

Nr. 5

SCHRIFTENREIHE

T. Schiffert

**KACHELOFEN 2000 – Technische
Entwicklungen der
Holzverbrennung im Kachelofen**



ÖSTERREICHISCHER KACHELOFENVERBAND

Versuchs- und Forschungsanstalt der Hafner Österreichs

Schriftenreihe des Österreichischen Kachelofenverbandes

Herausgeber und Vertrieb	Österreichischer Kachelofenverband A-1220 WIEN, Dassanowskyweg 8
Redaktion	Dipl.-Ing. Dr. Thomas Schiffert
Verantwortung	Der Inhalt der Beiträge liegt in der Verantwortung des jeweiligen Autors
Copyright ©	2001, Österreichischer Kachelofenverband Nachdruck auch auszugsweise nur mit Genehmigung des Herausgebers. Alle Rechte, auch das der Übersetzung, vorbehalten.
Ausgabe 1	2/1996
ISBN	3-901680-04-7

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	5
2 Prognose der Entwicklung der Grenzwerte	5
2.1 Entwicklung des CO-Grenzwertes	5
2.2 Entwicklung des OGC-Grenzwertes	6
2.3 Entwicklung des NO _x -Grenzwertes.....	7
3 Technische Entwicklungen der Holzverbrennung im Kachelofen	7
3.1 Brennraumgeometrie	7
3.1.1 Versuchsofen	8
3.1.2 Brennstoffdaten	8
3.1.3 Durchführung der Messungen	9
3.1.4 Auswertung der Meßergebnisse.....	9
3.1.5 Vergleich der Ergebnisse	11
3.1.6 Schlußfolgerungen aus der Versuchsreihe Brennraumgeometrie	11
3.2 Brennraumgröße	11
3.2.1 Versuchsofen	11
3.2.2 Versuchsergebnisse	12
3.2.3 Vergleich der Ergebnisse	13
3.2.4 Schlußfolgerungen aus der Versuchsreihe Brennraumgeometrie	15
3.3 Brennraumisolierung	15
3.3.1 Ausgangssituation	15
3.3.2 Einfluß des Wassergehaltes des Brennstoffes	17
3.3.3 Vergleich des isolierten Brennraumes mit dem nicht isolierten	20
3.3.4 Schlußfolgerungen und weitere Verbesserungsmöglichkeiten	22
3.4 Sauerstoffregelung	23

4 Kachelofen 2000	24
4.1 Produktanforderungen an den Kachelofen in Hinblick auf die Verbrennungstechnik.....	24
4.2 Technischer Handlungsbedarf in bezug auf die Verbrennungstechnik ...	24
4.3 Informationsbedarf in bezug auf die Verbrennungstechnik	25
4.4 Kurzdarstellung Kachelofen 2000 für die Verbrennungstechnik	25
5 Verzeichnisse.....	26
5.1 Literaturverzeichnis	26
5.2 Abbildungsverzeichnis	26
5.3 Tabellenverzeichnis	27

1 Einleitung

Der Kachelofen ist in Österreich sicherlich das Heizgerät mit der größten Tradition. Die Anzahl der Kachelöfen läßt sich mit ca. 450.000 schätzen, damit ist er sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht als auch in Hinsicht auf die Raumwärmeerzeugung ein bedeutender Faktor. Beachtet man nun die Tatsache, daß die Kachelöfen in Österreich zu über 90 % mit Holz betrieben werden, so erkennt man ihre Bedeutung für die Verwendung des Brennstoffs Holz. Die Verbrennung ist in diesen Fällen CO₂-neutral und trägt dazu bei, die CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen für die Raumwärmeerzeugung zu reduzieren. Um diesen Vorteil der Verbrennung nicht zu beeinträchtigen, müssen die anlagenbedingten Emissionen des Kachelofens möglichst gering gehalten werden. Dies ist weiters notwendig, um die steigenden gesetzlichen Anforderungen an den Kachelofen zu erfüllen.

In dieser Schrift sollen eine Prognose über die Entwicklung der emissionsmäßigen Anforderungen an den Kachelofen, Entwicklungsmöglichkeiten für die Holzverbrennung im Kachelofen und eine Darstellung der Auswirkungen auf den „Kachelofen 2000“ aufgezeigt werden.

2 Prognose der Entwicklung der Grenzwerte

2.1 Entwicklung des CO-Grenzwertes

Betrachtet man die Entwicklung der Grenzwerte, so läßt sich aus dem Verlauf der Geschichte eine Abschätzung der Grenzwerte für die Zukunft wagen. Am interessantesten ist die Entwicklung der Grenzwerte für die CO-Emissionen, da diese schon am längsten gefordert werden (Abbildung 1).

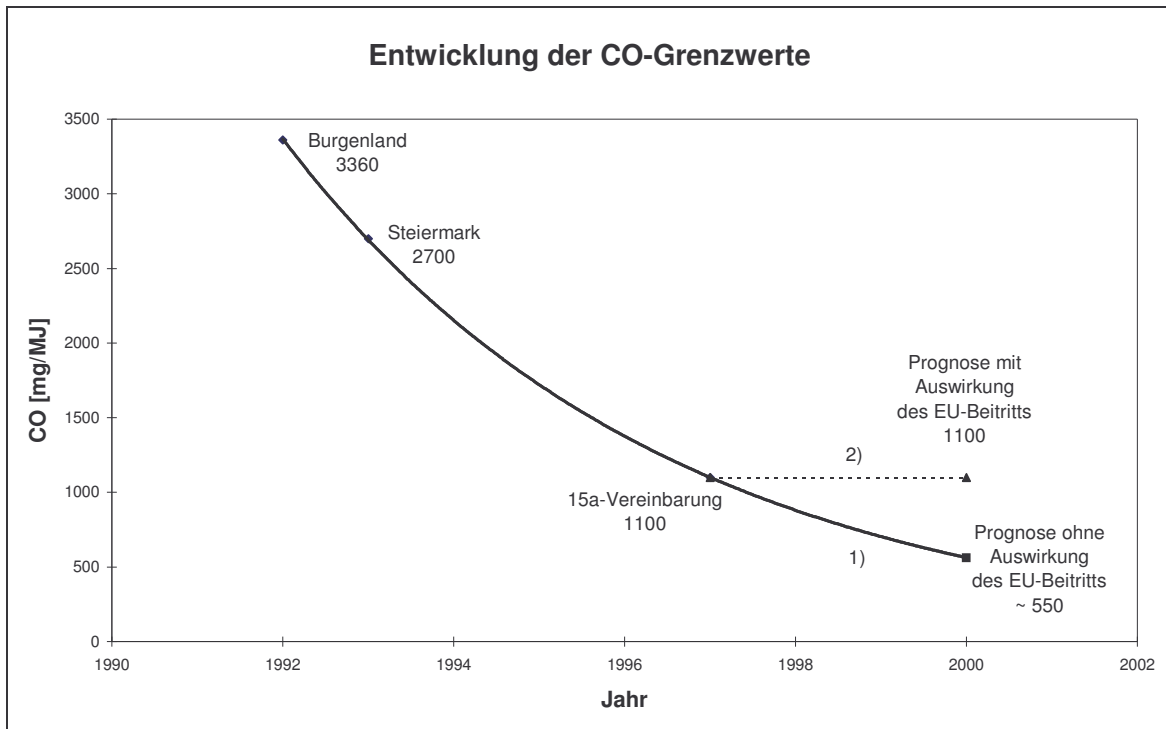


Abbildung 1: Prognose der Entwicklung des CO-Grenzwertes (LGBL-BGLD, 1991, LGBL-STMK, 1992, VST, 1995)

Nach dieser Abschätzung wird der Grenzwert für die CO-Emissionen im Jahre 2000 bei einer kontinuierlichen Entwicklung ohne Auswirkung des EU-Beitritts bei etwa 550 [mg/MJ] liegen ¹⁾. Diese Annahme kann als Ausgangsbasis für vom Kachelofen dann geforderte Emissionswerte an Kohlenmonoxid dienen. Als weitere Möglichkeit stellt sich ein Einfrieren der CO-Grenzwerte durch den EU-Beitritt dar ²⁾.

2.2 Entwicklung des OGC-Grenzwertes

Für die Emissionen an organisch gebundenem Kohlenstoff läßt sich dieser Ansatz nicht so leicht verwirklichen, da der Beobachtungszeitraum sehr kurz ist. Eine Abschätzung läßt sich jedoch unter der Annahme treffen, daß das Verhältnis des CO-Grenzwertes zum Grenzwert des OGC's gleich dem Verhältnis der 15a-Vereinbarung sein wird. Aus der Literatur (Nussbaumer, 1992) ist bekannt, daß die Kohlenwasserstoffemissionen in der Regel eine Zehnerpotenz unter den CO-Emissionen liegen. In der 15a-Vereinbarung liegt ein Verhältnis CO / OGC von 13,75 vor.

	CO [mg/MJ]	CO / OGC [-]	OGC [mg/MJ]
15a-Vereinbarung	1100	13,75	80
2000 ¹⁾	≈ 550	13,75	≈ 40
2000 ²⁾	1100	13,75	80

¹⁾ ohne Auswirkung des EU-Beitrittes

²⁾ mit Auswirkung des EU-Beitrittes

Tabelle 1: Prognose der Entwicklung des OGC-Grenzwertes

2.3 Entwicklung des NO_x-Grenzwertes

Bei den NO_x-Emissionen hat sich gezeigt, daß diese in allererster Linie vom Stickstoffgehalt des Brennstoffes abhängen (Schwarzott, 1993). Da auch davon auszugehen ist, daß der Stickstoffgehalt des Holzes im Jahre 2000 gegenüber heute gleichbleiben wird, ist keine Änderung des Grenzwertes zu erwarten.

