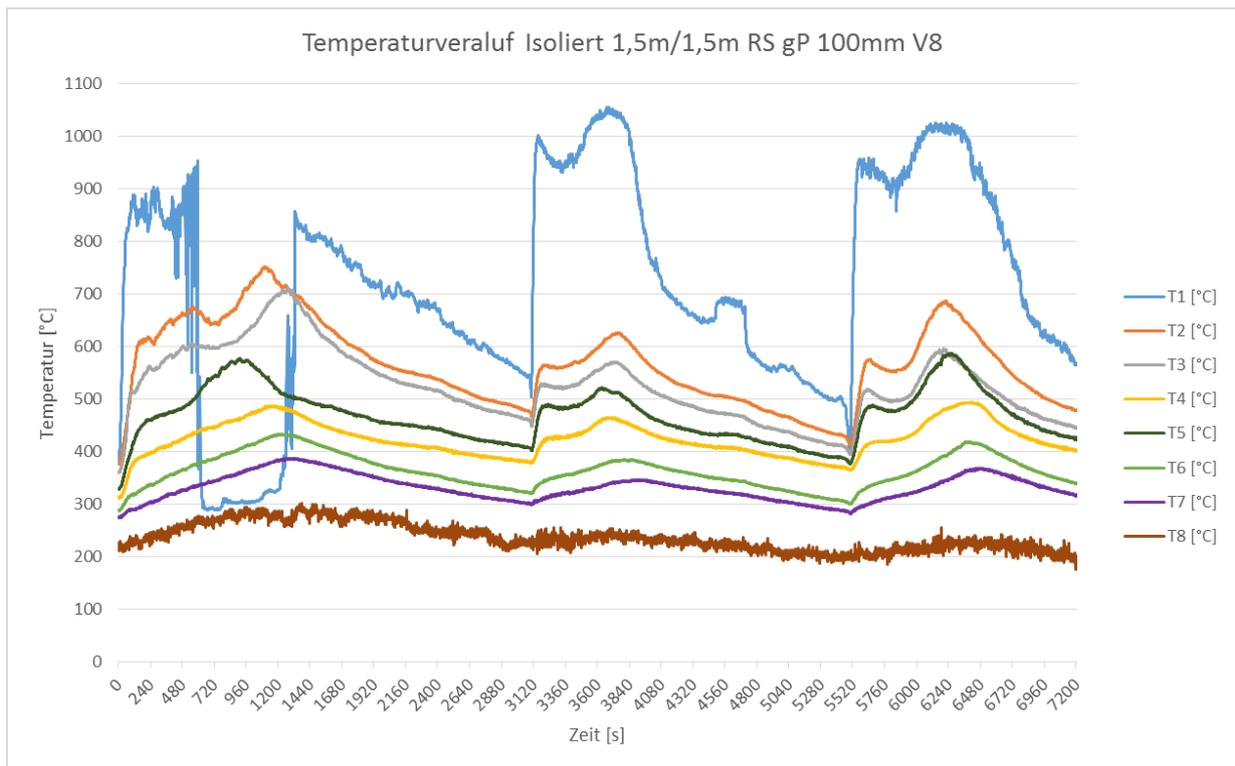


Abbildung 26: Temperaturverlauf Isoliert 1,5m/1,5m RS gP 100mm V8

T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]
718,42	566,48	525,25	424,03	468,21	363,20	331,44	236,81

Tabelle 11: Temperaturmittelwerte Isoliert 1,5m/1,5m RS gP 100mm V8

Auch bei diesen Varianten konnten die Temperaturen an den Ofenrohrenden stark gesenkt werden (vgl. Tabelle 10 und 11). Die Werte des Temperaturfühlers T8 konnten jedoch nicht ohne weiteres aus dem oben genannten Grund mit den T8-Werten der anderen Varianten verglichen werden. Somit kann diese Variante nicht abschließend als optimale Variante deklariert werden.

4.1.3 Ergebnisse der Optimierung der Oberflächentemperaturverteilung der Injeraplatte

Die Optimierung der Oberflächentemperaturverteilung der Injeraplatte ist essenziell für die Akzeptanz des Rocket Stove, da der Injerteig gleichmäßig auf der Platte gebacken werden soll. Die zweistündigen Versuche (2h-Test) wurden nach Erreichen einer Oberflächentemperatur in Plattenmitte von 250 °C (Betriebstemperatur) gestartet. Hierbei wurde versucht die Temperatur auf der Plattenmitte konstant bei annähernd 250 °C zu halten. Für diese Tests wurden die Varianten V3 bis V8 genauer betrachtet. Die Temperaturmittelwerte der Messpunkte T9 bis T13 (vgl. Abbildung 6 rechts) der einzelnen Varianten sind in Abbildung 27 und in Tabelle 12 dargestellt.

