



Ein Kachelofen im Miniformat

PLANUNG, BAU UND EINSATZ EINES
MULTIFUNKTIONALEN, TRANSPORTABLEN
KLEINKACHELOFENS

*Es wurde ein Kleinkachelofen mit den Maßen
25 cm × 19 cm × 24 cm und einem Gewicht von 13,3 kg geplant
und gebaut. Der Wirkungsgrad des Kleinkachelofens entspricht
in etwa demjenigen eines großen Kachelofens. Während
der Messungen und Berechnungen ergaben sich zukünftige
Anwendungsmöglichkeiten.*

DIE JUNGFORSCHERIN



Alice C. Höfler (1999)
Hegau-Gymnasium Singen
78224 Singen (Hohentwiel)

Eingang der Arbeit:
06.04.2017

Arbeit angenommen:
30.06.2017



Ein Kachelofen im Miniformat

PLANUNG, BAU UND EINSATZ EINES MULTIFUNKTIONALEN, TRANSPORTABLEN KLEINKACHELOFENS

1. Einleitung – die Projektidee

Als bei uns zu Hause ein neuer Kachelofen gesetzt wurde, entstand die Idee, selbst einen kleinen Kachelofen zu bauen. Daraus entstand das folgende Projekt mit folgenden Leitfragen: Ist es überhaupt möglich, einen Kleinkachelofen zu bauen, der funktionstüchtig ist? Welcher Brennstoff ist am besten geeignet?

2. Grundwissen Kachelöfen

2.1 Schamottesteine und Qualitätsstufen

Schamottesteine sind feuerfeste Steine zum Auskleiden von Feuerungsräumen. Schamotte besteht aus Tonerde und Aluminiumoxid und wird künstlich hergestellt. Da normal gebrannter Ton rissanfällig ist, wird diesem vor

dem Brennen eine Schamottekörnung (verpulverte Schamotte) beigemischt. Dadurch wird das Material hitzebeständiger. Die Qualität des Schamottesteines hängt vom Aluminiumoxidgehalt ab. Wenn dieser weniger als 30 Prozent beträgt, hat der Schamottestein eine niedrige Qualitätsstufe, bei 30–45 Prozent eine höhere. Man kann also sagen, je höher der Oxidgehalt, umso höher ist auch die Qualität der Schamottesteine.

2.2 Verschiedene Kachelofentypen

Kachelöfen werden nach der Masse der Schamottesteine unterschieden. Es gibt verschiedene Ausführungen, die sich in der Dicke der Schamotte-Vorschübe und der Ausfütterung der Kacheln unterscheiden (siehe [Abb. 1](#)). Leichte Ausführung (Vorschub 1–2 cm, keine Ausfütterung) z. B. Strahlungskachelöfen, Warmluftkachelöfen, mittelschwere Ausführung (5–7 cm) und schwere Ausführung (7–10 cm). Der Allzweckofen ist meistens in mittelschwerer Ausführung vorzufinden. Er ist für Kohle- und Holzfeuerung geeignet. Grundöfen gehören zu den schweren Bautypen, deren Vorteil in der langen Speicherung der Wärme durch die Schamottesteine und Kacheln liegt.

2.3 Funktionsweise eines Kachelofens

Die Verbrennung des Brennmaterials erwärmt die Luft im Feuerraum, diese zieht durch die Luftzüge und erwärmt dabei die Schamottesteine, diese erwärmen wiederum die Kacheln. Der Vorteil hierbei ist die große Wärmespeicherfähigkeit der Schamottesteine und Kacheln. Sie geben die Energie in Form von Strahlungs- und Konvektionswärme an den Raum ab. Im Vergleich zu einem Heizkörper liegt der Anteil der Strahlungswärme um einiges höher. Der sehr langsam voranschreitende Temperaturanstieg ist der einzige Nachteil. Die Strahlungswärme gilt als die gesündere Wärme, da sie aus langwelliger Infrarotstrahlung

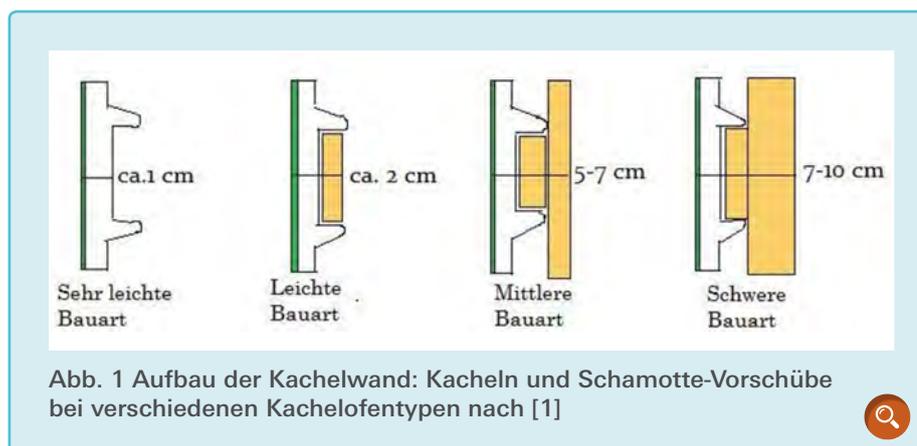


Abb. 1 Aufbau der Kachelwand: Kacheln und Schamotte-Vorschübe bei verschiedenen Kachelofentypen nach [1]



besteht, ähnlich wie die Sonnenstrahlung, die von der Erde wieder abgegebene wird.

2.4 Prinzipieller Aufbau eines Ofens

Abb. 2 zeigt den Aufbau eines Grundofens in der Seitenansicht. Der Feuerraum (3) ist mit Schamottesteinen höherer Qualitätsstufen gebaut. Ein Rost (1) unterhalb des Feuerraum ist nur für Kohle oder Briketts nötig, da es sich um zusammengepresste Brennmaterialien mit geringem Sauerstoffgehalt handelt. Unterhalb des Rosts befindet sich der Aschenkasten (2). Oberhalb des Feuerraums befindet sich die Feuerraumdecke (4). Hier sind die Temperaturen am höchsten. Die Luftzüge (5) sorgen für den Transport der warmen Luft und der Abgase durch den Kachelofen und die Erwärmung der Schamottesteine. Restgase können durch den Gasschlitz (6) direkt in den Schornstein (7) entweichen. Durch den Schornstein und die Luftzufuhr im Kachelofen entsteht der Schornsteinunterdruck, die Abgase werden ins Freie befördert. An den Wendungen der Züge oder in den horizontalen Zügen lagern sich Anhäufungen von Asche (9.) ab. Zum Reinigen sind die Reinigungsöffnungen (10) nötig.

- Um Brandgefahren vorzubeugen, darf die Asche erst aus dem Ofen entfernt werden, nachdem sie komplett abgekühlt ist.
- Die ausreichende Belüftung des Raumes, in dem der Kachelofen betrieben wird, muss gewährleistet sein.