3 Technische Entwicklungen der Holzverbrennung im Kachelofen

3.1 Brennraumgeometrie

Ausgangsbasis für die Versuche über die Brennraumgeometrie und die Brennraumgröße beim Kachelofen ist die vom Österreichischen Kachelofenverband neu ausgearbeitete Richtlinie für die Berechnung und Auslegung von Kachelöfen. Diese geht davon aus, daß die Brennraumhöhe ein gewisses Mindestmaß nicht unterschreiten darf, da Holz als langflammiger Brennstoff genügend Platz für die Flamme bieten muß, damit diese nicht durch das Berühren kalter Flächen abkühlt und dadurch schlechte Emissionswerte liefert. In den westlichen Bundesländern Österreichs herrscht jedoch die Tradition, Brennräume zu bauen, die entweder im Gegensatz zur Berechnungsrichtlinie deutlich tiefer sind als hoch oder aber deutlich größer sind als von der Berechnungsrichtlinie gefordert. Aus diesen Gründen wird der Einfluß der Brennraumgeometrie und der Brennraumgröße auf die Verbrennungsqualität untersucht.

Als Grundlage für die Versuchsreihe wurde ein 4 kW Kachelofen nach der Berechnungsrichtlinie des Österreichischen Kachelofenverbandes herangezogen, der an der staatlich autorisierten Prüfanstalt der Technischen Universität Wien einer Prüfung in bezug auf die Anforderungen der Feuerungsanlagen-Genehmigungs-Verordnung des Bundeslandes Steiermark (LGBL-ST, 1993) unterzogen worden ist und die Anforderungen erfüllt.

3.1.1 Versuchsofen

Kachelofen nach der Berechnungsrichtlinie des Österreichischen Kachelofenverbandes mit den Brennraummaßen:

Höhe 68 [cm] x Tiefe 45 [cm] x Breite 35 [cm]

Diese Brennraumabmessungen wurden nun variiert, indem die Abmessungen vertauscht wurden. Damit ergeben sich zwei weitere Brennraumabmessungen mit unterschiedlichen Höhen jedoch gleicher Brennraumoberfläche:

Höhe 45 [cm] x Tiefe 68 [cm] x Breite 35 [cm]

Höhe 35 [cm] x Tiefe 68 [cm] x Breite 45 [cm]

3.1.2 Brennstoffdaten

Die Versuche wurden mit Buchenholz, das einen mittleren Wassergehalt von etwa 15 [%] aufwies, durchgeführt.

Buche, w = 15 %		
Kohlenstoffgehalt (c)	[%]	43,1
Wasserstoffgehalt (h)	[%]	4,8
Stickstoffgehalt (n)	[%]	0,2
Schwefelgehalt (s)	[%]	0,01
Sauerstoffgehalt (o)	[%]	36,7
Aschegehalt (a)	[%]	0,3
Wassergehalt (w)	[%]	15
Heizwert (H_u)	[MJ]	15,2
CO_2 max.	[%]	20,81

Tabelle 2: Brennstoffdaten Brennraumgeometrie, Brennraumgröße

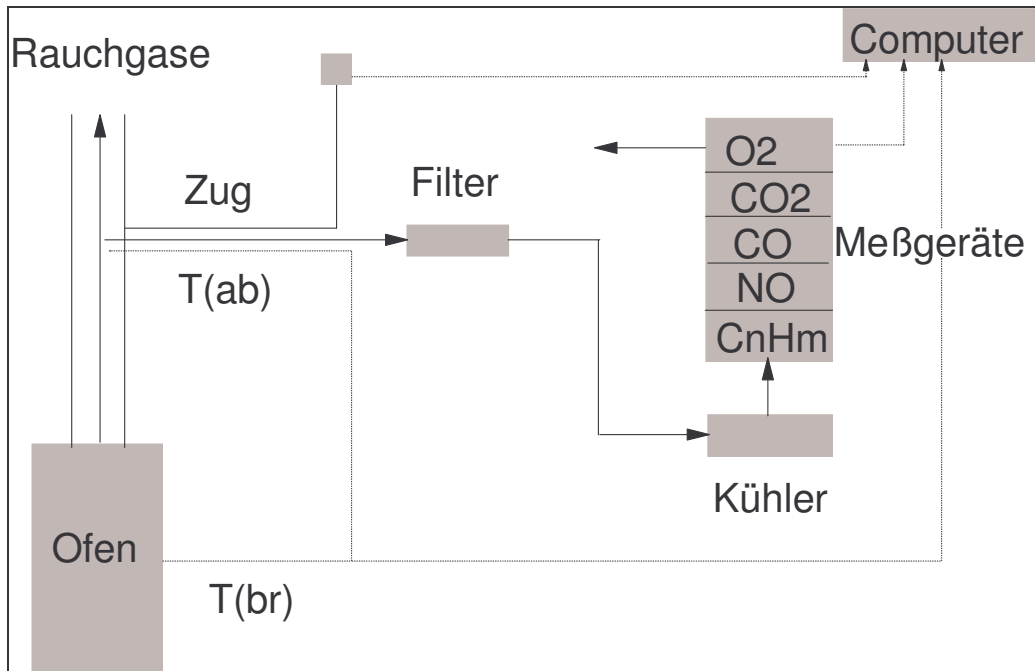


Abbildung 2: Versuchsaufbau Brennraumgeometrie, Brennraumgröße und Brennraumisolierung

3.1.3 Durchführung der Messungen

Zum Vergleich der jeweiligen Brennraumgeometrien wurden jeweils drei Versuche mit 12 kg Brennstoff durchgeführt. Die Vollastmenge von 15 kg konnte nicht aufgelegt werden, da die Versuche in der warmen Jahreszeit durchgeführt wurden und daher die Zugbedingungen 15 kg Brennstoff nicht zuließen.

Nach dem Einschalten der Meßgeräte wurde das Erreichen der Nullwerte abgewartet und bei Bedarf, wöchentlich zumindest einmal, kalibriert. Der Brennstoff wurde genau abgewogen und dem Brennraum des Ofens der Länge nach (Holz) beziehungsweise in gebrochenen Stücken (Holzbrikks, 4 Stücke je Brikett) eingelegt. Der Brennstoff wurde mit „Zündis“ der Firma Umdasch (2x2 Stück) entzündet und die Emissionsmessung anschließend begonnen. Die Versuche wurden laut Bedienungsanleitung des Kachelofens durchgeführt. Es wurde weiters die Messung vom Anzünden bis zu dem Zeitpunkt durchgeführt, an dem die CO₂-Konzentration den Wert von 2,5 % wieder unterschritt.

3.1.4 Auswertung der Meßergebnisse

Die von der Meßdatenerfassung alle 15 Sekunden abgespeicherten Meßwerte wurden in die Tabellenkalkulation „Microsoft Excel, Version 4.0 bzw. 5.0“ übernommen und in dieser bearbeitet. Diese Bearbeitung umfaßt die Bildung von zeitlichen Mittelwerten, die Berechnung der energiebezogenen Emissionen und eine graphische Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Versuche.

3.1.4.1 Höhe 68 [cm] x Tiefe 45 [cm] x Breite 35 [cm] (= hoch)

Auflage	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab) ^{*)}	T _(br) ^{**)}	Zug
---------	--------	-----------	----------------	----	-----	-----------------	---------------------------------	----------------------------------	-----

[kg]	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]
12	9,9	3,66	14,58	882	-	102	217	450	17
12	12,2	2,99	13,58	832	-	93	262	475	17
12	10,4	4,2	15,51	651	-	85	216	-	-
MW	10,8	3,62	14,56	788	-	93	232	463	17

^{*)} Die Messung der Abgastemperatur erfolgte im Verbindungsstück, 25 cm vor Kamineintritt

^{**)} Die Messung der Brennräumeustrittstemperatur erfolgte strahlungsgeschützt 15 cm nach dem Brennräumeustritt im ersten Zug

Tabelle 3: Versuchsergebnisse „hoher Brennraum“ (Brennraumgeometrie)

3.1.4.2 Höhe 45 [cm] x Tiefe 68 [cm] x Breite 35 [cm] (= mittel)

Auflage	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab)	T _(br)	Zug
[kg]	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]
12	8,52	3,61	14,84	891	-	80	208	400	-
12	11,8	3,15	13,9	609	89	90	204	454	-
12	10,47	3,4	14,23	615	76	90	208	412	17
MW	10,26	3,39	14,32	705	83	87	207	422	17

Tabelle 4: Versuchsergebnisse „mittlerer Brennraum“ (Brennraumgeometrie)

3.1.4.3 Höhe 35 [cm] x Tiefe 68 [cm] x Breite 45 [cm] (= niedrig)

Auflage	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab)	T _(br)	Zug
[kg]	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]
12	10	3,23	13,8	744	50	88	222	-	-
12	10,29	3,8	14,87	882	88	93	223	455	19
12	8,09	4,91	16,19	850	88	107	184	352	18
MW	9,46	3,98	14,95	825	75	96	210	404	18,5

Tabelle 5: Versuchsergebnisse „niedriger Brennraum“ (Brennraumgeometrie)

3.1.5 Vergleich der Ergebnisse

Zur Beurteilung und zum Vergleich der Ergebnisse werden die Mittelwerte der CO-Emissionen aus den drei Versuchen herangezogen. Die folgende Darstellung bringt den Vergleich der CO-Emissionen bei den unterschiedlichen Brennraumhöhen.

