



Technische Universität Kaiserslautern Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Prof. Dr.-Ing. Flierl

# Diplomarbeit

# "Wirkungsgraduntersuchungen von Ofenanlagen"

erstellt von

### Jérôme Forster

Matr.-Nr. 368878

Betreuer

# Dipl.-Ing. Alexander Holzer

Kaiserslautern im April 2015



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Jérôme Marcel Forster, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt, keine anderen als erlaubte Hilfsmittel benutzt und alle wörtlichen und sinngemäßen Entlehnungen als solche gekennzeichnet habe.

Kaiserslautern, den 02.04.2015

Unterschrift



# Inhaltsverzeichnis

I		Ab	bildu	IngsverzeichnisI	V
II		Tal	belle	nverzeichnisV	11
		Fo	rmelv	verzeichnisVI	
1		Ein	leitu	na	1
2		Δ	faab	enstellung	2
2		Au 	iyab		5
3		The	eoret	fische Grundlagen	4
	3.	.1	Verk	prennungstechnische Grundlagen	4
		3.1	1.1	Brennstoffzusammmensetzung	6
		3.1	.2	Optimale Verbrennung	8
		3.1	.3	Abgase und Schadstoffemissionen	9
	3.	2	Wär	meübertragung1	1
		3.2	2.1	Wärmeleitung 1	2
		3.2	2.2	Wärmeübertragung durch Konvektion1	4
		3.2	2.3	Wärmedurchgang 1	5
		3.2	2.4	Wärmestrahlung1	6
	3.	.3	Zust	tandsgrößen und Wärmestrom eines Systems 1	7
		3.3	3.1	Wärmekapazität1	8
		3.3	3.2	Wärmestrom eines Verbrennungsvorganges1	9
	3.	.4	Luft	strömung und Schornsteineffekt 2	21
		3.4	1.1	Luftmassenstrom	:3
4		Bre	ennv	erhalten bei Kleinfeuerungsanlagen 2	25
	4.	.1	Nutz	zer- und Brennstoffeinflüsse	28
_					
5		we	sste	CNNIK	1
	5.	.1	Wirk	kungsgradmessung	1
	5.	2	Tem	nperaturmessung	6
	5.	.3	Abg	asmessung4	.0



	5.4	Sch	wärzungszahl	45
6	Ve	rsuc	hsaufbau	46
(	6.1	Aufl	bau der Öfen	46
	6.1	1.1	Aufbau Nepal-Ofen	47
	6.1	1.2	Aufbau Äthiopien-Ofen	50
	6.2	Ver	suchsaufbau WBT	54
(	6.3	Ver	suchsaufbau Temperatur- und Abgasmessung	55
	6.3	3.1	Aufbau Temperatursensoren	56
	6.3	3.2	Aufbau Abgasmessung	58
	6.3	3.3	Aufbau Messung Schwärzungszahl	60
	6.4	Aufl	bau Vergleichstest	61
7	Ve	rsuc	hsvorbereitung und –durchführung	63
	7.1	Wirl	kungsgradmessung	63
	7.1	1.1	Variationen des WBT	65
	7.2	Ten	nperatur- und Abgasmessung	68
	7.2	2.1	Kalibrierung der AMA	69
	7.2	2.2	Versuchsdurchführung	70
	7.3	Ver	gleichsversuche	75
	7.3	3.1	Nepal-Ofen	76
	7.3	3.2	Injera-Platte	77
8	Au	swei	rtung	79
ł	8.1	Ver	suchsergebnisse WBT	79
ł	8.2	Ver	suchsergebnisse Temperatur- und Abgasmessung	86
ł	8.3	Ver	suchsergebnisse Vergleichtests	96
	8.3	3.1	Nepal-Ofen	96
	8.3	3.2	Injera-Platte	98
9	Faz	zit		02
IV	Lite	eratu	ırverzeichnis	XI



# I Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Brennendes Holz	2
Abbildung 3-1: Verbrennungsdreieck	5
Abbildung 3-2: Flammenbild [1]	6
Abbildung 3-3: Verschiedene NOX-Emissionen [4]	. 11
Abbildung 3-4: Wärmeleitung Wand [2]	. 13
Abbildung 3-5: Innen- und Außenradius [6]	. 13
Abbildung 3-6: Wärmedurchgang [2]	. 15
Abbildung 3-7: adiabater Brennraum [1]	. 19
Abbildung 3-8 Größe des Unterdrucks von Feuerraum bis Schornsteinaustritt [8]	. 22
Abbildung 3-9: Abgasdichte in Abhängigkeit der Abgastemperatur	. 23
Abbildung 4-1: Emissionsvergleich unterschiedlicher Messdauer [9]	. 25
Abbildung 4-2: Temperaturverlauf über Abbranddauer [9]	. 26
Abbildung 4-3: CO- und HC-Emissionen über Abbranddauer [9]	. 27
Abbildung 5-1: Zusammenhang Wassergehalt und Feuchtigkeitsgehalt	. 33
Abbildung 5-2: Wheatstonesche Brücke [6]	. 38
Abbildung 5-3: Wirkprinzip der Thermoelemente [2]	. 39
Abbildung 5-4: Hauptfilterelement der AMA [13]	. 40
Abbildung 5-5: Die AMA mit einigen Modulen [14]	. 41
Abbildung 5-6: Fließplan der AMA [14]	. 43
Abbildung 5-7: Probeentnahmeplan des Schwärzungszahlmessgerätes	. 45
Abbildung 6-1: Stellplatz und Unterbau der Öfen	. 47
Abbildung 6-2: Abmaße der Bauteile des Nepal-Ofens	. 48
Abbildung 6-3: Prinzipieller Aufbau Nepal-Ofen	. 48
Abbildung 6-4: fertiger Nepal-Ofen	. 49
Abbildung 6-5: Verlängerter und isolierter Schornstein	. 50
Abbildung 6-6: Äthiopien-Ofen im Bau	. 51
Abbildung 6-7: Fertiger Äthiopien-Ofen ohne Injera-Platte	. 52
Abbildung 6-8: Äthiopien-Ofen mit Injera-Platte	. 53
Abbildung 6-9: Luftführungselemente unter der zweiten Kochstelle	. 53
Abbildung 6-10: PT100-Sensor mit Anzeigegerät	. 54



Abbildung 6-11: Feuchtigkeitsmessgerät	. 55
Abbildung 6-12: Mobiler Messturm	. 56
Abbildung 6-13: Thermoelement	. 57
Abbildung 6-14: Messpunkt im Brennraum unter Kochstell eins im Nepal-Ofen	. 57
Abbildung 6-15: Temperaturmessstellen Äthiopien-Ofen	. 58
Abbildung 6-16: Anschluss Heizschlauch mit Filter an der Entnahmestelle	. 59
Abbildung 6-17: Offener Filter mit innenliegendem Filterpapier	. 60
Abbildung 6-18: Schwärzungszahlmessgerät	. 61
Abbildung 6-19: Prinzip der Vergleichstests	. 62
Abbildung 7-1: links: Pt100-Sensoren WBT; rechts: Flamme beim WBT	. 64
Abbildung 7- 2: Kleine Holzscheite für WBT	. 65
Abbildung 7-3: Töpfe v.I.: Edelstahltopf, Eisentopf, Tontopf	. 66
Abbildung 7-4: links: WBT ohne Luftführungselemente; rechts: WBT ohne Boden	. 67
Abbildung 7-5: WBT mit versenktem Topf mit Windschutz	. 68
Abbildung 7-6: Flammenloser Abbrand; links: Holzbrikett; rechts: Holz	. 70
Abbildung 7-7: links: Holzbriketts (400 g Stücke); rechts: 150 g Holz	. 71
Abbildung 7-8: Normale Luftzuführung mit Holz und Holzbrikett	. 72
Abbildung 7-9: Horizontale Luftzuführung mit Holzbrikett und Holz	. 73
Abbildung 7-10: Vertikale Luftzuführung mit Holz und Holzbrikett	. 73
Abbildung 7-11: Luftzuführung durch ein Kreis	. 73
Abbildung 7-12: links: Ohne Luftführungselemente; rechts: ohne Boden	. 74
Abbildung 7-13: links: Umbau Kochstelle 3; rechts: Nepal-Brennraum	. 74
Abbildung 7-14: Verschiedene Messungen der Schwärzungszahlmessung	. 75
Abbildung 7-15: Vergleichstest, links: Nepal-Ofen; rechts: offenes Feuer	. 77
Abbildung 7-16: Strahlungsmessgerät	. 78
Abbildung 7-17: Vergleichstest, links: Injera; rechts: offenes Feuer	. 78
Abbildung 8-1: Temperaturverlauf Ausgangsform Äthiopien-Ofen (ÄT)	. 87
Abbildung 8-2: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung horizontal (ÄT)	. 87
Abbildung 8-3: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung vertikal (ÄT)	. 88
Abbildung 8-4: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung Kreis 100 mm (ÄT)	) 89
Abbildung 8-5: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung Kreis 50 mm (ÄT).	. 89
Abbildung 8-6: Temperaturverlauf Nepal-Ofen (NP)	. 90



Abbildung 8-7: Temperaturverlauf ohne Boden im Feuerraum (ÄT)	90
Abbildung 8-8: Temperaturverlauf ohne Luftführungselemente (ÄT)	91
Abbildung 8-9: Temperaturverlauf nach Umbau KS 3 (ÄT)	91
Abbildung 8-10: Verlauf der Emissionen am Nepal-Ofen	92
Abbildung 8-11: Zusammenhang einiger Emissionen am Nepal-Ofen	93
Abbildung 8-12: Temperaturverläufe unter den Töpfen bzw. im Feuerraum	97
Abbildung 8-13: Temperaturvergleich jeweils unter der Injera-Platte	99
Abbildung 8-14: Oberflächentemperatur Injera-Ofen 1	100
Abbildung 8-15: Oberflächentemperatur Injera-Platte offenes Feuer 1	101



# II Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Zusammensetzung in Massen-%	. 6
Tabelle 5-1: Ausgangsgrößen	32
Tabelle 5-2: Verschiedene Thermoelemente und Anwendungstemperaturen [6] 3	39
Tabelle 7-1: Vorgaben des WBTs6	64
Tabelle 7-2: Messbereiche und Kalibriergase AMA6	69
Tabelle 8-1: Messergebnisse WBT unterschiedliche Wassermenge und Töpfe 8	80
Tabelle 8-2: Ergebnis WBT Nepal/Äthiopien-Ofen (2,5 l) bezogen auf ersten Topf 8	83
Tabelle 8-3: Ergebnisse WBT konstruktiven Veränderungen am Äthiopien-Ofen 8	84
Tabelle 8-4: Ergebnisse der Abgasmessungen mit Holzbriketts	94
Tabelle 8-5: Ergebnisse der Abgasmessungen mit Holz	95
Tabelle 8-6: Vergleich der verbrauchten Brennstoffmassen	97
Tabelle 8-7: Ergebnis Injera-Vergleich	98
Tabelle 8-8: Mittelwerte Injera-Platte Oberflächentemperaturen	01



# **III Formelverzeichnis**

a	[%]	Massenanteil Asche
А	[m <sup>2</sup> ]	(Wand-, Querschnitts-) Fläche
b	[%]	Reflexion
В	[g]	Gewicht Kohleschüssel
С	[%]	Massenanteil Kohlenstoff
c <sub>V</sub>	[J/kgK]	spezif. Wärmekapazität bei konstantem Volumen
CP	[J/kgK]	spezif. Wärmekapazität bei konstantem Druck
ī	[J/kgK]	mittlere spezifische Wärmekapazität
d	[m]	Höhe
f	[%]	Wassergehalt
FP	[W]	Feuerkraft
h	[%] / [J/kg]	Massenanteil Wasserstoff / spezifische Enthalpie
Δh	[kJ/kg]	Verdampfungsenthalpie Wasser
Н	[MJ/kg]	Heizwert
k	[W/m <sup>2</sup> K]	Wärmedurchgangskoeffizient
Δk	[g]	Menge verbrannter Kohlenstücke
К	[g]	Gewicht Kohleschüssel mit verbrannten Kohlestücke
1	[kg/kg]/[m]	tatsächliche Luftzufuhr / charakteristische Länge
l <sub>min</sub>	[kmol/kg]	spezifisch erforderlicher Luftbedarf
L <sub>min</sub>	[kg/kg]	erforderliche Luftmenge
m	[g]	Masse
m <sub>H</sub>	[g	äquivalente trockene Menge Brennstoff
ṁ	[kg/s]	Massenstrom
n	[%]	Massenanteil Stickstoff
Nu	[]	Nusselt-Zahl
0	[%]	Massenanteil Sauerstoff
o <sub>min</sub>	[kmol/kg]	spezifisch erforderlicher Sauerstoffbedarf
O <sub>min</sub>	[kg/kg]	erforderlicher Sauerstoffbedarf
р	[Pa]	Druck
Р	[g]	Gewicht leere Töpfe
q	$[J/m^2]$	spezifische Wärme
Q	[J]	Wärmemenge, Wärmeenergie
Ż	[W]	Wärmestrom
r	[m]	Radius



r <sub>b</sub>	[g/min]	Feuerrate
S	[%] / [%]	Massenanteil Schwefel / Absorbtion
SC	[g/l]	spezifischer Brennstoffverbrauch
SC <sup>T</sup>	[g/l]	zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch
t	[s]	Zeit, Kochzeit
Δt	[s]	Zeitintervall
$\Delta t^{\mathrm{T}}$	[s]	zeitkorrigierte Kochzeit
Т	[K]	Temperatur
ΔΤ	[K]	Temperaturänderung
TDR	[]	Turn-Down-Verhältnis
u	[J/kg] / [%]	spez. innere Energie / Feuchtigkeitsgehalt
V	[m <sup>3</sup> /kg]	spezifische Volumen
W	[%]	Massenanteil Wasser
W <sub>v</sub>	[g]	verdampftes Wasser
w <sub>r</sub>	[g]	anteilig kochendes Wasser
Х	[Ω]	Widerstand
у	[%]	Transmission
Z	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit
Z	[m/s]	mittlere Strömungsgeschwindigkeit
α	$[W/m^2K]$	Wärmeübergangskoeffizient
δ	[m]	Wanddicke
3	[]	Emissionskoeffizient
$\eta_{th}$	[%]	thermischer Wirkungsgrad
λ	[]	Luftverhältnis
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
σ	$[W/m^4K]$	Stephan-Bolzmann-Konstante
φ	[W/mK]	Wärmeleitfähigkeit
ω	[]	Sichtfaktor
_		
Indizies		
0		Bezugspunkt
1,2,3,		1,2,3, Punkt
a		aulsen
A		Ausgangs-, Antangspunkt
Ab		Abgas
В		Brennstoff



eingehend
Endpunkt
effektiv
Fluid
Fluid
Garphase
Hot Start Phase
innen
Anzahl (Phase)
Luft
ausgehend
Siede-
System
stöchiometrisch
unverdünnt
Wasser
Wand



## 1 Einleitung

Die Energieversorgung bildet eine der wichtigsten Lebensgrundlagen des Menschen. Energie wird in allen Bereichen des Lebens benötigt, wie zum Beispiel in der Industrie zum Herstellen von Produkten, im Verkehrswesen zum Transport von Menschen und Gütern sowie im häuslichen Gebrauch zum Heizen und Kochen. Vor allem der häusliche Gebrauch von Energie unterscheidet sich erheblich voneinander, je nachdem auf welchem Teil der Erde man sich befindet. Dabei stellt gerade der Kochvorgang einen unverzichtbareren Prozess in der lebensnotwendigen Nahrungszubereitung dar. In einem Großteil der Welt findet heutzutage der Kochvorgang noch ohne Elektrizität statt. In diesen unterentwickelten Ländern wird meist eine einfache Verbrennung von Brennstoffen zum Kochen verwendet. Als meist verwendeter Brennstoff zählt hierzu Holz, dessen chemisch gebundene Energie durch eine Verbrennung nutzbar wird. Jedoch steigt auch der Energieverbrauch durch die rasch steigende Zahl der Weltbevölkerung stark an. Da die sogenannte Vermögensenergie, wie in diesem Fall vor allem fossile Brennstoffe, nicht unendlich zur Verfügung steht, muss nach Mitteln zur Senkung des Energieverbrauchs gesucht werden. In hoch entwickelten Industriestaaten geschieht dies mit der Weiterentwickelung modernster Techniken. Da dies in Entwicklungsländern nur begrenzt möglich ist, muss dort nach anderen Möglichkeiten gesucht werden.

Im Vordergrund eines Kochvorgangs in einem ländlichen Gebiet steht die Ausnutzung der erzeugten Wärmeenergie. Dementsprechend kann gesagt werden, dass alles, was an Wärme nicht genutzt wird, als Verlust angesehen werden muss. Das Ziel sollte also sein, nur so viel Wärme zu erzeugen wie für den Kochvorgang nötig ist. Um möglichst wenig Wärme an die Umgebung abzugeben, werden in manchen Regionen bereits aus Lehmsteinen gebaute Ofenanlagen errichtet, mit denen eine gezielte Lenkung der Wärme stattfindet. Bei einer Verbrennung kommen viele wissenschaftliche Vorgänge zusammen, die den Verlauf und die Stärke einer Verbrennung beeinflussen. Darunter Strömungsvorgänge, der Wärmeund Stofftransport werden sowie das Zusammenspiel von chemischen und physikalischen Ereignissen verstanden. Eine Folge dessen ist oftmals eine zu hohe Feuerraumtemperatur, die nicht vollständig genutzt werden kann und somit für unnötige Abgasverluste sorgt. Außerdem hängen

1



die wegen ihrer klimaschädlichen Wirkung viel diskutierten Abgasemissionen mit diesen Umständen zusammen. Gerade häusliche Emissionen haben einen großen Anteil an den weltweiten Gesamtemissionen.

Aus diesen Gründen werden in dieser Diplomarbeit zwei landestypische Lehmöfen Äthiopien aus und Nepal hinsichtlich ihrer Wirkungsgrade und ihres Optimierungspotenzials auf verschiedenste Kriterien hin untersucht. Dazu gehören Veränderungen des aktuellen Konstruktionsstandes und der gegebenen Randbedingungen. Zusätzlich sollen durch Temperatur- und Abgasmessungen eine Verbesserung der Emissionswerte bei unterschiedlicher Verbrennungsluftzufuhr erzielt werden. Die Wirkungsgraduntersuchungen werden hierbei nach einem standardisierten Test, dem sogenannten Water Boiling Test, vollzogen. Zur weiteren messtechnischen Vermessung werden verschiedenste Messmittel des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen der TU Kaiserslautern zu Rate gezogen. Darunter befinden sich handelsübliche Thermoelemente zur Temperaturmessung sowie eine Abgasmessanlage und ein Schwärzungszahlmessgerät zur Abgasmessung.



Abbildung 1-1: Brennendes Holz



# 2 Aufgabenstellung

### Thema: "Wirkungsgradmessungen von Ofenanlagen"

Thematik des Projekts ist der Nachweis der Wirkungsgrade der verschiedenen Ofentypen, wie sie aktuell in Nepal, Kenia und Äthiopien gebaut werden, zum Erreichen des Gold Standards. Hintergrund ist die Anrechnung von  $CO_2$ – Gold Credits durch den im Vergleich zu offenen Feuerstellen höheren Wirkungsgrad und den damit verbundenen verringerten  $CO_2$ - Emissionen. Der Gold Standard ist ein Zertifikat für Klimaschutzprojekte und der weltweit strengste Zertifizierungstandard, der die Bedingungen des Kyoto Protokolls erfüllt.

Während dieser Diplomarbeit sollen an zwei konzeptionell unterschiedlichen Ofentypen Wirkungsgradmessungen erfolgen. Nach der Vermessung des Basisdesigns sind Optimierungen zur Verbesserung der Kennwerte (Wirkungsgrad und Emissionen) durchzuführen und gegeben falls nach Möglichkeiten zur Vereinfachung der Konzepte zu suchen.



## 3 Theoretische Grundlagen

### 3.1 Verbrennungstechnische Grundlagen

Die Verbrennung ist ein Prozess, der das Ziel verfolgt, die im Brennstoff enthaltene chemische Energie in thermodynamische Energie umzuwandeln. Das Resultat dieser Umwandlung ist der Gewinn von nutzbarer Wärme. Die Wärme entsteht, da der Verbrennungsvorgang als exotherme chemische Reaktion der Brennstoffbestandteile mit Sauerstoff aufgefasst werden kann. Es liegt also eine Oxidation des Brennstoffes vor. Die wichtigsten brennbaren Bestandteile sind Kohlenstoff, Wasserstoff sowie die Kohlenwasserstoffverbindungen.

Allgemein kann eine technische Verbrennung in der Art des Brennstoffes und in der Art der Verbrennung unterschieden werden. Unter der Art des Brennstoffes wird der Aggregatzustand des Brennstoffmaterials verstanden. Man unterteilt in:

- Feste Brennstoffe (z. B. Holz, Steinkohle)
- Flüssige Brennstoffe (z. B. Benzin, Heizöl)
- Gasförmige Brennstoffe (z. B. Erdgas)

An der Art der Verbrennung erkennt man die Bedeutung des Sauerstoffes für eine Verbrennung. Sie lässt sich in folgende Stufen untergliedern:

- Luftüberschuss (ausreichend Sauerstoff, Sauerstoffüberschuss, vollständige Verbrennung).
- Stöchiometrische Verbrennung (gerade genug Sauerstoff f
  ür vollst
  ändige Verbrennung).
- Luftmangel (wenig Sauerstoff, Sauerstoffmangel, unvollständige Verbrennung).

Ohne Sauerstoff liegt demnach keine Verbrennung vor. In der Regel wird dieser über die atmosphärische Luft bereitgestellt.

Abbildung 3-1 zeigt ein Verbrennungsdreieck, dass die drei Bedingungen für ein Feuer symbolisiert. Vor allem beim Beginn eines Feuers ist das richtige Mengenverhältnis von wichtiger Bedeutung.





Abbildung 3-1: Verbrennungsdreieck

Der Beginn eines Verbrennungsvorgangs wird durch die sogenannte Zündung eingeleitet. Erst durch die Zündung gelangen die brennbaren Moleküle in einen höheren Energiezustand, in dem die Energiefreisetzung beginnt und somit zu einer Kettenreaktion führt. Voraussetzung für diese Kettenreaktion ist jedoch, dass die durch Strahlung und Konvektion herbeigeführte Wärmeabführung nur so groß ist, dass ein Erlöschen der Flamme vermieden wird. Das Verhältnis zwischen freigesetzter Wärme und Wärmeabführung bestimmt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Verbrennung. Überwiegt die freigesetzte Wärme, breitet sich die Verbrennung schnell aus, da eine immer höhere Aktivierungsrate der Moleküle vorliegt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird natürlich durch starken Luftüberschuss auch und Turbulenzerscheinungen unterstützt. Die sogenannte Ausbreitungsfront des Feuers oder allgemein die Flamme ist abhängig von dem Wärme- und Stofftransport in der Verbrennungszone. Innerhalb der Flamme liegen die Reaktionszonen des Brennstoffes vor, in der somit auch die Änderung seiner thermodynamischen Eigenschaften wie Dichte und Viskosität zu Stande kommen (vgl. Abbildung 3-2) [1] [2] [3].

5





Abbildung 3-2: Flammenbild [1]

#### 3.1.1 Brennstoffzusammensetzung

Die Brennstoffzusammensetzung ist abhängig von der Art des Brennstoffes. Als Beispiel werden hier die festen Brennstoffe gewählt. Sie bestehen aus den brennbaren Stoffen Kohlenstoff (c), Wasserstoff (h) und Schwefel (s). Hinzu kommen noch Stickstoff (n), Sauerstoff (o), Wasser (w) und Asche (a), die häufig als Ballaststoffe angesehen werden. Die genaue Zusammensetzung kann nur mit Hilfe einer Elementaranalyse vorgenommen werden, bei der die Massenanteile bestimmt werden. Die Summe aller Anteile muss eins ergeben.

$$c + h + s + o + n + w + a = 1$$
 (3.1)

Die Zusammensetzung von luftgetrocknetem Holz ist in Tabelle 3-1 in Massenprozent dargestellt.