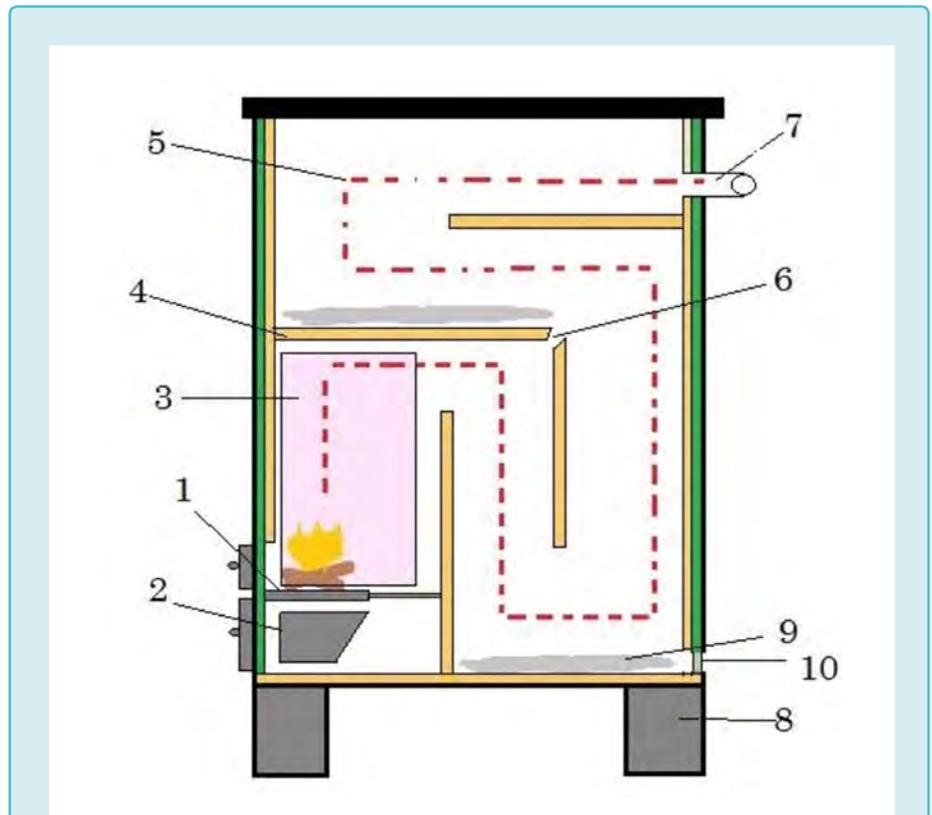


Abb. 2: Prinzipieller Aufbau eines Kachelofens (Seitenansicht) mit 1 Rost, 2 Aschenkasten, 3 Feuerraum, 4 Feuerraumdecke, 5 Luftzüge, 6 Gasschlitz, 7 Rauchgasrohr, 8 Sockel, 9 Ascheanhäufungen, 10 Reinigungsöffnung, nach [1]

Die Kacheln des Außenbaus sind jeweils zweifach gebrannt. Erst werden die Teile aus Keramik gebrannt und in der zweiten Brennung kommt die Glasur aus Glas hinzu. Die Kacheln werden mit Ofenbaulehm zusammengehalten sowie mit ausgeglühtem Eisendraht verklammert.

2.5 Sicherheitshinweise beim Betrieb von Kachelöfen

- Man darf niemals die Luftzufuhr schließen, wenn noch Flammen im Ofen vorhanden sind, da sonst gefährliche Gase entstehen können, während die Flamme erstickt, z. B. Kohlenmonoxid.

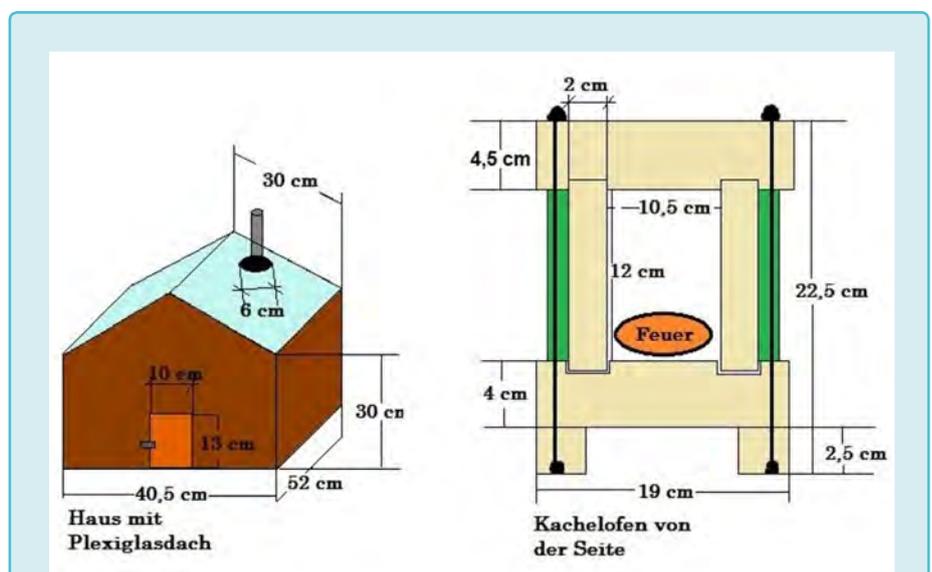


Abb. 3: Planskizzen des Modellhauses und des Kleinkachelofens



Abb. 4: Bauteile des Kleinkachelofens



Abb. 5: Kachelofentür



Abb. 6:
Fertiger Kleinkachelofen



3. Planung und Bau des Kleinkachelofens

3.1 Planung des Kleinkachelofens

Ursprünglich bestand die Idee, für ein Modellhaus mit den in [Abb. 3](#) dargestellten Dimensionen einen Kachelofen zu bauen. Aus einer Ermittlung der Heizfläche [1]

$$\frac{\text{Rauminhalt in m}^3 \cdot 40}{900} = \text{Heizfläche in m}^2$$

ergab sich eine optimale Heizfläche von 38 cm². Die Heizfläche des Ofens liegt mit ca. 2800 cm² deutlich darüber.

Der Ofen wurde ausgehend von der Heizfläche größer als optimal geplant, da dies (siehe [Abb. 3](#)) die kleinste mögliche Größe zum Bauen war. Sein Gewicht sollte gut von einer Person tragbar sein, dies ist mit ca. 13 kg auch gelungen. Auf die Luftzüge verzichtete ich. Somit können nur die Decke und die Seitenwände Wärme speichern. Somit ist das Volumen des Ofens zu groß für das Modellhaus. Den Ofen kleiner und dafür mit Luftzügen zu bauen, wäre unmöglich gewesen.

Für den Feuerraum standen ca. 20 Schamottesteinplatten verschiedener Qualitätsstufen zur Auswahl. Für die Decke benötigte ich Platten von höherer Qualität als für die Wände, da dort höhere Temperaturen herrschen. Bei den Seitenwänden entschied ich mich für Bündelplättchen mit Qualität 4E, bei Decke und Boden für Backofenplatten mit Qualität 5E.