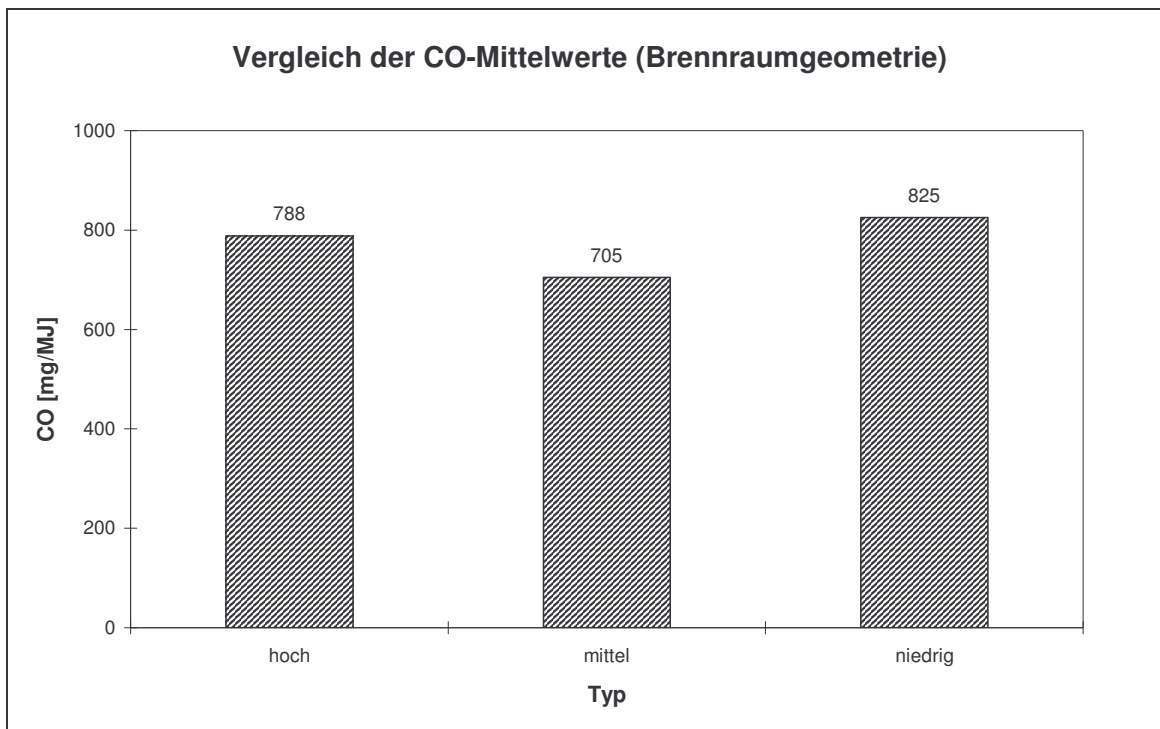


Abbildung 3: Vergleich der CO-Emissionen (Brennraumgeometrie)

3.1.6 Schlußfolgerungen aus der Versuchsreihe Brennraumgeometrie

- Als Ergebnis dieser Versuchsreihe läßt sich eindeutig feststellen, daß bei gleichen Abmessungen die Position des Brennraumes im Raum (stehend, liegend) keine entscheidende Rolle für die CO-Emissionen darstellt. Die Unterschiede in den Mittelwerten bewegen sich in einem für die Stückholzverbrennung für die relativ geringe Anzahl von Versuchen typischen Streubereich.

3.2 Brennraumgröße

Die Vorgangsweise bei der Versuchsreihe zum Thema Brennraumgröße war ident mit der bei der Brennraumgeometrie. Insbesondere wurden der selbe Brennstoff, die selben Meßgeräte, Meßstellen und die gleiche Durchführung und Auswertung gewählt.

3.2.1 Versuchsofen

Als Versuchsofen wurde ein Kachelofen nach der Berechnungsrichtlinie des Österreichischen Kachelofenverbandes mit den Brennraummaßen:

Höhe 68 [cm] x Tiefe 45 [cm] x Breite 35 [cm] \Rightarrow O = 1,403 [m²] verwendet.

Diese Brennraumabmessungen wurden insofern variiert, indem sowohl das Volumen als auch die Oberfläche des Brennraumes einmal deutlich erhöht

Höhe 68 [cm] x Tiefe 68 [cm] x Breite 45 [cm] \Rightarrow O = 2,149 [m²]

und einmal deutlich verringert wurden:

Höhe 45 [cm] x Tiefe 45 [cm] x Breite 35 [cm] \Rightarrow O = 1,035 [m²]

3.2.2 Versuchsergebnisse

3.2.2.1 Höhe 68 [cm] x Tiefe 45 [cm] x Breite 35 [cm] (= normal, hoch)

Auflage	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab)	T _(br)	Zug
[kg]	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]
12	9,9	3,66	14,58	882	-	102	217	450	17
12	12,2	2,99	13,58	832	-	93	262	475	17
12	10,4	4,2	15,51	651	-	85	216	-	-
MW	10,8	3,62	14,56	788	-	93	232	463	17

Tabelle 6: Versuchsergebnisse „normaler Brennraum“ (Brennraumgröße)

3.2.2.2 Höhe 68 [cm] x Tiefe 68 [cm] x Breite 45 [cm] (= großer Brennraum)

Auflage	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab)	T _(br)	Zug
[kg]	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]
12	8,47	3,72	14,94	1432	153	81	190	354	16
12	11,25	3,08	13,82	993	73	94	234	447	19
12	11,76	3,18	14,04	1601	183	81	212	406	18
MW	10,49	3,33	14,27	1342	136	85	212	402	17,7

Tabelle 7: Versuchsergebnisse „großer Brennraum“ (Brennraumgröße)

3.2.2.3 Höhe 45 [cm] x Tiefe 45 [cm] x Breite 35 [cm] (= klein)

Auflage	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab)	T _(br)	Zug
[kg]	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]

12	8,47	3,72	14,94	1432	153	81	190	354	16
12	11,25	3,08	13,82	993	73	94	234	447	19
12	11,76	3,18	14,04	1601	183	81	212	406	18
MW	10,49	3,33	14,27	1342	136	85	212	402	17,7

Tabelle 8: Versuchsergebnisse „kleiner Brennraum“ (Brennraumgröße)

3.2.3 Vergleich der Ergebnisse

Vergleicht man nun die Mittelwerte der einzelnen Versuchsofen, so gelangt man zu folgender Tabelle:

Größe	Umsatz	λ	O ₂	CO	OGC	NO ₂	T _(ab)	T _(br)	Zug
-	[kg/h]	[-]	[%]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[Pa]
normal	10,8	3,62	14,56	788	78	93	232	463	17
groß	10,49	3,33	14,27	1342	136	85	212	402	17,7
klein	9,41	3,26	13,88	746	65	89	220	462	20,3

Tabelle 9: Vergleich der Ergebnisse (Brennraumgröße)

Betrachtet man nun diese Ergebnisse, so lassen sich einige wesentliche Schlußfolgerungen ziehen:

- Die CO-Emissionen sind beim „großen“ Brennraum deutlich höher als bei den anderen beiden Brennräumen
- Die Emissionen an OGC sind beim „großen“ Brennraum ebenfalls deutlich erhöht
- Die NO_x-Emissionen werden von der Brennraumgröße nicht beeinflusst. Dies liegt daran, daß die NO_x-Emissionen im wesentlichen vom Brennstoffstickstoffgehalt abhängen (Schwarzott, 1993) und dieser bei allen Versuchen gleich war
- Der Luftüberschuß wurde in etwa konstant gehalten
- Die Brennaustrittstemperatur liegt beim „großen“ Brennraum deutlich unter den anderen Brennaustrittstemperaturen

Das nachfolgende Bild zeigt eine Darstellung der Emissionen für die drei Brennraumgrößen.