С	h	0	n	S	а	w
44	5	35	0,5	0,04	0,5	15

Tabelle 3-1: Zusammensetzung in Massen-%

Als aussagekräftige Größen eines Brennstoffes dienen der obere bzw. der untere Heizwert. Sie geben die freigesetzte Energie je Kilogramm Brennstoff an, d.h. die



die bei vollständiger Verbrennung gewonnen wird, wenn Energie, das Verbrennungsprodukt wieder auf die Ausgangstemperatur zurückgekühlt wird. Der Unterschied zwischen oberem und unterem Heizwert liegt in der Verdampfungsenthalpie des Wassers. Beim oberen Heizwert, der auch Brennwert genannt wird, wird zusätzlich die Energie berücksichtigt, die durch die Kondensation des Wasserdampfes entsteht. Beim unteren Heizwert, der oft auch nur Heizwert genannt wird, wird diese nicht berücksichtigt. Daraus schließt sich, dass der Brennwert immer etwas höher ist als der Heizwert. Als Bezugstemperatur werden i.d.R. 25°C angenommen, bei einem Umgebungsdruck von 1,01325 bar. Bei technischen Feuerungen wird meist der Heizwert verwendet, da das Wasser am Ende im dampfförmigen Zustand vorliegt. Der Heizwert spiegelt demnach die spezifischen Enthalpiedifferenzen zwischen den zu- und abgeführten Stoffen wider. Der Heizwert von luftgetrocknetem Holz liegt je nach Holzart im Bereich von etwa 14,65-16,75MJ/kg. Allgemein kann hierzu noch gesagt werden, dass der Heizwert mit steigender Dichte abnimmt, denn bei höherer Dichte liegen ein größerer Kohlenstoffanteil und ein kleinerer Wasserstoffanteil vor. Der Heizwert von Wasserstoff ist weitaus größer als der von Kohlenstoff [1] [2] [3].

Der Verbrennungsvorgang findet also statt, wenn die brennbaren Stoffe mit Sauerstoff reagieren. Diese Reaktion wird auch Oxidation genannt. Gleichung (3.2) zeigt die grundlegenden Reaktionsgleichungen einer Verbrennung mit festen Brennstoffen und deren freiwerdenden Energiemengen für die Bezugstemperatur von 25 °C und den Zustandsdruck von 1,01325 bar auf [1].

$$C + O_{2} = CO_{2} + 393510 \text{ kJ/kmol}$$

$$C + \frac{1}{2}O_{2} = CO + 110520 \text{ kJ/kmol}$$

$$CO + \frac{1}{2}O_{2} = CO_{2} + 282989 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{2} + \frac{1}{2}O_{2} = (H_{2}O)_{fl} + 285840 \text{ kJ/kmol}$$

$$H_{2} + \frac{1}{2}O_{2} = (H_{2}O)_{gas} + 241840 \text{ kJ/kmol}$$

$$S + O_{2} = SO_{2} + 296900 \text{ kJ/kmol}$$
(3.2)



Da der Sauerstoff mit atmosphärischer Luft zugeführt wird, gelangt folglich auch der in der Luft vorhandene Stickstoff in den Brennraum. Stickstoff ist ein inertes Gas, das an der Verbrennung nicht teilnimmt, aber durch sie erwärmt wird. Demnach entzieht der Stickstoff der Verbrennung einen kleinen Anteil an Energie, der somit zu einer Minderung der Verbrennungs- und Ausbreitungsgeschwindigkeit führen kann [1].

### 3.1.2 Optimale Verbrennung

Unter einer optimalen Verbrennung wird eine vollkommene oder zumindest eine stöchiometrische Verbrennung verstanden. Der dafür benötigte Sauerstoff wird meist mit der atmosphärischen Umgebungsluft zugeführt. Der für eine stöchiometrische Verbrennung erforderliche spezifische Sauerstoffbedarf o<sub>min</sub> lässt sich aus den brennbaren Bestandteilen des Brennstoffes herleiten. Allgemein wird im Folgenden das Augenmerk auf die festen Brennstoffe gerichtet. Mit Hilfe der Gleichungen (3.2) und den Molmassen der brennbaren Stoffe Kohlenstoff (Molmasse 12), Wasserstoff (2) und Schwefel (32) errechnet sich die Molmenge des Sauerstoffbedarfs pro kg Brennstoff [3].

$$o_{\min} = \left(\frac{c}{12} + \frac{h}{4} + \frac{s}{32} - \frac{o}{32}\right) \text{ kmol/kg Brennstoff}$$
(3.3)

Der Massenanteil an Sauerstoff (32) im Brennstoff muss natürlich von dem erforderlichen Sauerstoff abgezogen werden. Der spezifische Sauerstoffbedarf lässt sich auch in kg Sauerstoff pro kg Brennstoff angeben. Dafür muss Gleichung (3.3) mit der Molmasse des Sauerstoffes multipliziert werden.

$$O_{\min} = 32 \cdot o_{\min} \tag{3.4}$$

Da die atmosphärische Luft nicht aus reinem Sauerstoff besteht, muss nun die erforderliche spezifische Luftmenge  $l_{min}$  berechnet werden, die einer Verbrennung zuzuführen ist, um deren stöchiometrischen Ablauf zu garantieren. Der Sauerstoffanteil der Luft beträgt in etwa 21 Vol.-%.



$$o_{\min} = 0.21 \cdot l_{\min} \tag{3.5}$$

Um die erforderliche Luftmenge in Abhängigkeit der Brennstoffmenge anzugeben, wird jedoch der Gewichtsanteil des Sauerstoffes in der Luft verwendet. Dieser beträgt 23,2 %. Daraus folgt [1]:

$$L_{\min} = \frac{32 \cdot o_{\min}}{0,232} = \frac{O_{\min}}{0,232} \text{ kg Luft/kg Brennstoff}$$
(3.6)

In technischen Feuerungen liegt fast immer ein Luftüberschuss vor, daher ist das Luftverhältnis  $\lambda$  eingeführt. Es spiegelt das Verhältnis von tatsächlicher Luftzufuhr 1 und erforderlichem Luftbedarf wider.

$$\lambda = \frac{l}{l_{\min}} \tag{3.7}$$

Die Temperatur eines Verbrennungsvorganges und die Bildung der Schadstoffe werden im Wesentlichen durch das Luftverhältnis bestimmt [1] [3].

#### 3.1.3 Abgase und Schadstoffemissionen

Die wesentlichen Bestandteile des reinen Verbrennungsprozesses sind  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ,  $O_2$  und  $N_2$ . Bei einer unvollständigen Verbrennung kommen noch CO, HC,  $H_2$ ,  $NO_x$  und Ruß hinzu. Davon werden  $SO_2$ , CO, HC,  $NO_x$  und Ruß als Schadstoffe angesehen, da sie eine luftverunreinigende Wirkung erzielen.  $CO_2$  zählt nicht direkt als Schadstoff, jedoch fördern große Mengen an  $CO_2$  den Klimawandel und tragen somit zur Erderwärmung bei. Zusammen bilden sie die Emissionen. Die Bildung von Emissionen kann aus zwei Gründen entstehen. Zum einen kann sie brennstoffabhängig sein, wie zum Beispiel das Vorhandensein des Brennstoffbestandteils Schwefel, was zur Bildung von  $SO_2$  führt. Zum anderen kann sie prozessabhängig sein, d. h. bei einem kohlenstoffhaltigem Brennstoff ist beispielsweise die Bildung von CO von den Verbrennungsbedingungen abhängig. Bei einer vollständigen Verbrennung eines Brennstoffes, der aus Kohlenwasserstoffen besteht, fallen als Endprodukte nur  $CO_2$ 



und H<sub>2</sub>O an. Der Stickstoff wird als inertes Gas betrachtet. SO<sub>2</sub> ist eine Nebenerscheinung und fällt nur an, wenn im Brennstoff geringe Mengen an Schwefel enthalten sind. Eine unvollständige Verbrennung zeichnet sich durch noch brennbare Bestandteile oder brennbare Gase im Abgasstrom aus. Sie kann trotz ausreichender Sauerstoffzufuhr durch unzureichende Vermischung oder falsche Luftzuführung herrühren. Eine unvollständige Verbrennung führt somit zu Energieverlusten auf chemischer Basis, da nicht der komplette zur Verfügung stehende Brennstoff umgewandelt wird. Die Verluste sind nicht mit dem Abgasverlust zu verwechseln, der auf einem physikalischen Ursprung aufbaut und damit zusammenhängt, dass die entstandene Wärmeenergie nicht ausreichend genutzt wird, wodurch das Abgas mit sehr hohen Temperaturen entweicht. Dieser Fall liegt vor, wenn dem Verbrennungsprozess zu viel Luft zugeführt wird und sich die Abgasmenge dadurch erhöht. Da die chemischen Verluste größere Verlusterscheinungen zur Folge haben, sind sie durch höheren Luftüberschuss zu vermeiden [3].

Die  $CO_2$ -Emissionen sind direkt proportional abhängig von der Menge an verwendetem Brennstoff. Die Größe der  $CO_2$ -Emissionen richtet sich nach dem Heizwert eines Brennstoffes. Je größer der Heizwert, desto höher sind die  $CO_2$ -Emissionen pro Kilogramm Brennstoff. Sie sind demnach durch den Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes vorgegeben. Sie sinken leicht mit Zunahme der Unvollständigkeit einer Verbrennung, was jedoch andere Schadstoffe nach sich zieht.

Ein Maß für die unvollständige Verbrennung stellen die CO-Emissionen und die HC-Emissionen dar. Sie sind noch brennbare Gase und bilden sich bei zu geringer Sauerstoffzufuhr durch schlechte Luftzufuhr. Je größer sie sind, desto unvollständiger ist die Verbrennung. Ein Prozent CO im Abgas bedeutet einen Verlust von ungefähr 4-6% des thermischen Wirkungsgrades. Unter HC werden allgemein die Kohlenwasserstoffemissionen verstanden, die Hinweise auf noch brennbare Gasanteile im Abgas geben.

Die  $NO_x$ -Emissionen stehen als Sammelbegriff für die  $NO_2$ -Und die  $NO_2$ -Emissionen. Zu 90-95 % bestehen die  $NO_x$ -Emissionen jedoch aus den  $NO_2$ -Emissionen. Diese reagieren in der Atmosphäre mit dem Luftsauerstoff weiter zu  $NO_2$ . Es wird zwischen zwei  $NO_x$ -Emissionen unterschieden, dem thermischen  $NO_x$  und dem Brennstoff  $NO_x$ ,



je nachdem ob es vom Brennstoff oder der Verbrennungsluft herrührt. Die Bildung der  $NO_x$ -Emissionen unterliegt einer starken Temperaturabhängigkeit. Unter einer Temperatur von 1000 °C ist die Bildung der NO-Emissionen äußerst gering. Dort wird Stickstoff höchstens in  $N_2O$  umgewandelt, was als Lachgas bezeichnet wird (vgl. Abbildung 3-3).



Abbildung 3-3: Verschiedene NO<sub>X</sub>-Emissionen [4]

Die  $SO_2$ -Emissionen sind komplett brennstoffabhängig. Ist im Brennstoff kein Schwefel enthalten, so entsteht bei der Verbrennung auch kein  $SO_2$ . Die  $SO_2$ -Emissionen oxidieren an der atmosphärischen Luft weiter zu dem schädlichen  $SO_3$  [3] [5] [4].

#### 3.2 Wärmeübertragung

Der Transfer von Wärme zwischen zwei Körpern oder allgemein zwischen zwei Systemen nennt man Wärmeübertragung. Die Grundlage für eine Wärmeübertragung ist eine Temperaturdifferenz zwischen zwei Systemen. Der zu Stande kommende Wärmestrom bewegt sich dabei immer in Richtung der geringeren Temperatur. Der Wärmestrom Q gibt Auskunft über die pro Zeiteinheit t übergetretene Wärmemenge Q.



$$\dot{\mathbf{Q}} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \mathbf{Q}}{\Delta t} \tag{3.8}$$

Die Wärmeübertragung lässt sich in drei Arten unterteilen, die je nach Ausgangssituation einzeln oder zusammen auftreten können [2] [3]:

- Wärmeleitung
- Wärmeübertragung durch Konvektion
- Wärmestrahlung

### 3.2.1 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt den Wärmeübergang zwischen direkt benachbarten festen Körpern oder unbewegten Fluiden. Die Grundlage hierfür ist die Übertragung von Energie durch schwingende benachbarte Teilchen. Es muss zwischen stationärer und instationärer Wärmeleitung unterschieden werden.

Der einfachste Fall der stationären Wärmeleitung ist der der ebenen Wand. Der Wärmestrom lässt sich hierbei durch die Temperaturdifferenz (T – T<sub>U</sub>), die Wandfläche A, die Wanddicke  $\delta$  und der materialspezifischen Wärmeleitfähigkeit  $\phi_W$  der Wand ermitteln (vgl. Abbildung 3-4) [3].

$$\dot{\mathbf{Q}} = \frac{\boldsymbol{\varphi}_{\mathrm{W}}}{\delta} \cdot \mathbf{A} \cdot (\mathbf{T} - \mathbf{T}_{\mathrm{U}}) \tag{3.9}$$





Abbildung 3-4: Wärmeleitung Wand [2]

Liegt nun der Fall vor, dass sich die Größe der Wandinnen- und der Wandaußenfläche unterscheidet, wie beispielsweise bei gerundeten Flächen von Zylindern oder Kugeln, erfolgt die Berechnung des Wärmestromes über den Innen- und Außenradius  $r_i$  und  $r_a$  (vgl. Abbildung 3-5).



Abbildung 3-5: Innen- und Außenradius [6]

Der Wärmestrom durch eine einschichtige Zylinderwand lautet:

$$\dot{Q} = \frac{\phi_W \cdot 2\pi l \cdot (T - T_U)}{\ln \frac{r_a}{r_i}}$$
(3.10)



Die Größe I bringt die Zylinderlänge in die Berechnungsformel mit ein. Im Falle einer einschichtigen Kugel, demnach einer Hohlkugel, ergibt sich der Wärmestrom folgendermaßen:

$$\dot{Q} = \frac{\phi_{W} \cdot 4\pi \cdot (T - T_{U})}{\frac{1}{r_{i}} - \frac{1}{r_{a}}}$$
(3.11)

Die Gleichungen (3.9) bis (3.11) gelten jeweils für einschichtige Flächen. Durch Erweiterung der entsprechenden Parameter sind sie auch für mehrschichtige Flächen unterschiedlichstem Material anwendbar [3].

### 3.2.2 Wärmeübertragung durch Konvektion

Die Wärmeübertragung durch Konvektion liegt vor, wenn strömende Fluide und feste Körper Wärme zwischen einander übertragen. Die bewegenden Teilchen der Strömung sorgen dabei für den Energieaustausch. Je nachdem, ob die Strömung des Fluides selbst hervorgerufen wird oder ob sie maschinell verursacht ist, spricht man von freier bzw. erzwungener Konvektion.

Der Wärmestrom, der von einem Fluid mit der Temperatur  $T_F$  auf eine Wand der Temperatur  $T_W$  und der Wandfläche A übergeht, folgt aus [2]:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_F - T_W) \tag{3.12}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  ist abhängig von der Wärmeleitfähigkeit  $\phi$  des Fluides und der charakteristischen Länge I des angeströmten oder durchströmten Körpers. Die charakteristische Länge I ist eine geometrieabhängige Größe und kann je nachdem Länge, Breite, Höhe oder Durchmesser eines Körpers sein. Des Weiteren ist der Wärmeübergangskoeffizient an die dimensionslose Nusselt-Zahl gebunden.

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu} \cdot \varphi_{\mathrm{F}}}{\mathrm{l}} \tag{3.13}$$



Die Nusselt-Zahl beinhaltet mehrere dimensionslose Kenngrößen, die modellabhängige Strömungs- und Wärmeleitungsvorgänge widerspiegeln. In ihr sind auch die Unterschiede der freien und erzwungenen Konvektion enthalten [3].

### 3.2.3 Wärmedurchgang

Der Wärmedurchgang vereint die Wärmeleitung und die Wärmeübertragung durch Konvektion. Dabei wird zum Beispiel der Wärmestrom berechnet, der von einem Fluid auf eine Wand und anschließend wieder auf ein Fluid übergeht (vgl. Abbildung 3-6). Dabei werden die Wärmeübergangskoeffizienten und die Wärmeleitfähigkeit in dem Wärmedurchgangskoeffizienten k zusammengefasst. Als Temperaturdifferenz werden die Temperaturen der beiden Fluiden genommen. Somit folgt der Wärmestrom:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (T_{Fl1} - T_{Fl2})$$
 (3.14)



Abbildung 3-6: Wärmedurchgang [2]

Der Wärmedurchgangskoeffizient ermittelt sich wie folgt:



$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{A} = \frac{\mathbf{A}}{\left(\frac{1}{\alpha_{\text{Fl}1}} + \frac{\delta}{\phi_{\text{W}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{Fl}2}}\right)}$$
(3.15)

Die Fläche A wird i. d. R. in die Formel miteinbezogen, da sie mit der Wanddicke in Verbindung steht und beide im Falle einer Hohlkugel oder eines Zylinders durch die Radien ersetzt werden [3] [6].

### 3.2.4 Wärmestrahlung

Unter der Wärmestrahlung wird eine elektromagnetische Strahlung verstanden. Der Energietransport erfolgt durch elektromagnetische Wellen, daher ist keine Materie nötig. Der elektromagnetischen Strahlung liegt der Übergang von quantenmechanischen Zuständen in emittierenden Körpern zu Grunde. Sie ist temperaturabhängig und wächst daher mit zunehmender Temperatur stark an. Ein Körper strahlt folgenden Wärmestrom an seine Umgebung ab:

$$\dot{\mathbf{Q}} = \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{T}^4 \tag{3.16}$$

Dabei ist A die Fläche und T die Temperatur des Körpers. Das griechische Symbol  $\sigma$  steht für die Stephan-Boltzmann-Konstante und hat den Wert 5,67051  $\cdot$  10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>. Außerdem steht  $\epsilon$  für den Emissionskoeffizienten, der einen Wert zwischen 0 und 1 annimmt. Er gibt den Anteil der spektralen Ausstrahlung gegenüber dem schwarzen Körper an, der einen Emissionskoeffizienten von eins besitzt. Alle Körper, die einen Koeffizienten kleiner eins haben, werden graue Strahler genannt.

Wird ein Körper bestrahlt, gibt es die Möglichkeiten der Absorption s, Reflexion b und der Transmission y. Ihre jeweiligen Anteile ergeben zusammen immer eins. Dabei hat ein Körper immer das gleiche Absorptions- wie auch Emissionsverhalten.

$$s + b + y = 1$$
 (3.17)

$$\epsilon = s$$
 (3.18)



Die Wärmestrahlung zwischen zwei Körpern ist dementsprechend ein Zusammenwirken von Ein- und Ausstrahlung. Die übertragene Wärme ist dabei abhängig von der Lage und der Geometrie der zwei Körper. Daher muss Gleichung (3.16) noch um den sogenannten Sichtfaktor  $\omega$  verbessert werden. Der Sichtfaktor besagt im Prinzip, was der abstrahlende Körper räumlich von dem einstrahlenden Körper sieht. Der Sichtfaktor ist im Endeffekt ein prozentualer Anteil der Umgebung [3] [6].

$$\dot{\mathbf{Q}} = \boldsymbol{\omega} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{A} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{T}^4 \tag{3.19}$$

#### 3.3 Zustandsgrößen und Wärmestrom eines Systems

Zwei Kenngrößen bezeichnen den Zustand bzw. die Energie eines Systems oder eines Stoffes. Diese zwei Zustandsgrößen, nämlich die spezifische innere Energie u und die spezifische Enthalpie h, lassen sich als Funktionen von unabhängigen Variablen darstellen. Die spezifische innere Energie ist dabei eine Funktion des spezifischen Volumens v sowie der Temperatur T und die spezifische Enthalpie eine Funktion des spezifischen Druckes p und ebenfalls der Temperatur T.

$$u = u(v, T)$$
 (3.20)

$$h = h(p, T)$$
 (3.21)

Das vollständige Differential dieser Zustandsgleichungen entsteht durch das Differenzieren nach jeder der Variablen, wobei zugleich die zweite Variable stets konstant gehalten wird. Daraus ergibt sich:

$$du = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_{v} \cdot dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_{T} \cdot dv$$
(3.22)

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_{p} \cdot dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_{T} \cdot dp$$
(3.23)



Die vollständigen Differentiale bestehen jeweils aus zwei Teilen, wobei die entsprechenden Indizes die konstant gehaltenen unabhängigen Veränderlichen angeben [3] [6].

#### 3.3.1 Wärmekapazität

Die ersten Differentiale der Gleichungen (3.22) und (3.23) geben dabei die spezifischen Wärmekapazitäten an.

$$c_{v} = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_{v}$$
(3.24)

$$c_{\rm p} = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_{\rm p} \tag{3.25}$$

Die Gleichung (3.24) stellt die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen  $c_v$  dar und die Gleichung (3.25) gibt die Wärmekapazität bei konstantem Druck  $c_p$  wider. Eine Methode zur Messung der Wärmekapazitäten besteht darin, einem System bei konstantem Volumen bzw. konstantem Druck Wärme zuzuführen. Voraussetzungen sind hierfür, dass dem System keine Aggregatzustandsänderungen vorliegen und im System keine Arbeit ausgeführt wird [3].

$$q_{12} = \int_{T_1}^{T_2} c_v(v, T) dT$$
 (3.26)

$$q_{12} = \int_{T_1}^{T_2} c_p(p, T) dT$$
 (3.27)

Allgemein definiert sich die spezifische Wärmekapazität als die Energie, die aufgewendet werden muss um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Außerdem ist die Wärmekapazität eines Stoffes von seinem Material und seiner Masse abhängig. Sie geben die Speicherfähigkeit und auch die Speichermenge des Stoffes wider. Da bei fester und flüssiger Materie die Wärmekapazität unabhängig vom Druck ist, wird in diesen Fällen i. d. R. mit c<sub>P</sub> gerechnet. Lediglich die Gase weisen eine Abhängigkeit zum Druck und zum Volumen aus, daher wird dort zwischen beiden Wärmekapazitäten



unterschieden. Da sich die Wärmekapazität jedoch mit der Temperatur ändert, wird in einigen Fällen eine mittlere spezifische Wärmekapazität  $\overline{c}$  angewendet. Diese errechnet sich folgender Maßen [2] [7]:

$$\bar{c}|_{T_1}^{T_2} = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} c \cdot dT$$
(3.28)

### 3.3.2 Wärmestrom eines Verbrennungsvorganges

Zur Vereinfachung eines Verbrennungsvorganges wird von einem adiabaten System ausgegangen, bei dem nur die ein- und ausgehenden Massenströme berücksichtigt werden. Dementsprechend werden die kinetischen und potenziellen Energieänderungen vernachlässigt.



