

KOMMENTIERTE MESSDIAGRAMME ZUR SPÄTANTIKEN TÖPFEROFENTECHNOLOGIE

ZUM NUTZEN LANGFRISTIG ANGELEGTER EXPERIMENTALARCHÄOLOGISCHER EVALUIERUNGEN HISTORISCHER PRODUKTIONSANLAGEN

Die methodischen Anforderungen an Design und Durchführung archäologischer Experimente zur Sicherung ihres wissenschaftlichen Stellenwertes hat in der Forschungsgeschichte einen breiten Raum eingenommen. Ein unangefochtener Grundkonsens besteht darüber, dass archäologische Experimente prinzipiell wiederholbar, in allen Prozessschritten nachvollziehbar und die Untersuchungsparameter klar benannt sein müssen. Die Frage nach der notwendigen Anzahl und Ausrichtung archäologischer Experimente, die etwa für eine umfassendere technologische Evaluierung einer historischen Produktionsanlage notwendig sind, findet demgegenüber in der Regel weitaus weniger Beachtung in Methodikdiskursen.

Die folgenden kommentierten Messdiagramme der Versuchsbrände in dem Nachbau eines Schachtofens des Mayener Töpfereiviertels Siegfriedstraße, der um 500 in Betrieb war¹, geben nicht nur Aufschluss über das Brennverhalten des Ofens. Sie zeigen ebenso deutlich, wie notwendig ein Set von Experimenten auch mit variierenden Fragestellungen ist. Dadurch werden Aufbau und Entwicklung des Wissensfundaments bei den Experimentatoren gewährleistet – auch dann, wenn es sich um erfahrene Handwerksspezialisten handelt. Darüber hinaus können die Reproduzierbarkeit bzw. die Streuweite von Ergebnissen überprüft sowie die Wirkungsmächtigkeit einzelner Variablen mit wechselnden Parametern näher bestimmt werden.

LAGE DER TEMPERATURFÜHLER UND MESSSONDEN IM OFEN

Alle Temperaturfühler liegen vertikal übereinander. Die Temperaturfühler T1, T2 und T3 sind im Feuerungsraum eingesetzt. Der Fühler ragt dabei jeweils ca. 2 cm in den Feuerungsraum hinein. T4, T5 und T6 liegen im Brennraum, unmittelbar oberhalb der Speichentenne, ebenfalls mit etwa 2 cm Überstand. Mit den Temperaturfühlern T7, T8 und T9 wird die mittlere Zone im Brennraum besetzt. Dabei sind die Temperaturfühler 40 cm weit in den Brennraum hineingeführt und erfassen damit die Temperaturentwicklung im Zentrum des Ofens. Die Temperaturfühler T10, T11 und T12 liegen mit einem Überstand von ca. 2 cm unterhalb der Brennraumöffnung. Alle Temperaturfühler der Positionen T1-T12 sind Nickel-Chrom-Sonden vom Typ K. Die Zählung der Fühlerpositionen im Ofen (T1 bis T12) erfolgt immer im Uhrzeigersinn und beginnt links unten im Brennraum, sodass die letzte Position (T12) rechts oben im Brennraum, knapp unterhalb der Ofenöffnung liegt (**Abb. 1**).

Der vordere Bereich des Brennraumes, direkt über dem Schürloch, wird durch die Positionen ST1 und ST2 überwacht. Diese liegen auf der Ebene zwischen T4 bis T6 und T7 bis T9 (ST1) bzw. zwischen T7 bis T9 und T10 bis T12 (ST2). Die Temperatursonden der Positionen ST1 und ST2 sind Platin-Rhodium-Sonden vom Typ S. Bei den Bränden 2014, 2015, 2016 und 2018 dienten diese Messstationen ausschließlich der Überwachung und laufenden Kontrolle während des Brandes und als Backup für eventuelle Ausfälle der stationären Messtechnik. Die Aufzeichnung der Temperaturen erfolgte hier alle 15 Minuten handschriftlich im