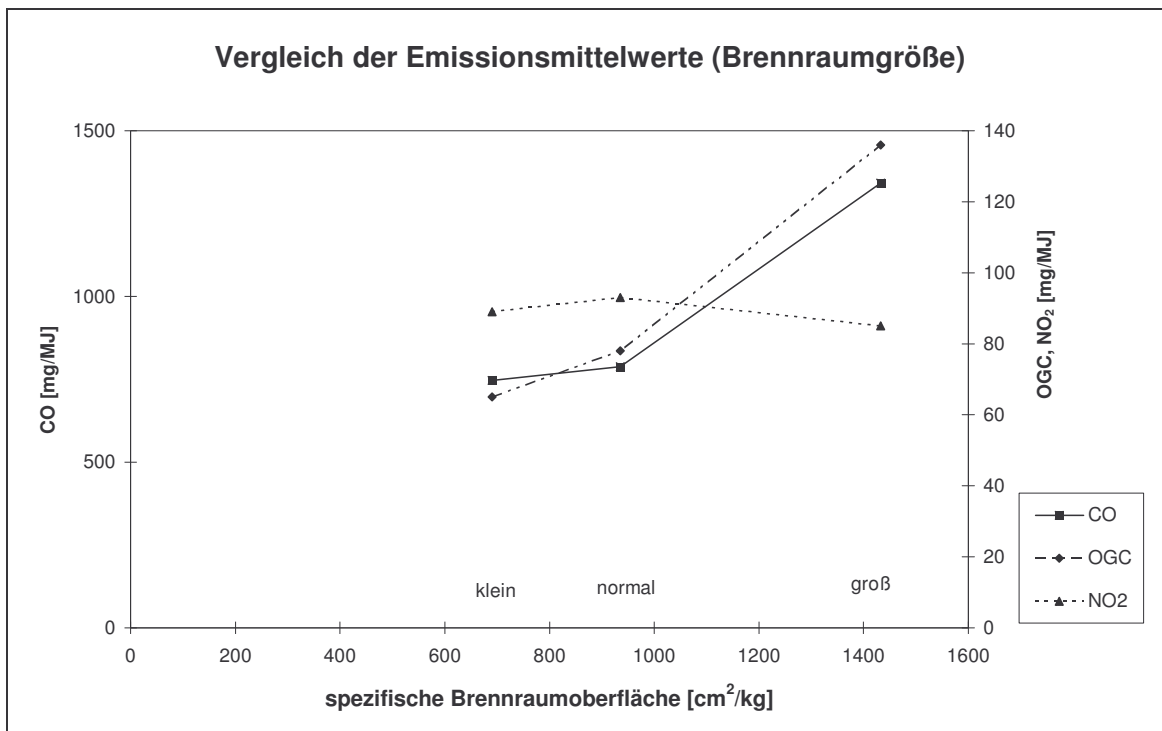


Abbildung 4: Abhängigkeit der Emissionen von der Brennraumgröße

Bei der Betrachtung der Abhängigkeit der Emissionen von der Brennraumoberfläche ist zu beachten, daß sich während der Versuche herausstellte, daß beim kleinsten Brennraum die Flammen massiv aus dem Brennraum in den ersten Zug hinausschlügen. Das führt zu der Schlußfolgerung, daß der erste Zug in diesem Fall als Brennraum benutzt wird. Dies wäre bei der Berechnung der Brennraumoberfläche zu berücksichtigen, was den geringen Unterschied zwischen den Ergebnissen beim kleinen und beim normalen Brennraum erklärt.

Durch die Tatsache, daß beim Kachelofen im ersten Zug die selben Materialien (Schamotte) verwendet werden wie im Brennraum, ist hier kein negativer Einfluß auf die Emissionen gegeben. Im Falle eines stärkeren Wärmeentzuges (Metallwärmetauscher, Wasserwärmetauscher) ist in diesem Fall durch eine zu geringe Verweilzeit im „eigentlichen Brennraum“ eine Erhöhung der Emissionen zu erwarten.

3.2.4 Schlußfolgerungen aus der Versuchsreihe Brennraumgeometrie

- Für den Brennraum hat sich eine spezifische Oberfläche von etwa 900 cm²/kg als optimal erwiesen. Eine höhere spezifische Oberfläche (geringere Belastung) hat sich als schlechter erwiesen, eine geringere als kaum besser
- Limitierender Faktor ist dabei außerdem, daß die Holzmenge, die bei Vollast eingefüllt wird, unter akzeptablen Bedingungen in den Brennraum eingebracht werden können muß

3.3 Brennraumisolierung

3.3.1 Ausgangssituation

Aus der Analyse der heutigen Heizsysteme für den Kachelofen und einigen Entwicklungsergebnissen liegt die Vermutung nahe, daß für eine Verringerung der Emissionen an Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen eine Erhöhung der Temperatur im Brennraum nötig ist.

Eine Ursache für die relativ geringe Verbrennungstemperatur bei der Holzverbrennung im Kachelofen liegt darin, daß der Luftüberschuß λ bei traditionellen Kachelöfen im Durchschnitt etwa 3 beträgt und damit relativ hoch ist. Durch diesen hohen Luftüberschuß tritt in einigen Phasen (λ in der Anbrand- und Ausbrandphase noch deutlich höher) der Verbrennung ein Abkühleffekt durch kühle, den Brennraum unverbraucht durchströmende Luft ein. Eine Verbesserung dieser Situation ist durch eine gezielte Anpassung der Verbrennungsluftmenge an den tatsächlichen Luftbedarf denkbar. Die Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom Luftüberschuß ist aus dem folgenden Bild ersichtlich. Weiters ist zu sehen, daß mit zunehmendem Wassergehalt die Verbrennungstemperatur ebenfalls abnimmt.

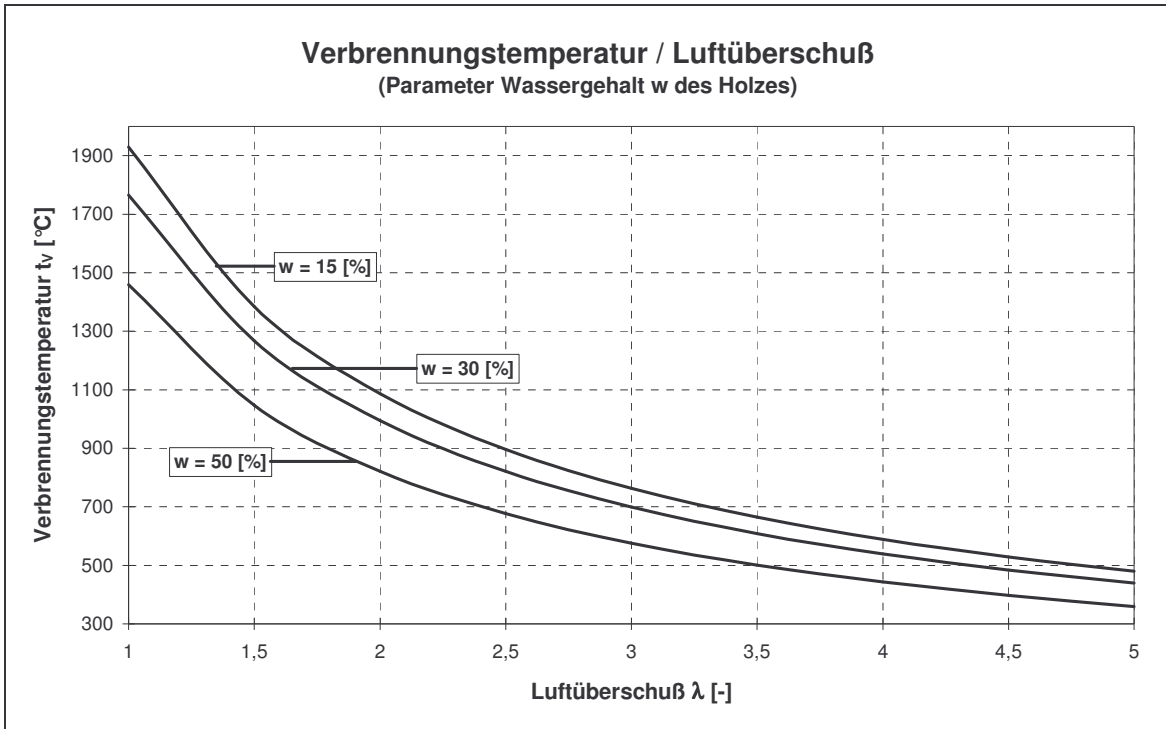


Abbildung 5: Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom Luftüberschuß

Die andere naheliegende Möglichkeit zur Erhöhung der Verbrennungstemperatur liegt in einer Verringerung der Wärmeabgabe im Brennraum. Untersuchungen zeigen, daß im Brennraum eines Kachelofens bereits ein großer Teil (bis zu 50 %) der bei der Holzverbrennung freigesetzten Wärme eingespeichert wird. Um diese Wärmemenge zu reduzieren, bietet sich der Einsatz von Isolationsmaterialien im Brennraum an. Diese nun nicht mehr im Brennraum eingespeicherte Wärme steht dann für die Verbrennung zur Verfügung und führt dadurch zur gewünschten Temperaturerhöhung. Die Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom Wärmeentzug stellt sich wie folgt dar:

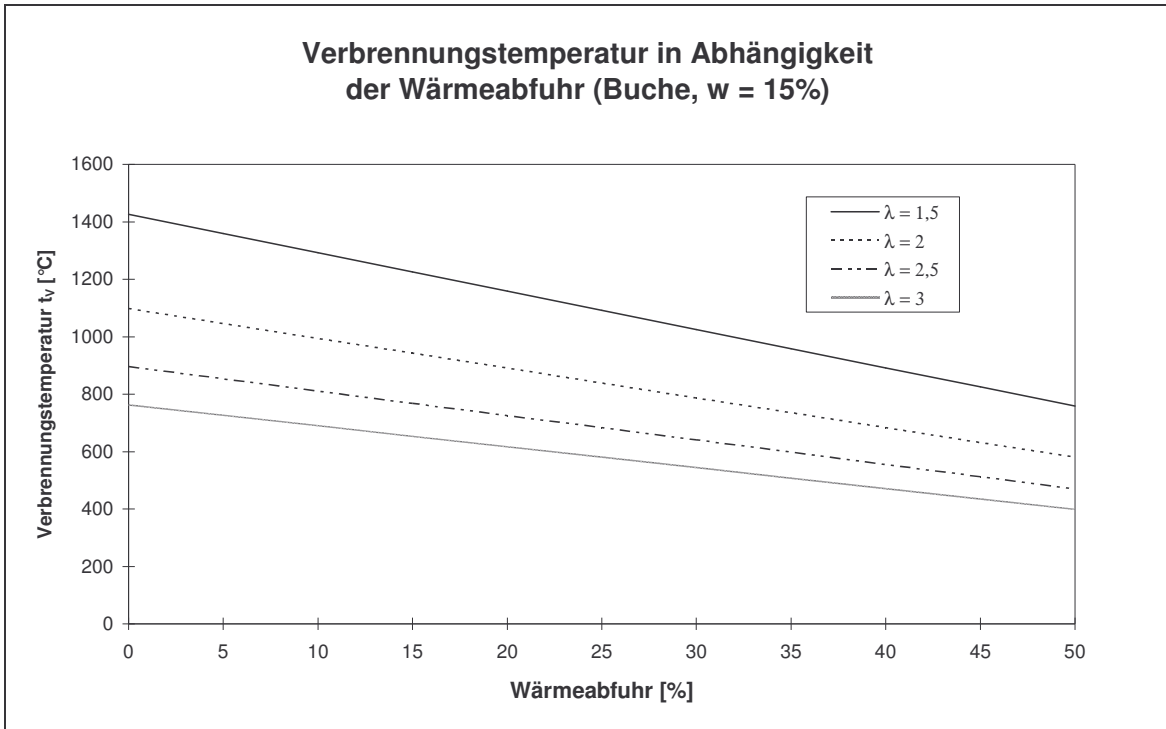


Abbildung 6: Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom Wärmeentzug

3.3.2 Einfluß des Wassergehaltes des Brennstoffes

Während der Durchführung der Untersuchungen mit dem isolierten Brennraum trat die Situation ein, daß der Holzvorrat zur Neige ging und daher eine neue Holzlieferung angefordert werden mußte. Bei den daraufhin durchgeführten Versuchen stellte sich heraus, daß der Wassergehalt des neuen Holzes mit 35 [%] im Mittel, wobei es Unterschiede bei den einzelnen Holzscheiten zwischen 20 und 50 [%] gab, deutlich höher war als beim vorher verwendeten Holz mit einem durchschnittlichen Wassergehalt von etwa 15 [%]. Die beim feuchteren Holz erzielten Emissionen lagen in einer ganz anderen Größenordnung (CO, OGC) als die des trockenen. Dies führte zur Vermutung, daß der Wassergehalt des Holzes einen ganz entscheidenden Einfluß auf die Höhe dieser Emissionen hat. Aus diesem Grund wurden im Anschluß an die Versuche mit dem feuchten Holz Versuche mit Holzbriketts (Umdasch) durchgeführt, da diese mit 8,7 [%] einerseits einen geringeren Wassergehalt aufweisen und außerdem für den Vergleich mit dem nicht isolierten Brennraum einen konstanten Wassergehalt garantieren. Die wichtigsten Brennstoffdaten sind in der Tabelle 10 enthalten.

		Buche, w = 15 %	Buche, w = 35 %	Holz briquets w = 8,7 %
Kohlenstoffgehalt (c)	[%]	43,1	32,9	46
Wasserstoffgehalt (h)	[%]	4,8	3,7	5,3
Stickstoffgehalt (n)	[%]	0,2	0,1	0,1
Schwefelgehalt (s)	[%]	0,01	0,01	0,01
Sauerstoffgehalt (o)	[%]	36,7	28	39,8
Aschegehalt (a)	[%]	0,3	0,2	0,1
Wassergehalt (w)	[%]	15	35	8,7
Heizwert (H_u)	[MJ/kg]	15,2	11	16,4

Tabelle 10: Brennstoffdaten Brennraumisolierung

Für den Vergleich der unterschiedlichen Brennstoffe wurde der jeweilige Brennstoffumsatzbereich bestimmt und die auftretenden Emissionen gemessen (Abbildung 7).

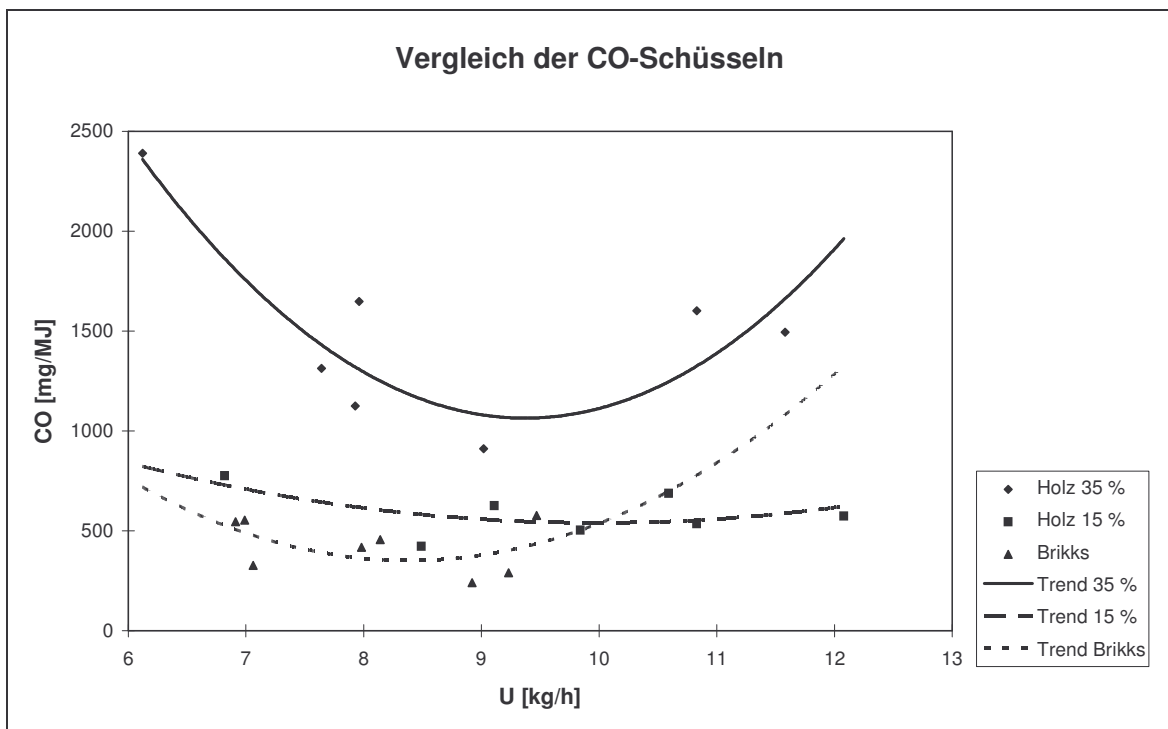


Abbildung 7: Abhängigkeit der CO-Emissionen von Brennstoffumsatz und Brennstoffwassergehalt

Im Anschluß daran wurde für alle drei Brennstoffe der Wert mit der geringsten CO-Emission aus der Gleichung der Kurve bestimmt und in Abhängigkeit vom Wassergehalt des Brennstoffes aufgetragen.

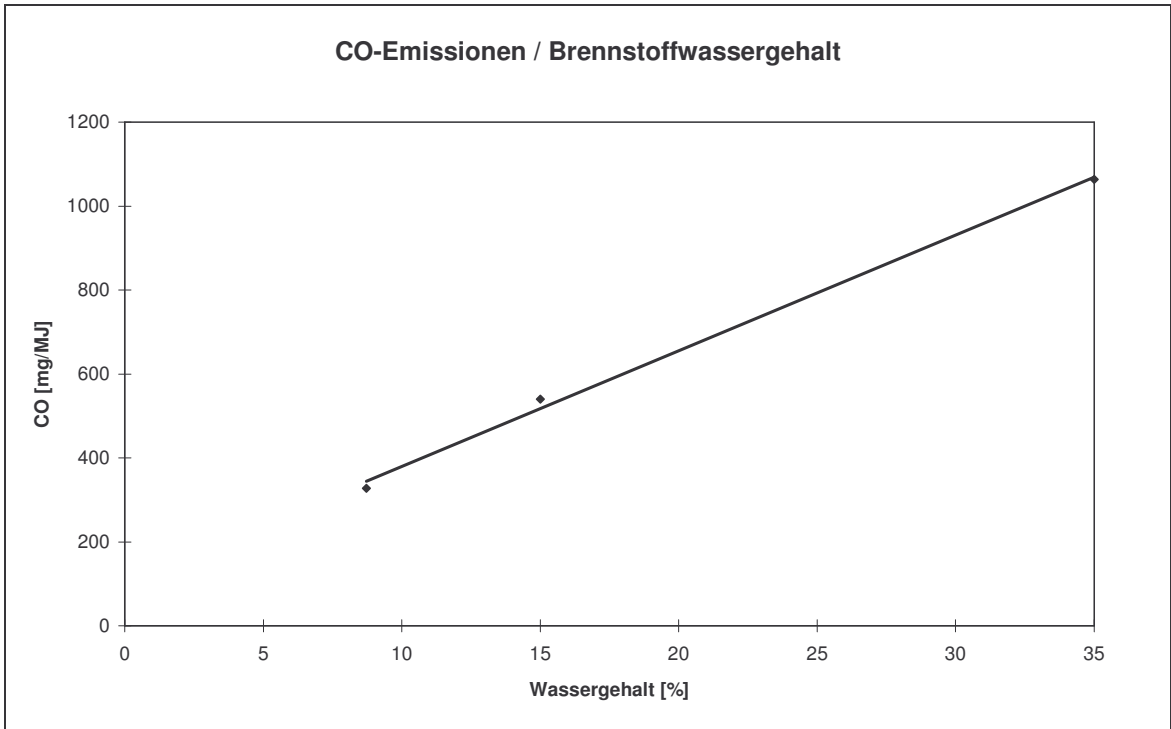


Abbildung 8: Abhängigkeit der minimalen CO-Emission vom Brennstoffwassergehalt

Aus Abbildung 8 erkennt man deutlich die Abhängigkeit der im günstigsten Fall erreichbaren CO-Emissionen vom Wassergehalt des Brennstoffs. Im untersuchten Bereich besteht mit sehr guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen der Verbrennungsqualität und dem Wassergehalt des Brennstoffs.