Abbildung 3-7: adiabater Brennraum [1]

Für diesen adiabaten Brennraum (Wärmstrom  $\dot{Q} = 0$ ) lässt sich eine Energiebilanz nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik aufstellen (vgl. Abbildung 3-7).

$$\dot{Q} = \dot{m}_B \cdot h_B(T_B) + \dot{m}_L \cdot h_L(T_L) - \dot{m}_{Ab} \cdot h_A(T_A)$$
(3.29)

Der abgeführte Abgasmassenstrom  $\dot{m}_{Ab}$  ist ein Gemisch der beiden zugeführten Massenströme. Zwischen den zugeführten Brennstoffmassenstrom  $\dot{m}_B$  und dem Luftmassenstrom  $\dot{m}_L$  besteht folgender Zusammenhang:



$$\frac{\dot{m}_{\rm L}}{\dot{m}_{\rm B}} = \lambda \cdot L_{\rm min} \tag{3.30}$$

Die Division durch den Brennstoffmassenstromes  $\dot{m}_B$  bei Gleichung (3.29) folgt mit Gleichung (3.30) für die spezifischen Wärme q:

$$q = h_B(T_B) + \lambda \cdot L_{\min} \cdot h_L(T_L) - \frac{\dot{m}_{Ab}}{\dot{m}_B} \cdot h_A(T_A)$$
(3.31)

Da die Enthalpien der im Brennraum vorliegenden Stoffe verschieden und auch nicht bekannt sind, muss eine Bezugstemperatur T<sub>0</sub> eingeführt werden. Dadurch lassen sich die Enthalpien in ihre Differenzen zwischen der Bezugstemperatur und der Endtemperatur des jeweiligen Stoffes, sowie die Enthalpie der Bezugstemperatur aufteilen [2].

$$q = [h_{B}(T_{B}) + h_{B}(T_{0}) - h_{B,0}(T_{0})] + \lambda \cdot L_{min} \cdot [h_{L}(T_{L}) + h_{L}(T_{0}) - h_{L,0}(T_{0})] - \frac{\dot{m}_{Ab}}{\dot{m}_{B}} \cdot [h_{A}(T_{A}) + h_{A}(T_{0}) - h_{A,0}(T_{0})]$$
(3.32)

Anschließend können die Enthalpien der Bezugstemperatur zusammengefasst werden. Diese stellen im Grunde nichts anderes dar, als den spezifischen Heizwert  $h_U$ . Somit steht nun in jeder eckigen Klammer die Enthalpiedifferenz eines Stoffes für die jeweilige Temperaturdifferenz. Diese lassen sich nach Gleichung (3.27) über die spezifischen Wärmekapazitäten berechnen, bzw. sofern eine Temperaturabhängigkeit besteht, mittels Gleichung (3.28).

$$q = [c_{P,B}(T_B - T_0)] + \lambda \cdot L_{\min} \cdot [c_{P,L}(T_L - T_0)] - \frac{\dot{m}_{Ab}}{\dot{m}_B} \cdot [c_{P,A}(T_A - T_0)] + h_U \quad (3.33)$$

Da das Abgas zum Teil aus stöchiometrisch verbranntem Gas und unverbrannter Luft besteht, liegen unterschiedliche Wärmekapazitäten vor. Um dies zu berücksichtigen, muss auf grundlegende Bilanzgleichungen zurückgegriffen werden. Der Abgasmassenstrom besteht aus den beiden zugeführten Massenströmen.

$$\dot{\mathbf{m}}_{\mathrm{Ab}} = \dot{\mathbf{m}}_{\mathrm{B}} + \dot{\mathbf{m}}_{\mathrm{L}} \tag{3.34}$$



Wird nun Gleichung (3.30) in Gleichung (3.34) eingesetzt, folgt:

$$\frac{\dot{m}_{Ab}}{\dot{m}_B} = 1 + \lambda L_{\min}$$
(3.35)

Wird  $\lambda = 1$  gesetzt, folgt für den stöchiometrisch verbrannten Abgasanteil:

$$\frac{\dot{m}_{stöch}}{\dot{m}_B} = 1 + L_{min}$$
(3.36)

Der Anteil der unverbrannten Luft ist die Differenz der Gleichungen (3.35) und (3.36).

$$\frac{\dot{m}_{unv.Luft}}{\dot{m}_B} = 1 + \lambda L_{min} - (1 + L_{min}) = (\lambda - 1) \cdot L_{min}$$
(3.37)

Daraus resultiert die endgültige Energiebilanz:

$$q = [c_{P,B}(T_B - T_0)] + \lambda \cdot L_{min} \cdot [c_{P,L}(T_L - T_0)]$$
  
-(1 + L<sub>min</sub>) \cdot [c\_{P,stöch}(T\_A - T\_0)] (3.38)  
-(\lambda - 1) \cdot L\_{min} \cdot [c\_{P,unv.Luft}(T\_A - T\_0)] + h\_U

Gleichung (3.38) zeigt die entstehende nutzbare Wärmemenge eines Verbrennungsprozesses auf. Im Falle eines nicht adiabaten Verbrennungsraumes müssen zusätzlich die Wärmeverluste nach Kapitel 3.2 durch Wärmeleitung und Wärmestrahlung berücksichtigt werden [2].

#### 3.4 Luftströmung und Schornsteineffekt

Die bei einer Verbrennung entstehenden Verbrennungsabgase müssen dem Verbrennungsraum entzogen werden. Dieser Entzug wird meist durch einen Abzug oder Schornstein gewährleistet. Der Abzug der Verbrennungsluft unterliegt grundlegenden physikalischen Prinzipien. Die Grundlage, deren sich jeder Abzug zu Nutze macht, ist das Bestreben von warmer Luft, aufzusteigen. Diese Erscheinung wird thermische Konvektion genannt und hängt mit der Luftdichte und dem Luftdruck



zusammen. Die Luftdichte nimmt mit zunehmender Temperatur und geringerem Luftdruck ab (vgl. Abbildung 3-9). Die im Verbrennungsraum aufgeheizte Luft zieht demnach schnell durch den Schornstein nach oben. Dabei entsteht um das Feuer im Verbrennungsraum ein kleines Unterdruckgebiet. Dieses sorgt dafür, dass atmosphärische Luft angezogen wird und dem Verbrennungsprozess zugeführt wird. Die Temperatur des Abgases nimmt über den Verlauf hin durch Wärmeabgabe ab. Unterdruckgebiet Das steigt nach dem Verbrennungsraum bis zum Schornsteineingang auf sein Maximum. Von dort an nimmt es über die Länge des Schornsteins ab, bis es am Austritt Umgebungsdruck erreicht (vgl. Abbildung 3-8) [8].









Abbildung 3-9: Abgasdichte in Abhängigkeit der Abgastemperatur

Allgemein ist der Temperatur- und Druckverlauf jedoch vom Bau des Schornsteines und somit von dem zu Stande kommenden Luftzug abhängig. Querleitungen des Schornsteins behindern den Luftzug geringförmig. Außerdem sind die Verläufe natürlich von der Größe des Feuers abhängig. Höhere Abgastemperaturen und auch höhere Drücke kommen dem Abzug zu Gute [8].

#### 3.4.1 Luftmassenstrom

Der Luftzug, der als atmosphärische Luft in den Feuerraum einzieht, wird Luftmassenstrom  $\dot{m}_L$  genannt. Dort vermischt er sich mit dem Brennstoffmassenstrom, ehe er wieder zum Schornstein hin als Abgasmassenstrom austritt. Der Massenstrom allgemein spiegelt die Änderung der Masse in einem System wider. Die zeitliche Änderung der Masse im System zum Zeitpunkt t und dem Zeitpunkt t +  $\Delta t$  lautet dann wie folgt:

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{m(t + \Delta t) - m(t)}{\Delta t}$$
(3.39)



Die Massenstrombilanz eines offenen Systems ergibt sich aus den ein- und ausströmenden Massenströmen (vgl. Abbildung 3-7 mit Gleichung (3.29)).

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_o \tag{3.40}$$

Für den stationären Fall  $\frac{dm}{dt} = 0$  lässt sich daraus ableiten, dass die Summe der eingehenden gleich der Summe der ausgehenden Massenströme ist. Diese Gesetzmäßigkeit wird auch Kontinuitätsgleichung genannt.

Ein Massenstrom lässt sich mit Hilfe der Dichte  $\rho$ , der Querschnittsfläche A und der Strömungsgeschwindigkeit z ermitteln.

$$\dot{\mathbf{m}} = \boldsymbol{\rho} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{z} \tag{3.41}$$

Da die Geschwindigkeit meist ungleichmäßig über dem Flächenquerschnitt ist, wird oft mit der mittleren Geschwindigkeit  $\overline{z}$  gerechnet. Diese kann mittels Integration über die Fläche berechnet werden [2].

$$\overline{z} \cdot A = \int_0^A z \cdot dA \tag{3.42}$$


## 4 Brennverhalten bei Kleinfeuerungsanlagen

In diesem Kapitel wird auf das charakteristische Brennverhalten von Kleinfeuerungsanlagen eingegangen. Zusätzlich werden die Bedienungseinflüsse auf den Verbrennungsprozess erläutert. Ein Verbrennungsprozess besteht meist aus mehreren aufeinander folgenden einzelnen Verbrennungsvorgängen. Unter einem Verbrennungsvorgang wird hierbei der Abbrand einer zu einem Zeitpunkt aufgelegten Brennstoffmasse verstanden. Ein solcher Verbrennungsvorgang läuft i.d.R. als Chargenabbrand ab. Das bedeutet, dass sich die Abgaswerte und die Abgaszusammensetzung während des Abbrandes immer wieder ändern. Dementsprechend ist die Messdauer von entscheidender Bedeutung.



Abbildung 4-1: Emissionsvergleich unterschiedlicher Messdauer [9]

Abbildung 4-1 verdeutlicht den Einfluss des flammenlosen Abbrandes auf die Emissionswerte. Aus Erfahrungswerten ergibt sich, dass ein vollständiger Abbrand einer Brennstoffmasse bis zu dem Zeitpunkt zählt, wenn die Restmasse des Brennstoffes noch ein Gewicht von etwa 4 % seines Ausgangsgewichtes beinhaltet. Daher sollte auch eine Messdauer über eine gesamte Abbranddauer gehen. Abbildung 4-2 zeigt den ungefähren Temperaturverlauf eines Holzabbrandes. Daran ist zu erkennen, dass die höchste Temperatur relativ kurz nach dem Anbrennen erreicht



wird. Ein Abbrand lässt sich in drei Phasen untergliedern, die Heiz-, die Leistungs- und die Glutphase. Die in der Abbildung 4-2 ersichtlichen Prozent beziehen sich dabei auf die benötigte Luftzufuhr, d. h. wenn die ausgelegte Luftzufuhr als Maximum dargestellt wird, so wird diese in der Heizphase benötigt. In der Glutphase werden entsprechend nur noch 20 % dieser Luftzufuhr benötigt, um den Abbrand zu gewährleisten [9].



Abbildung 4-2: Temperaturverlauf über Abbranddauer [9]

Der Verlauf der Emissionswerte ist bei gleichen Randbedingungen, wie Luftzufuhr oder Brennmaterial, in etwa an den Verlauf der Feuerraumtemperatur gegliedert. So liegen bei einer höheren Temperatur größere Kohlenstoffdioxid- und Stickoxidwerte vor und eine geringere Menge der Emissionen aus einer unvollständigen Verbrennung, wie Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe. In der Heizphase steigen die Temperatur und die Bildung von Kohlenstoffdioxid stark an, weshalb viel Sauerstoff benötigt wird. Nach längerem Temperaturabfall in der Leistungsphase folgt in der Glutphase eine stärkere unvollständige Verbrennung, was mit niedrigen Temperaturen und einem geringen Sauerstoffbedarf einhergeht. Dadurch verringert sich die Bildung des Kohlendioxides.





Abbildung 4-3: CO- und HC-Emissionen über Abbranddauer [9]

Aus Abbildung 4-3 geht hervor, dass gerade die CO-Emissionen in der Glutphase rapide ansteigen. Bei den Kohlenwasserstoffemissionen liegt dagegen nur eine geringfügige Änderung vor. Da bei einem flammenlosen Abbrand auch die  $CO_2$ -Emissionen zurückgehen, steigt demnach die Sauerstoff-Konzentration an.

Etwas anders sieht es bei den Partikelemissionen aus. Die größten Partikelemissionen liegen im Bereich der höchsten Temperaturen, denn da bilden sich partikelgebundene Kohlenstoffteilchen zu Ruß. Zwar ist Ruß ebenfalls ein Anzeichen für eine unvollständige Verbrennung, aber auch ein Merkmal für CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit der Verbrennungstemperatur ansteigen, da sie die Intensität einer Verbrennung widerspiegeln.

Allgemein lässt sich zu dem Brennverhalten jedoch sagen, dass ein stationärer Betrieb gerade bei Kleinfeuerungsanlagen nicht möglich ist. Die einzelnen Messwerte hängen von zu vielen Einflussfaktoren ab. Die Schwankungen sind wegen den unterschiedlichen Brennstoffeigenschaften, den instationären Betriebsbedingungen sowie den wechselnden Randbedingungen über einen Verbrennungsvorgang unvermeidlich. Aus diesem Grund sind die Messwerte stark abhängig von der kurzfristigen Leistung und des aktuellen Betriebszustandes der Feuerungsanlage. So sind beispielsweise die Staub- und Partikelemissionen nach einer gewissen Zeit nach dem Auflegen am niedrigsten [9] [10] [11].



## 4.1 Nutzer- und Brennstoffeinflüsse

In diesem Abschnitt werden vermeidbare Einflüsse auf einen Verbrennungsvorgang erklärt, um einen effektiveren Betrieb einer Feuerungsanlage mit dem Brennstoff Holz zu ermöglichen. Zu diesen Faktoren zählen die Brennstoffeigenschaften wie Wassergehalt und Brennstoffgröße sowie die Bedienung der Anlage anhand von Nachlegezeitpunkt und Nachlegemasse des Brennstoffes. Weiterhin werden die Unterschiede zwischen dem Brennstoff Holz und dem Brennstoff Holzbriketts aufgezeigt.

Die Brennstoffqualität hat einen Einfluss auf das Emissionsverhalten von Feuerungsanlagen. Dabei spielen Wassergehalt, Aschegehalt und Scheitgröße eine wichtige Rolle. Weniger Einfluss hat die verwendete Holzart, da dementsprechend das Emissionsverhalten proportional zu den unterschiedlichen Heizwerten ist.

Die genaue Brennstoffgröße ist natürlich abhängig vom Feuerraum oder vom Ofen. Mehrere kleine Holzscheite bringen durch ihre große Anbrennfläche kurzzeitig eine hohe Leistung ein und sorgen somit für erhöhtes Emissionsverhalten bei den Kohlenwasserstoffen und dem Kohlenmonoxid, da anschließend die Glutphase überwiegt. Außerdem verkürzen sich dadurch die Nachlegezyklen. Große Holzscheite haben ein besseres Emissionsverhalten und bringen ihre Wärmeleistung über eine längere Zeit ein. Dadurch ergeben sich auch geringfügig bessere Wirkungsgrade. Je nach Anwendungsfall können daher kleinere oder größere Holzscheite verwendet werden.

Der Wassergehalt des Holzes spielt eine wichtige Rolle. Je mehr Wasser im Holz vorhanden ist, desto mehr Wärmeenergie muss aufgebracht werden um dies zu verdampfen. Dadurch läuft die Verbrennung langsamer ab, was u. a. zu geringeren Temperaturen führt. Die besten Emissionswerte weist hierbei Holz mit einem Feuchtigkeitsgehalt zwischen 8 und 17 % auf. Bei einem Feuchtigkeitsgehalt von über 20 % steigen die Werte stark an. Unter 8 % liegen die Werte ebenfalls in einem konstant guten Rahmen. Je nach Holzart kommt es jedoch vor, dass sich die Werte bei einem Gehalt unter 8 % etwas verschlechtern, was durch höhere Gasbildungsprozesse erklärt werden kann. Diese fördern die Bildung von unverbrannten Kohlenwasserstoffgasen. Die Wärmeleistung und der Wirkungsgrad



einer Feuerung steigen konstant mit fallendem Wassergehalt des Holzes. Bei zu geringem Wassergehalt verkürzt sich wiederrum die Abbranddauer.

Mit Rinde behaftete Holzscheite weisen ein etwas höheres Emissionsverhalten auf, da in ihnen ein höherer Aschegehalt vorliegt [9].

Nicht nur die Zusammensetzung des Brennstoffs, sondern auch die Nachlegemenge und der Nachlegezeitpunkt haben Einfluss auf das Emissionsverhalten und die Wärmeleistung.

Geringe Nachlegemengen wie beispielsweise einzelne Scheite führen zu erhöhten Emissionen, da so nur geringe Reaktionstemperaturen im Brennraum erreicht werden, die eine unvollständigere Verbrennung nach sich ziehen. Mehrere Holzscheite können jedoch eine Überladung des Brennraumes und somit eine mangelnde Luftzufuhr zur Folge haben. Sollte die Luftzufuhr trotzdem ausreichen, führt mehr Brennstoff natürlich zu höheren Temperaturen und auch zu höheren Abgastemperaturen, die sich negativ auf den Wirkungsgrad ausweisen können. Die Wärmeleistung und der Wirkungsgrad steigen mit der nachgelegten Brennstoffmasse an, wobei Letzterer nur bis zu einem gewissen Maße der Beladung ansteigt.

Der Nachlegezeitpunkt bedingt natürlich das Anbrennen des nachgelegten Brennstoffes. Unter einem frühen Nachlegen wird ein Zeitpunkt verstanden, bei dem die inliegende Restmasse noch mit einer Flamme verbrennt. Dies erleichtert das Anbrennen, da die Temperaturen im Feuerraum noch höher sind und durch die Flamme eine Zündung vorgenommen wird. Unter einem späten Nachlegen ist der Endpunkt des Abbrandes gemeint, bei dem die Glutphase schon längere Zeit anhält. Ein spätes Auflegen erhöht die Emissionen, da die CO- und HC-Emissionsbildung in vollem Gange ist. Die Zündung des Brennstoffes verzögert sich und ist von der Luftzuführung abhängig. Die geringen Temperaturen erschweren die Verbrennung und fördern die unvollständige Verbrennung. Beim frühen Nachlegen sind die Wärmeleistung und der Wirkungsgrad deutlich besser, was mit der kürzeren Abbranddauer zu tun hat. Der Nachlegezeitpunkt hat außerdem einen Einfluss auf das Glutbett. Frühes Nachlegen erhöht Stück für Stück das Glutbett und sorgt für einen Anstieg der Abgastemperatur. Spätes Nachlegen hält das Glutbett auf einem gleichmäßigen Niveau. Das Glutbett wirkt sich zudem auf die Luftzuführung aus, da der nachgelegte Brennstoff teilweise darin versinkt und damit weniger Luft erhält [9].



Die achteckigen Holzbriketts mit Loch (Pini Kay) kommen in ihrem Emissionsverhalten dem Holz noch am nächsten. Gemeinsam mit den runden Holzbriketts mit Loch haben sie die geringsten Emissionswerte aller Brikettsorten. Lediglich die Partikelemissionen sind etwas höher als die des Holzes, was daran liegt, dass die gepressten Briketts sich über die Abbranddauer ausdehnen und auseinander fallen. Dadurch werden kleinste Brennstoffteile mit dem Abgasstrom mitgezogen. Dies bedingt auch einen etwas anderen Abbrandverlauf. Sie erreichen ihre höchsten Temperaturen gegen Ende des flammenden Abbrandes. Die Wärmeleistung der Briketts ist leicht höher als die des Holzes.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass sich Einflüsse wie die Nachlegemasse und die Brennstoffgröße aus der Größe des Brennraumes ergeben. Meist muss ein optimaler Betriebspunkt gefunden werden. Zu viel Luft, also zu hohe  $\lambda$ -Werte, führen zu einer Abkühlung der Flamme und einer geringeren Verbrennungstemperatur. Der gleiche Fall liegt vor, wenn die  $\lambda$ -Werte zu niedrig sind. Die Folge von zu geringen Verbrennungstemperaturen und zu geringen  $\lambda$ -Werte ist eine unvollständige Verbrennung. Somit steigen die Emissionswerte der Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxids. Daraus kann auch der optimale Nachlegezeitpunkt hergeleitet werden. Dieser ist jedoch abhängig von der Messdauer und des erwünschten Glutbettes. Ein großes Glutbett sorgt für eine große Wärmeleistung, hat aber bei einem kleinen Brennraum eine verminderte Luftzuführung zur Folge. Im Gegensatz dazu können zu hohe Temperaturen wegen den hohen Abgastemperaturen einen leichten Wirkungsgrad- und Wärmeverlust nach sich ziehen [9] [10] [11].



# 5 Messtechnik

#### 5.1 Wirkungsgradmessung

Die Wirkungsgradmessung dient der Ermittlung des thermischen Wirkungsgrades und wird mit dem sogenannten Water Boiling Test (WBT) durchgeführt. Dieser ist ein standardisierter Test, der auf den verschiedensten Kochprozessen unterschiedlicher Ofenarten beruht. Dabei werden zusätzlich aussagekräftige Indikatoren wie Brenngeschwindigkeit (Feuerrate), eingebrachte Leistung (Firepower FP) und spezifischer Brennstoffverbrauch errechnet, die der Vergleichbarkeit der Tests mit unterschiedlichen Durchführungsvariationen dienen.

Allgemein besteht der WBT aus drei aufeinanderfolgenden Phasen. Die ersten beiden Phasen bilden den Hochleistungstest (High Power), in denen jeweils eine gleiche vorher bestimmte Menge an Wasser mit möglichst wenig Brennstoff zum Kochen gebracht wird. Sie unterscheiden sich in den jeweiligen Startbedingungen. In der ersten Phase wird ein sogenannter Kaltstart (Cold-start) vorgenommen, bei dem die Ofentemperatur der Umgebungstemperatur entspricht. Die zweite Phase folgt unmittelbar hinter der ersten, wodurch die Ofentemperatur weitaus höher ist (Hot-Durch die beiden unterschiedlichen Anfangsbedingungen kann der start). Leistungsunterschied beider Phasen entnommen werden. Bei der dritten Phase handelt es sich um einen Niedrigleistungstest (Low Power). Er simuliert einen die mit ebenfalls minimalem Garprozess, bei dem Wassertemperatur Brennstoffverbrauch knapp unter dem Siedepunkt gehalten wird [12].

Jede der drei Phasen enthält eine Reihe von Messungen einiger Zustandsgrößen, die in der unten stehenden Tabelle 5-1 aufgelistet sind.



Pj	Gewicht des leeren Topfes j		
К	Gewicht der leeren Kohleschüssel		
Cw	Wärmekapazität des Wassers (4,186 kJ/kg°C)		
Δh	Enthalpie des Wassers (2260 kJ/kg)		
P <sub>jA</sub>	Anfangsgewicht wassergefüllter Topf		
P <sub>jE</sub>	Endgewicht wassergefüllter Topf		
T <sub>jA</sub>	Anfangstemperatur		
T <sub>jE</sub>	Endtemperatur		
t <sub>A</sub>	Anfangszeit		
t <sub>E</sub>	Endzeit		
m <sub>A</sub>	Anfangsholzmenge		
m <sub>E</sub>	Übrige Holzmenge nach Test		
В	Gewicht kohlegefüllter Kohleschüssel		
T <sub>U</sub>	Umgebungstemperatur		

Tabelle	5-1:	Ausgangsgrößen
lasono	• • •	/ laogangogi olion

Um in Erfahrung zu bringen, ab wann das Wasser kocht, wird allgemein der lokale Siedepunkt des Wassers in Abhängigkeit der vor Ort vorliegenden Höhe d über dem Meeresspiegel errechnet. Der normalen Siedepunkt des Wasser liegt bei 100°C bei Atmosphärendruck auf Meeresspiegelhöhe.

$$\Gamma_{\rm s} = \left(100 - \frac{\rm d}{300}\right)^{\circ} \rm C \tag{5.1}$$

Zur Berechnung der aussagekräftigen Indikatoren ist die Ermittlung einiger relevanter Größen von Bedeutung, die sich anhand der gemessenen Zustandsgrößen herleiten lassen. So wird der Heizwert z. B. um den Wassergehalt f des Brennstoffes korrigiert, um den effektiven Heizwert H<sub>eff</sub> zu erhalten.

$$H_{eff} = H \cdot (1 - f) - f \cdot [(T_s - T_U) \cdot c_w + \Delta h]$$
(5.2)

Dabei stellt  $\Delta h$  die Verdampfungsenthalpie dar, die benötigt wird um 1 kg Wasser zu verdampfen. Der Wassergehalt f steht mit dem Feuchtigkeitsgehalt u des Brennstoffs über Gleichung (5.3) in Verbindung.



$$f = \frac{u}{1+u}$$
(5.3)

Allgemein lässt sich der Wassergehalt f durch Division der im Holz enthaltenen Wassermasse und der Gesamtmasse des feuchten Holzes errechnen. Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Holzfeuchtigkeit ist in Abbildung 5-1 dargestellt.