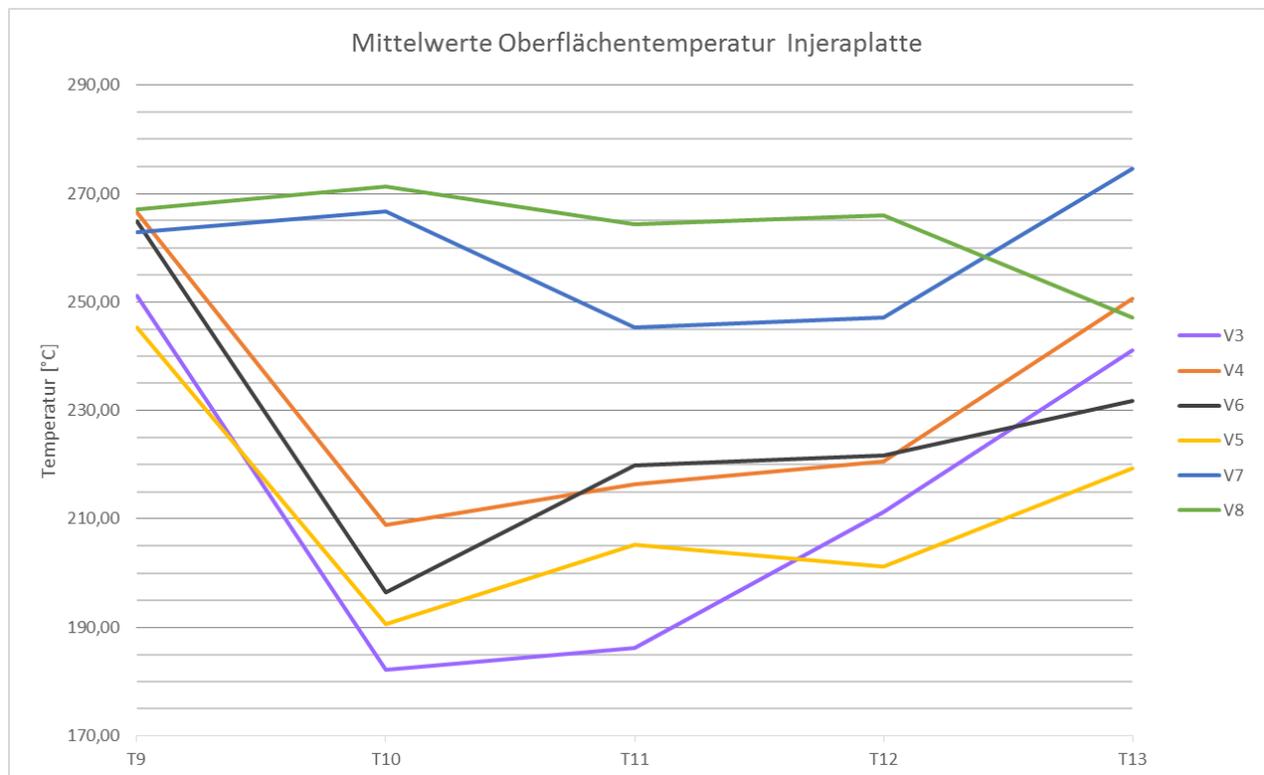


Abbildung 27: Mittelwerte Oberflächentemperatur Injeraplatte

Ofenvariante	T9 [°C]	T10 [°C]	T11 [°C]	T12 [°C]	T13 [°C]
V3	251,2	182,1	186,3	211,3	241,1
V4	266,5	208,9	216,4	220,7	250,6
V5	245,4	190,6	205,2	201,1	219,4
V6	265,0	196,4	219,9	221,6	231,8
V7	262,9	266,8	245,3	247,1	274,6
V8	267,0	271,3	264,3	266,0	247,2

Tabelle 12: Mittelwerte Oberflächentemperatur Injeraplatte

Anhand Abbildung 27 sind die starken Temperaturabweichungen der Messpunkte T10 bis T13 der Varianten V3 bis V6 vom Plattenmittelpunkt T9 zu erkennen. Die Temperaturabweichungen der Varianten V7 und V8 sind eher gering. Die genauen Temperaturmittelwerte lassen sich Tabelle 12 entnehmen. In Tabelle 13 sind die Temperaturabweichungen der äußeren Temperaturmesspunkte zur Temperatur in der Plattenmitte angegeben. Hier lassen sich die Unterschiede der einzelnen Varianten noch besser erkennen.