Eine wichtige Anforderung an den Kleinkachelofen war die Zerlegbarkeit, damit er zwischen den Versuchen von innen untersucht und auf Unversehrtheit überprüft werden kann. Dies war mir wichtig, da das Modell in vielerlei Hinsicht von einem großen Kachelofen abweicht und nicht vorhersehbar war, was mit dem Ofen beim Befeuern passieren würde.

Das Modellhaus stellt für die folgenden Versuche eine abgeschlossene und gleichbleibende Versuchsumgebung dar. Nur mit einer solchen Umgebung sind die Versuche vergleichbar. In diesem Modellhaus brachte ich später die Temperatursensoren an. Das Modellhaus ist aus Kiefernholz gefertigt.

3.2 Bau des Kleinkachelofens

Zunächst wurden die Platten zugeschnitten und mit den jeweiligen Fugen ausgestattet, sodass man den Kachelofen zusammenbauen konnte. Dann kamen die Löcher für den Kamin und die Edelstahlschrauben hinzu. Diese Arbeitsschritte haben ca. 30 Stunden gedauert. Dann wurden die 110 Jahre alten Kacheln hinzugefügt. Diese mussten gesäubert, abgeschliffen und zurechtgeschnitten werden. Die Ofentür ist eine zugesägte Edelstahlplatte, deren Kanten geglättet wurden. Die Lüftung besteht aus vier Bohrlöchern und ist regulierbar. Mit einem Hebel ist die Tür sicher verschließbar (siehe [Abb. 5](#)). Danach wurde noch das Kaminrohr, welches aus einem Edelstahlrohr besteht, montiert. Ganz zum Schluss wurden die Kacheln mit Haftmörtel angerieben (angeklebt). Der Modellkachelofen war vorerst fertiggestellt.

Der Ofen funktionierte mit Brennspritus. Allerdings konnte weder Holz noch Kohle verbrannt werden, da kein Rost vorhanden war. Nachträglich war es unmöglich mit einem festen Rost sowie einem Aschekasten den Ofen nachzurüsten, da in dem Feuerraum kein Platz und die Schamotteplatte zu massiv war. Die Lösung für dieses Problem bestand darin, einen kleinen Korb aus Stahl (mit Aschekasten) zu bauen. Somit kann die Luft gut an die Brennstoffe gelangen. Jetzt war es auch möglich, Holz und Kohle zu verbrennen.

Insgesamt wurde am Modellhaus und Kachelofen ca. 150 Stunden geplant und gebaut. Der fertige Ofen hat die Außen-

maße: Länge 25 cm, Breite 19 cm, Höhe 22,5 cm, Kaminhöhe insgesamt 45 cm, davon 17 cm im Kachelofen, und ein Gewicht von 13,3 kg.

4. Betrieb des Ofens

4.1 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden alle im Winter draußen durchgeführt. Das Modellhaus (Dach) stand bei den Versuchen zur Erforschung des Ofens offen, da hier die Temperatur auf Ofendecke bzw. Ofenwänden gemessen wurde und die Differenz zur Außentemperatur bestimmt werden sollte. Bei der Ermittlung des idealen Brennstoffes war das Haus ver-

schlossen und die Temperatur wurde im Modellhaus gemessen, denn hier war das Ziel, herauszufinden mit welchem Brennstoff die Umgebung des Ofens am besten erwärmt werden konnte.

Bei den Versuchen wurde jeweils der Brennstoff angezündet und in den Ofen gelegt. Nach dem Erlöschen wurden direkt die Luftlöcher an der Ofentür verschlossen, um den Luftzug im Ofen zu minimieren und somit die Wärme so gut wie möglich im Ofen zu halten.

Da meistens mit 20 g eines Brennstoffes gearbeitet wurde, war ein Nachlegen nicht notwendig, außer bei der Verbrennung von 60 g Brennspritus,

da musste der Brenner einmal nachgefüllt werden.

Da der Ofen draußen stand und die Temperatur durch einen Datenlogger aufgezeichnet wurde, war es nicht notwendig, den Ofen permanent zu beaufsichtigen.

Ein Versuch gliederte sich in vier Phasen:

Vorbereitungsphase: Der Ofen und das Modellhaus mussten auf Außentemperatur gebracht werden, hierzu habe ich die Versuchsobjekte schon 10 bis 12 Stunden vor Versuchsbeginn nach draußen gestellt.

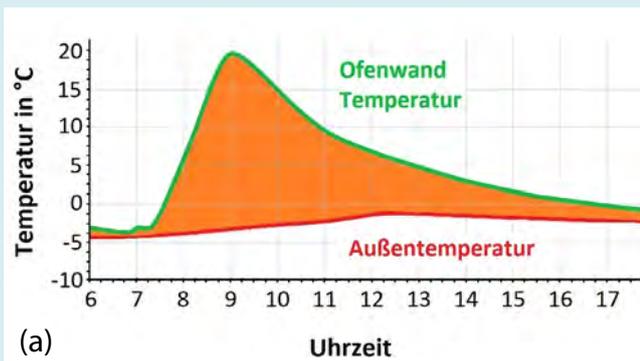


Abb. 7a: Temperaturverlauf auf der Ofenwand während und nach Verbrennung von 20 g Brennspritus

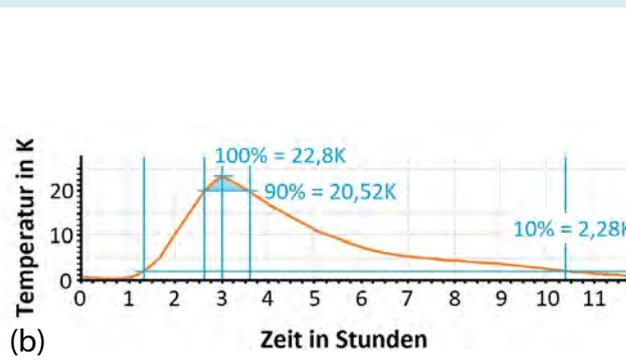


Abb. 7b: Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur auf der Ofenwand und der Außentemperatur während und nach Verbrennung von 20 g Brennspritus

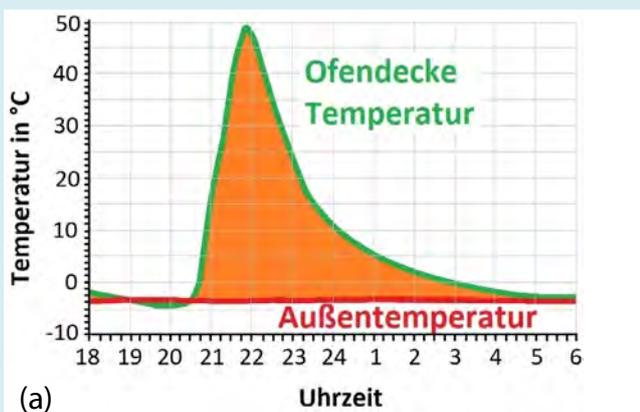


Abb. 8a: Temperaturverlauf auf der Ofendecke während und nach Verbrennung von 20 g Brennspritus



Abb. 8b: Temperaturdifferenz zwischen gemessener Temperatur auf der Ofendecke und der Außentemperatur während und nach Verbrennung von 20 g Brennspritus

Heizphase: Hier habe ich den Ofen mit dem Brennstoff beheizt. Dies dauerte je nach Brennstoff und Brennstoffmenge unterschiedlich lang: zwischen 20 Minuten und 3 Stunden.