Genauso kann man beim OGC vorgehen und erhält folgende Abhängigkeit:

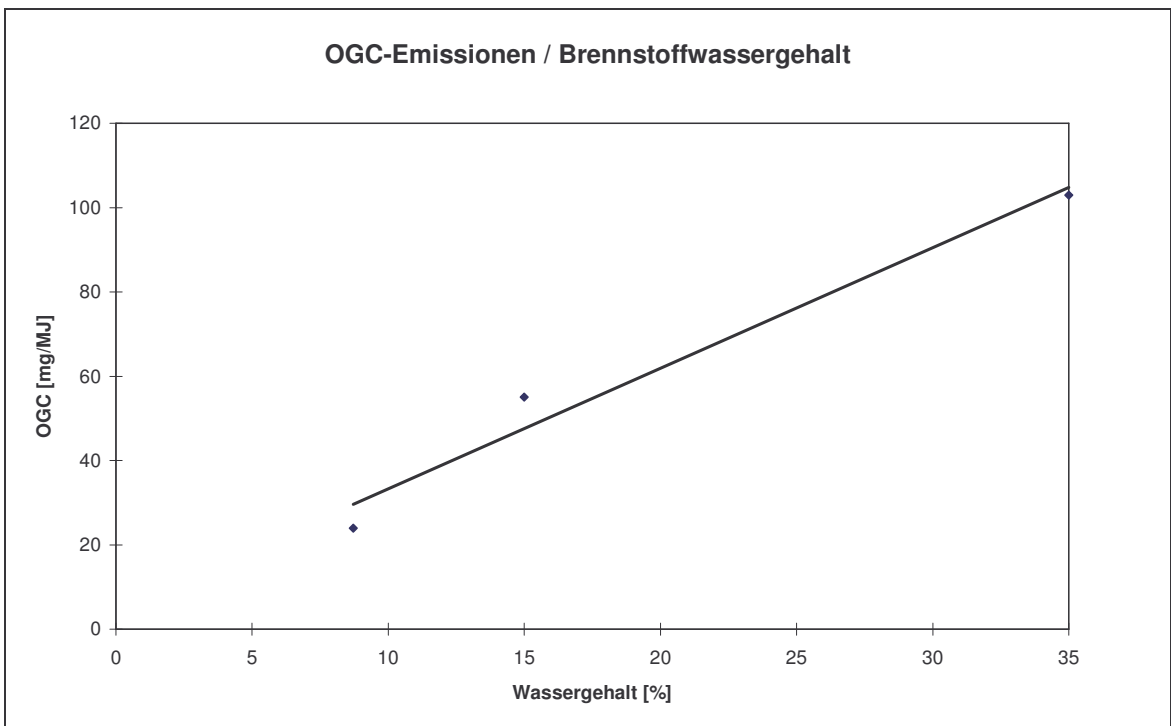


Abbildung 9: Abhängigkeit der minimalen OGC-Emission vom Brennstoffwassergehalt

Es ist für den OGC im untersuchten Intervall ebenfalls eine annähernd lineare Abhängigkeit zwischen dem Wassergehalt des Brennstoffs und den auftretenden OGC-Emissionen gegeben.

3.3.3 Vergleich des isolierten Brennräumes mit dem nicht isolierten

3.3.3.1 Vergleich der Emissionen

Für den Vergleich der beiden Varianten des Brennräumes wurden die zwei Versuchsreihen mit Holzbriketts herangezogen, da sie am besten miteinander vergleichbar sind. Die folgende Tabelle enthält die Ergebnisse, wobei jeweils die Mittelwerte über die Versuche gebildet und anschließend die prozentuelle Änderung ermittelt wurden.

	Umsatz	λ	CO	OGC	$T_{(ab)}$	$T_{(br)}$	η	Zug
	[kg/h]	[-]	[mg/MJ]	[mg/MJ]	[°C]	[°C]	[%]	[Pa]
nicht isoliert	6,72	4,74	768	111	205	387	70	14
isoliert	8,09	3,59	426	41	273	563	69	16
Änderung	[%]	[%]	[%]	[%]			[%]	[%]
	20	- 24	- 45	- 63			- 2	12

Tabelle 11: Vergleich isolierter und nicht isolierter Brennräum

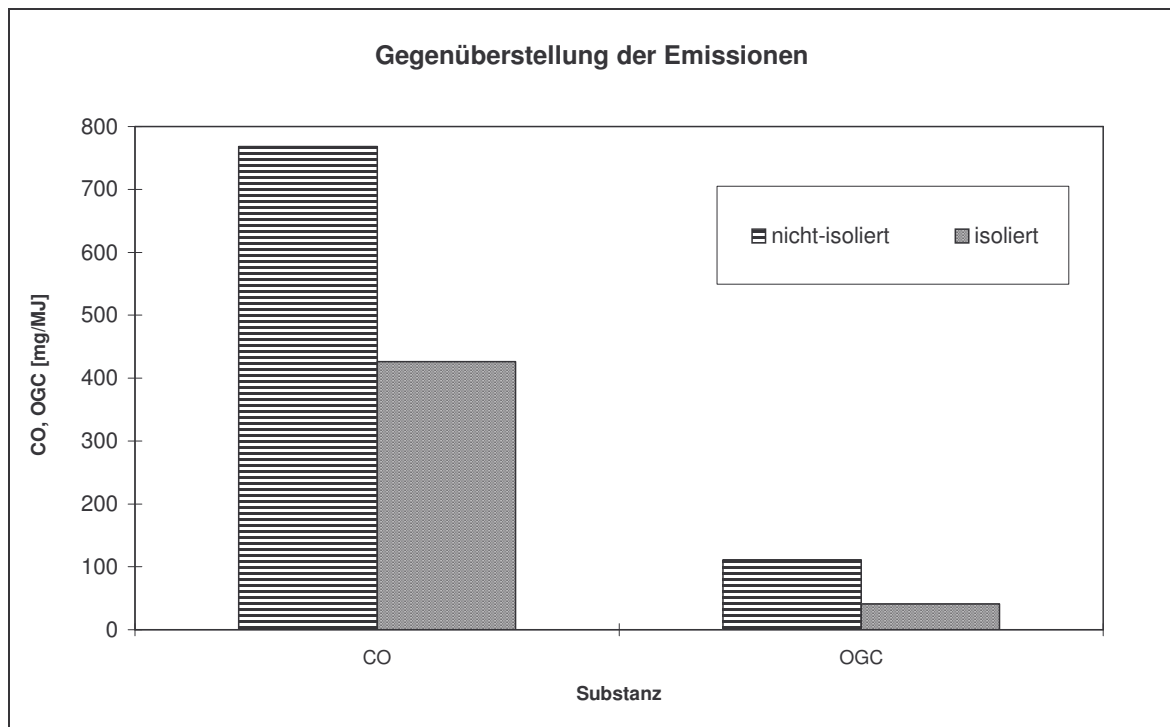


Abbildung 10: Verbesserung der CO- und OGC-Emissionen durch die Verwendung einer Brennraumisolierung

Wie man aus den Ergebnissen sehen kann, wurden die Erwartungen durch den Einbau einer Brennraumisolierung erfüllt. Die Emissionen an Kohlenmonoxid (CO) und organischem Kohlenstoff (OGC) konnten beträchtlich reduziert werden. Dies trat vorwiegend wegen der Erhöhung der Temperatur im Brennraum ein. Dadurch erhöhte sich auch der Brennstoffumsatz, während der Luftüberschuß verringert werden konnte. Der Wirkungsgrad zeigte sich praktisch unverändert, weil sich einerseits zwar der Luftüberschuß verringerte, andererseits sich aber die Abgastemperatur erhöhte und sich diese beiden Effekte so überlagerten, daß sie sich praktisch aufhoben.

Wenn in Zukunft beim Bau des Kachelofens darauf Rücksicht genommen wird, daß die Brennraumaustrittstemperatur und damit auch die Temperaturen in den Zügen bei der Verwendung von Isolationsmaterialien im Brennraum deutlich höher liegen, was eine Verlängerung des Zugsystems verlangt, um die Abgastemperatur in etwa konstant zu halten, dann ist mit einer Erhöhung des Wirkungsgrades zu rechnen.

3.3.3.2 Bestimmung der im Brennraum eingespeicherten Wärme

Die eingespeicherte Wärmemenge ergibt sich aus der Differenz der dem Brennraum zugeführten und aus ihm abgeführten Wärmemengen. Bezieht man die Berechnung auf 0°C, so besteht die zugeführte Wärmemenge aus dem Wärmeinhalt der zugeführten Luft und dem Wärmeinhalt des Brennstoffes (H_u). Die abgeführte Wärmemenge wird durch den Wärmeinhalt des Rauchgases, der durch das Produkt aus Volumen, mittlerer spezifischer Wärme und Brennraumaustrittstemperatur bestimmt wird, ermittelt.