Ofenvariante	T9 [°C]	Δ T10 [°C]	Δ T11 [°C]	Δ T12 [°C]	Δ T13 [°C]	Δ Mittel [°C]
V3	251,2	69,0	64,9	39,9	10,0	46,0
V4	266,5	57,6	50,1	45,8	15,9	42,4
V5	245,4	54,8	40,2	44,3	26,0	41,3
V6	265,0	68,6	45,0	43,3	33,2	47,5
V7	262,9	-3,9	17,6	15,8	-11,7	4,5
V8	267,0	-4,3	2,7	1,0	19,8	4,8

Tabelle 13: Temperaturabweichungen bezogen auf Plattenmittentemperatur T9

Entsprechend Tabelle 13 wiesen die Varianten V7 und V8 die konstanteste Oberflächentemperaturverteilung auf. Obwohl der Mittelwert der Abweichungen von Variante V7 niedriger war, war Variante V8 die bessere Variante, da der bessere Wert von V7 nur aus der breiteren positiven und negativen Temperaturstreuung um T9 resultierte. Zudem stiegen die Temperaturen zwischen dem Punkt T9 und den restlichen Punkten bei Variante V7 enorm an. Dieser enorme Anstieg hatte seine Ursache in der Konstruktion der Modifikation. Dadurch dass die Platte, welche auf die Brennkammer gelegt wurde, im Durchmesser um wenige Millimeter kleiner ist als die Öffnung der Brennkammer entstand hier ein Spalt. Durch diesen Spalt wurde das Abgas auf eine ringförmige Fläche auf der Innenseite der Injerplatte geleitet, wodurch diese Stelle stärker erwärmt wurde als der Rest der Platte. Diese Ringfläche befand sich genau zwischen T9 und den restlichen Messpunkten. Bei Variante V8 war dies nicht der Fall, hier wurde das Abgas zuerst zu den Seitenwänden geleitet. In der Aufheizphase des Ofens werden somit bei Variante V8 zuerst die Außenbereiche der Injerplatte erwärmt. Von hier aus breitet sich die Temperatur dann zur Plattenmitte aus.

Variante V8 ist eindeutig die optimalste der getesteten Varianten bezogen auf die Temperaturverteilung. Man muss jedoch dazu sagen, dass in dem Bereich der Injerplatte,

auf dem die Platte auf den Ziegeln des Rocket Stove auflag, ein starker Temperaturabfall zu vernehmen war. Dies war bei allen Varianten der Fall, wobei der Temperaturabfall bei Variante V7 und V8 am wenigsten ausgeprägt war.

4.2 Ergebnisse des Water Boiling Tests am Chigr Fечи

Entsprechend des in Kapitel 3.2.4 erläuterten Versuchsaufbaus wurde am Chigr Fечи ein Versuch durchgeführt, welcher aus drei verschiedenen Messreihen bestand. Auf Modifikationen am Chigr Fечи und die Durchführung weiterer Versuche wurde verzichtet, da der sich im Einsatz befindende Typ des Chigr Fечи bereits in seiner Modifikation fortgeschrittener war als der Grundtyp der für die Messungen errichtet wurde. Die einmalige Durchführung des Water Boiling Tests sollte dennoch stattfinden um einen Vergleich mit anderen Öfen und Modifikationen des Chigr Fечи anstellen zu können.

Die Durchführung des Water Boiling Tests fand ohne größere Probleme statt. Äußere Einflüsse durch Wind konnten zu einem großen Teil minimiert werden. Die Brennkammer der Injerplatte wurde nicht genutzt und somit wurde das Gate nachträglich mit Steinwolle verschlossen. Bei offenem Gate der Brennkammer der Injerplatte entstand ein zu starker Sog in beiden Brennkammern, sodass die Flamme aus der Brennkammer von Kochstelle 1 fast vollständig unter Kochstelle 2 gesogen wurde und das Wasser von Kochstelle 2 früher zu sieden begann.

Die Messergebnisse wurden in eine vorgefertigte Excel-Tabelle übertragen, welche alle notwendigen Größen automatisch berechnete. Die Ergebnisse der einzelnen Messreihen sowie das Gesamtergebnis sind in Tabelle 14 dargestellt.