Abbildung 5-1: Zusammenhang Wassergehalt und Feuchtigkeitsgehalt

Durch einfache Subtraktionen lassen sich die verbrauchte Menge Brennstoff  $m_B$ , sowie die Menge der verbrannten Kohlestücke  $\Delta k$  ermitteln.

$$m_{\rm B} = m_{\rm A} - m_{\rm E} \tag{5.4}$$

$$\Delta k = B - K \tag{5.5}$$

Die verbrauchte Menge an Brennstoff wird noch auf die äquivalente Menge an rein trockenem verbrauchtem Brennstoff  $m_H$  korrigiert.

$$m_{\rm H} = m_{\rm B} \cdot [1 - (1, 12 \cdot f)] - 1, 5 \cdot \Delta k \tag{5.6}$$



Die Gleichung (5.6) enthält dabei zwei Faktoren, zum einen den Faktor 1-(1,12·f), der die Menge des Brennstoffes um die Menge verringert, die benötigt wird, um die Feuchtigkeit f aus dem Brennstoff zu lösen und zu verdampfen. Zum anderen den Faktor  $1,5 \cdot \Delta k$ , der die Energie beinhaltet, der in unverbrannter Kohle noch enthalten ist [12].

Das insgesamt verdampfte Wasser  $w_v$  lässt sich durch Subtraktion der Anfangs- und Endgewichte der Töpfe darstellen. Es ist zu beachten, dass bei dem Test zwei Töpfe berücksichtigt werden.

$$w_{v} = \sum_{j=1}^{2} (P_{jA} - P_{jE})$$
(5.7)

Zusätzlich lässt sich noch das effektive Gewicht des übrigen kochenden Wassers berechnen.

$$w_{r} = \sum_{j=1}^{2} \left[ \left( P_{jE} - P_{j} \right) \cdot \left( \frac{T_{jE} - T_{jA}}{T_{S} - T_{A}} \right) \right]$$
(5.8)

Dabei ist zu beachten, dass nur das Wasser des ersten Topfes kocht. Vom zweiten Topf wird nur ein kleiner Anteil als kochend angenommen. Da die Temperatur des Wassers im Topf als relativ gleichverteilt angenommen wird, wird ein prozentualer Anteil des Wassers eingerechnet, der abhängig von der erreichten Temperatur ist. Dies geschieht durch den folgenden Faktor:

$$\frac{T_{jE} - T_{jA}}{T_S - T_A}$$
(5.9)

Dieser Faktor spiegelt den Anteil der Wärmeenergie wider, der von der erforderlichen Wärmeenergie zum Kochen des ersten Topfes absorbiert wird. Zusammenfassend kann geurteilt werden, dass die erforderliche Wärmeenergie Q, die nötig ist, um Wasser zum Kochen zu bringen, eine lineare Funktion der Temperaturänderung  $\Delta T$  ist.

Des Weiteren ist die Zeit  $\Delta t$  ein miteinzuberechnender Faktor, um den es dauert, bis das Wasser des ersten Topfes kocht.



$$\Delta t = t_E - t_A \tag{5.10}$$

Auch die Zeit lässt sich durch eine Temperaturkorrektur verbessern. Dies berücksichtigt eine durchschnittliche Temperaturerhöhung von 75 °C während des Kochens. Dadurch erleichtert sich die Vergleichbarkeit der Kochzeiten verschiedener Tests. Dies wird vollzogen, da nicht bei jeder Versuchsdurchführung die gleiche Ausgangstemperatur vorliegt. Somit folgt auch eine größere Temperaturerhöhung, was zu einer längeren Kochzeit führt. Die korrigierte Kochzeit  $\Delta t^{T}$  wird wie folgt ermittelt:

$$\Delta t^{\rm T} = (t_{\rm E} - t_{\rm A}) \cdot \frac{75}{(T_{\rm E} - T_{\rm A})}$$
(5.11)

Mit diesen ganzen ermittelbaren Größen lassen sich verbrennungsspezifische Parameter errechnen, allen voran der thermische Wirkungsgrad  $\eta_{th}$ . Er gibt das Verhältnis der im Wasser steckenden Wärme und des verdampften Wassers zu der aufgebrachten Energie durch den Verbrennungsvorgang des Brennstoffes an [12].

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\left[c_{\text{W}} \cdot \sum_{j=1}^{2} \left(P_{j\text{A}} - P_{j}\right) \cdot \left(T_{j\text{E}} - T_{j\text{A}}\right)\right] + \Delta h \cdot w_{v}}{m_{\text{H}} \cdot \text{H}}$$
(5.12)

Die Feuerrate  $r_b$  gibt die während des Kochvorgangs durchschnittlich verbrauchte Brennstoffmenge pro Minute wider.

$$r_{\rm b} = \frac{m_{\rm H}}{\Delta t} \tag{5.13}$$

Der spezifische Brennstoffverbrauch SC errechnet sich aus dem Nettoverbrauch von trockenem Brennstoff, der aufgewendet werden muss, um ein Liter Wasser zum Kochen zu bringen bzw. bei der dritten Phase, um das Wasser knapp unter dem Siedepunkt zu halten.

$$SC = \frac{m_{H}}{\left(\sum_{j=1}^{2} \left[ \left(P_{jE} - P_{j}\right) \cdot \left(\frac{T_{jE} - T_{jA}}{T_{S} - T_{A}}\right) \right] \right)}$$
(5.14)



Auch der spezifische Brennstoffverbrauch lässt sich zur besseren Vergleichbarkeit einer Temperaturkorrektur unterziehen.

$$SC^{T} = SC \cdot \frac{75}{(T_{E} - T_{A})}$$
(5.15)

Letztlich kann mit Hilfe der Feuerkraft FP eine Aussage über die eingebrachte Leistung getroffen werden. Sie zeichnet das Verhältnis von verbrauchter Brennstoffenergie über die Zeitdauer auf.

$$FP = \frac{m_{\rm H} \cdot H}{\Delta t}$$
(5.16)

Die Rechenoperationen der Gleichungen (5.4) bis (5.16) werden für jede der drei Phasen durchgeführt, mit Ausnahme der temperaturkorrigierten Parameter aus Gleichung (5.11) und (5.14), die bei der dritten Phase (Gartest) nicht berücksichtigt werden. Dafür lässt sich nach der dritten Phase noch das sogenannte Turn-down Verhältnis herleiten. Es stellt ein Verhältnis zwischen dem High Power und dem Low Power Test dar, bei dem die jeweiligen eingebrachten Leistungen verglichen werden [12].

$$TDR = \frac{FP_{\rm H}}{FP_{\rm G}}$$
(5.17)

#### 5.2 Temperaturmessung

Zur praktischen Temperaturmessung stehen mehrere Möglichkeiten zur Wahl:

- Flüssigkeitsthermometer
- Widerstandsthermometer
- Strahlungsthermometer
- Thermoelemente

Messtechnik



Flüssigkeitsthermometer sind wegen ihrer Quecksilberfüllung hauptsächlich im Bereich bis etwa 300 °C einzusetzen.

Widerstandsthermometer eignen sich wegen dem temperaturabhängigen Widerstand einiger Metalle für einen großen Temperaturbereich. Da jedoch auch die Widerstände, die durch elastische Spannungen hervorgerufen werden, einen Einfluss auf das Ergebnis haben, kommt es zu geringen Messungenauigkeiten im Bereich höherer Temperaturen. Wegen seines relativ hohen Schmelzpunktes und der Unempfindlichkeit gegen chemische Einwirkungen wird meistens Platin als Ausgangsmaterial verwendet. In manchen Fällen wird auch Nickel verwendet. Das einfachste Verfahren dieser Temperaturmessung beruht auf der Wheatstoneschen Brücke. Diese besteht aus vier Widerständen, dem Widerstand des Thermometers wa, den zwei Vergleichswiderständen w<sub>b</sub>, w<sub>c</sub> und einem regelbaren Widerstand w<sub>d</sub>. Außerdem sitzen der Brücke noch eine Stromquelle (e), ein Vorschaltwiderstand  $w_{v}$ sowie ein Nullinstrument (G) bei (vgl. Abbildung 5-2). Ändert sich nun die am Sensor anliegende Temperatur, so schlägt der Zeiger des Nullinstrumentes aus. Wird der regelbare Widerstand jetzt so eingestellt, dass dieser Ausschlag wieder verschwindet, so lässt sich der Widerstand des Thermometers über folgende Beziehung errechnen [6]:

$$\frac{w_a}{w_d} = \frac{w_b}{w_c} \tag{5.18}$$





Abbildung 5-2: Wheatstonesche Brücke [6]

Strahlungsthermometer sind sehr gut für die Messung von Oberflächen geeignet, da sie berührungsfrei fungieren. Sie sind in einem breiten Temperaturbereich von -100 °C bis mehrere 1000 °C einsetzbar. Die Funktionalität der Strahlungsthermometer liegt in der elektromagnetischen Strahlung, die ein Körper abwirft. Die Stärke der Strahlung ist proportional zu der vierten Potenz seiner Temperatur (vgl. Gleichung (3.19)).

Die Nutzung von Thermoelementen hat gegenüber der Nutzung von Widerstandsthermometern den Vorteil, dass die Anbringung mehrerer Messstellen mit weniger Aufwand und Kosten verbunden ist. Thermoelemente können für einen breiten Temperaturbereich angewendet werden und sind je nach Ausgangsmetall bis zu einer Temperatur von 2600 °C einsetzbar (vgl. Tabelle 5-2). Weitere Vorteile der Thermoelemente sind die schnelle Temperaturerfassung, sowie eine punktgenaue Messung.



Metallpaare	Verwendbar bis °C	thermœlektrische Kraft in Millivolt je 100 °C
Kupfer-Konstantan	400	4
Manganin-Konstantan	700	4
Eisen-Konstantan	800	5
Chromnickel-Konstantan	1000	4-6
Chromnickel-Nickel	1100	4
Platinrhodium-Palladiumgold	1200	4
Platinrhodium-Platin (90% Pt, 10% Rh)	1500	1
Iridium-Iridiumrhodium (40% Ir, 60% Rh)	2000	0,5
Iridium-Iridiumrhodium (90% Ir, 10% Rh)	2300	0,5
Wolfram-Wolframmolybdän (75% W, 25% Mo	) 2600	0,3

#### Tabelle 5-2: Verschiedene Thermoelemente und Anwendungstemperaturen [6]

Das Messprinzip der Thermoelemente beruht auf der unterschiedlichen Spannung zweier Metalle unterschiedlicher Temperaturen. Zwei zusammengelötete Drähte aus verschiedenen Metallen bilden einen Stromkreis. Sofern die beiden Lötstellen die gleiche Temperatur besitzen, entsteht keine Spannungsdifferenz. Sobald sich eine Temperaturdifferenz zwischen beiden entwickelt, wird auch eine Spannung ausgegeben (vgl. Abbildung 5-3). Die Temperaturdifferenz der Lötstellen ist proportional zu der ausgegebenen Thermospannung. Wird nun eine Lötstelle mit einer Bezugstemperatur von 0 °C oder Umgebungstemperatur versehen, so kann mit Hilfe der entstandenen Thermospannung ein Rückschluss auf die Temperatur an der zweiten Lötstelle getroffen werden [2] [6].



Abbildung 5-3: Wirkprinzip der Thermoelemente [2]



## 5.3 Abgasmessung

Die Abgasmessung erfolgt an einer Abgasmessanlage (AMA). In ihr sind verschiedene Module eingegliedert, die durch verschiedenste Messmethoden eine Abgasbestimmung ermöglichen. Ebenfalls zur Abgasmessung gehört eine der Abgasanlage vorgestellte Einheit, das sog. Sample Selection Module (SSM).

Das Abgas wird von der Entnahmestelle durch das Sample Selection Module hin zur Abgasmessanlage transportiert. Das SSM besteht aus den grundlegenden Elementen wie dem Eingangs- und dem Ausgangsblock der Leitungen, der Isolierung, dem Gehäuse und dem Filterblock. Die Funktionen des SSM belaufen sich hauptsächlich Filterung des Messgases und der Auswahl der verschiedenen auf die Entnahmestellen. Durch beheizte Umschaltungen kann dafür gesorgt werden, dass die Gasleitungen und die AMA frei von Verschmutzungen bleiben. Die Hauptaufgabe des SSM ist die Filterung des Messgases. Der Filterblock besteht aus einem Filterhalter und einem Filterelement. Das Filterelement reinigt das Abgas von Partikelemissionen, wobei sogar Partikel entfernt werden, die kleiner sind als die Porengröße des Filters. Ein solcher Filter wird Tiefenfilter genannt. In Abbildung 5-4 ist der Filterhalter (1), die Isolierung (2), das Filterelement (3) und die Klemmmutter (4) des Hauptfilters zu erkennen [13].



Abbildung 5-4: Hauptfilterelement der AMA [13]



Die Abgasmessanlage ist modular aufgebaut und besteht aus mehreren Einheiten. Die wichtigsten Funktionsteile der AMA werden nachfolgend aufgezählt [14]:

- BFU (Bench Fan Unit) Temperaturregelung (1)
- > CWU (Cable and Wiring Unit) Zuleitungskanal (2)
- > PDU (Power Distribution Unit) Energieverteilereinheit (6)
- > GPU (Gas Preperation Unit) Messgasaufbereitung (7)
- SGU (Span Gas Unit) Kalgaseinheit (4)
- > AVU (Analyzer Valve Unit) Analysatorventileinheit (3)
- Mehrere Analysatoren
- > MSR-Rechner (Messen-Steuern-Regeln) (5)
- > BCU (Bench Control Unit) Steuereinheit

In Abbildung 5-5 ist die Abgasmessanlage mit einigen der oben genannten Komponenten dargestellt.



Abbildung 5-5: Die AMA mit einigen Modulen [14]



Die BFU regelt die Temperatur für beheizte Leitungen der AMA. Die CWU bündelt die Leitungen für die Versorgungsspannungen und die Datentransfers. Die PDU führt den entsprechenden Komponenten wie GPU, Rechner oder Ventilen die nötige Energie zu.

Die GPU ist die erste Anlaufstelle des eintreffenden Abgases. In der GPU werden alle Mittel zur Messgasaufbereitung vorgenommen, u. a. wird die im Abgas enthaltene Feuchtigkeit auskondensiert. In ihr ist auch die Messgaspumpe enthalten, die die Saugleistung aufbringt, um das Abgas anzusaugen. Damit die Saugleistung der Pumpe auf jeden Fall ausreichend ist, soll die Länge der Ansaugstrecke 15m nicht übersteigen. Denn durch eine längere Stecke steigen die Fließwiderstände innerhalb der Leitung. Anschließend gelangt das Abgas über die AVU zu den verschiedensten Analysatoren. Die AVU stellt die richtige Verteilung aller Gase und die Versorgung der Analysatoren sicher. Außerdem achtet die AVU auf die Druckregelung, die am Ende der letzten Zuleitung eines Analysators liegt. Dadurch wird konstanter Druck und einfaches Spülen der Gasleitungen sichergestellt. Die SGU stellt den Analysatoren die Betriebs- und Kalibriergase zur Verfügung. Diese gelangen ebenfalls über die AVU zu den Analysatoren. In den diesen erfolgt die Messwertbestimmung des Abgases. Die daraus resultierenden Messwerte werden an den MSR-Rechner weitergegeben. Nach den Analysatoren wird das Messgas an die Absaugung der AMA weitergeleitet. Der MSR-Rechner verarbeitet die Ergebnisse und ermittelt dadurch die physikalisch richtigen Messdaten. Sie kommuniziert mit der BCU und gibt dieser die Daten weiter. Abbildung 5-6 zeigt einen schematischen Fließplan des Abgases in der AMA. An den Punkten (1) und (2) werden die Kalibriergase eingeleitet. Punkt (3) zeigt die Absaugung des Abgases.





Abbildung 5-6: Fließplan der AMA [14]

Das Herzstück der AMA sind die verschiedenen Analysatoren. Meist gibt es vier Stück [14].

- FID-Analysator (Flammenionisations-Detektor)
- CLD-Analysator (Chemiluminiszenz-Detektor)
- IRD-Analysator (Infrarot-Detektor)
- PMD-Analysator (Paramagnetischer Detektor)

Der FID-Analysator eignet sich für Kohlenwasserstoffe wie beispielsweise Methan. Das Messprinzip des FID ist, dass sich organisch gebundene Kohlenstoffatome an einer Gasflamme aus Wasserstoff ionisieren lassen. Durch das ionisierte Messgas kann zwischen zwei Elektroden mit unterschiedlichen Potenzialdifferenzen ein elektrischer Stromfluss herbeigeführt werden. Die Stromstärke des Stromkreises ist dabei linear zu der Anzahl der Kohlenstoffatome im ionisierten Messgas. Die Messung erfolgt jedoch als Relativmessung, d. h. der Messwert muss mit einer bekannten Stromstärke verglichen werden und dadurch ein Differenzwert gebildet werden.

Mit Hilfe des CLD-Analysators können die Stickoxide des Abgases bestimmt werden. Das Messprinzip beruht auf der Oxidation des instabilen N0 mit Ozon  $(0_3)$  zu N0<sub>2</sub>. Das hierbei entstehende Licht, die sog. Chemilumineszenzstrahlung wird über einen



Detektor aufgefangen. Die Strahlung ist bei Ozonüberschuss proportional zu der N0-Konzentration im Abgas. Der Detektor oder besser Photomultiplier erzeugt elektrischen Strom, dessen Stärke abhängig von der Stärke des einfallenden Lichtes ist. Um auch  $NO_2$  zu erfassen, wird dies in einem vorherigen Schritt in einem Konverter zu N0 reduziert.

$$NO + O_3 \rightarrow NO_2^* + O_2$$

$$NO_2^* \rightarrow NO_2 + \nu^*$$
(5.19)

Die Gleichung (5.19) zeigt auf, wie das  $NO_2$  entsteht und unter Abgabe elektromagnetischer Strahlung  $v^*$  in seinen Endzustand zerfällt.

Mit dem IRD-Analysator wird die Konzentration von CO, CO<sub>2</sub> oder auch Wasser bestimmt. Bei dem Messverfahren wird Infrarotstrahlung durch das Abgas geführt. Dadurch entstehen unterschiedliche Absorbtionsspektren, die abhängig von den Molekülen der verschiedenen Gasarten sind. So kann je nach absorbiertem Wellenlängenbereich die entsprechende Gasart ermittelt werden. Die Absorptionsstärke stellt dabei die Konzentration des Gases dar. Hinter dem Messgas trifft die Infrarotstrahlung auf einen Detektor, der diese in ein elektrisches Signal umwandelt. Der Detektor muss mit dem gleichen Gas gefüllt sein wie das zu messende Gas. Der Wert des elektrischen Signals wird mit einem Referenzwert verrechnet und die Differenz daraus steht als Maß für die Konzentration des Gases. Der Referenzwert stellt ein Nullsignal dar, das durch eine Messung mit einem neutralen Füllgas durchgeführt wird.

Der PMD-Analysator wird vorwiegend zur Konzentrationbestimmung von Sauerstoff  $(0_2)$  benutzt. Zur Messung wird die paramagnetische Eigenschaft des Sauerstoffes genutzt. Ein drehbar gelagerter Messkörper erfährt in einem sauerstoffdurchströmten Magnetfeld eine Auslenkung. Durch Kompensation der Auslenkung mittels eines elektromagnetischen Feldes lässt sich die Kraft kompensieren, die der Sauerstoff auf den Messkörper ausgewirkt hat. Die zur Kompensation aufzubringende elektrische Stromstärke ist proportional zu der Sauerstoffkonzentration [14].



## 5.4 Schwärzungszahl

Die Schwärzungszahl ist ein Indikator für den Rußgehalt des Abgases. Das Schwärzungszahlmessgerät bilden zwei zusammengehörende Teile, das Probeentnahmesystem und das elektrische Steuergerät. Im Probeentnahmesystem ist das Pneumatiksteuerungsmodul integriert, das sämtliche Bewegungsabläufe wie Papiertransport oder Ventil- und Drosseleinstellungen steuert (vgl. Abbildung 5-7). Das Steuergerät mit seinem acht Bit Mikroprozessor ist das Bedienelement des gesamten Messgerätes. Allgemein enthält das Messgerät eine elektronisch gesteuerte Kalibriereinrichtung und Rußzahlbestimmung. Wegen dem automatischen Filterpapiertransport kann eine Messung per Knopfdruck vollkommen automatisiert vorgenommen werden.

Das Wirkprinzip des Messgerätes beruht auf der fotoelektrischen Messung von Filterpapier. Dabei wird eine definierte Menge des Abgases über einen Saugzylinder angesaugt und durch einen Papierfilter mit bekannter Oberfläche gedrückt. Das Saugvolumen beläuft sich auf etwa 1000 cm<sup>3</sup>. Dadurch werden die im Abgas vorhandenen Rußpartikel auf dem Filterpapier abgelagert und diese verändert seine Schwärzung. Anschließend wird von einem Reflexionsfotometer die Schwärzung analysiert und mit der sog. "Bosch-Schwärzungsskala" verglichen. Diese Skala beinhaltet Werte zwischen 0 und 10, wobei 0 eine 100 %-ige Reflexion und 10 eine 0 %-ige Reflexion bedeutet. Die Werte zwischen diesen beiden verteilen sich linear [15].







# 6 Versuchsaufbau

Die Versuchsdurchführung soll zwei verschiedenen Varianten einer an Kleinfeuerungsanlage aus Lehm vorgenommen werden. Der Aufbau der zwei Lehmöfen erfolgt aus Platzgründen und aufgrund des Abgasausstoßes im Freien. Um einen einigermaßen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten, wird ein windgeschützter Platz gewählt, der mit einem provisorischen Dach gegen die Wettereinflüsse geschützt ist. Daher wurde ein freier Stellplatz an der TU Kaiserslautern zwischen einem Hang, einer Garage und dem Versuchsgebäude des Lehrstuhls für Verbrennungskraftmaschinen gewählt. Die Nähe zum Versuchsgebäude war wichtig, da dort ein Teil der erforderlichen Messgeräte untergebracht ist.

## 6.1 Aufbau der Öfen

Bei den zwei aufgebauten Varianten handelt es sich um kleine Ofenanlagen aus Lehmsteinen, wie sie in verschiedenen Teilen der Welt gebaut werden. Die Ofentypen sind je nach Land an die entsprechenden Kochgewohnheiten angepasst. Zum einen wird der sogenannte Nepal-Ofen aufgebaut, der in Ländern wie Kenia und, wie der Name schon sagt, eben in Nepal gebaut wird. Zum anderen wird daneben ein Ofentyp erstellt, der für die Kochfunktionen in Äthiopien geeignet ist. Beide Öfen werden auf zwei Holzpaletten aufgebaut, die je eine Schicht aus luftdurchströmten Ziegelsteinplatten und feuerfesten Steinen erhalten. Dies dient der Wärmeisolierung der Paletten, die die Öfen von unten gegen Wasser schützen (vgl. Abbildung 6-1).





Abbildung 6-1: Stellplatz und Unterbau der Öfen

## 6.1.1 Aufbau Nepal-Ofen

Der Nepal-Ofen ist der kleinere von beiden. Er beinhaltet lediglich einen Feuerraum und zwei Kochstellen. Er wird hauptsächlich aus Lehmsteinen aufgebaut. Nur über dem Durchbruch zwischen erster und zweiter Kochstelle sowie über der Öffnung zum Feuerraum (Gate) sind kleine Eisenstangen zur Stabilisierung montiert. Außerdem erhält das Gate einen Eisenrahmen. Die Abmaße der Baumaterialen ist in Abbildung 6-2 zu erkennen.