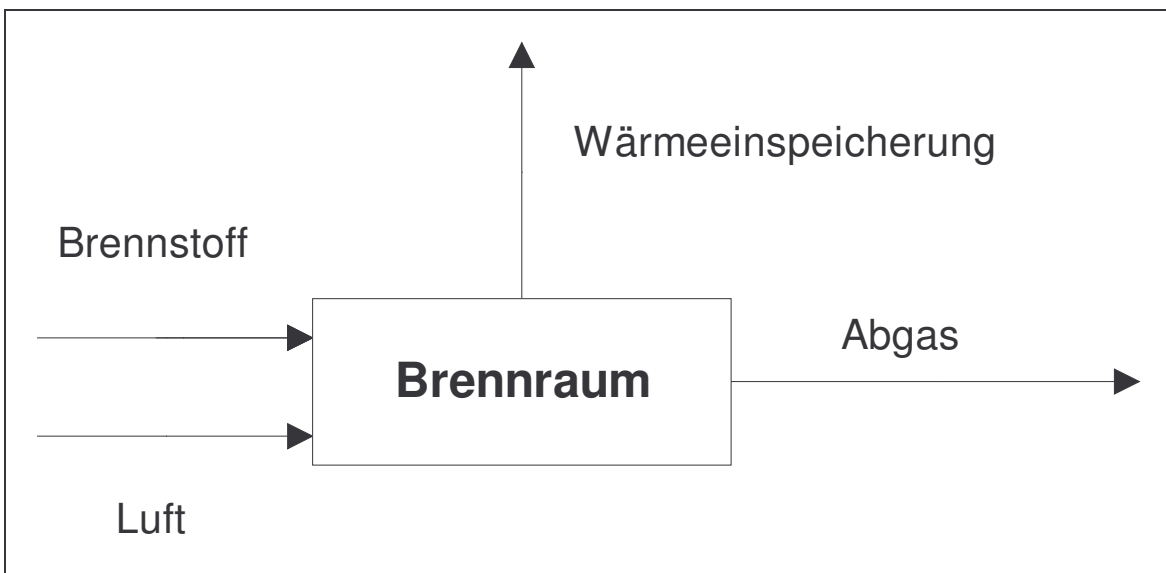


Abbildung 11: Wärmebilanz Brennraum

Vergleicht man nun die aus den Meßergebnissen errechneten Daten für den Brennstoff Holzbriketts, so gelangt man zu folgender Tabelle:

	$T_{(br)mittel}$	$Q_{Speicher}$	$Q_{zugeführt}$	$q_{Speicher}$
	[°C]	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[%]
Isoliert	563	4015	16531	24
Nicht isoliert	387	5574	16655	34

Tabelle 12: Wärmeeinspeicherung im Brennraum

Betrachtet man den Wert der eingespeicherten Wärmemenge für Holzbriketts beim isolierten Brennraum, so erhält man 24 [%]. Beim nicht isolierten Brennraum ist der Wert für Holzbriketts mit 34 [%] etwa um die Hälfte höher.

3.3.4 Schlußfolgerungen und weitere Verbesserungsmöglichkeiten

Wie sich bei der Versuchsreihe deutlich zeigt, ist der Einbau eines Isolationsmaterials im Brennraum für eine Verringerung der Emissionen aus der unvollständigen Verbrennung ein durchaus vielversprechender Weg. Die hier verwendete Keramikfaser besitzt jedoch nicht die nötige mechanische Stabilität, um in der Praxis Verwendung finden zu können. Daher müssen Materialien zum Einsatz kommen, die den Dauereinsatz in der Praxis sowohl in thermischer Hinsicht (das wird durch die Keramikfaser erfüllt) aber auch in mechanischer Hinsicht bestehen können.

Für die Versuche wurde eine Keramikfaser mit einer Wandstärke von 3 cm verwendet, wobei eine dickere Wandstärke eine weitere Temperaturerhöhung im Brennraum und damit einen größeren Effekt bewirkt.

Außerdem ist für eine weitere Reduktion der Emissionen eine Kombination mit anderen Maßnahmen denkbar. So erscheint durch die Tatsache, daß die mittlere Brennraumaustrittstemperatur durch die Verwendung einer Brennraumisolation deutlich gesteigert werden konnte, die Zufuhr von Sekundärluft im Ausbrand als sinnvolle Möglichkeit, da die Temperatur über einen längeren Zeitraum für eine Nachverbrennung ausreicht.

Die andere Möglichkeit besteht in einer Kombination mit der Anpassung der Luftmenge an die jeweilige Abbrandphase. Diese Maßnahme könnte ebenfalls das Temperaturniveau im Brennraum weiter anheben.

Der große Vorteil der Verwendung von Isolationsmaterialien liegt im deutlich geringeren Aufwand im Gegensatz zu den anderen Maßnahmen. Für eine Umsetzung in die Praxis ist lediglich das Vorhandensein eines geeigneten Materials und die Anpassung der Berechnung an die geänderten Temperaturen notwendig. Die als Alternative in Frage kommenden Verbesserungsansätze erfordern jedoch eine Steuerung, die in jedem Fall elektronisch erfolgen muß. Der traditionelle Kachelofen konnte sich bisher der Notwendigkeit der Verwendung von Strom entziehen, was einer seiner Vorteile ist. Außerdem spricht auch der geringe finanzielle Aufwand für die Verwendung eines Isolationsmaterials im Brennraum, um die Emissionen aus der unvollständigen Verbrennung beim Kachelofen weiter zu verringern.

Schlußfolgerungen aus der Verwendung einer Brennraumisolierung:

- Eine Anbringung von Isolationsplatten im Brennraum ist eine einfache Maßnahme die Brennraumtemperatur zu erhöhen
- Die Erhöhung der Brennraumtemperatur kann eine deutliche Reduktion der Emissionen an Kohlenmonoxid und organisch gebundenem Kohlenstoff mit sich bringen, im konkreten Fall auf die Hälfte
- Der Brennstoffumsatz wird durch die Verwendung einer Brennraumisolierung erhöht, der Luftüberschuß verringert
- Durch die erhöhte Ausbrandtemperatur muß die Zuglänge erhöht werden. Durch die Verringerung des Luftüberschusses kann bei einer Erhöhung der Zuglänge der Wirkungsgrad gesteigert werden
- Ein niedriger Wassergehalt des Brennstoffs trägt ebenso entscheidend zur Temperaturerhöhung und damit zur Emissionsverringern bei

3.4 Sauerstoffregelung

Eine weitere mögliche Maßnahme, die Brennraumtemperatur beim Kachelofen anzuheben, ist der Einsatz einer Sauerstoffregelung. Als Sensor kann hier eine Lambda(λ)-sonde, wie sie in Kraftfahrzeugen Verwendung findet, eingesetzt werden.

Durch die Verwendung der Sonde ist es möglich, die Luftzufuhr schon zu Beginn des Abbrandes zu verringern und so den Luftüberschuß in dieser Phase zu reduzieren. Dadurch wird schneller eine höhere Temperatur im Brennraum erreicht, was einen früheren Beginn der Hauptbrandphase zur Folge hat. Auch kann in der Hauptbrandphase die Sauerstoffzufuhr angepaßt werden, was zu einer Erhöhung der Temperatur und damit zu einem positiven Effekt bei den Emissionen führt. Weiters ist es möglich, in der Ausbrandphase den Luftüberschuß deutlich zu reduzieren, was verhindert, daß der Brennraum zu schnell abkühlt und dadurch die Emissionen wieder stark ansteigen. Außerdem kann durch ein Mitmessen der Temperatur in der Ausbrandphase die Zuluftklappe so angesteuert werden, daß sie am Ende des Abbrandes selbsttätig schließt. Durch die Verwendung dieser Maßnahme konnten folgende Effekte erzielt werden:

	O ₂ [%]	CO [mg/MJ]	η [%]
ohne λ -Sonde	13,8	811	82
mit λ -Sonde	11,5	440	87

Tabelle 13: Auswirkungen durch Einsatz einer Sauerstoffregelung (Hofbauer, 1993)

Durch den Einsatz der Sauerstoffregelung konnten die CO-Emissionen um etwa 46 [%] reduziert werden. Damit liegen die Ergebnisse für die Reduktion der

CO-Emissionen in der selben Größenordnung wie der Erfolg bei der Verwendung einer Brennraumisolierung. Der Wirkungsgrad konnte, wie aus der Tabelle ersichtlich, um 5 [%] erhöht werden. Zu berücksichtigen ist beim Einsatz einer Sauerstoffregelung, daß auf jeden Fall eine elektronische Regelung vorzusehen ist.

Das Prinzip der Verwendung der Sauerstoffregelung durch eine λ -Sonde beim Kachelofen liegt darin, daß einer bestimmten Brennraumtemperatur ein bestimmter λ -Wert zugeordnet wird, der möglichst geringe Emissionen verursacht. Dieser Sollwert wird bei der Regelung des Ofens mit dem Istwert verglichen, durch die elektronische Regelung wird anschließend ein entsprechender Eingriff getätigt. Dieses optimale T/ λ -Verhältnis ist jedoch für die Anbrandphase nicht das selbe wie für die Ausbrandphase. Es kommt aufgrund der Temperaturerhöhung im Brennraum zu einer Hysterese und das optimale Verhältnis ist in der Ausbrandphase nicht das gleiche wie in der Anbrandphase. Da jedoch die Kenntnis des λ -Signals und der Temperatur nicht ausreicht, um diese Hysterese verarbeiten zu können, muß neben dem Sauerstoffgehalt und der Temperatur auch der CO-Gehalt kontinuierlich mitgemessen werden (Rath, 1995).