Abkühlphase: Sobald das Feuer erloschen war, wurden die Luftlöcher geschlossen. Der Ofen sowie die Versuchsumgebung kühlten langsam ab. Die Temperatur näherte sich wieder der Außentemperatur an. Dies dauerte je nach erreichter Temperatur des Ofens ca. 6 bis 10 Stunden.

Check: Nach einem abgeschlossenen Versuch untersuchte ich den Ofen auf seine Unversehrtheit. Hierzu wurde der Ofen komplett auseinandergebaut, gesäubert, auf Risse etc. untersucht und wieder zusammengebaut.

4.2 Wärmestrom und Energieabgabe

Um den Wärmestrom Φ und den Wirkungsgrad η des Ofens zu bestimmen, verbrannte ich 20 g Brennspritus. Mithilfe eines Temperaturdatenloggers (Arexx TL-510), dessen Sensoren ich auf der Ofendecke und an den Seitenwänden befestigt hatte, bestimmte ich den zeitlichen Temperaturverlauf.

[Abb. 7a](#) zeigt die Temperatur an der Ofenwand, [Abb. 8a](#) auf der Ofendecke. [Abb. 7b](#) bzw. [Abb. 8b](#) zeigt die Differenz zwischen der gemessenen Temperatur und der Außentemperatur.

Gut zu sehen ist, dass die Temperaturdifferenz von Außentemperatur zur Ofendecke mit 52,5 K um einiges höher lag als zu den Ofenwänden mit 22,8 K. Des Weiteren ist zu sehen, dass die Wände die Temperatur besser hielten als die Decke, denn sowohl das Halten der Temperatur im Maximalbereich (auf den Abbildun-

gen blau eingefärbt) als auch das Abkühlen dauert bei den Wänden länger. Dies liegt wohl an den Kacheln, die nur an den Wänden befestigt sind.

Zur Vereinfachung wird später nur mit den Messwerten über den 10-Prozent-Schwellen (10 Prozent des Gesamttemperaturanstiegs) gerechnet. Der Temperaturanstieg ist hier annähernd linear, was eine gleichmäßige Energieaufnahme der Schamottesteine impliziert. Anschließend fällt die Temperatur, mit der Umgebungstemperatur als untere Schranke, annähernd exponentiell ab.

Aus diesen Messungen konnte ich den Wärmestrom, die Energieabgabe und den Wirkungsgrad bestimmen.

4.2.1 Wärmestrom

Der Wärmestrom Φ wird basierend auf dem Stefan-Boltzmann-Gesetz bestimmt

$$\Phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T(t)^4$$

Mit ε Emissionsgrad, σ Stefan-Boltzmann-Konstante und A Fläche.

Für den Emissionsgrad ε wird 0,93 angenommen, da bei dem Ofen nicht von einem „schwarzen Körper“ ($\varepsilon = 1$) ausgegangen werden kann. 0,93 ist der Wert für roten Ziegelstein und somit in etwa vergleichbar mit den Schamottesteinen.

Der gesamte Wärmestrom setzt sich aus vier Anteilen zusammen:

Gemessener Temperaturanstieg an der Decke

Vereinfachend wird angenommen, dass der Anstieg zwischen 5,25 K (10 Pro-

zent) und 52,25 K (100 Prozent) mit einer Gerade angenähert werden kann (siehe auch [Abb. 8b](#)). Für die Temperaturdifferenz von 47,25 K werden 75 min bzw. 4500 s benötigt. Die Steigung m der Geraden beträgt also

$$m = \frac{47,25 \text{ K}}{4500 \text{ s}} = 0,0105 \frac{\text{K}}{\text{s}}$$

Und somit

$$T_{\text{Decke}} = 0,0105 \frac{\text{K}}{\text{s}} \cdot t + 273 \text{ K}$$

Für die Temperaturdifferenz gilt

$$T(t) = T_{\text{Decke}} - T_{\text{außen}}$$

Mit

$$\vartheta_{\text{außen}} = -4^\circ\text{C}, \text{ also } T_{\text{außen}} = 269 \text{ K}$$

Für den Wärmestrom gilt also mit $A = 0,0871 \text{ m}^2$

Siehe [Formel \(1\)](#)

Gemessener Temperaturabfall an der Decke

Für die Abnahme der Temperatur um 47,25 K wird eine Zeit von 165 min = 9900 s benötigt. Es wird angenommen, dass die Temperatur exponentiell abnimmt:

$$T(t) = T_{\text{max}} \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)} = 320,25 \text{ K} \cdot e^{\left(\frac{-t}{\tau_1}\right)}$$

Nach 3600 s wird eine Temperatur von 297,75 K erreicht.

$$320,25 \text{ K} \cdot e^{\left(\frac{-3600 \text{ s}}{\tau_1}\right)} = 297,75 \text{ K}$$

Aus dieser Gleichung kann τ_1 bestimmt werden.

$$\Phi_1 = 0,93 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)} \cdot 0,0871 \text{ m}^2 \cdot \left((0,0105 \frac{\text{K}}{\text{s}} \cdot t + 273 \text{ K})^4 - (269 \text{ K})^4 \right)$$

Formel (1)

$$\ln \frac{(297,75 \text{ K})}{(320,25 \text{ K})} \cdot \tau_1 = -3600 \text{ s}$$

$$\tau_1 = \frac{(-3600 \text{ s})}{\left(\ln \frac{(297,75 \text{ K})}{(320,25 \text{ K})}\right)} = 49418,15$$

$$T(t) = (47,25 \text{ K} + 273 \text{ K}) \cdot e^{\left(\frac{-t}{49418,15}\right)}$$

Für den Wärmestrom gilt also

Siehe [Formel \(2\)](#)