Abbildung 6-2: Abmaße der Bauteile des Nepal-Ofens

Insgesamt besteht der Nepal-Ofen aus fünf Schichten Lehmsteinen. Ab der fünften Schicht werden nur noch quadratige, mittig mit einem Loch versehene Lehmsteine zu einem Schornstein aufgestapelt. Diese Funktion übernimmt bei diesem Versuchsobjekt jedoch ein Aluminiumrohr mit einem Durchmesser von 100 mm, da die Herstellung der Schornsteinsteine sehr aufwendig ist. Abbildung 6-3 zeigt den Aufbau des Nepal-Ofens. Dabei ist der Weg des Luftstromes gut zu erkennen.



Abbildung 6-3: Prinzipieller Aufbau Nepal-Ofen



Die Gesamtmaße des Ofens liegen bei  $910 \times 275 \times 410$  mm (Breite x Höhe x Tiefe), dazu kommt noch der Schornstein, sodass die Höhe des Ofens von 275 mm auf etwa 1450 mm ansteigt.

Die zweite Kochstelle liegt eine Etage höher als die erste, sodass der warme Abgasstrom nach oben ziehen kann (vgl. Abbildung 6-4). Der Feuerraum hat eine ungefähre Größe von  $190 \times 180 \times 220$  mm, wobei die beiden hinteren Ecken abgerundet sind. Der Feuerraum besitzt keinen Boden, sodass das Feuer auf den feuerfesten Steinen brennt. Der Durchbruch zur zweiten Kochstelle ist trichterförmig nach oben geneigt und reduziert sich etwa von  $180 \times 90$  mm auf  $120 \times 50$  mm (Breite x Höhe). Von der zweiten Kochstelle zieht der Luftstrom Richtung Schornstein durch einen Gang mit einer Querschnittsfläche von ca.  $60 \times 140$  mm. Dieser fällt leicht nach unten ab, sodass unter der zweiten Kochstelle die Wärme gestaut wird.



Abbildung 6-4: fertiger Nepal-Ofen

Die Kochstellen des Ofens lassen sich jederzeit an verschiedene Kochtöpfe anpassen. Einzige Bedingung ist ein runder Boden sowie eine Mindestgröße, da die Öffnungen der Kochstellen einen Durchmesser von etwa 140 und 175 mm haben (KS1 175 mm, KS2 140 mm).



Um den Abgasabzug besser zu gestalten und auch um das provisorische Dach nicht zu zerstören, wurde der Schornstein in horizontaler Richtung etwas verlängert, um unter dem Dach heraus zu ragen. Damit die isolierende Funktion der Lehmsteine am Schornstein weiterhin gegeben ist, wurde das Aluminiumrohr bis zu der Stelle, wo es unter dem Dach gegen Regen geschützt ist, mit Steinwolle und Aluminiumklebeband isoliert (vgl. Abbildung 6-5).



Abbildung 6-5: Verlängerter und isolierter Schornstein

## 6.1.2 Aufbau Äthiopien-Ofen

Der Äthiopien-Ofen ist der komplexere der beiden Öfen. Er besteht aus zwei Teilen, die an der dritten Kochstelle zusammenlaufen. Der erste Teil besteht, ähnlich wie beim Nepal-Ofen, aus einem Feuerraum und zwei Kochstellen. Der zweite Teil besteht aus



einem großen runden Feuerraum (Injera), der etwa einen Durchmesser von 580 mm hat. Die Höhe beträgt in etwa 190 mm. Die Decke bildet eine ca. 30 mm dicke wärmeleitfähige Platte. Auf dieser Platte wird ebenfalls gekocht bzw. gebacken. Beide Ofenteile laufen unter der dritten Kochstelle zusammen, von wo aus der Luftzug in den Schornstein gelangt. Der Schornstein besteht wie der Ofen selbst aus gemauerten Lehmsteinen. Er ist wegen des großen Feuerraums deutlich größer als der des Nepal-Ofens. Der Feuerraum der ersten Kochstelle ähnelt dem des Nepal-Ofens. Der Äthiopien-Ofen wird aus etwas größeren Lehmsteinen und ohne Eisenstangen gebaut. Die Abmaße der Steine betragen 10" in der Länge, 5" in der Breite und 2,5" in der Höhe.



Abbildung 6-6: Äthiopien-Ofen im Bau

Im Gegensatz zum Nepal-Ofen werden die Lehmsteine hier seitlich aufeinander gesetzt, wodurch nur drei Schichten der Steine benötigt werden. Der Äthiopien-Ofen wird anders als der Nepal-Ofen mit einer Lage Lehmsteine als Boden versehen. Um die thermische Konvektion besser zu gewährleisten, wird die dritte Kochstelle eine Etage höher gebaut (vgl. Abbildung 6-6). Zum Vergleich soll diese Stufe später demontiert werden, daher existieren zwei Übergänge von der dritten Kochstelle zum Schornstein. Der untere Durchgang wird deshalb erstmal mit Steinwolle verschlossen,



sodass der Abgasstrom über den oberen Durchgang zieht. Die Durchgänge sind etwa 180 x 130 mm groß. Im Bild ist auch der Boden des ersten Feuerraumes erkennbar. Die Gesamtabmaße des Ofens belaufen sich auf ungefähr 1450 x 420 x 790 mm. Hierzu kommt noch der Schornstein mit einer Höhe von 1770mm und einer Querschnittsfläche von 300 x 300 mm. Der Ausgang am Schornstein beträgt 165 x 175 mm. Die Größe des Brennraums (Feuerraum 1) unter der ersten Kochstelle wurde mit 230 x 175 x 235 mm vermessen. Der Eingang zum Brennraum misst 230 x 130 mm. Der Durchbruch zur zweiten Kochstelle liegt bei 150 x 120 mm. Die Räume unter Kochstelle 2 und 3 haben in etwa die gleichen Maßen wie der erste Feuerraum. Die Verbindung zwischen beiden beläuft sich auf 100 x 180 mm. In Abbildung 6-7 ist der Ofen in fertig gebauter Ausführung zu sehen, lediglich die Montage der Injera-Platte ist noch nicht vollzogen.



Abbildung 6-7: Fertiger Äthiopien-Ofen ohne Injera-Platte

Der Eingang der sogenannten Injera misst in etwa 240 x 140 mm. Der Durchbruch zur Kochstelle 3 ist mit 160 x 130 mm etwas kleiner. Inklusive der Außensteine beruht der Gesamtdurchmesser der Injera (Feuerraum 2) auf ca. 700 mm. Abbildung 6-8 zeigt den Ofen mit verbauter Injera-Platte.





Abbildung 6-8: Äthiopien-Ofen mit Injera-Platte

Im Äthiopien-Ofen sind unter der zweiten und dritten Kochstelle sogenannte Luftführungselemente verbaut, die dazu dienen, dass sich die heiße Luft unter den Kochtöpfen staut (vgl. Abbildung 6-9). Dies soll eine bessere Wärmeabgabe an die Töpfe bewirken. Die Luftführungselemente sind ungefähr im 60° Winkel angestellt. Die Öffnungen der Kochstellen sind identisch mit denen des Nepal-Ofens und ebenfalls für jeden Topf geeignet, sofern diese einen gerundeten Boden mit einem Durchmesser von etwa 160-170 mm aufweisen.



Abbildung 6-9: Luftführungselemente unter der zweiten Kochstelle



Auch beim Äthiopien-Ofen wurde der Schornstein durch ein horizontales Rohr verlängert, um die Abgase unter dem Dach abzuleiten. Der Durchmesser des Rohres lag bei 154 mm, wodurch der eigentliche Ausgangsquerschnitt des Schornsteines geringfügig verkleinert wurde. Auch hier wurde das Rohr bis zum Dachende mit Steinwolle isoliert (vgl. Abbildung 6-5).

#### 6.2 Versuchsaufbau WBT

Der Versuchsaufbau des Water Boiling Tests umfasst lediglich die Bereitstellung mehrerer zur Messung benötigten Utensilien. Zur Messung der relevanten Größen sind unbedingt eine Waage mit einer Genauigkeit von einem Gramm, ein Thermometer, ein Feuchtigkeitsmessgerät und eine Uhr bereitzustellen. Als Thermometer dient ein PT100-Sensor der Firma Greisinger Typ GES 401, der nach dem Widerstandprinzip misst. Dieser besteht aus Platin und besitzt einen Widerstand von 100  $\Omega$  bei einer Bezugstemperatur von 0 °C. Er ist im Temperaturbereich von -50 °C bis 400 °C einsetzbar (vgl. Abbildung 6-10).



Abbildung 6-10: PT100-Sensor mit Anzeigegerät



Die Waage ist von der Firma Mettler Toledo vom Typ ID1 Plus. Das Feuchtigkeitsmessgerät dient der Ermittlung des Feuchtigkeitsgehaltes des Brennstoffs. Es ist von der Firma Brennstuhl vom Typ 1298680 Feuchtigkeits-Detector MD und lässt sich für Messungen zwischen 5-50 % Holzfeuchte einsetzen (vgl. Abbildung 6-11).



Abbildung 6-11: Feuchtigkeitsmessgerät

Außerdem soll pro Kochstelle ein Topf und ausreichend Wasser vorhanden sein. Die Töpfe sind aus dünnwandigem Edelstahlblech. Des Weiteren ist eine Metallschale für die späteren verkohlten Brennstoffreste vorzuweisen. Als Letztes ist dafür zu sorgen, dass genügend Brennstoffmasse, sprich luftgetrocknetes Holz vorhanden ist. Das Holz sollte eine Feuchte unter 20 % haben und in ähnlichen geometrischen Stücken vorliegen. Die Länge der Holzstücke ist aufgrund des Brennraums auf etwa 200 mm beschränkt. Der Durchmesser sollte ca. 20 bis 50 mm betragen.

#### 6.3 Versuchsaufbau Temperatur- und Abgasmessung

Die Temperatur- und Abgasmessungen erfolgen parallel zueinander. Da die Versuchsmessungen draußen vorgenommen werden, ist eine Reihe von Aufbauten



vorzunehmen. Dafür müssen mehrere Verbindungen und Leitungen zwischen der Messtechnik und den Ofenanlagen verlegt werden. Die benötigte Abgasmessanlage muss dabei ihren Standort innerhalb der Versuchshallen beibehalten. Nur die zur Temperaturmessung und Schwärzungszahl benötigten Geräte können transportiert werden. Dafür wird ein Messturm verwendet, in dem die Apparate montiert sind (vgl. Abbildung 6-12).



Abbildung 6-12: Mobiler Messturm

#### 6.3.1 Aufbau Temperatursensoren

Zur Temperaturmessung werden mehrere Temperatursensoren, sog. Thermoelemente an jedem Ofen angebracht. Die Thermoelemente sind alle von der Firma Thermocoax und vom Typ TKI, also aus Nickel-Chrom-Nickel. In Länge und Dicke der Sensoren unterscheiden sie sich etwas je nach Bedarf und Einbauort (vgl. Abbildung 6-13). Sie sind alle für Temperaturen bis etwa 1100 °C ausgelegt. Die meisten Temperaturmessstellen sind in den Lehmsteinen eingearbeitet, außer die zwei



Messstellen an den Abgasentnahmestellen. Diese sind durch gebohrte Löcher und entsprechende Einsätze befestigt.



Abbildung 6-13: Thermoelement

Am Nepal-Ofen werden insgesamt fünf dieser Thermoelemente angebracht (vgl. Abbildung 6-14). Sie messen die Temperatur im Brennraum, also unter der ersten Kochstelle, der zweiten Kochstelle, im Schornsteineintritt, in der Krümmung des Schornsteins und in der dahinter liegenden Entnahmestelle des Abgases.



Abbildung 6-14: Messpunkt im Brennraum unter Kochstell eins im Nepal-Ofen



Im Äthiopien-Ofen werden natürlich aufgrund seiner Größe und der zwei Brennräume mehr Thermoelemente eingesetzt. Insgesamt werden elf Stück verbaut. Davon sind allein fünf Stück im Brennraum der Injera befestigt, je einer in der Mitte, am Gate, am Durchbruch zur Kochstelle 3 und je einer in den dazwischen liegenden Außenbereichen. Des Weiteren ist je ein Element unter den drei Kochstellen, dem Schornsteineintritt, der Schornsteinkrümmung sowie der Entnahmestelle des Abgases angebracht (vgl. Abbildung 6-15).



Abbildung 6-15: Temperaturmessstellen Äthiopien-Ofen

Je nach verwendetem Brennraum werden die Thermoelemente mit einer Auswerteeinheit verbunden, die dem Auslesen der gemessenen Spannung dient. In ihr erfolgt der Abgleich mit der Bezugsspannung bei der Bezugstemperatur, wodurch sich ein Temperaturwert ausgeben lässt. Die Messdatenaufzeichnung und Speicherung der Temperaturwerte erfolgt mittels eines LabView-Programms. Eine analoge Messbox dient der Digitalisierung der Temperaturwerte. Dazu ist sie mit einem Rechner verbunden. Das LabView-Programm schreibt pro Sekunde eine Messung aller Temperatursensoren mit. Alle benötigten Messgeräte sind in dem mobilen Messturm integriert (vgl. Abbildung 6-12)

## 6.3.2 Aufbau Abgasmessung

Zur Abgasmessung werden Entnahmestellen am horizontalen Metallrohr des Schornsteins eingearbeitet. Diese befinden sich unmittelbar hinter der Schnittstelle des



vertikalen und horizontalen Schornsteinrohres. Sie befinden sich somit fast genau an den Stellen, an der die Abgase bei den Öfen in die Atmosphäre entweichen. An diesen Entnahmestellen wird eine Heizleitung befestigt, über die das Abgas in die Abgasmessanlage angesaugt wird (vgl. Abbildung 6-16). Die Abgasmessanlage ist von der Firma AVL Emission Test Systems GmbH vom Typ AMA i60 R1-EGR.



Abbildung 6-16: Anschluss Heizschlauch mit Filter an der Entnahmestelle

Die Heizleitung wird auf etwa 180 °C geheizt und sorgt dafür, dass das Abgas nicht kondensiert. Die Heizleitung hat ungefähr eine Länge von 30 m. Dies ist leider unvermeidbar und überschreitet die eigentlich zulässige Heizlängenleitung von 15 m deutlich (vgl. Kapitel 5.3). Zwischen Heizleitung und Schornstein ist außerdem ein zusätzlicher Filter angebracht, der verhindern soll, dass zu große Partikel in das vorgeschaltete Sample Selection Module der AMA eingezogen werden (vgl. Abbildung 6-17).





Abbildung 6-17: Offener Filter mit innenliegendem Filterpapier

Die von der AMA gemessenen Werte werden genau wie die Temperaturwerte mit dem zuvor genannten LabView-Programm aufgezeichnet. Auch hier wird jeder Messwert sekündlich mitgeschrieben. Die Übertragung der Messwerte von der AMA zum Rechner wird mit Hilfe einer LAN-Verbindung sichergestellt.

#### 6.3.3 Aufbau Messung Schwärzungszahl

Für die Messung der Schwärzungszahl muss ebenfalls an jedem Schornstein eine Entnahmestelle angebracht werden. Diese wird in gleicher Position wie die Abgasmessstelle am horizontalen Schornsteinrohr montiert. Im Gegensatz zur AMA wird hier das Abgas gegen die Strömungsrichtung abgesaugt. An dieser Stelle wird das Abgas über einen Schlauch mit einem Durchmesser von etwa 5 mm zum Probeentnahmesystem des Messgerätes abgesaugt. Das Messgerät ist von der Firma Pierburg vom Typ Dieselrauch Messgerät PR-1 (vgl. Abbildung 6-18). Das Messgerät ist in den mobilen Messturm eingesetzt und lässt sich somit leicht transportieren. Zusätzlich wird das Entnahmegerät über einen Luftdruckschlauch mit der Luftdruckversorgungsleitung des Gebäudes verbunden. Das Entnahmegerät benötigt


einen Luftdruck von etwa 5 bar, der über einen integrierten Luftdruckminderer sichergestellt wird.



Abbildung 6-18: Schwärzungszahlmessgerät

Die Ausgabe des Messergebnisses erfolgt über eine digitale Anzeige. Die Werte müssen daher von Hand notiert werden und können nicht über das LabView Programm mitgeschrieben und gespeichert werden.

#### 6.4 Aufbau Vergleichstest

Um einen ungefähren Vergleich bezüglich der verbrauchten Brennstoffmenge zu erzielen, werden zwei Vergleichstests aufgebaut. Ein Test beinhaltet den Vergleich zwischen dem Nepal-Ofen und dem gleichen Kochvorgang über offenem Feuer. Ebenso soll der zweite Test ein Vergleich zwischen der Injera-Platte des Äthiopien-Ofens und dem selbigen Koch- bzw. Backvorgang über offenem Feuer erzielen. Beide Vergleichsaufbauten werden unter gleichen Randbedingungen abgehalten, so liegt die gleiche Höhe des Kochtopfes bzw. der Injera-Platte und dem Boden vor. Außerdem wird der Boden mit Lehmsteinen ausgelegt, sodass nur der Unterschied zwischen den offen Seitenwänden und dem Ofengemäuer besteht. Der Topf bzw. die Platte werden jeweils an drei Stellen auf Backsteinen aufgesetzt (vgl. Abbildung 6-19). Zur Temperaturmessung des Feuerraumes wird ein Thermoelement bei jedem Versuch im Feuerraum angebracht. Zum Schutz vor Windeinflüssen wird in geringer Entfernung der Feuerstellen ein Windschutz errichtet.





Abbildung 6-19: Prinzip der Vergleichstests



# 7 Versuchsvorbereitung und –durchführung

### 7.1 Wirkungsgradmessung

Eine Wirkungsgradmessung umfasst drei aufeinander folgende Versuchsdurchführungen. Vor dem Versuchsbeginn werden einige Ausgangsparameter wie das Leergewicht der Töpfe und der Kohleschale, die Feuchtigkeit des Brennholzes sowie die Umgebungstemperatur der Luft gemessen. Vor und nach jedem der drei Versuchsphasen werden folgende Größen gemessen:

- Gewicht jedes einzelnen Topfes mit Wasser.
- Temperatur des Wassers jedes Topfes.
- Bereitgelegte / übrige Holzmenge.
- Gewicht der Kohlestücke nach dem Versuchsdurchgang.
- Anfangs- und Endzeitpunkt des Versuchsdurchgangs.

Eine Versuchsphase beginnt mit der Zündung des Brennstoffes und endet mit den Anforderungen der jeweiligen Versuchsphase. Bei den ersten beiden Phasen ist dies mit dem Kochen des Wassers und in der dritten Phase mit der Beendigung der Garzeit von 45 min vollzogen. Die Anforderungen beziehen sich natürlich nur auf den ersten Topf des Ofens, der direkt über dem Feuerraum sitzt. Allgemein laufen die ersten beiden Phasen identisch ab. Hierzu wird jedes Mal Wasser, das ungefähr Umgebungstemperatur besitzt, zum Kochen gebracht (Erreichen des lokalen Siedepunktes). Der lokale Siedepunkt lässt sich mit der Höhe des Versuchsstandortes über dem Meeresspiegel nach Gleichung (5.1) ermitteln. Die Höhe des Versuchsstandortes liegt bei etwa 270 m ü. NN. Die Wassermenge in jedem Topf ist in den ersten beiden Versuchsphasen relativ gleich. Sobald das Wasser kocht, endet die Phase. Nach der zweiten Phase ändert sich die Ausgangssituation ein wenig. Da im dritten Durchgang eine Wassertemperatur von etwa drei bis maximal sechs Grad unter dem lokalen Siedepunkt gehalten werden muss, wird kein neues Wasser verwendet. Es wird das kochende Wasser aus der zweiten Versuchsphase wieder verwendet. Um so wenig Zeit wie möglich zu verlieren, wird auch darauf verzichtet, die Kohlereste des



zweiten Versuches zu wiegen, stattdessen wird mit ihnen der dritte Brennvorgang entzündet. Daher entsprechen die Anfangsgrößen wie Wassertemperatur und Gewicht des Topfes denen der Endgrößen des zweiten Versuchsdurchgangs (vgl. Tabelle 7-1).

Tabelle 7-1: vorgaben des WBTS	Tabelle	7-1:	Vorgaben	des	WBTs
--------------------------------	---------	------	----------	-----	------

1. Phase:	Wasser des ersten Topfes zum Kochen bringen
	Verwendung frisches Wasser mit Umgebungstemperatur
	Berücksichtugung der ersten zwei Kochstellen
2. Phase:	Wasser des ersten Topfes zum Kochen bringen
	Verwendung frisches Wasser mit Umgebungstemperatur
	Berücksichtugung der ersten zwei Kochstellen
	Verzicht der auf Messung der Kohlereste
3.Phase:	Wasser des ersten Topfes knapp unter Siedepunkt halten für 45 min
	Verwendung des Wassers aus der zweiten Phase
	Berücksichtugung nur der ersten Kochstelle
	Anfangsmesswerte entsprechen den Endwerten der zweiten Phase

In Abbildung 7-1 (links) ist die Temperaturmessung während des WBT zu erkennen. Auf der rechten Abbildung ist der Feuerraum mit der Flamme sichtbar.



Abbildung 7-1: links: Pt100-Sensoren WBT; rechts: Flamme beim WBT

Das wichtigste Ziel des gesamten Versuchsablaufes besteht darin, so wenig wie möglich, aber trotzdem so viel wie nötig an Brennstoffmasse zu nutzen. Zur Zündung der ersten zwei Versuchsphasen wird jeweils etwas Papier zur Hilfe gezogen. Bei der dritten Phase kann die vorhandene Glut des zweiten Durchganges zur Zündung



verwendet werden. Die Pausen zwischen den einzelnen Phasen sind so kurz wie möglich zu halten.

Der Water Boiling Tests soll i. d. R. dreimal durchgeführt werden, er wird am Nepalwie auch am Äthiopien-Ofen durchgeführt. Die Wassermenge in einem Topf beträgt etwa 1,51. Der Versuch wird mit Edelstahltöpfen mit einem ungefähren Fassungsvermögen von 31 durchgeführt. Als Brennmaterial wird vorwiegend Anfeuerholz aus Nadelhölzern verwendet, da dieses in seinen geometrischen Abmaßen der Feuerraumgröße am ehesten entspricht (vgl. Abbildung 7- 2). Außerdem entspricht dies dem geforderten Feuchtigkeitsgehalt des Brennstoffs (vgl. Kapitel 6.2). Um den Versuchsbedingungen in einem Raum oder einem Gebäude zu entsprechen, wird der Kochtopf gegen Wind geschützt. In Abbildung 7-1 (links) ist der Windschutz für das Bild entfernt worden, um die Sicht zu verbessern.



Abbildung 7- 2: Kleine Holzscheite für WBT

#### 7.1.1 Variationen des WBT

Um zu vergleichen, wie sich der Wirkungsgrad mit verschiedenen Randbedingungen bzw. mit Änderungen am Konstruktionszustand des Ofens ändert, wird der WBT in einigen Variationen durchgeführt. Unter veränderten Randbedingungen wird die Versuchsdurchführung mit einer anderen Wassermenge (2,5 I) und einem anderen Topf (Eisen- und Tontopf) verstanden. Der Eisentopf hat ein Fassungsvermögen von 8 I, der Tontopf von etwa 3 I. Dadurch soll der Einfluss der Wassermenge und des Topfmaterials untersucht werden. Die Variation der Wassermenge wird an jedem der beiden Öfen durchgeführt, die des Topfes nur am Nepal-Ofen (vgl. Abbildung 7-3).