	Chigr Fechi 1,5l Edelstahl				
	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Gesamt	
1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
Kochdauer Topf 1	[min]	15	14	17	15
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	13	13	15	14
Feuerrate	[g/min]	30	33	40	34
thermischer Wirkungsgrad	%	11,4	13,0	11,6	12,0
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/Liter]	245	221	266	244
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/Liter]	214	211	234	220
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	9.292	10.237	12.210	10.580
2. HIGH POWER TEST (HOT START)					
Kochdauer Topf 1	[min]	14	14	12	13
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	12	13	10	12
Feuerrate	[g/min]	30	39	30	33
thermischer Wirkungsgrad	%	13,7	13,2	16,0	14,3
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/Liter]	200	224	181	202
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/Liter]	170	208	148	175
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	9.218	11.925	9.224	10.122
3. LOW POWER (SIMMER)					
Feuerrate	[g/min]	20	16	27	21
thermischer Wirkungsgrad	%	10,4	13,0	10,6	11,3
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/Liter]	1.291	1.227	3.154	1.891
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	6.079	5.067	8.246	6.464
Turn Down Verhältnis	--	1,53	2,02	1,48	1,68

Tabelle 14: Ergebnisse WBT Chigr Fechi

Die Kochdauer war beim Cold Start High Power Test sowie beim Hot Start High Power Test annähernd gleich. Hier lag lediglich eine Zeitdifferenz von zwei Minuten vor. Auch die Feuerrate unterschied sich lediglich um ein Gramm Brennstoff pro Minute. Der spezifische Brennstoffverbrauch beim Hot Start war jedoch um rund 17 % geringer als der des Cold Start, der spezifische zeitkorrigierte Brennstoffverbrauch sogar um 20 %. Hier lässt sich deutlich erkennen, dass zuerst ein Teil der Wärme vom Lehm aufgenommen wurde. Dies ist ebenfalls dem thermischen Wirkungsgrad zu entnehmen, der beim Hot Start mit 14,3 % um 2,3 Prozentpunkte höher war als der des Cold Starts. Die Leistung des Chigr Fechi in der vorliegenden Ausführung lag bei den High Power Tests zwischen 10,1 kW und 10,6 kW. Beim Low Power Test lag die Leistung lediglich nur bei rund 6,5 kW. Das Turn Down Verhältnis lag entsprechend bei 1,68.

Über die Ergebnisse des WBT hinaus lässt sich zum Chigr Fechi sagen, dass das Gate zum Brennraum der Kochstelle 1 sehr klein gestaltet war. Das ordentliche Stapeln von Feuerholz war nur über die für den Kochtopf vorgesehene Öffnung möglich. Zudem

könnte man den Brennraum kleiner gestalten, sodass die Wärme konzentrierter unten den Kochtopf geleitet werden kann.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Versuchsreihen um den Rocket Stove lieferten aussagekräftige Ergebnisse bezüglich des in der Zukunft möglichen Aufbaus stationärer, in Entwicklungsländern zum Einsatz kommender Rocket Stoves. Die Ergebnisse zeigen, dass vor allem die Gestaltung des Gates einen Einfluss auf den Brennstoffverbrauch hat. Um diesen beim Backen möglichst gering zu halten sollte ein kreisrundes Gate mit möglichst kleinem Durchmesser gewählt werden. Zum Heizen kann das Gate entfernt werden, da ein großes Gate eine hohe Wärmeabstrahlung in den Wohnraum ermöglicht.

Auch eine möglichst lange Ofenrohrstrecke durch den Wohnraum kann einen Wärmegewinn im Wohnraum und gleichzeitig Brennstoffeinsparungen mit sich bringen. Auf den Einbau einer großen Anzahl von 90°-Winkeln kann und sollte verzichtet werden. An diesen Stellen kann es vermehrt zu Rußablagerungen kommen, die die Leistung des Ofens nachhaltig vermindern können. Hier müssten diverse Reinigungsvorrichtungen in das Ofenrohr integriert werden, welche die Kosten und die Sicherheit des Ofens negativ beeinträchtigen können.

Eine annähernd optimale Temperaturverteilung auf der Oberfläche der Injerplatte konnte durch bauliche Maßnahmen erreicht werden. Dieses durchaus positive Ergebnis geht jedoch mit einem erhöhten Brennstoffverbrauch einher. Hier besteht ein weiterer Optimierungsbedarf hinsichtlich Temperaturverteilung und Brennstoffverbrauch. Eine Änderung der Brennkammer bezogen auf die Ausgangsvariante ist hierbei unerlässlich.