4 Kachelofen 2000

4.1 Produktanforderungen an den Kachelofen in Hinblick auf die Verbrennungstechnik

Vom Kachelofen wird im Jahr 2000 ein geringes Ausmaß an Emissionen und ein hoher Wirkungsgrad verlangt werden. Die Forderung kommt in erster Linie von der Seite des Gesetzgebers. Dabei werden zumindest die heute festgelegten Werte erreicht werden müssen, bei den Emissionen an Kohlenmonoxid und organisch gebundenem Kohlenstoff könnten bei Fortsetzung des Trends die Grenzwerte bei etwa der Hälfte der Anforderungen der Vereinbarung gemäß 15a B-VG über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinf Feuerungen liegen. Bei einer Auswirkung des EU-Beitritts könnten diese Grenzwerte auch stagnieren, da Österreich auf dem Gebiet der Kleinf Feuerungen derzeit die strengsten Grenzwerte aller EU-Länder besitzt.

4.2 Technischer Handlungsbedarf in bezug auf die Verbrennungstechnik

In bezug auf die Verbrennungstechnik ist der Kachelofen für das Jahr 2000 bestens gerüstet. Er erfüllt die Anforderungen an die heutigen Grenzwerte von Kohlenmonoxid (1100 mg/MJ) und organisch gebundenem Kohlenstoff (80 mg/MJ) bei

- Berechnung des Kachelofens
- Einhaltung einer spezifischen Brennraumoberfläche

Sollten die Anforderungen an den Kachelofen bezüglich der Emissionen an Kohlenmonoxid (~ 550 mg/MJ) und organisch gebundenem Kohlenstoff (~ 40

mg/MJ) noch strenger werden, so gibt es ausgereifte ergänzende Entwicklungen zur

- Erhöhung der Brennraumtemperatur
 - durch Anbringen von Isolationsplatten im Brennraum
 - durch Verwendung einer Sauerstoffregelung

Der Kachelofen erfüllt auch die Anforderungen an den Wirkungsgrad, wobei dieser durch Isolationsplatten im Brennraum und Sauerstoffregelung noch gesteigert werden kann.

Bei Berücksichtigung der angeführten Maßnahmen ist für das Jahr 2000 lediglich ein Handlungsbedarf bei der Schaffung von Werkstoffen, die für den praktischen Einsatz der Brennraumisolierung geeignet sind, gegeben.

4.3 Informationsbedarf in bezug auf die Verbrennungstechnik

Bei der Verbrennungstechnik läßt sich ein Informationsbedarf bei den Kunden, beim Hafner und bei den Behörden orten. Bei diesem Thema müssen die betroffenen Gruppen verstärkt über die Heiztechniken und über die erreichbaren Emissionen informiert werden.

4.4 Kurzdarstellung Kachelofen 2000 für die Verbrennungstechnik

Thema	Anforderungen	Technik	Information
Verbrennungstechnik	Emissionen	✓	H (Ha, Ku, Be)
	Wirkungsgrad	✓	H (Ha, Ku, Be)

Tabelle 14: Kurzdarstellung „Kachelofen 2000“ (Verbrennungstechnik)

Legende:

- ✓ in Ordnung
- H..... Handlungsbedarf
- Ha..... Hafner
- Ku..... Kunde
- Be..... Behörde

5 Verzeichnisse

5.1 Literaturverzeichnis

HOFBAUER H., Kleinholzfeuerungen - Entwicklungen in Österreich, Der Rauchfangkehrer, Wärmetechnische Gesellschaft der Rauchfangkehrer Österreichs, Kufstein, AT, 1993.

LGBL.-BGLD., Landesgesetzblatt für das Burgenland, 102/91 vom 11.12.1991, Eisenstadt, AT, 1991.

LGBL.-ST., Landesgesetzblatt für die Steiermark, 33/1992 vom 22.6.1992, ausgegeben am 30.6.1992, Graz, AT, 1992.

LGBL.-ST., Landesgesetzblatt für die Steiermark, 9/1993 vom 23.12.1992, ausgegeben am 23.2.1993, Graz, AT, 1993.

NUSSBAUMER T., Anforderungen an emissionsarme Holzenergie-Anlagen, Neue Konzepte zur schadstoffarmen Holzenergienutzung, ENET, Zürich, CH, 1992.

RATH M., Einsatz neuer Techniken zur Optimierung der Verbrennung und Erhöhung der Anwendungs- und Bedienungsfreundlichkeit des Holzbrandkachelofens - Forschungsbericht, Aug. Rath jun. AG, Wien, AT, 1995.

SCHIFFERT T., Kachelofen 2000, TU-Wien, Wien, AT, 1995. -- Dissertation

SCHWARZOTT J., Stickoxidemissionen bei der Holzverbrennung, Technische Universität, Wien, AT, 1993. -- Diplomarbeit

VST, Verbindungsstelle der Bundesländer beim Amt der niederösterreichischen Landesregierung, Vereinbarung gemäß Art 15a B-VG über Schutzmaßnahmen betreffend Kleinf Feuerungen, Beilage I zu VST-244/59 vom 23.November 1994, Wien, AT, 1994.

5.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prognose der Entwicklung des CO-Grenzwertes (LGBL-BGLD, 1991, LGBL-STMK, 1992, VST, 1995)	6
Abbildung 2: Versuchsaufbau Brennraumgeometrie, Brennraumgröße und Brennraumisolierung	9
Abbildung 3: Vergleich der CO-Emissionen (Brennraumgeometrie)	11
Abbildung 4: Abhängigkeit der Emissionen von der Brennraumgröße	14
Abbildung 5: Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom Luftüberschuß	16
Abbildung 6: Abhängigkeit der Verbrennungstemperatur vom Wärmeentzug	17
Abbildung 7: Abhängigkeit der CO-Emissionen von Brennstoffumsatz und Brennstoffwassergehalt	18

Abbildung 8: Abhängigkeit der minimalen CO-Emission vom Brennstoffwassergehalt	19
Abbildung 9: Abhängigkeit der minimalen OGC-Emission vom Brennstoffwassergehalt	20
Abbildung 10: Verbesserung der CO- und OGC-Emissionen durch die Verwendung einer Brennraumisolierung	21
Abbildung 11: Wärmebilanz Brennraum	21

5.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Prognose der Entwicklung des OGC-Grenzwertes	7
Tabelle 2: Brennstoffdaten Brennraumgeometrie, Brennraumgröße	8
Tabelle 3: Versuchsergebnisse „hoher Brennraum“ (Brennraumgeometrie)	10
Tabelle 4: Versuchsergebnisse „mittlerer Brennraum“ (Brennraumgeometrie)	10
Tabelle 5: Versuchsergebnisse „niedriger Brennraum“ (Brennraumgeometrie)	10
Tabelle 6: Versuchsergebnisse „normaler Brennraum“ (Brennraumgröße)	12
Tabelle 7: Versuchsergebnisse „großer Brennraum“ (Brennraumgröße)	12
Tabelle 8: Versuchsergebnisse „kleiner Brennraum“ (Brennraumgröße)	13
Tabelle 9: Vergleich der Ergebnisse (Brennraumgröße)	13
Tabelle 10: Brennstoffdaten Brennraumisolierung	18
Tabelle 11: Vergleich isolierter und nicht isolierter Brennraum	20
Tabelle 12: Wärmeeinspeicherung im Brennraum	22
Tabelle 13: Auswirkungen durch Einsatz einer Sauerstoffregelung (Hofbauer, 1993)	23
Tabelle 14: Kurzdarstellung „Kachelofen 2000“ (Verbrennungstechnik)	25

Verzeichnisse

Bisher sind im Rahmen der Schriftenreihe des Österreichischen Kachelofenverbandes folgende Werke erschienen:

- | | |
|--------|---|
| Nr. 1 | Bemessung von Kachelöfen |
| Nr. 2 | Ökologischer Vergleich der Brennstoffe Erdgas, Erdöl und Holz |
| Nr. 3 | KACHELOFEN 2000 - Raumklima und Gesundheit |
| Nr. 4 | KACHELOFEN 2000 - Die Zukunft des Kachelofens |
| Nr. 5 | KACHELOFEN 2000 - Technische Entwicklungen der Holzverbrennung im Kachelofen |
| Nr. 6 | Typenprüfung Kachelofen |
| Nr. 7 | Der Einfluß des Kachelofens auf raumklimatische Parameter und Gesundheit - Projektbericht |
| Nr. 8 | Auslegung keramischer Speicher |
| Nr. 9 | Kachelherdentwicklung - Projektbericht |
| Nr. 10 | Geschichte des Österreichischen Kachelofenverbandes |
| Nr. 11 | Projekt Neuhaus - Ganzhausheizung, Jahresnutzungsgrad, Raumklimamessungen |
| Nr. 12 | Ganzhausheizung aus Hafnerhand - Grundlagen |
| Nr. 13 | Der Kachelofen in der Praxis – Vorortmessungen bei Kachelöfen |