Abbildung 7-3: Töpfe v.l.: Edelstahltopf, Eisentopf, Tontopf

Die weiteren Versuchsvarianten des Konstruktionsstandes werden lediglich an dem Äthiopien-Ofen durchgeführt, da an diesem ein größeres Optimierungspotenzial besteht. Die Umgestaltung des Konstruktionsstandes beinhaltet die Veränderung des Feuerraumes und Veränderungen innerhalb des Ofens. Unter der Veränderung des Feuerraums wird zum einen eine Vergrößerung des Feuerraumes durch Entnahme des Feuerraumbodens verstanden, der in seiner Ausgangsform mit Lehmsteinen bedeckt ist. Zum anderen wird eine Versenkung des Topfes in den Feuerraum hinein untersucht. Durch die Entnahme des Bodens soll dafür gesorgt werden, dass sich der Topfboden im Bereich heißerer Flammenpunkte befindet, da vorher die Flamme durch die geringe Höhe des Brennraumes gegen den Topfboden schlägt. Abbildung 7-4 (rechts) spiegelt den WBT ohne Boden wider. Dabei wird die Fläche des Gates etwas verkleinert, um ungefähr die gleiche Flächengröße zu erhalten wie in den vorherigen Versuchen.





Abbildung 7-4: links: WBT ohne Luftführungselemente; rechts: WBT ohne Boden

Bei der Versenkung wird versucht, den gleichen Abstand zum Feuerraumboden zu verwirklichen wie in der Ausgangsvariation. Der große Unterschied besteht darin, dass die komplette Fläche des Topfes nun im Feuerraum hängt und dadurch die Fläche der Wärmezufuhr vergrößert wird (vgl. Abbildung 7-5). Die Luftströmung des Ofens wird verändert, indem die Luftführungselemente unter den Kochstellen 2 und 3 entnommen werden. Damit entfällt der Staueffekt der Luftströmung unter den zusätzlichen Kochstellen (vgl. Abbildung 7-4 links).

Auch hier soll für jede Variation der WBT dreimal durchgeführt werden. Bei einer der Versuchsvariationen konnte jedoch schon nach einem Versuch eine deutliche und sichtbare Verschlechterung des Wirkungsgrades und auch des Kochvorganges ausgemacht werden, sodass dieser nach einer Durchführung bereits gestoppt wird.





Abbildung 7-5: WBT mit versenktem Topf mit Windschutz

### 7.2 Temperatur- und Abgasmessung

Die Temperatur- und Abgasmessungen erfolgen zusammenhängend. Unter den Abgasmessungen wird die Messung mit der AMA wie auch die Ermittlung der Rußzahl mit dem Schwärzungszahlmessgerät verstanden. Die Temperaturund Abgasmessungen der AMA geschehen kontinuierlich, während die Rußzahlmessung nur manuell an bestimmten Punkten durchgeführt wird. Die Rußzahlmessung besteht aus einem Messzyklus von drei Einzelmessungen, denen ein Spülvorgang und eine Kalibrierung vorausgehen. Die Kalibrierung wird mittels eines Weiß- und eines Schwarzabgleichs durchgeführt. Zwischen der Kalibrierung und der ersten Messung wird noch ein sog. Leerhub ausgeführt, sodass kein Verdünnungseffekt der angesaugten Luft auftritt. Nach den drei Einzelmessungen wird zusätzlich der Mittelwert der drei Messungen ausgegeben. Die AMA muss ebenfalls vor ihrer Nutzung kalibriert werden. Die Thermoelemente werden nur einmal vor ihrer ersten Nutzung kalibriert.



## 7.2.1 Kalibrierung der AMA

An jedem Versuchstag wird eine neue Kalibrierung vorgenommen, nachdem die AMA in einen Pausenmodus versetzt war. Vor einer Kalibrierung wird jedoch erst ein Spülvorgang eingeleitet, bei dem die Gasleitungen der AMA gespült und so von Ablagerungen gereinigt werden. Die Kalibrierung wird in Form einer 2-Punkt-Kalibrierung vorgenommen, d.h. es wird mittels sogenanntem Nullgas der Messbereichsanfangswert und mit Hilfe von Kalibriergas mit entsprechender Konzentration der Messbereichsendwert angefahren. Für jedes Gas muss hierfür ein entsprechendes Kalibriergas vorhanden sein. Die Kalibrierung kann manuell vorgenommen werden, indem jeweils erst die Kalibrierung mit Nullgas und mit einem Nullgasabgleich vorgenommen wird. Anschließend kann der Vorgang mit dem Kalibriergas ausgeführt werden. Es kann jedoch auch eine automatische Kalibrierung im jeweiligen Messbereich durchgeführt werden. Als Nullgas wird Stickstoff verwendet. Die Kalibriergase und die jeweiligen Messbereiche können von Tabelle 7-2 entnommen werden. Die AMA misst die Kohlenwasserstoffe (THC), die Stickoxide  $(NO_x)$ , den niedrigen (CO(L)) und hohen (CO(H)) Kohlenmonoxidgehalt, den Kohlenstoffdioxidgehalt  $(CO_2)$  sowie den Sauerstoffgehalt  $(O_2)$ , der jedoch nicht kalibriert werden konnte, da kein entsprechendes Kalibriergas vorhanden war.

	Messbereich [ppm]	Kalibriergase [ppm]
THC	902 - 10000	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> 900
NO <sub>x</sub>	882 - 1000	NO 900
CO(L)	4754 - 5000	CO 4500
CO(H)	8170 - 10000	CO 8000
C0 <sub>2</sub>	100200 - 150000	CO <sub>2</sub> 100000
02	179100 - 220000	

Tabelle 7-2: Messbereiche und Kalibriergase AMA



## 7.2.2 Versuchsdurchführung

Hinsichtlich der Temperatur- und Abgasmessungen werden mehrere Messungen unter der Änderung der Luftzufuhr und des Konstruktionsstandes durchgeführt. Dabei werden für die Abgasmessung hauptsächlich zwei verschiedene Brennstoffe gewählt. Die Versuchsdurchführungen werden vorwiegend mit standardisierten Holzbriketts ausgeführt. Als Holzbriketts werden achteckige Briketts mit Loch (Pini Kay) verwendet. Sie besitzen einen Heizwert von rund 18700 KJ/kg. Zusätzlich werden für die Abgasmessung noch Versuchswerte mit Laubhölzern hinzugezogen. Ihr Heizwert liegt bei etwa 15000 KJ/kg.

Um einen Vergleich zwischen mehreren Varianten zu erzielen, wird eine einheitliche Versuchsdauer gewählt. Da die Restmasse während eines Abbrandes nicht ermittelt werden kann, ist somit auch der Endpunkt einer Verbrennung bei 4 % Restmasse nicht zu erkennen. Aus diesem Grund wird eine Versuchsdauer gewählt, bei der ein flammenloser Abbrand inbegriffen ist (vgl. Abbildung 7-6).



Abbildung 7-6: Flammenloser Abbrand; links: Holzbrikett; rechts: Holz

Allgemein haben die Holzbriketts einige Vorteile gegenüber dem Holz. Holzbriketts sichern aufgrund ihrer standardisierten Form einen relativ ähnlichen Verlauf des Abbrandes und können dadurch ungefähr gleiche Gegebenheiten voraussetzen. Sie eignen sich daher besser zur Temperaturmessung. Ein Holzbrikett kann als einzelnes Stück brennen, während ein einzelner Holzscheit nur verglüht oder mit kleiner Flamme



verbrennt. Holzbriketts lassen sich mittels eines Glutbettes entflammen. Sie benötigen vor allem Hitze und nicht unbedingt eine Flamme. Holz hingegen muss jedes Mal angezündet werden oder in ausreichender Menge vorliegen. Bei einer Stapelung von Holzscheiten kann jedoch kein einheitlicher Abbrand gewährleistet werden. Um einen flammenlosen Abbrand in die Versuchsdauer aufzunehmen, ist beim Brennmaterial Holz eine Zündung mit entsprechendem Zündmaterial von Nöten. Bei den Holzbriketts enthält das Glutbett noch genügend Wärme, um nachgelegte Briketts zu entzünden. Letztlich wird daher die Versuchsdurchführung mit einem 400 g Holzbrikettstück vorgenommen, das wiederum von dem Glutbett des vorherigen Briketts entzündet wird. Wegen der Beibehaltung seiner Ausgangsform auch im flammenlosen Abbrand lässt sich die Glut des vorherigen Briketts eindeutig identifizieren. Somit kann sonstige Glut entfernt werden. Die Versuchsdauer wird auf 1400 s festgelegt, sodass der flammenlose Brikettrest noch genügend Wärme besitzt, um den folgenden zu entzünden (vgl. Abbildung 7-7 links).



Abbildung 7-7: links: Holzbriketts (400 g Stücke); rechts: 150 g Holz

Bei den Versuchsdurchführungen mit Holz wird jeweils eine Masse von 150 g gewählt, da dies ungefähr einer Füllung des Brennraumes entspricht. Auf die Nachlegung wird verzichtet, da dies mit ungleichen Bedingungen verbunden ist. Die Masse von 150 g wird auf fünf Holzscheite verteilt, die jeweils nach gleichem Prinzip im Brennraum aufgestapelt werden (vgl. Abbildung 7-7 rechts). Zur Zündung wird immer eine gleiche Menge von Anzündmaterial verwendet. Darunter versteht sich ein Paraffinanzündwürfel (nahezu rußfrei) und etwas Papier. Die Versuchsdauer liegt bei 720 s.



Bei beiden Durchführungen werden die Restmassen des Brennmaterials gewogen, sodass bei starken Abweichungen Versuchsdurchführungen verworfen werden können.

Alle folgenden Variationen werden ausschließlich am Äthiopien-Ofen durchgeführt. Am Nepal-Ofen wird lediglich ein Vergleichstest abgehalten.

Zur Untersuchung der Luftzuführung wird die Fläche der Luftzufuhr in ihrer Größe verändert. Die Umsetzung der Maßnahmen erfolgt mit Hilfe von Steinwolle, die entsprechend der Voraussetzung angebracht oder zugeschnitten wird. Es werden folgende Durchführungen vollzogen:

- 1) Normale Luftzuführung (vgl. Abbildung 7-8).
- 2) Halbierung der Fläche horizontal (vgl. Abbildung 7-9).
- 3) Halbierung der Fläche vertikal (vgl. Abbildung 7-10).
- 4) Reduzierung der Fläche auf einen mittigen Kreis mit Durchmesser 100mm (vgl. Abbildung 7-11)
- 5) Reduzierung der Fläche auf einen mittigen Kreis mit Durchmesser 50mm (hier nicht dargestellt, aber ähnlich Abbildung 7-11).



Abbildung 7-8: Normale Luftzuführung mit Holz und Holzbrikett





Abbildung 7-9: Horizontale Luftzuführung mit Holzbrikett und Holz



Abbildung 7-10: Vertikale Luftzuführung mit Holz und Holzbrikett



Abbildung 7-11: Luftzuführung durch ein Kreis



Zur Untersuchung des Konstruktionsstandes werden folgende Varianten getestet:

- a) Aktueller Konstruktionstand (vgl. Abbildung 7-8).
- b) Ausbau der Luftführungselemente (vgl. Abbildung 7-12 links, Abbildung 6-9).
- c) Entnahme des Feuerraumbodens (vgl. Abbildung 7-12 rechts).
- d) Umbau der dritten Kochstelle auf gleiche Höhe wie zweite Kochstelle (vgl. Abbildung 7-13 links).
- e) Konstruktionsstand Nepal-Ofen (vgl. Abbildung 7-13 rechts).



Abbildung 7-12: links: Ohne Luftführungselemente; rechts: ohne Boden



Abbildung 7-13: links: Umbau Kochstelle 3; rechts: Nepal-Brennraum

Bei der Versuchsdurchführung ohne Feuerraumboden wird versucht, die gleiche Gategröße beizubehalten. Daher wird die Fläche am oberen Teil durch Steinwolle



verkleinert (ähnlich Abbildung 7-4 rechts). Für eine bessere Darstellung wurde in Abbildung 7-12 (rechts) ein Bild ohne die Verkleinerung gewählt.

Die Anzahl der jeweiligen Versuchswiederholungen ist unterschiedlich und von dem Verlauf jeder Messung abhängig. Aufgrund zahlreicher Einflüsse von Wetterbedingungen, Messmittelfunktionalität sowie Abbrandverhalten wird versucht, drei Versuchswiederholungen mit Holzbriketts und fünf Versuchswiederholungen mit Holz zu erhalten.

Abbildung 7-14 zeigt drei verschiedene Messungen der Schwärzungszahl auf. Jede Messung enthält vier Abdrücke, den aus dem Leerhub (erster Abdruck links) und die aus den drei Messungen. Hier sind drei unterschiedliche Werte aufgelistet. Der oberste spiegelt eine hohe Rußzahl und der unterste eine relativ geringe Rußzahl wider.



Abbildung 7-14: Verschiedene Messungen der Schwärzungszahlmessung

## 7.3 Vergleichsversuche

Bei den Vergleichtests geht es primär um den Vergleich der benötigten Brennstoffmengen. Dadurch soll ein Verhältnis aufgezeigt werden, um wie viel Brennstoff ein Ofen gegenüber einem offenen Feuer sparsamer ist. Der Vergleich wird durch eine Aufheizphase und einen Dauerbetrieb von zwei Stunden erzielt. Dabei wird jeweils der Brennstoffverbrauch vor und nach jeder Phase ermittelt. Als Brennstoff werden Holzbriketts verwendet, da mit ihnen ein relativ gleicher Abbrand



vorgenommen werden kann. Zum Anzünden in der Aufheizphase wird bei jedem Vergleich eine gleiche Menge an Anfeuerholz aus Laubholz verwendet. Der 2-Stunden Test erfolgt direkt im Anschluss an die Aufheizphase.

## 7.3.1 Nepal-Ofen

Die Durchführung mit dem Nepal-Ofen erfolgt im Prinzip nach dem gleichen Ablauf wie der des WB-Tests. Die Aufheizphase endet mit dem Erreichen des Siedezustandes des Wassers. Der Versuch wird mit dem Edelstahltopf mit einer Wassermenge von zwei Litern durchgeführt. In der Aufheizphase wird eine Holzmenge von 500 g zum Anfeuern verwendet, da den Holzbriketts eine gewisse Ausgangshitze zu Grunde liegen muss, damit sie anbrennen. Die Größe der Brikettstücke liegt bei ungefähr 60-80 g, sodass jeweils 2-3 Stücke im Brennraum liegen. Der Kochtopf wird gegen Windeinflüsse geschützt. Während des Dauerbetriebes von zwei Stunden wird die Wassertemperatur im Bereich weniger Grad unter dem Siedepunkt gehalten (vgl. WBT-Phase 3, Garprozess). Da bei diesen Temperaturen eine starke Verdampfung des Wassers vorliegt, muss etwas Wasser nachgefüllt werden. Dazu wird insgesamt 1 I Wasser über eine Zeit von einer Stunde nachgefüllt, um die Wassertemperatur nicht zu stark zu senken. Die nachgefüllte Wassermenge beläuft sich auf jeweils 160-170 ml nach 10, 20, 30, 40, 50 und 60 Minuten nach dem Beginn des 2h-Dauertests. Exakt die gleiche Durchführung wird bei dem Vergleich über dem offenen Feuer vorgenommen (vgl. Abbildung 7-15).





Abbildung 7-15: Vergleichstest, links: Nepal-Ofen; rechts: offenes Feuer

## 7.3.2 Injera-Platte

Der Test an der Injera-Platte beinhaltet geringfügige Änderungen. Da das Hauptaugenmerk nicht auf kochendem Wasser, sondern auf der Oberflächentemperatur der Platte liegt, wird diese als Referenzpunkt genommen. Als stationärer Punkt wurde in einem vorherigen Test eine Plattenoberflächentemperatur von etwa 250 °C ermittelt. Diese Temperatur liegt jedoch nur in der Plattenmitte vor und fällt zum Rand hin ab. Die Aufheizphase endet also mit dem Erreichen dieser Temperatur. Die Temperaturen im Außenbereich liegen zwischen 170 und 200 °C. Anschließend wird versucht, diese Temperatur ebenfalls über eine Zeit von zwei Stunden zu halten. Die Oberflächentemperatur wird mit einem Strahlungsthermometer der Firma Voltcraft vom Typ IR 900-30S gemessen (vgl. Abbildung 7-16).





Abbildung 7-16: Strahlungsmessgerät

Da der Feuerraum größer ist als der des Nepal-Ofens, wird hier eine Menge von 1000 g Anfeuerholz verwendet. Die Größe der Brikettstücke lag bei ungefähr 120 g, um eine gleichmäßige Temperaturverteilung zu gewährleisten. Während des 2h-Tests wird die Oberflächentemperatur alle 900 s an fünf Stellen gemessen. Die Messung erfolgt im Mittelpunkt der Platte sowie an vier Außenstellen der Platte im 90° Winkel, beginnend mit der Öffnung des Brennraumes. Daraus lässt sich eine Temperaturverteilung ableiten. Die Temperaturmessungen erfolgen demnach an den gleichen Stellen wie die Thermoelemente unterhalb der Platte angebracht sind (vgl. Abbildung 6-15). Auch hier wird versucht, die Platte bewirken würde. Die Versuchsdurchführung über einer offenen Flamme läuft genauso ab wie die am Ofen. Bei der Versuchsdurchführung über offener Flamme wird jedoch nur ein Thermoelement in der Brennraummitte angebracht, da die Befestigung sich auf Grund der fehlenden Wand als schwierig gestaltet (vgl. Abbildung 7-17).



Abbildung 7-17: Vergleichstest, links: Injera; rechts: offenes Feuer



# 8 Auswertung

#### 8.1 Versuchsergebnisse WBT

Die Versuchsauswertung der Water Boiling Tests geschieht über eine Excel-Vorlage, in der lediglich die gemessenen Versuchsgrößen eingetragen werden und sich dadurch automatisch die relevanten Größen nach Kapitel 5.1 berechnen lassen. Die Auswertung bezieht sich jeweils nur auf zwei Kochstellen, obwohl der Äthiopien-Ofen drei Kochstellen besitzt. Der Einfluss der dritten Kochstelle erweist sich als vernachlässigbar gering. In der dritten Phase des WBT wird nur die erste Kochstelle berücksichtigt, dies ist in dem Test so vorgeschrieben.

Die folgenden Tabellen zeigen jeweils die Ergebnisse der verschiedenen Durchführungen. Die gezeigten Messwerte verstehen sich als Mittelwerte aus drei Wiederholungen des Water Boiling Tests.

Es sollte darauf geachtet werden, dass nicht die dritte Phase mit den ersten zwei Phasen verglichen wird, da gerade hier erhebliche Unterschiede vorkommen. Vor allem in der dritten Phase sind die Ergebnisse teilweise etwas irreführend. Der thermische Wirkungsgrad beispielsweise errechnet sich u. a. aus verdampftem Wasser, welches beim Kochen stärker erzeugt wird als in der Garphase. Da nach dem WBT der Dampf die übertragene Energie darstellt, fällt der Wirkungsgrad in der dritten Phase auch schlechter aus. Auch der spezifische Brennstoffverbrauch kann täuschen. Er berechnet sich aus dem übrig gebliebenen Wasser und nach der Kochzeit oder der Garzeit. Wenn die restliche Wassermenge zu gering ist, folgt daraus ein überhöhter spezifischer Verbrauch [12].



			Nepal-Ofen		Äthiopie	en-Ofen
		2,5I Edelstahl	1,5I Edelstahl	1,5l Gusseisen	2,5l Edelstahl	1,5I Edelstahl
1. HIGH POWER TEST (COLD START)						
Kochdauer Topf 1	[min]	65,5	52,2	65,5	70,3	57,4
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	61,2	50,5	62,9	65,4	55,0
Feuerrate	[g/min]	15,7	15,2	18,2	18,5	13,9
thermischer Wirkungsgrad	%	15,8%	14,5%	13,2%	15,3%	14,2%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	323,4	439,7	517,9	421,9	419,6
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/liter]	302,6	426,0	497,4	392,0	402,0
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4047	3930	4698	4770	3587
2. HIGH POWER TEST (HOT START)						
Kochdauer Topf 1	[min]	53,8	40,8	40,2	55,4	49,6
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	50,5	40,0	39,0	51,8	49,1
Feuerrate	[g/min]	16,5	15,1	19,2	16,3	13,3
thermischer Wirkungsgrad	%	18,7%	17,6%	17,4%	19,6%	19,1%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	268,0	335,9	304,2	281,9	367,8
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/liter]	251,9	329,0	295,3	263,7	362,6
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4256	3904	4961	4206	3440
3. LOW POWER (SIMMER)						
Feuerrate	[g/min]	16,1	15,8	17,3	17,8	14,9
thermischer Wirkungsgrad	%	16,0%	14,4%	14,6%	13,8%	14,2%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	618,7	1954,9	1207,9	680,5	1998,4
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4156	4095	4461	4596	3849
Turn down Verhältnis		1,04	0,99	1,12	0,91	0,89

#### Tabelle 8-1: Messergebnisse WBT unterschiedliche Wassermenge und Töpfe

Tabelle 8-1 zeigt die Ergebnisse der beiden Ofentypen Nepal und Äthiopien mit einer Wassermenge von 1,5 und 2,5 l. Außerdem werden die Messergebnisse des Versuches mit dem eisernen Topf am Nepal-Ofen dargestellt. Der Versuch mit dem Tontopf wird nicht beachtet, da es diese Versuchsvariante zu keinem Ergebnis brachte. Mit dem Tontopf konnte das Wasser nicht zum Kochen gebracht werden. Der Versuch wurde abgebrochen, nachdem die Wassertemperatur in einem stationären Zustand von etwa 90 °C verharrte. Trotz starker Brennstoffzufuhr gelang es nicht die Wassertemperatur zu steigern. Grund dafür ist die Wandstärke des Tontopfes, die mit fast 10 mm sehr dick ist. Des Weiteren ist der Wärmeleitkoeffizient von Ton schlechter als von den anderen beiden Topfmaterialien.

Demgegenüber steht der Versuch mit dem eisernen Topf am Nepal-Ofen. Dabei lassen die Messwerte erkennen, dass der eiserne Topf leicht schlechtere Werte vorweist als der Edelstahltopf. Lediglich die Ergebnisse des spezifischen Brennstoffverbrauches ergeben eine andere Aussage, was daran liegt, dass weniger Wasser verdampft und somit wiederum eine größere Restmenge zurück bleibt (vgl. Gleichung (5.14)). Auch der Kochvorgang war bei dem Edelstahltopf einfacher. Das Wasser war



leichter zum Kochen zu bringen als beim Eisentopf. Allerdings muss bei diesem Versuch auch die Geometrien der Töpfe berücksichtigt werden. Der Edelstahltopf ist weitaus kleiner, was ihm zu Gute kommt, da dadurch die Wasserfläche zur Luft hin viel kleiner als beim Eisentopf ist. Auch die Wandstärke des Edelstahltopfes ist um einiges geringer. Der Wärmeleitkoeffizient des Eisentopfes ist jedoch höher als der des Edelstahltopfes. Daraus zeigt sich, dass eine Material- und Geometrieabhängigkeit eine nicht vernachlässigbare Rolle spielt.

Der Vergleich zwischen den beiden Wassermengen ist bei beiden Öfen annähernd gleich. Kochzeit, Feuerrate und eingebrachte Leistung fallen jeweils auf die kleineren Wassermengen. Dies liegt hauptsächlich an der geringer zu erwärmenden Wassermasse. Bei mehr Wassermenge muss mehr Energie aufgewendet werden, um das Wasser zum Kochen zu bringen. Die Werte des spezifischen Brennstoffverbrauchs sind bei der 2,51 Wassermenge besser. Dies resultiert aus der Berechnungsformel des spezifischen Brennstoffverbrauches, da diese sich aus der übrig gebliebenen Wassermenge berechnet (vgl. Gleichung (5.14)). Den höheren Wirkungsgrad erzielt jeweils die größere Wassermenge. Beim Nepal-Ofen liegen Wirkungsgradunterschiede bis zu 1,6 % vor. Als Hauptgrund steht dafür die längere Kochzeit, durch die mehr Wasser verdampfen kann (vgl. Gleichung (5.12)). Allgemein ergibt sich aus diesem Vergleich, dass die Menge, die zum Kochen gebracht wird einen kleinen Einfluss auf den Wirkungsgrad besitzt. Zwar ändern sich die meisten Größen mit der Kochmenge, was jedoch nicht unbedingt zum Vergleich herangezogen werden kann.