Da die am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen vorhandenen Messinstrumente hinsichtlich der Abgasmesstechnik fast ausschließlich nur bei Motorentechnik richtig eingesetzt werden kann, sollte hier bei zukünftigen Versuchen auf einfachere Messtechnik zurückgegriffen werden, nämlich auf solche wie sie Schornsteinfeger benutzen. Dies könnte bei einer Leistungsbestimmung behilflich sein. Bei weiteren Versuchsreihen bezüglich einer optimalen Temperaturverteilung sollte eine Wärmebildkamera genutzt werden, da feste Messpunkte auf der Plattenoberfläche alleine nur einen Abfall zum Rand der Injerplatte aufzeigen können. Eine Momentaufnahme einer Wärmebildkamera hingegen zeigt auch deutliche Temperaturkonzentrationen, wie sie bei Variante V7 nur durch Zufall entdeckt wurden.

Die Messungen am Chigr Fечи lieferten aussagekräftige Ergebnisse, die für zukünftige Vergleiche mit Modifikationen des Chigr Fечи sowie anderen Ofentypen herangezogen werden können. Da bereits weiterentwickelte Modelle des Chigr Fечи im Umlauf sind, sollten die WBT-Ergebnisse dieser Modelle mit dem Grundmodell verglichen werden und der Einfluss der einzelnen Modifikationen geprüft werden. Diese könnten auch Einflüsse auf weitere Öfen haben.

Quellen – und Literaturverzeichnis

1. **Die Ofenmacher e.V.** www.ofenmacher.org. [Online] 01 2013. [Zitat vom: 20. 10 2015.] http://ofenmacher.org/files/3114/0430/9484/Chulo-Projekt_130117.pdf.
2. **Die Ofenmacher e.V.** www.ofenmacher.org. [Online] 2014. [Zitat vom: 20. 10 2015.] <http://ofenmacher.org>.
3. **Forster, Jérôme.** *Wirkungsgraduntersuchungen von Ofenanlagen.* Kaiserslautern : s.n., 2015.
4. **Geller, Wolfgang.** *Thermodynamik für Maschinenbauer.* 5. Lohmar : Springer Vieweg, 2015.
5. **Grote, Karl-Heinrich und Feldhusen, Jörg.** *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau.* 22. Auflage. Magdeburg und Aachen : Springer, 2007.
6. **Baehr, Hans Dieter und Kabelac, Stephan.** *Thermodynamik - Grundlagen und technische Anwendungen.* 14. Auflage. Hamburg : Springer, 2009.
7. **Schiedel GmbH & Co.** *Grundlagen der Schornsteintechnik.* München : Schiedel GmbH & Co., o.J.
8. **Ruopp, Christoph.** Christoph Ruopp in Äthiopien. *Der Chulo-Bote.* München : Die ofenmacher, 2015. 10, Oktober 2015.
9. **Dengler, Frank.** Sonderaktion - mobile Rocket Stoves. *Der Chulo-Bote.* München : Die Ofenmacher, 2015. 9.
10. **Dengler, Frank und Melcher, Theo.** *Informationsgewinnung beim Ofenbau.* 21. Juli 2015.
11. **Informationsstelle Edelstahl Rostfrei.** www.edelstahl-rostfrei.de. [Online] 2014. [Zitat vom: 11. 12 2015.] http://www.edelstahl-rostfrei.de/downloads/iser/mb_821.pdf.
12. **Voltcraft (R)** . Infrarot-Thermometer IR 900-30s Bedienungsanleitung. Hirschau : Voltcraft (R), 2011.
13. **Greisinger.** Produktinformation Pt100/Pt1000. [Online] o.J. [Zitat vom: 07. 11 2015.] https://www.greisinger.de/files/upload/de/produkte/kat/k14_126_DE_oP.pdf.

14. **Brennstuhl (R).** Feuchtigkeits-Detector Moisture detector MD
Bedienungsanleitung. Tübingen : Hugo Brennstuhl GmbH & Co. KG, 2014.
15. **Mettler.** PE 3000 PE 6000 PE 6 Bedienungsanleitung. o.O. : Mettler Instrumente AG, o.J.
16. **Hartmann, Hans und Schön, Claudia.** *Charakterisierung von Holzbriketts - Brennstofftechnische, physikalische und stoffliche Eigenschaften - eine Marktstichprobe.* Straubing : Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe, 2011.
17. **o.A.** cleancookstoves.org. [Online] 19. 03 2014. [Zitat vom: 08. 11 2015.]
<https://cleancookstoves.org/binary-data/DOCUMENT/file/000/000/399-1.pdf>.
18. **Bailis, Rob, et al.** *The Water Boiling Test (WBT).* o.O. : Household Energy and Health Programme, Shell Foundation, 2007.
19. **Ruopp, Christoph.** *Telefonat vom 29.09.2015.* 29. 09 2015.