Gemessener Temperaturanstieg an der Wand

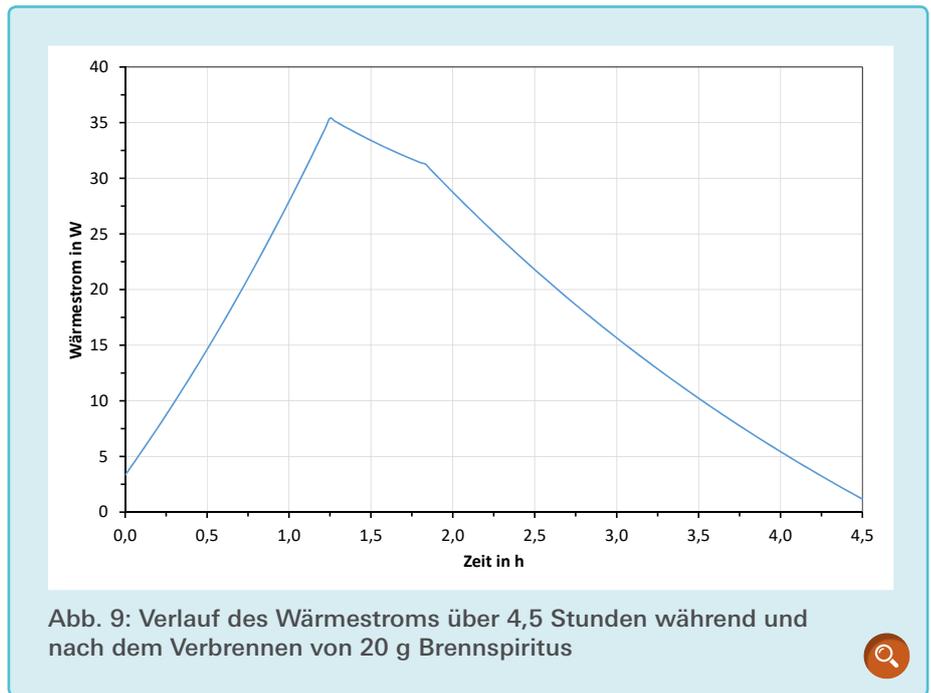
Die Fläche der Wände beträgt 0,0976 m² und der Temperaturanstieg 20,52 K. Die benötigte Zeit des Anstiegs war 6000 s. Die Außentemperatur lag bei 269,5 K.

Siehe [Formel \(3\)](#)

Gemessener Temperaturabfall an der Wand

Gleicher Temperaturabfall wie Anstieg: 20,52 K. Zeit des Abfalls: 360 min = 21600 s

Siehe [Formel \(4\)](#)



In [Abb. 9](#) ist der gesamte Wärmestrom ($\Phi_{ges} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$) über eine Zeit von 4,5 Stunden dargestellt. Der maximale Wärmestrom der Verbrennung von 20 g Brennspritus im Kleinkachelofen liegt bei ca. 35 W. Für das Modellhaus liegt der Wärmebedarf bei ca. 20 W. (Dieser Wert ergibt sich aus folgender Abschätzung: Der Wärmestrom für ein mittelgut isoliertes Haus liegt bei ca. 100 W/m². Das Modellhaus hat eine Grundfläche von ca. 0,2 m².) Dieser wird ca. 110 min lang erreicht bzw. sogar überschritten.

4.2.2 Berechnung der Energieabgabe

Integriert man den zeitabhängigen Wärmefluss über die Zeit, erhält man die abgegebene Energiemenge. Dies habe ich mit einem wissenschaftlichen Taschenrechner ausgeführt.

$$W_{t_1, t_2} = \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t)$$

$$\Phi_2 = 0,93 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)} \cdot 0,0871 \text{ m}^2 \cdot (((320,25 \text{ K}) \cdot e^{\left(\frac{-t}{49418,15}\right)})^4 - (269 \text{ K})^4)$$

Formel (2)

$$\Phi_3 = 0,93 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)} \cdot 0,0976 \text{ m}^2 \cdot ((0,00342 \text{ K} \cdot \text{s}^{-1} \cdot t + 273)^4 - (269 \text{ K})^4)$$

Formel (3)

$$\Phi_4 = 0,93 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)} \cdot 0,0976 \text{ m}^2 \cdot (((20,52 \text{ K} + 273 \text{ K}) \cdot e^{\left(\frac{-t}{19566,6}\right)})^4 - (269,5 \text{ K})^4)$$

Formel (4)

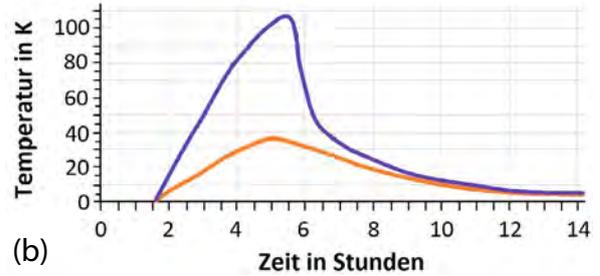
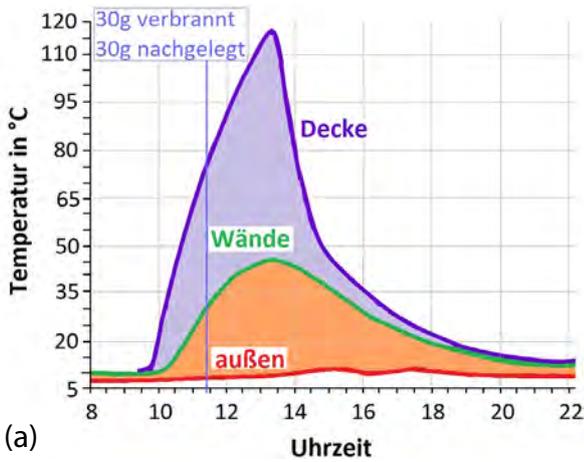


Abb. 10: Temperaturverlauf (a) und Temperaturdifferenz (b) während und nach Verbrennung von 60 g Brennsprit

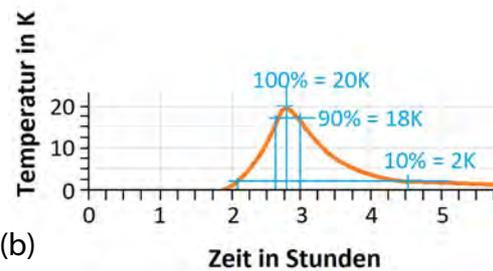
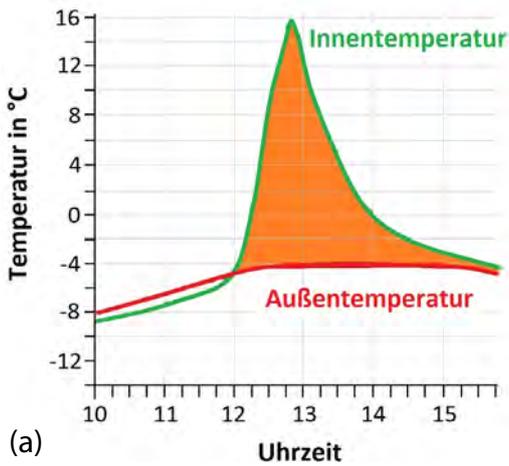


Abb. 11: Temperaturverlauf (a) und Temperaturdifferenz (b) während und nach Verbrennung von 20 g Paraffin im Modelhaus

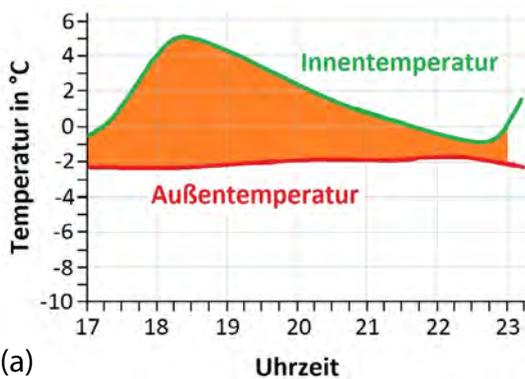


Abb. 12: Temperaturverlauf (a) und Temperaturdifferenz (b) während und nach Verbrennung von 20 g Paraffin im Kachelofen, der im Modelhaus steht