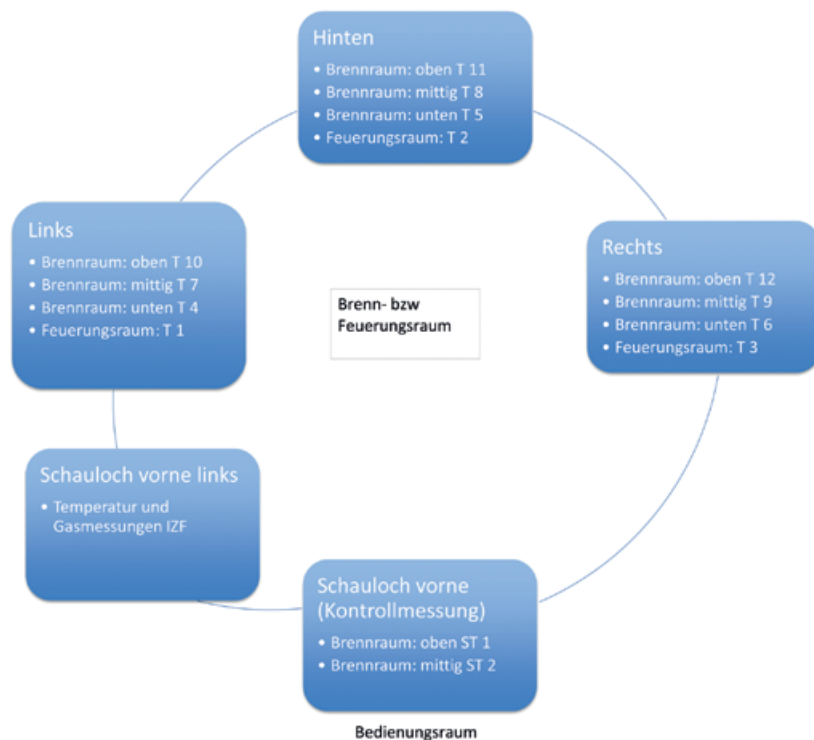


Abb. 1 Schema zur Lage der Temperaturfühler und Messsonden im Ofennachbau. – (Grafik G. Döhner).

Brennprotokoll. Zusätzlich wurden Oberflächentemperaturen per Infrarotmessgerät genommen und auch im Brennprotokoll festgehalten. Für die Erstellung der Brenn- und Temperaturkurven der Jahre 2015, 2016 und 2018 wurden diese Werte nicht grafisch dargestellt, da die Daten als Backup erhoben wurden. Die Kontrollöffnung links des Schürloches (Schauloch links) liegt in der Mitte der aufgehenden Brennraumwandung. Diese Öffnung dient der Aufnahme der Messsonden des Instituts für Ziegelforschung Essen e. V. (IZF) zur Messung der Ofenatmosphäre und des Ofendruckes. Die gemessenen Gaskomponenten sind: Sauerstoff (O_2), Kohlenstoffmonoxid (CO) und Gesamtkohlenwasserstoff (C_{ges}). Schwefeldioxid (SO_2) war in der Ofenatmosphäre nicht messbar. Zusätzlich wird die Temperatur gemessen. Alle Fühler der IZF-Messungen liegen im Zentrum des Brennraumes.

EXPERIMENTALBRAND IM JAHR 2014

Das Ziel des ersten Ofenbrandes im Jahr 2014 in dem nachgebauten Mayener Schachtofen der Zeit um 500 war die Verfestigung der Konstruktion und die Erprobung eines geeigneten Dokumentationsverfahrens. Der Brennraum wurde nur zu 68 % besetzt. Die Messpunkte T10, T11 und T12 lagen deshalb oberhalb der Abdeckung des Brenngutes und wurden aus diesem Grund nicht mit Thermofühlern bestückt.

Die Sonden in den Kontrollöffnungen ST 1 und ST 2 sind ab 3:00 Uhr ausgefallen. Deshalb brechen beide Temperaturkurven zu diesem Zeitpunkt ab (**Abb. 2**). Auch der Temperaturfühler T4 mit durchschnittlich $50^\circ C$ zeigt einen Messfehler an. T4 lag auf der linken Seite oberhalb der Speichentenne im Brennraum. Die Messfühler T1, T2 und T3 bilden im Uhrzeigersinn die Messstationen im Feuerungsraum. Dementsprechend liefern sie die Messkurven mit den höchsten Temperaturschlägen. Das entspricht zunächst dem Brennverhalten stehender Öfen. Die Temperaturfühler T5 im Brennraum unten und T8 darüber liegend, befinden sich genau gegenüber der Schüröffnung und liegen ungefähr im gleichen Temperaturanstiegs-