Als Nächstes bleibt noch der Vergleich der beiden Ofentypen untereinander. Ein genauer Vergleich zwischen beiden Öfen ist nicht möglich, da sich beide zu stark in der Geometrie und der Luftführung unterscheiden. Während im 1,5 I-Versuch die besseren Messergebnisse beim Äthiopien-Ofen liegen, sind die Messwerte des 2,5 I-Versuchs mit Ausnahme der zweiten Phase beim Nepal-Ofen besser. Die Kochdauer ist bei jeder Phase des WBT beim Nepal-Ofen kürzer als beim Äthiopien-Ofen, obwohl zum Teil weniger Leistung eingebracht wird. Die Durchmesser der Kochstellen bei beiden Öfen sind in etwa gleich. Nur die zweite Kochstelle des Nepal-Ofens ist deutlich kleiner. Dies könnte eine Verschlechterung der Nepal-Ergebnisse bewirken, da die wärmeübertragende Fläche reduziert ist. Beim Äthiopien-Ofen ist der Brennraum



etwas größer. Hingegen ist beim Nepal-Ofen die Luftführung inklusive der Durchbrände besser gestaltet. Beim Nepal-Ofen befindet sich die zweite Kochstelle eine Schicht höher, was die thermische Konvektion unterstützt. Am thermischen Wirkungsgrad ist in beiden Fällen zu erkennen, dass in der ersten und dritten Phase jeweils der Nepal-Ofen die höheren Messergebnisse erzielt. Das Gegenteil liegt in der zweiten Phase vor. Der kleinere Bauraum am Nepal-Ofen lässt sich leichter aufheizen, dementsprechend kann mehr Wärme an den Topf übertragen werden. Im aufgeheizten Zustand überwiegt der Äthiopien-Ofen, indem aufgrund der schlechteren thermischen Konvektion ein besserer Wärmestau im Brennraum vorliegt. Dies liegt u. a. am Durchbruch des Äthiopien-Ofen, der tiefer sitzt als der im Nepal-Ofen. In der dritten Phase ist aufgrund des kleineren Feuers der kleinere Bauraum wieder von Vorteil. Der schlechtere Wirkungsgrad des Nepal-Ofens in der zweiten Phase könnte auch durch den kleineren Durchmesser der zweiten Kochstelle hervorgerufen werden. Aus diesem Grund wird in den Messergebnissen in Tabelle 8-2 der Einfluss des zweiten Topfes vernachlässigt.



1,5I Edelstahltopf, nur 1.Topf		Äthiopien-Ofen	Nepal-Ofen
1. HIGH POWER TEST (COLD START)			
Kochdauer Topf 1	[min]	70,3	65,5
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	65,4	61,2
Feuerrate	[g/min]	18,5	15,7
thermischer Wirkungsgrad	%	12,3%	12,4%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	722,0	508,7
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/liter]	670,2	476,4
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4770	4047
2. HIGH POWER TEST (HOT START)			
Kochdauer Topf 1	[min]	55,4	53,8
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	51,8	50,5
Feuerrate	[g/min]	16,3	16,5
thermischer Wirkungsgrad	%	15,3%	14,4%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	470,2	446,0
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/liter]	439,8	419,4
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4206	4256
3 LOW POWER (SIMMER)			
Feuerrate	[a/min]	17.8	16.1
thermischer Wirkungsgrad	%	13,8%	16,0%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	680,5	618,7
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4596	4156
Turn down Verhältnis		0,91	1,04

#### Tabelle 8-2: Ergebnis WBT Nepal/Äthiopien-Ofen (2,5 I) bezogen auf ersten Topf

In Tabelle 8-2 werden erneut die Ergebnisse des Nepal- und des Äthiopien-Ofens mit 2,51 dargestellt. Diesmal wird der Einfluss des zweiten Topfes vernachlässigt. Die Ergebnisse weichen trotzdem nur geringfügig voneinander ab. Es ändern sich nur der Wirkungsgrad und der spezifische Brennstoffverbrauch. Die Messwertdifferenzen zwischen beiden Öfen bleiben ungefähr gleich. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der zweiten Kochstellen bei beiden Öfen gleich ist. Da der zweite Kochstellendurchmesser des Nepal-Ofens deutlich kleiner ist, muss demnach der Durchbrand zwischen beiden Kochstellen am Nepal-Ofen besser ausgeführt sein.

Allgemein scheint ein Vergleich zwischen beiden Ofentypen schwer zu sein, da bereits die drei Versuchswiederholungen jeder Durchführung eine größere Ungenauigkeit enthalten als die gemittelten Endergebnisse. Aus den bisherigen Ergebnissen lässt sich erkennen, dass die Durchmesser der Kochstellen so groß wie möglich ausgeführt werden müssen, um möglichst viel Energie übertragen zu können. Auch ein kleinerer



Bauraum scheint von Vorteil zu sein, solange er groß genug ist, um die entsprechende Kochmenge zum Kochen zu bringen.

Äthiopien-Ofen, 1,5I im Edelstahltopf		ohne Luftführung	ohne Boden	normal	versenkter Topf
1. HIGH POWER TEST (COLD START)					
Kochdauer Topf 1	[min]	71,0	57,4	57,4	37,6
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	68,2	53,6	55,0	34,8
Feuerrate	[g/min]	17,3	16,5	13,9	10,9
thermischer Wirkungsgrad	%	10,1%	11,9%	14,2%	23,1%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	681,3	468,7	419,6	206,9
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/liter]	655,1	438,3	402,0	191,6
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4458	4267	3587	2807
2. HIGH POWER TEST (HOT START)					
Kochdauer Topf 1	[min]	46,7	48,3	49,6	29,5
zeitkorrigierte Kochdauer Topf 1	[min]	44,9	45,8	49,1	27,0
Feuerrate	[g/min]	19,3	15,7	13,3	13,8
thermischer Wirkungsgrad	%	11,9%	14,5%	19,1%	24,4%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	463,5	344,5	367,8	193,0
zeitkorrigierter spez. Brennstoffverbrauch	[g/liter]	445,7	326,9	362,6	176,4
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	4984	4065	3440	3553
3. LOW POWER (SIMMER)					
Feuerrate	[g/min]	22,4	15,4	14,9	13,5
thermischer Wirkungsgrad	%	10,3%	12,1%	14,2%	19,2%
spezifischer Brennstoffverbrauch	[g/liter]	1957,2	952,1	1998,4	1094,1
Leistung/Feuerkraft	[Watt]	5788	3986	3849	3499
Turn down Verhältnis		0,86	1,02	0,89	1,02

Tabelle 8-3: Ergebnisse WBT konstruktiven Veränderungen am Äthiopien-Ofen

Beim Äthiopien-Ofen werden mehrere Variationen des Konstruktionsstandes umgesetzt. Dabei stellt sich die Variante mit dem versenkten Kochtopf als die mit der größten Leistungssteigerung dar. In Tabelle 8-3 sind die Ergebnisse aufgelistet. Alle Durchführungen wurden mit einem Edelstahltopf und einem Wasservolumen von 1,5 I durchgeführt. Die Ergebnisse der Versuchsdurchführung ohne Luftführungs-elemente sind nicht als Mittelwerte dargestellt, sondern als Einzelmessungen. Sie wurden nur einmal durchgeführt, da die Messwerte und auch die Beobachtungen während des Versuches auf ein deutlich schlechteres Ergebnis hinwiesen. Im Wesentlichen ist ein klares Ergebnis zu sehen. Die Variante ohne Feuerraumboden ist schlechter als die Ausgangsvariante, während die Variante mit versenktem Kochtopf eine erhebliche Steigerung fast aller ermittelten Werte widergibt.

Die Variante ohne Luftführungselemente beinhaltet die schlechtesten Messwerte. Die eingebrachte Leistung, der spezifische Brennstoffverbrauch sowie die Feuerrate sind



deutlich höher und der thermische Wirkungsgrad fällt geringer aus. In dieser Versuchsdurchführung entfällt der Staueffekt unter der zweiten und dritten Kochstelle, weshalb die Luftströmung nicht gebremst wird und durch die Druckkräfte rasch durch den Ofen gezogen wird. Dies ist auch an der Flamme erkennbar, die sich immer wieder in Richtung der zweiten Kochstelle ziehen lässt. Dies senkt die Feuerraumtemperatur und vergrößert die Abgasverluste (vgl. Abbildung 7-4 links).

Auch die Variante ohne Feuerraumboden zeigt zum Großteil schlechtere Werte als die Ausgangsvariante. In Bezug auf den Wirkungsgrad und die Feuerrate sind die Messwerte in allen drei Phasen deutlich schlechter. Die Leistung hat vor allem in den ersten beiden Phasen eine große Differenz zu den Versuchswerten mit Feuerraumboden. Die Messwerte des spezifischen Brennstoffverbrauchs sind zum Teil sogar besser als in der Ausgangsvariante, was durch die Berechnungsformel hervorgeht und immer in Bezug zu der Restmenge an Wasser gestellt werden muss. Mehr Restmenge an Wasser bedeutet einen besseren spezifischen Brennstoffzeigt eine Vergrößerung verbrauch. Demnach des Brennraumes eine Verschlechterung der Messwerte. Zwar sitzt der Topf so über dem heißesten Flammenpunkt, jedoch wirkt dieser nur punktuell. Im Außenbereich der wärmeübertragenden Topffläche liegen daher geringere Temperaturen vor. Aus diesem Grund ist die Wärmeübertragung schlechter als im Ausgangszustand, bei dem die Flamme gegen den Topfboden schlägt. Dabei herrschen unter dem kompletten Topfboden gleichmäßig hohe Temperaturen, die etwas tiefer liegen als die Spitzentemperaturen der Flamme.

Als Letztes wird das beste Ergebnis aller Versuchsdurchführungen aufgeführt, die Variante mit dem versunkenen Kochtopf, der in den Feuerraum eingelassen wurde. Die Ergebnisse sind bis auf die eingebrachte Leistung und die Feuerrate der zweiten Phase teils deutlich besser. Der Wirkungsgrad steigert sich in allen Phasen zwischen 5 und bis zu fast 9 %. Bis auf die Messwerte der ersten Phase, die deutlich verbessert sind, liegen die Messergebnisse für Feuerrate, spezifischen Brennstoffverbrauch sowie eingebrachte Leistung sogar annähernd im Bereich der Ausgangsvariante. Daran ist zu erkennen, dass die aufgewendete Energie besser ausgenutzt wird. Denn durch eine Vergrößerung der Wärmezufuhrfläche, verringert sich zudem die Fläche der Wärmeabfuhr. Diese Ergebnisse unterstützen die eben aufgestellte These, dass



die wärmeübertragende Fläche so groß wie möglich ausgeführt werden muss. Eine bessere Ausnutzung der aufgewendeten Energie verringert auch den Brennstoffverbrauch und die Kochzeit, woraus sich bessere Allgemeinwerte ableiten lassen.

#### 8.2 Versuchsergebnisse Temperatur- und Abgasmessung

Bei der Temperaturmessung der verschiedenen Luftzuführungen und Umbauvariationen werden die jeweiligen Temperaturverläufe über der Versuchsdauer aufgezeigt. Die Auswertung der Emissionen erfolgt über die Mittelwerte der gemessenen Verläufe. Unter der Abgasmessung versteht sich die Analyse der Kohlenstoffdioxid- und Kohlenstoffmonoxidwerte sowie der ermittelten Rußzahl. Die Kohlenwasserstoffe konnten leider nicht gemessen werden. Stickstoffgehalt des Abgases liegt aufgrund der geringen Feuerraumtemperaturen von weit unter 1000 °C in einem vernachlässigbaren Rahmen von 0,0002-0,0012 %.

In Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-9 sind die Temperaturverläufe aller Variationen dargestellt. Allgemein zur Temperaturmessung kann angemerkt werden, dass die Messstellen in der Schornsteinkrümmung und der Entnahmestelle des Abgases fast gleich sind, da sie nur etwa 100-150 mm auseinander liegen. Der Temperaturverlauf ist weitestgehend ähnlich und unterscheidet sich in den Temperaturmaxima der einzelnen Messstellen. Außerdem liegen geringe Unterschiede im Anbrennverhalten und der damit zusammenhängenden Brenndauer vor. Langsames Anbrennen hat eine längere Brenndauer zur Folge. In der Regel folgt nach der starken Steigung beim Anbrennen eine leichte Steigung bis zu einem Temperaturmaximum, dem anschließend ein rascher Abfall folgt, indem die Flamme erlischt. Die abstrahlende Wärme der Glut wandelt danach den anfänglich starken Temperaturabfall in einen gemäßigten Abfall um.

In Abbildung 8-1 ist der Temperaturverlauf der Ausgangsvariation des Äthiopien-Ofens zu sehen. In dieser Ausführung fällt die höchste Feuerraumtemperatur aller Versuchsvarianten an. Die Temperatur unter der zweiten Kochstelle (KS 2) liegt bei etwa 400 °C. Von dieser fällt die Temperatur ab, bis zu einer Abgastemperatur von ca. 80 °C an der Abgasentnahmestelle.





Abbildung 8-1: Temperaturverlauf Ausgangsform Äthiopien-Ofen (ÄT)



Abbildung 8-2: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung horizontal (ÄT)

Wird die Luftzufuhr horizontal um die Hälfte verkleinert, sinkt die Feuerraumtemperatur geringfügig. Demgegenüber steht aber eine Steigerung der Temperatur unter der zweiten Kochstelle, was wiederum zu höheren Abgastemperaturen von 100 °C führt (vgl. Abbildung 8-2). Bei vertikaler Verkleinerung der Luftzufuhr ist dieser Effekt noch stärker ausgeprägt. Hier liegt die Feuerraumtemperatur noch tiefer als bei der horizontalen Durchführung. Ebenso steigt die Temperatur der Kochstelle 2 nochmals an. Das Anbrennen des Holzbriketts scheint sich wesentlich schneller zu vollziehen als bei normaler Luftzufuhr (vgl. Abbildung 8-3). Der Grund liegt in dem stärkeren Luftzug, der bei einer Verkleinerung der Zufuhrfläche eine höhere Strömungsgeschwindigkeit aufweist. Dadurch werden die Flamme und auch der Wärmestrom in Richtung der zweiten Kochstelle getrieben. Dies reduziert die Feuerraumtemperatur.



Dieser Effekt ist bei der vertikalen Durchführung noch stärker ausgeprägt als bei der Horizontalen, weil der Luftstrom in diesem Fall von rechts nach links durch die Flamme hinweg zieht (vgl. Abbildung 7-10). Das ist aus dem Verlauf der zweiten Kochstellentemperatur in Abbildung 8-3 zu erschließen. Ein weiterer Grund für höhere Temperaturen der zweiten Kochstelle und des Abgasstromes ist der geringere Wärmeverlust durch das Feuerraumgate. Bei der Ausgangsvariante zieht Qualm durch das Gate nach vorne heraus, wodurch auch der Wärmeverlust vergrößert wird. Dies ist bei einer Verkleinerung der Gatefläche, besonders im oberen Bereich, weniger ausgeprägt.



Abbildung 8-3: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung vertikal (ÄT)

In zwei weiteren Versuchen wurde die Luftzufuhr auf einen Kreis mit einem Durchmesser von 100 bzw. 50 mm beschränkt. Beide Verläufe ähneln sich. Allgemein gleichen die Temperaturverläufe denen des horizontalen Durchgangs. Lediglich die Temperaturmaxima der zweiten Kochstelle sind etwas geringer. Jedoch gestaltet sich das Anbrennen des Briketts etwas schwieriger. Der Anstieg fällt flacher aus. Dafür verlängert sich die Brenndauer (vgl. Abbildung 8-4 und Abbildung 8-5). Der Grund liegt womöglich in dem frontal auf das Brikett gerichteten Zuluftstrom, der ein Entzünden des vorderen Brikettteils erschwert. Die Wärme bzw. Flamme wird durch den Luftzug nach hinten gezogen.





Abbildung 8-4: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung Kreis 100 mm (ÄT)



Abbildung 8-5: Temperaturverlauf Luftzuführungsverkleinerung Kreis 50 mm (ÄT)

Abbildung 8-6 zeigt den Temperaturverlauf des Nepal-Ofens auf. Er lässt sich höchstens mit der Ausgangsvariante des Äthiopien-Ofens bzgl. der ersten zwei Kochstellentemperaturen vergleichen. Zum Beispiel ist der Temperaturunterschied zwischen Kochstelle 1 und 2 viel größer als beim Äthiopien-Ofen. Dies könnte an dem kleineren Durchbruch liegen, der einen stärkeren Luftzug nach sich zieht. Dadurch verringert sich der Staueffekt. Auch die Anbringung des Thermoelementes ist komplizierter, woraus sich nicht derselbe punktuelle Messpunkt ergibt. Dass die Abgastemperaturen höher sind, erklärt sich aus der kürzeren Strecke zwischen Feuerraum und Abgasentnahmestelle. Außerdem strömt auch an diesem Ofen Qualm durch das vordere Gate heraus, wodurch ebenfalls Wärme verloren geht. Diese Menge lässt sich nicht messen, daher kann die Stärke dieses Effektes nicht kalkuliert werden.





Abbildung 8-6: Temperaturverlauf Nepal-Ofen (NP)



Abbildung 8-7: Temperaturverlauf ohne Boden im Feuerraum (ÄT)

In Abbildung 8-7 und Abbildung 8-8 sind die Variationen mit ausgebautem Feuerraumboden und ausgebauten Luftführungselementen dargestellt. Es handelt sich um die gleichen konstruktiven Änderungen wie bei der Durchführung der Water Boiling Tests. Bei der Versuchsdurchführung ohne Feuerraumboden ist deutlich das schlechtere Anbrennverhalten zu erkennen. Dies hängt u. a. mit der Vergrößerung des Feuerraumes zusammen, da sich die zum Entzünden des Briketts benötigte Wärme aus der Glut auf einen größeren Raum verteilt. Außerdem ist die Feuerraumtemperatur deutlich niedriger als bei den anderen Versuchen. Trotzdem ist die Temperatur unter der zweiten Kochstelle relativ hoch. Der Grund könnte mit dem tiefer liegenden Gate verbunden sein, das den ausströmenden Qualm und die damit verbundene Wärme



wieder das übliche Bild auf. Auffällig sind der relativ kurze Abbrand und die hohen Abgastemperaturen. Des Weiteren ist der Unterschied zwischen erster und zweiter Kochstelle deutlich größer als bei den anderen Ergebnissen. Alle Merkmale deuten auf einen sehr starken Luftzug innerhalb des Ofens hin. Die Staueffekte unter den Kochstellen entfallen, wodurch die Wärmeabgabe verringert wird. Folglich entstehen höhere Abgastemperaturen. Durch den Luftzug wird auch das Feuer stärker entfacht, weshalb ein schnellerer Abbrand zu Stande kommt.



Abbildung 8-8: Temperaturverlauf ohne Luftführungselemente (ÄT)



Abbildung 8-9: Temperaturverlauf nach Umbau KS 3 (ÄT)

Abbildung 8-9 spiegelt die Temperaturverläufe des Äthiopien-Ofens bei umgebauter dritter Kochstelle wider. Der Verlauf ähnelt der Ausgangsform des Äthiopien-Ofens mit der Ausnahme, dass die Temperaturen im Vergleich geringer sind. Eigentlich müsste



das Temperaturmaximum im gleichen Bereich liegen, wie in der Ausgangsvariation des Ofens. Denn es wurde lediglich die dritte Kochstelle in der Höhe versetzt und die Luftströmung im Schornstein geringfügig verändert. Aber die starke Temperaturschwankung zeigt die Wetterabhängigkeit der Versuchsergebnisse. Bei den drei Umbauvariationen des Äthiopien-Ofens lagen weitaus geringere Umgebungstemperaturen mit schlechterem Windaufkommen vor. Sie können daher schlecht mit den restlichen Ergebnissen verglichen werden.

In der Abbildung 8-10 und Abbildung 8-11 sind alle gemessenen Abgase der Abgasmessanlage dargestellt. In diesen Abbildungen werden die einzelnen Verläufe der Abgase veranschaulicht. Daher sind die Abgase je nach Konzentrationsstärke in verschiedenen Einheiten abgebildet. Die Einheiten ppm und % stehen über den Faktor 10000 miteinander in Verbindung (1 % = 10000 ppm). Abbildung 8-10 zeigt den unterschiedlichen Verlauf der  $CO_2$ -Emissionen und der CO-Emissionen über der Feuerraumtemperatur. Steigt die Temperatur, so steigen auch die  $CO_2$ -Emissionen an. Gleichzeitig fallen die CO-Emissionen ab. Mit dem Beginn des flammenlosen Abbrandes tritt das Gegenteil auf.



Abbildung 8-10: Verlauf der Emissionen am Nepal-Ofen



In Abbildung 8-11 ist erkenntlich, dass der Verlauf der  $NO_x$ -Emissionen dem Verlauf der  $CO_2$ -Emissionen gleicht, obwohl die  $NO_x$ -Emissionen vernachlässigbar gering sind. Der Verlauf der Sauerstoffkonzentration zeigt ebenfalls einen gegensätzlichen Verlauf zu den  $CO_2$ - und  $NO_x$ -Emissionen auf.



Abbildung 8-11: Zusammenhang einiger Emissionen am Nepal-Ofen

Allgemein entsprechen die Verläufe somit den theoretischen Erwartungen. Bei höheren Verbrennungstemperaturen liegt eine höhere Brennrate bzw. Brennintensität vor, weshalb die  $CO_2$ -Emissionen und die  $NO_X$ -Emissionen ansteigen. Da in diesem Fall mehr Kohlenstoff zu  $CO_2$  umgewandelt wird, fallen natürlich die CO-Emissionen sowie die Sauerstoffkonzentration. Der bei einer Verbrennung zugeführte Kohlenstoff wird je nach Verbrennungsbedingungen entweder in  $CO_2$  oder in CO umgewandelt. Durch die Umwandlung in  $CO_2$  wird mehr Sauerstoff gebunden, sodass die Sauerstoffkonzentration mit steigender  $CO_2$ -Konzentration abfällt. Die Anzahl an gebundenem Sauerstoff bezüglich der  $NO_X$ -Emissionen ist aufgrund der geringen Menge ebenfalls vernachlässigbar und in der Mengenkonzentration von Sauerstoff nicht erkenntlich.

In den Tabelle 8-4 und Tabelle 8-5 sind die Versuchsergebnisse der Abgasmessungen dargelegt. Dies sind die gemittelten Prozentwerte über die jeweilige Versuchsdauer.



Die Messergebnisse entsprechen einer einzigen Messung, und zwar jener, die der Mittelung aller durchgeführten akzeptablen Messungen am nächsten kommt. Die Anzahl akzeptabler Messungen schwankt, da je nach Wettervorkommnissen und kurzfristigem Messmittelausfall einige Messungen verworfen wurden.

Holzbriketts 400g	Mitteltemperatur [°C]	CO2-Wert [%]	CO-Wert [%]	Schwärzungzahl []
Äthiopien normal	601	1,28	0,076	5,20
horizontal	561	1,44	0,051	6,44
vertikal	540	1,16	0,036	5,88
Kreis 100	553	1,62	0,043	6,46
Kreis 50	550	1,73	0,046	5,88
ohne Boden	388	1,22	0,078	3,74
ohne Luftführungselemente	447	0,81	0,035	3,92
Umbau KS 3	430	0,92	0,042	5,18
Nepal	560	1,46	0,076	4,92

Die Ergebnisse müssen in zwei Kategorien unterteilt werden (vgl. Kapitel 7.2.2). Bei den Holzbriketts zeigen die Untersuchungen der Luftzufuhr, dass diese durch einen Kreis die höchsten CO<sub>2</sub>-Emissionswerte vorweisen. Dafür liegen die CO-Werte im mittleren Bereich. Die höchsten CO-Werte treten bei normaler Luftzufuhr auf. Die Werte bei vertikaler Luftzufuhr sind in beiden Fällen die geringsten. Die Größe der Schwärzungszahl liegt bei allen Durchführungen im gleichen Rahmen, lediglich die der normalen Durchführung ist etwas niedriger (vgl. Tabelle 8-4).