Siehe [Formel \(5\)](#)

Mit den Daten aus 4.2.1. ergibt sich die gesamte abgegebene Energie zu

Siehe [Formel \(6\)](#)

Siehe [Formel \(7\)](#)

4.3 Bestimmung des Wirkungsgrads

Der Wirkungsgrad η gibt das Verhältnis zwischen der nutzbaren und der zugeführten Energie an.

$$\eta = \frac{E_{ab}}{E_{zu}}$$

Der Heizwert von Ethanol beträgt 27 MJ/kg. 20 g Ethanol enthalten somit 540 kJ. Mit 253 kJ wird bei meinem Kachelofenmodell ca. 47 Prozent der Energie als messbare Wärme (durch Abgabe von Wänden und Decke) im Modellhaus nutzbar. Der Rest entweicht durch den Kamin und die Ofentür (große Energiemengen) sowie durch den Boden des Ofens (kleine Energiemenge). Der verwendete Brennspritus ist kein reines, sondern vergälltes Ethanol, somit liegt der Heizwert etwas unter den angegebenen 27 MJ/kg. Außerdem wird nur mit den Messwerten über der 10-Prozent-Temperaturanstiegsschwelle gerechnet. Somit liegt die nutzbare Energie (Wärme) bei der Verbrennung von 20 g Brennspritus etwas höher als 47 Prozent der enthaltenen Energie des Brennstoffes.

[Abb. 10](#) zeigt den Temperaturverlauf bei Verbrennung von 60 g Brennspritus. Hier sind in [Abb. 10a](#) sowohl die Außentemperaturkurve (rot), die Temperaturkurve der Ofendecke (lila) und die Temperaturkurve der Ofenwände (grün) dargestellt. Auf der Ofendecke werden bei der Verbrennung von 60 g Brennspritus Höchsttemperaturen von über 115°C erreicht. Auf den Ofenwänden hingegen ca. 45°C. In [Abb. 10b](#) sind die Temperaturdifferenzen zur Außentemperatur zu sehen. Die höchste Temperaturdifferenz zwischen Außentemperatur und der Temperatur

auf der Ofendecke beträgt 108 K, zu den Wänden herrscht eine Differenz von 35 K. Bei der Verbrennung von 60 g Brennspritus errechnet man einen Wirkungsgrad von 72 Prozent. Der höchste erreichte Wärmefluss beträgt hier ca. 100 W.

4.4 Wärmespeicherfähigkeit

Hier soll die Wärmespeicherfähigkeit der Schamottesteine und Kacheln untersucht werden. Dazu wurden in zwei Versuchen jeweils 20 g Paraffin verbrannt. Paraffin wird verwendet, da durch die vergleichsweise kleine Kerzenflamme das

Plexiglasdach des Modellhauses nicht schmilzt, was bei anderen Brennmaterialien nicht gewährleistet war. Im ersten Versuch (siehe [Abb. 11](#)) steht nur die Kerze im Modellhaus. Im zweiten Versuch steht der Kachelofen, in dem die Verbrennung stattfindet, im Modellhaus (siehe [Abb. 12](#)). Die Kerze brannte ca. 40 min. Während der Versuchszeit waren die Temperatursensoren im geschlossenen Modellhaus jeweils so weit wie möglich von der Flamme entfernt angebracht.

Wenn ein Feuer im Kachelofen brennt, erwärmt dieses die Luft im Ofen, aber

$$W = 0,93 \cdot \sigma \cdot A \cdot \int_{t_1}^{t_2} ((T(t))^4 - (T_{\text{außen}})^4) dt$$

Formel (5)

$$W_{\text{ges}} = W_{\text{Wand, Anstieg}} + W_{\text{Wand, Abfall}} + W_{\text{Decke, Anstieg}} + W_{\text{Decke, Abfall}}$$

Formel (6)

$$W_{\text{ges}} = 53814,5 \text{ J} + 37126,56 \text{ J} + 90941,24 \text{ J} + 71434,46 \text{ J} = 253316 \text{ J} = 253 \text{ kJ}$$

Formel (7)

Tab. 1: Vergleich der Versuche mit und ohne Kleinkachelofen

	Ohne Kachelofen	Mit Kachelofen
Max. Temperaturdifferenz	20 K	7,1 K
Zeit: Temperaturanstieg (10 %-90 %)	30 min	50 min
Zeit: Max. Temperaturbereich (90 %-100 %-90 %)	15 min	65 min
Zeit: Temperaturabfall (90 %-10 %)	90 min	130 min

auch die Wände und die Decke des Ofens. Das Kachelofenmodell hält die Temperatur im Modellhaus nach dem Erlöschen der Flamme für mehrere Stunden (brennstoffabhängig) über 10 Prozent des Gesamttemperaturanstiegs (siehe [Abb. 12b](#)). Das Modell kühlt also erst nach dieser Zeitspanne vollständig aus. Der Ofen hält trotz der geringen Brennstoffmenge seine Temperatur knapp eine Stunde lang oberhalb 90 Prozent des erreichten Temperaturanstiegs. Ein großer Kachelofen in

schwerer Bauweise hält bis zu 18 Stunden nach dem Erlöschen (über 10 Prozent) warm. Für die geringe Größe meines Modells sind die Werte also mehr als zufriedenstellend. Die Versuche mit Kachelofen haben alle gemeinsam, dass es einige Zeit dauert, bis die Temperatur ihren höchsten Punkt erreicht. Die Schamottesteinplatten und Kacheln speichern die Energie und geben diese mit der Zeit an die Umgebung des Ofens ab. Sobald die Flamme erlischt, gibt der Ofen die gespeicherte Wärme weiter-

hin ab, die Temperatur steigt also weiter an und die Höchsttemperatur wird erst nach dem Erlöschen erreicht. Der Temperaturanstieg nach dem Erlöschen beträgt noch ca. 10 Prozent des Gesamttemperaturanstiegs. Gleichzeitig kühlt jedoch das Haus wegen der niedrigeren Außentemperatur ab. Wenn der Ofen keine Wärme mehr abgibt, also auch erkaltet ist, kühlt das Haus insgesamt aus, bis die gleiche Temperatur wie außen herrscht. Alle Temperaturveränderungen laufen somit zeitlich verzögert ab.