Bei den baulichen Veränderungen befinden sich die Versuchsergebnisse zwischen dem Äthiopien- und dem Nepal-Ofen in ähnlichen Bereichen. Trotz höherer mittlerer Verbrennungstemperatur liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionswerte beim Äthiopien-Ofen etwas niedriger. In der Durchführung ohne den Feuerraumboden beim Äthiopien-Ofen verweilen die Emissionswerte im gleichen Bereich wie mit Boden. Dafür sind die Schwärzungszahl und die Verbrennungstemperatur geringer. Die die niedrigsten CO<sub>2</sub>- und CO-Werte aller Versuche weisen die Durchführungen ohne Luftführungselemente und nach dem Umbau der KS 3 auf.

Da der CO<sub>2</sub>-Wert i. d. R. die Güte der Verbrennung widerspiegelt und demnach die CO-Emissionswerte am geringsten sein müssten, zeigen die Ergebnisse auf, dass ein



Vergleich der Messwert nicht vorgenommen werden kann. Zum Beispiel enthält die vertikale Durchführungen bei den Luftzufuhrvariationen die geringsten CO<sub>2</sub>- und CO-Emissionswerte, obwohl diese eigentlich gegenseitig verlaufen müssten. D.h. die Durchführung mit den höchsten CO<sub>2</sub>-Werten müsste eigentlich die niedrigsten CO-Emissionswerte aufweisen. Als Hauptgrund ist die Abgasmenge anzusehen, die in die Betrachtungen nicht einfließt, da sie nicht gemessen werden konnte. Demzufolge können verschiedene Abgasmassenströme mit unterschiedlichen Abgaskonzentrationen und unterschiedlichen Abgaszusammensetzungen im Schornstein auftreten. Dies resultiert ebenso aus den Versuchsbeobachtungen, bei denen ein Teil des Abgases nach vorne durch das Gate entweicht. Je nach Verkleinerung des Gates kann dies zu unterschiedlichen Abgasmengen führen. Bei den drei Konstruktionsvarianten am Äthiopien-Ofen kommen zudem weitaus geringere Umgebungstemperaturen hinzu, welche der Verbrennung entgegenwirken. Bei der Variante ohne Feuerraumboden kommt das tiefer gelegte Gate der Abgasmessung zu Gute, da dadurch eine bessere Luftströmung in Richtung des Schornsteins gewährleistet wird. Die Schwärzungs-zahlen besitzen aufgrund eines fehlenden stationären Messpunktes wenig Aussagekraft, da nicht vergleichbare Betriebszustände herrschen.

Holz 150g	Mitteltemperatur [°C]	CO2-Wert [%]	CO-Wert [%]	Schwärzungzahl []
Äthiopien normal	380	0,58	0,023	3,23
horizontal	492	0,98	0,023	3,66
vertikal	430	0,94	0,027	3,11
Kreis 100	404	1,14	0,037	2,89
Kreis 50				
ohne Boden	282	0,94	0,027	1,85
ohne Luftführungselemente	296	0,56	0,015	0,96
Umbau KS 3	304	0,67	0,022	2,78
Nepal	402	1,05	0,040	3,14

Fabelle 8-5: Ergebnisse de	r Abgasmessungen mit Holz
----------------------------	---------------------------

Bei den Versuchsdurchführungen mit Holz treten fast identische Ergebnisse auf. Nur das Ergebnis der normalen Durchführung beim Äthiopien-Ofen befindet sich in einem überdurchschnittlich schlechten Bereich. Hier liegen sogar noch ungleichmäßigere Betriebsbedingungen vor, da kein gleichmäßiger Abbrand vorliegt. Der Abbrand ist stark von dem Anbrennen des Holzes abhängig (vgl. Tabelle 8-5).



## 8.3 Versuchsergebnisse Vergleichtests

Die Vergleichsversuche sollen dazu verhelfen ein ungefähres Potenzial im Ofenbau zu erkennen. Sie weisen auf die bessere Effektivität und den Grad an Energieeinsparung bei einem Kochvorgang hin. Die Ergebnisse der Versuche zeigen jedoch nur eine Tendenz auf, da sich die Bedingungen geringfügig unterscheiden. Trotzdem wird versucht möglichst viele Einflussfaktoren anzugleichen bzw. zu übernehmen. Die Auswertung der Versuche beinhaltet im Prinzip nur den Vergleich der verbrauchten Brennstoffmassen. Die Mengen an Anfeuerholz werden in der Aufheizphase mitberücksichtigt, indem sie über die jeweiligen Heizwerte in Brikettmasse umgerechnet werden.

#### 8.3.1 Nepal-Ofen

Das 500 g Anfeuerholz (Laubholz, 15 MJ/kg) entspricht etwa 401 g Holzbriketts (Pini Kay, 18,7 MJ/kg; somit Faktor: 0,8021). Da sich die übrige Wassermenge nach dem 2h-Versuch etwas voneinander unterscheidet, wird auch hierbei die nicht verdampfte Wassermenge in zu wenig verbrauchte Briketts umgerechnet. Dazu dient ein Mittelwert der verbrauchten Brennstoffmassen  $m_B$  der dritten Phase des Water Boiling Tests am Nepal-Ofen mit dem Edelstahltopf (1,51 und 2,51). Daraus ergibt sich, dass pro zusätzlichem mI Wasser zu viel, 1,079 g Brennstoff (Nadelholz, 15,5 MJ/kg) hätte aufgewendet werden müssen, um diesen zu verdampfen. Demnach muss bei dem Versuch der am Ende mehr Wasser enthält ein weiterer Teil Brennstoffmasse dazu addiert werden, der praktisch benötigt worden wäre, um das zusätzliche Wasser zu verdampfen. Die 1,079 g sind noch in Briketts umzurechnen (Faktor: 0,8289). Die Wassermenge bei der Durchführung am Ofen ist etwa um 150ml höher, sodass im 2h-Test eine Brennstoffmenge von 134 g Holzbriketts dazu addiert wird. Das Ergebnis ist in Tabelle 8-6 abgebildet.


	im Nepal-Ofen [g]	offenes Feuer [g]	Vergleich	Ersparnis
Aufheizphase	1137	1498	75,90%	24,10%
2h-Test	2464	3687	66,83%	33,17%

Tabelle o-o. Vergieich der Verbrauchten Dreimstommasser	Tabelle 8-6: Verg	gleich der verbr	rauchten Bren	nstoffmassen
---	-------------------	------------------	---------------	--------------

Das Ergebnis zeigt, dass bei einem zweistündigen Garprozess die Ofenvariante nur etwa 2/3 der Brennstoffmasse benötigt, wie wenn der Topf über offenem Feuer hängt. Das Ersparnis der Aufheizphase liegt bei fast 25 %. Da in dieser Phase noch eine Aufheizung der Ofengemäuer stattfindet, ist ein etwas schlechteres Ergebnis erklärbar.



Abbildung 8-12: Temperaturverläufe unter den Töpfen bzw. im Feuerraum

In Abbildung 8-12 sind die Temperaturverläufe im Feuerraum des Nepal-Ofens, sowie unter dem Topf in der Versuchsdurchführung über offener Flamme dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Schwankung im Ofen geringer ist als ohne Ofen. Auch die Häufigkeit der Schwankungen ist bei der Ofenvariante weitaus geringer, da ein konstanter Abbrand und eine bessere Stabilisierung gewährleistet werden können. Im Falle des offenen Feuers ist die Flamme immer wieder unterschiedlichen



Luftströmungen ausgesetzt. Dies hat eine bewegende Flammenfront zur Folge, wodurch die Steuerung der Wassertemperatur erschwert wird. Die Mitteltemperaturen beider Versuchsdurchführungen liegen etwas auseinander. Während die Durchschnittstemperatur im Ofen 605 °C beträgt, befindet sie sich bei offenem Feuer unterhalb des Topfes bei 465 °C wieder.

Trotzdem ist das Einsparpotenzial geringer als erwartet. Dies hängt womöglich damit zusammen, dass bei der Ofenvariante die Fläche der Wärmezufuhr auf den Kochstellenradius beschränkt ist, während sie im Falle des offenen Feuers auf die gesamte Topffläche ausgeweitet ist. Aus diesem Grund genügt in diesem Fall eine weitaus geringere Durchschnittstemperatur unterhalb des Kochtopfes. Wegen der erschwerten Steuerung des offenen Feuers gehen die Graphen in Abbildung 8-12 gegen Ende etwas auseinander, denn in diesem Fall lag die Wassertemperatur stets etwas höher als im Falle des Ofens. Gleiche Temperaturen unterhalb des Topfes haben eine höhere Wassertemperatur im Falle des offenen Feuers zur Folge, da bei dieser Versuchsdurchführung mehr Wärme aufgenommen werden kann. Da jedoch versucht wurde die Wassertemperatur in beiden Fällen gleich zu halten, musste die Temperatur im Nepal-Ofen etwas höher sein. Außerdem handelt es sich bei dem Vergleichstest um einen Garprozess. Bei einem Vergleich eines zweistündigen Siedeprozesses würde das Einsparpotenzial wahrscheinlich größer ausfallen.

## 8.3.2 Injera-Platte

Auch bei diesen Versuchen werden die 1000 g Anfeuerholz der Aufheizphase in Briketts umgerechnet und dazu addiert. Eine Umrechnung der Endoberflächentemperaturen der Injera-Platte wird nicht durchgeführt. Dies muss vernachlässigt werden, da auch sonst die Oberflächentemperatur nur ungefähr im Bereich der 250 °C gehalten werden kann. Tabelle 8-7 zeigt das Ergebnis auf.

	in Injera [g]	offenes Feuer [g]	Vergleich	Ersparnis
Aufheizphase	3188	8044	39,63%	60,37%
2h-Test	3616	9859	36,68%	63,32%

Tabelle 8-7: Ergebnis Injera-Vergleich



Das Ergebnis ist beachtlich. Über 60 % Einsparung an Brennstoffenergie ist in der Aufheizphase und im anschließenden 2h-Test durch den Ofen möglich. Der große Unterschied kommt wahrscheinlich von der guten Wärmespeicherung des Ofens. Dieser Effekt des Ofens kommt der wärmeleitenden Platte zu Gute, da diese nicht so stark auf ein erloschenes Feuer reagiert wie die Kochstellen. Im Gegensatz dazu, kann unter der Injera-Platte über offenem Feuer keine Wärme gestaut werden. Sobald die Flammen erlöschen, kühlt sich die Luft unterhalb der Platte schnell ab. Auch in diesem Vergleich können in Abbildung 8-13 die Schwankungen der Temperatur unter der Injera-Platte verglichen werden. Wie schon beim Nepal-Ofen ist die Schwankung über offenem Feuer größer und häufiger. Im Injera-Feuerraum kann die Temperatur mittels des Glutbettes in einem höheren Zustand gehalten werden, wodurch die Oberflächentemperatur der Platte einfacher beizubehalten ist. Der Wärmeverlust bei einem offenen Feuer ist größer, da die Flammen teilweise unter der Platte herausschlagen. Dies ist jedoch nötig, um auch die Außenbereiche der Platte ausreichend zu erwärmen.



Abbildung 8-13: Temperaturvergleich jeweils unter der Injera-Platte



Die Mitteltemperaturen aus Abbildung 8-13 betragen 583 °C im Ofen und 618 °C im Falle des offenen Feuers.

Als Referenz bei diesem Vergleichsversuch stand die Oberflächentemperatur der Injera-Platte. Der Verlauf dieser Temperatur bei beiden Versuchen ist in Abbildung 8-14 und in Abbildung 8-15 dargestellt.



Abbildung 8-14: Oberflächentemperatur Injera-Ofen

In beiden Abbildungen ist der Verlauf der Plattenmittentemperatur im Bereich von 250 °C ersichtlich. Außerdem ist zu erkennen, dass die Temperaturen der Außenbereiche bei der Ofenvariante in einem höheren Temperaturbereich liegen als beim offenen Feuer. Die stärkere Schwankung im Ofenversuch geht mit der Lage des Brennstoffes einher. Denn im Ofen müssen weniger Holzbrikettstücke eingelegt werden, um die Plattenmittentemperatur zu halten. Dadurch entstehen im Außenbereich punktuelle Spitzentemperaturen je nach Lage der Brikettstücke. Folglich kommt es zu leichten Schwankungen der Außentemperaturen der Plattenoberfläche. Der Grund dafür, dass die Temperatur im linken Bereich der Injera-Platte beim Ofenversuch fast kontinuierlich etwas höher ist als auf der rechten Seite. Dies ist auf eine geringe Schieflage der Platte zurückzuführen. Sie fällt nach rechts einige Millimeter ab. Im hinteren Teil der Injera-Platte sorgt die heiße Zugluft in



Richtung des Durchbrandes für die ausreichende Erwärmung. Allgemein unterscheiden sich die Außentemperaturen am Ofen nur gering gegenüber der offenen Variante, bei der es keine vorgegebene Luftströmungsrichtung unterhalb der Platte gibt. Dadurch liegen die Temperaturwerte des offenen Feuers im gleichen Bereich. Dies kann jedoch mit einer richtigen Brennstoffverteilung innerhalb des Injera-Feuerraumes gelöst werden.



Abbildung 8-15: Oberflächentemperatur Injera-Platte offenes Feuer

In Tabelle 8-8 sind die Mittelwerte aus den gemessenen Oberflächentemperaturen der Injera dargestellt (vgl. Abbildung 8-14 und Abbildung 8-15). Dabei ist zu erkennen, dass in beiden Versuchen die Plattenmittentemperaturen im Bereich der gewünschten 250 °C liegen. Die Mittelung aller vier Außentemperaturen der Injera-Platte befindet sich in der Ofenausführung um etwa 14 °C höher als über offener Flamme (vgl. auch Anordnung der Temperaturmessstellen unter der Injera Abbildung 6-15).

Mittelwerte 2h-Test	Plattenmitte [°C]	vorne/Gate [°C]	links [°C]	hinten [°C]	rechts [°C]	Außenbereich [°C]
Injera	252	208	215	183	198	201
offenes Feuer	251	175	200	182	190	187



## 9 Fazit

In dieser Diplomarbeit wurden zwei Ofenmodelle aus Lehmsteinen auf ihren thermischen Wirkungsgrad und ihre Emissionen untersucht. Das Hauptaugenmerk lag auf den Wirkungsgradmessungen, bei denen die Untersuchung verschiedener Einflussparameter sowie die Veränderung des Konstruktionsstandes vorgenommen wurden. Der Konstruktionsstand änderte sich hinsichtlich der Luftströmung und der Ausnutzung der Wärmeenergie. Den Emissionsmessungen lagen unterschiedliche Luftzuführungen und ebenfalls unterschiedliche Konstruktionsstände zugrunde. Die unterschiedlichen Luftzuführungen wurden durch Größenveränderungen des Gates vorgenommen. Zusätzlich zu den Emissionsmessungen gaben Temperaturmessungen die Temperaturverteilung innerhalb des Ofens wieder. Außerdem wurden an beiden Ofenmodellen sog. Vergleichstests durchgeführt, die ein ungefähres Potenzial für die Höhe der Brennstoffeinsparung geben sollen. Im Falle der Injera-Platte konnte u. a. auch die Temperaturverteilung auf der Plattenoberfläche verglichen werden.

Die Water Boiling Tests brachten ein eindeutiges Ergebnis, das sich mit den theoretischen Grundlagen der Wärmeübertragung erklären lässt. Der Wirkungsgrad steigt mit größer werdender Fläche der Kochstelle. Demnach muss diese Fläche der Wärmeübertragung so groß wie möglich ausgelegt werden. Die Brennraumgröße dagegen ist so gering wie möglich zu halten, jedoch so groß, dass genügend Brennmaterial in den Brennraum eingelegt werden kann um die Kochmenge zum Kochen zu bringen. Ebenso spielt das Material und die Geometrie des Topfes eine wichtige Rolle. Das Topfmaterial sollte eine größtmögliche Wärmeleitfähigkeit besitzen, bei dem die Wandstärke möglichst gering zu halten ist. Des Weiteren sollte die Topfgröße auf die Kochmenge angepasst sein, sodass die Fläche der Wärmeabfuhr zur Umgebung minimiert ist. Allgemein kann zu dem WBT angemerkt werden, dass die Messmethoden geringe Abweichungen aufweisen, da jedes Mal leicht veränderte Zustandsbedingungen wie beispielsweise der Flammenschlag oder das Abbrandverhalten des Holzes vorliegen. Dadurch lassen sich nur große Unterschiede in den verschiedenen Versuchsvariationen erkennen, wie z.B. das Vorhandensein oder die Entnahme der Luftführungselemente. Dies ist an den

Fazit



einzelnen Versuchswiederholungen sichtbar, bei denen teils deutliche Abweichungen auftreten.

Die Temperatur- und Abgasmessungen verdeutlichen die Versuchsbeobachtungen während den Durchführungen. Die Temperaturmessungen zeigen auf, dass bei einer Verringerung der Gatefläche ein erhöhter Luftzug auftritt, der dafür sorgt, dass die heiße Luft schneller durch den Ofen zieht. Dies senkt die Brennraumtemperatur und erhöht die Temperatur unter der zweiten Kochstelle. Somit erhöht sich auch die Abgastemperatur, was zu etwas größeren Abgasverlusten führt. Verdeutlicht wird dies durch die Bewegungen der Flamme, die immer wieder in die Richtung der zweiten Kochstelle gezogen werden.

Die Abgasmessungen besitzen für einen Vergleich untereinander nur wenig Aussagekraft. Da keine Möglichkeit vorhanden war den Luftmassenstrom zu messen, können die einzelnen Messergebnisse nicht miteinander verglichen werden. Aus den Versuchsbeobachtungen geht hervor, dass zum Beispiel die an der Abgasentnahmestelle gemessene Abgasmenge in den unterschiedlichen Durchführungen variiert, da ein Teil des Abgases vom Feuerraum aus nach vorne durch das Gate entweicht. Dies kann Veränderungen in der Abgaskonzentration und der Abgaszusammensetzung nach sich ziehen. Dieser Effekt ist je nach Verringerung der Gatefläche unterschiedlich. Lediglich der Verlauf der einzelnen Emissionen untereinander und zur Brennraumtemperatur entspricht weitestgehend den theoretischen Erwartungen. Jedoch auch die Höhe der Emissionen weist auf einige Probleme hin. Durch die lange Heizleitung von ca. 30 m der Abgasmessanlage entsteht ein geringer Druckverlust, der zu Ansaugverlusten führt. Auch die zahlreichen verschraubten Heizleitungen, wie auch die AMA selbst, weisen geringe Undichtigkeiten auf. Ein weiteres Problem stellt die Abgastemperatur der Öfen dar. Diese liegt teils unter 100 °C, sodass es zur Kondensation kommen kann, noch bevor das Abgas die Heizleitung erreicht. Dies führt zu einer Verringerung der Durchlässigkeit des vorgestellten Filters. Allgemein liegen teilweise die Messungen der Versuchswiederholungen bei gleichen Randbedingungen weiter auseinander als die gemittelten Werte der Variationsdurchführungen.

Zusammenfassend muss zu den Wirkungsgrad- und den Abgasmessungen das Problem der Wetterabhängigkeit genannt werden. Da der Aufbau der Ofenanlagen im



Freien vorgenommen wurde, treten Unterschiede in Bezug auf die Luftfeuchte, der Umgebungstemperatur und vor allem der Windverhältnisse auf. Diese Einflüsse können nicht kompensiert werden. Lediglich die Windeinflüsse konnten durch einige Maßnahmen verringert werden. Durch die Wettereinflüsse können sich das Abbrandverhalten und der Flammenschlag ändern, was Einflüsse auf die Wirkungsgradmessungen, die Temperatur- und Abgasmessungen hat. Trotz all dieser Einflüsse stellt sich die Variante des versenkten Kochtopfes bezüglich des Wirkungsgrades und der Energieausnutzung als Beste heraus. Aus allen Messungen geht hervor, dass ein möglichst geringer Luftzug bei der Luftzuführung, wie auch innerhalb des Ofens von Vorteil erscheint. Zudem erweist sich der kleinere Feuerraum als effizienter. Daher ist der Einbau der Luftführungselemente und auch der Einbau des Feuerraumbodens zu bevorzugen.

Die Vergleichsversuche zeigen, dass der Einsatz der Öfen auf jeden Fall brennstoffsparender ist, als wenn der selbige Kochvorgang über offener Flamme durchgeführt wird. Die Ergebnisse des Injera-Vergleichs ergeben ein hohes Einsparpotenzial bei höheren Plattentemperaturen im Außenbereich. Einziger Nachteil ist die größere Temperaturdifferenz der einzelnen Plattentemperaturen im Außenbereich, da diese durch die Luftströmung beeinflusst werden. Im Nepal-Vergleich liegt das Einsparpotenzial geringer als angenommen. Dies liegt an der größeren Fläche der Wärmeübertragung in der Versuchsdurchführung über offener Platte. Dies ist jedoch auch topfabhängig. Die Vergleichsversuche dienen nur als ungefähres Potenzial im Ofenbau. Dennoch lassen sich die Vorteile der Öfen erkennen. Die bessere Wärmespeicherung und der Schutz vor Windeinflüssen kommen dem Brennstoffverbrauch zu Gute.



## **IV** Literaturverzeichnis

- K. Schaber, F. Mayinger, P. Stephan und K. Stephan, Thermodynamik Band2, Bd. 2, Darmstadt, Karlsruhe: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] W. Geller, Thermodynamik für Maschinenbauer, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2006.
- [3] G. Cerbe und G. Wilhelms, Technische Thermodynamik, München: Carl Hanser Verlag, 2013.
- [4] R. Kneer, Skript Feuerungstechnik, Aachen: RWTH Aachen, 2006.
- [5] R. Flierl, *Skript zur Vorlesung Ressourcen- und umweltschonende Energieanwendung*, TU Kaiserslautern, 2011.
- [6] K. Schaber, F. Mayinger, P. Stephan und K. Stephan, Thermodynamik Band1, Bd. 1, Darmstadt, Karlsruhe: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [7] R. Flierl, *Skript zur Vorlesung Energietechnik I,* TU Kaiserslautern, 2012.
- [8] Schiedel GmbH&Co., Grundlagen der Schornsteintechnik, München, 2004.
- [9] C. Schön und H. Hartmann, "Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinfeuerungsanlagen," Eigenverlag, Straubing, 2014.
- [10] H. Hartmann, P. Roßmann, P. Turowski, H. Link und A. Marks, "Staubemissionen aus Holzfeuerungen," Eigenverlag, Straubing, 2006.
- [11] F.-E. Schuberth, Η. Hartmann, P. Turowski und Ρ. Roßmann, "Partikelemissionen für Kleinfeuerungen für Holz Ansätze für und Minderungsmaßnahmen," Eigenverlag, Straubing, 2010.
- [12] R. Bailis, D. Ogle, N. MacCarty und D. Still, The Water Boiling Test Version 3.0, Household Energy and Health Programme, Shell Fondation, 2007.
- [13] Emissions Test Systems AVL, "Benutzerhandbuch AVL Sample Selection Module, Band AT2576D, Rev 00," Neuss, 2008.
- [14] Emissions Test Systems AVL, Bedienungsanleitung und Gerätebeschreibung der Abgasmessanlage i60, Band AT2519D, Rev 02, Neuss, 2008.



[15] Pierburg GmbH, Bedienungsanleitung für das Dieselrauch Messgerät PR 1, Neuss, 1989.