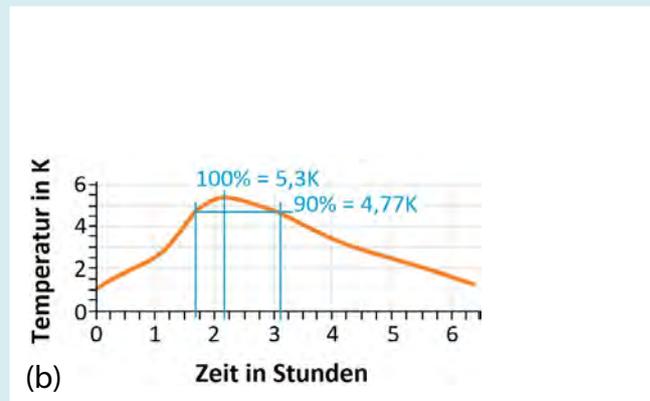
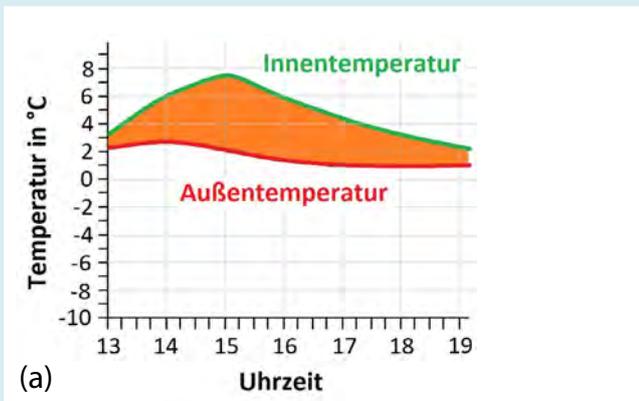


Abb. 13: Temperaturverlauf (a) und Temperaturdifferenz (b) während und nach Verbrennung von 20 g Fichtenholz



Tab. 2: Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Brennstoffen (absolut)



Brennstoff	Temperaturdifferenz in K	Zeit: Anstieg in min ab 10 %	Zeit: Abfall in min bis 10 %	Zeit: insgesamt in min	Besonderheiten
Brennpaste	6,4	75	420	495	Ethanolbasis
Brennspiritus	8,1	100	355	455	
Buchenholz	3,2	50	550	600	8 g übrig
Esbit	8,2	60	435	495	
Fichtenholz	5,3	110	415	525	3 g übrig
Kohle	5,1	70	500	570	12 g übrig
Paraffin	7,1	70	325	395	
Petroleum-Leim-Gemisch	6,2	60	345	405	Starke Rußbildung 8 g übrig

Bei einem offenen Feuer im Modellhaus wird mit jeglicher Energie, die durch die Verbrennung frei wird, sofort das Modellhaus erwärmt. Hierdurch steigt die Temperatur kurzfristig hoch an, kann allerdings nach Erlöschen der Flamme nicht gehalten werden und das Haus kühlt schnell wieder ab. Dies zeigen auch die Werte in [Tab. 1](#).

4.5 Verschiedene Brennstoffe im Kleinkachelofen

4.5.1 Versuche

Nach der Fertigstellung des Ofens habe ich Brennstoffversuche durchgeführt, um zu testen, welcher Brennstoff die höchste Temperaturdifferenz zwischen Innen- (Modellhaus) und Außentemperatur erzeugt. Die Temperaturen habe ich wieder mithilfe des Temperaturdatenloggers (Arexx TL-510) aufgezeichnet. Getestet wurden acht Brennstoffe: Fichtenholz, Buchenholz, Kohle, Brennspiritus, Brennpaste (Ethanol Basis), Paraffin, Esbit und eine Petroleum-Leim-Mischung

(Feststoff). Dazu entzündete ich jeweils 20 g des Brennstoffes im Kachelofenmodell. Der Ofen stand im Modellhaus, welches verschlossen und zu Beginn auf Außentemperatur abgekühlt war. Die Brennstoffe brannten im Durchschnitt 40 bis 50 Minuten. Nach dem Erlöschen wurden die Luftlöcher geschlossen. Das Abkühlen dauerte im Durchschnitt 490 bis 500 Minuten. Insgesamt dauerte ein Versuch mit allen vier Phasen 20 bis 25 Stunden.

4.5.2 Ergebnisse

Exemplarisch zeigen die [Abb. 10](#) für Paraffin und die [Abb. 12](#) für Fichtenholz die Ergebnisse.

Holz besteht größtenteils aus Cellulose, Lignin und Hemicellulose. Es verbrannte aufgrund einer unzureichenden Sauerstoffzufuhr nicht vollständig. Ich entfernte die Asche, die zum größten Teil aus Inert-Stoffen besteht, vorsichtig. Das zurückbleibende unverbrannte Holz wog 3 g. Durch das Ersticken des Feuers

kann es zu einer CO-Bildung kommen, dies kann für Menschen gefährlich sein. Auch beim Beheizen des Ofens mit kleinen Brennstoffmengen sollte deshalb bei unvollständiger Verbrennung unbedingt draußen experimentiert werden.

Der Heizwert von Holz beträgt ca. 15 MJ/kg. Die Verbrennung von Holz läuft in drei Schritten ab: Trocknung: Hier entweicht die Feuchtigkeit des Holzes. Entgasung (Pyrolyse): Die flüchtigen Holzbestandteile gehen in den gasförmigen Aggregatzustand über. Oxidation: Die brennbaren Holzbestandteile reagieren mit dem Luftsauerstoff.

Das Paraffin verbrannte ohne sichtbare Rückstände. Es ist ein Gemisch aus langkettigen gesättigten Kohlenwasserstoffen. Die allgemeine Summenformel ist $C_n H_{2n+2}$. Die Kettenlängen liegen zwischen 15 und 25 C-Atomen. Die Eigenschaften können aus der homologen Reihe der Alkane abgeleitet werden. Paraffin ist wachsartig, brennbar und ungiftig.

Tab. 3: Auswertung der Versuche mit unterschiedlichen Brennstoffen



Brennstoff	Relative Energieausbeute in %	Absoluter Heizwert in MJ/kg	Relativer Heizwert in %	Relative Effizienz des Brennstoffes
Brennpaste	85	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
Brennspiritus	100	27	100	100
Buchenholz	80	15	55	145
Esbit	101	31	115	87
Fichtenholz	73	14	52	140
Kohle	65	30	111	58
Paraffin	71	40	148	47
Paraffin (ohne Ofen)	81	40	148	54
Petroleum-Leim-Gemisch	63	42	155	40

4.5.3 Auswertung

Tab. 2 zeigt die Ergebnisse der Brennstoffversuche.

An den Temperaturverläufen sowie den Werten der Tab. 2 kann man nicht erkennen, wie effizient die Brennstoffe sind, denn hier spielt das Verhältnis zwischen abgegebener Energie und dem Heizwert des Brennstoffes die entscheidende Rolle.

Zur Ermittlung des ergiebigsten Brennstoffes habe ich die Differenzflächen zwischen Innen- und Außentemperaturkurve berechnet; diese sind proportional zu der Energieabgabe und in den Diagrammen orange eingefärbt. Dafür habe ich die jeweiligen Temperaturfunktionen aufgestellt und die Integrale berechnet. Damit man die Flächeninhalte vergleichen kann, habe ich die Werte jeweils durch den Flächeninhalt der Graphen des Brennspritus geteilt. Dadurch erhält man die relative Energieausbeute in Prozent.

Da ich auch die Versuche zur Bestimmung des Wirkungsgrades, des Wärmestroms und der Energieabgabe mit Brennspritus durchgeführt habe, entschied ich mich, den Brennspritus als Referenz zu benutzen.

Der Quotient aus dem Heizwert eines Brennstoffes und dem Heizwertes aus Brennspritus ist der relative Heizwert. Durch das Verhältnis aus „relativer Energieausbeute“ und „relativem Heizwert“ kann man einen Vergleich der Effizienz zwischen den Brennstoffen ziehen. Werte siehe Tab. 3.

Nach Tab. 3 wären die beiden Holzproben trotz unvollständiger Verbrennung am effizientesten. Diese Werte sind allerdings stark von der Gesamtzeit des Versuchs abhängig, da die berechneten Differenzflächen stark von der Zeit beeinflusst werden. Dies ist somit nur eine grobe Abschätzung der relativen Effizienz.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Mir ist es gelungen, einen funktionsfähigen Kleinkachelofen zu entwickeln und zu bauen, der mit einem Gesamtgewicht von 13,3 kg transportabel ist. Der Ofen hält aufgrund des Fugenprinzips auch ohne Mörtel zusammen. Der Ofen funktioniert auch ohne Luftzüge. Der Zug, der durch den Kamin erzeugt wird, ist weitestgehend ausreichend und die Schamottesteine nehmen auf dem, im Vergleich kurzen Weg der warmen Luft durch den Ofen, genug Wärme auf, um eine deutliche, wenn auch vergleichsweise langsame Erwärmung der Umluft festzustellen. Bei richtiger Benutzung (geeignete Brennstoffe, geöffnete Luftlöcher, nicht Einatmen der Abgase) besteht kein großes Risiko bei der Inbetriebnahme. Trotzdem besteht, wie bei jedem Feuer, die Gefahr einer Rauchvergiftung.

Eine der gewünschten Eigenschaften des Kachelofens ist die Wärmespeicherefähigkeit. Man kann einen Raum mit vergleichsweise wenig Brennstoff lange warmhalten. Bei meinem kleinen Ofenmodell wirkt sich dieser Effekt natürlich in geringerem Maße aus, als bei einem großen Kachelofen. Deshalb habe ich mich gefragt, welche kleinen (meist schlecht wärmeisolierten) Räume es gibt, in denen es zu keinen sehr niedrigen Temperaturen kommen darf. Ein Hobby-Gewächshaus war meine Antwort. Die Pflanzen brauchen dort wärmere Temperaturen, besonders im Winter. Die übliche Lösung ist es, Kerzen in diesen kleinen Gewächshäusern aufzustellen. Sie brennen schnell ab, danach ist die Wärme „verloren“. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem Versuch, den ich in meinem Modellhaus ohne Kachelofenmodell durchgeführt habe. Man könnte nun in einem Gewächshaus das Kachelofenmodell mit den Kerzen beheizen, die man sonst ohne den Kachelofen aufgestellt hätte. Dabei wird die charakteristische Wärmespeicherefähigkeit der Schamottesteine und Kacheln

des Kachelofens genutzt. Des Weiteren wird kein elektrischer Strom gebraucht, dies kann vor allem in Gebieten außerhalb von Ortschaften ein entscheidender Vorteil sein. Trotzdem ist hier erst zu testen, wie der kleine Kachelofen auf einen solchen, etwas größeren Raum wirkt. Weiterhin ließe sich mit dem Modell gut nach Verbesserungen der aktuell gebräuchlichen Rußfilter/Abgasfilter forschen, da die Brennstoffe die gleichen Eigenschaften aufweisen, wie bei der Verbrennung in großen Öfen. Hierbei wäre der Einbau der Testfilter an einem kleinen Ofen unkomplizierter und die Kosten dafür erheblich geringer.

Danksagung

Das gute Gelingen meiner Jugendforscht-Arbeit verdanke ich vielen Personen. Bei Freunden, Verwandten und Familie bekam ich Anregungen und mentalen Rückhalt. Dafür möchte ich danken. An meinen Vater Ernst Höfler geht ein ganz herzlicher Dank für seine praktische und theoretische Hilfe beim Bau des Ofens.

Besonders danken möchte ich meinem Projektbetreuer Dr. Martin Stübiger für seine unkomplizierte und kenntnisreiche Begleitung – bis hin zum letzten Schliff der Arbeit für die Veröffentlichung. Unser gemeinsames Interesse an dem kleinen Kachelofen wuchs und ließ ausführliche Gespräche und Diskussionen entstehen. Durch seine Impulse entwickelten sich sowohl der Kachelofen, aber auch die theoretische Ausarbeitung – insbesondere die Messreihen und Berechnungen – immer weiter. Lieber Herr Stübiger, vielen Dank!

Literaturverzeichnis

- [1] Kachelofenbau von Manfred Raschner, Köln-Braunsfeld: R. Müller 1983 (Fachwissen für Heimwerker); S. 21, S. 24
- [2] http://www.ofen.edingershops.de/Vermiculite-oder-Schamotte:_:113.html (Letzter Zugriff: 08.01.17)

- [3] <https://www.ofen.de/blog/holzkohle-fakten.html> (Kohle) (Letzter Zugriff: 05.01.17.)
- [4] <http://www.wissen.de/lexikon/holzkohle> (Kohle) (Letzter Zugriff: 05.01.17.)
- [5] <http://www.ofenfeuer.de/global/pdf/Probleme.pdf> (Holz) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [6] <http://www.kaminholz-wissen.de/hartholz-weichholz.php> (Holz) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [7] <https://www.schornsteinmarkt.de/rauchzeichen/holz-viele-arten-mit-grossen-unterschieden/1623> (Holz) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [8] <http://www.chemie.de/lexikon/Paraffin.html> (Paraffin) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [9] <http://www.chemie.de/lexikon/Ethanol.html> (Spiritus) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [10] <http://www.chemieunterricht.de/dc2/r-cho/curotro.htm> (Esbit) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [11] <http://www.gifte.de/Chemikalien/hexamethylentetramin.htm> (Esbit) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [12] <https://www.chem-page.de/experimente/82-brennpaste.html> (Brennpaste) (Letzter Zugriff: 06.01.17)
- [13] <https://www.bauforumstahl.de/upload/documents/brandschutz/kennwerte/Heizwertfluessig.pdf> (Petroleum) (Letzter Zugriff: 06.09.17)

Publiziere auch Du hier!

FORSCHUNGSARBEITEN VON
SCHÜLER/INNE/N UND STUDENT/INN/EN

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft

Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg
Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de

Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschiedt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d. h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d. h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



Richtlinien für Beiträge

FÜR DIE MEISTEN AUTOR/INN/EN IST DIES DIE ERSTE WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNG. DIE EINHALTUNG DER FOLGENDEN RICHTLINIEN HILFT ALLEN – DEN AUTOR/INNEN/EN UND DEM REDAKTIONSTEAM

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d. h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und

Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.

- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.

- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)
- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage www.junge-wissenschaft.ptb.de herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.

Impressum

[JUNGE]
wissenschaft



Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion
Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508

Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

Design & Satz

Sabine Siems
Agentur „provieler werbung“
E-Mail: info@provieler-werbung.de
Tel.: 05307 / 939 3350



Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100