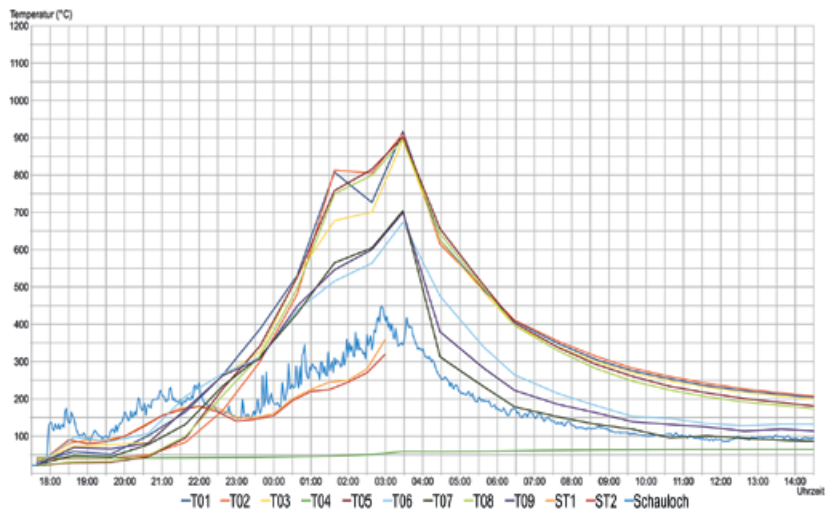


Abb. 2 Die Brennkurve des Experimentalbrandes im Jahr 2014. – (Grafik B. Streubel).

bereich. Im Vergleich dazu dokumentieren die Temperaturfühler T6, T7 und T9 einen deutlich geringeren Temperaturanstieg, der gegen 3:30 Uhr eine Höchsttemperatur im Bereich von 700°C erreichte. Die Temperaturen im Feuerungsraum und hinteren Brennraumbereich lagen zur selben Zeit bei 900°C. Der Temperaturunterschied zwischen Feuerungsraum und Brennraum ist dabei weniger problematisch als der Unterschied von knapp 200°C innerhalb des Brennraumes. Die Ursache für diese Differenz lag in der Art der Befuerung und der geringen Auslastung des Ofens sowie in der Art des Einstapelns. Bei diesem ersten Brand bestand die Befürchtung, dass der Bereich des Brennraumes, der direkt über der Schüröffnung liegt, sehr schnell heiß wird. Diese Annahme beruhte darauf, dass die Bedienmannschaft davon ausging, dass die Flamme den kürzesten Weg durch den Ofen nimmt. Um dem entgegenzuwirken, wurde in diesem Bereich der Besatz besonders dicht gesetzt. Es zeigte sich aber, dass dieser Bereich eher als »kalte Stelle« im Ofen zu betrachten ist, da die Flamme durch den Zug eher nach hinten wegzieht und von dort nach oben durch den Brennraum führt. Daraus resultiert auch der hohe Wert an den Messpositionen T5 und T8. Die stark gezackte blaue Kurve bildet die IZF-Messungen (Sonden im Schauloch links) ab. Die dicht getaketen Ausschläge sind auf die deutlich kürzeren Messintervalle zurückzuführen. Alle anderen Kurven weisen ein durchschnittliches Messintervall von einer Stunde auf. Aufgrund der Position des Temperaturfühlers im Schauloch links bildet diese Kurve auch gleichzeitig die durchschnittliche Brennkurve ab. Hier lag die Maximaltemperatur bei 450°C (ca. 2:50 Uhr). Das ist eine deutlich zu geringe Durchschnittstemperatur für einen keramischen Brand im Niedertemperaturbereich. Zum Ausbrennen der Feuchtigkeit und zur Teilverfestigung der Ofenkonstruktion war die Temperatur für den ersten Brand jedoch ausreichend.

EXPERIMENTALBRAND IM JAHR 2015

Im Jahr 2015 erfolgte der erste Experimentalbrand des Töpferofennachbaus unter Volllast. Eingesetzt wurde Gebrauchs- und Kochgeschirr aus dem Formenspektrum der Zeit um 500. Die Gefäße bestanden aus gereinigten Mayener Tonen. Es wurden kein Masseversatz hergestellt und keine Zuschlagsstoffe zugesetzt, weil mit diesem Brand die Tone zunächst aus handwerklicher Perspektive auf ihre natürlichen Eigenschaften bezüglich der Herstellung von Koch- und Gebrauchsgeschirr getestet werden sollten. Im Diagramm (**Abb. 3**) ist gut zu erkennen, dass alle zwölf Temperaturkurven der Messstationen T1 bis T12 dichter beieinander liegen als im Jahr 2014. Das zeigt, dass die Temperaturunterschiede im Ofen deutlich

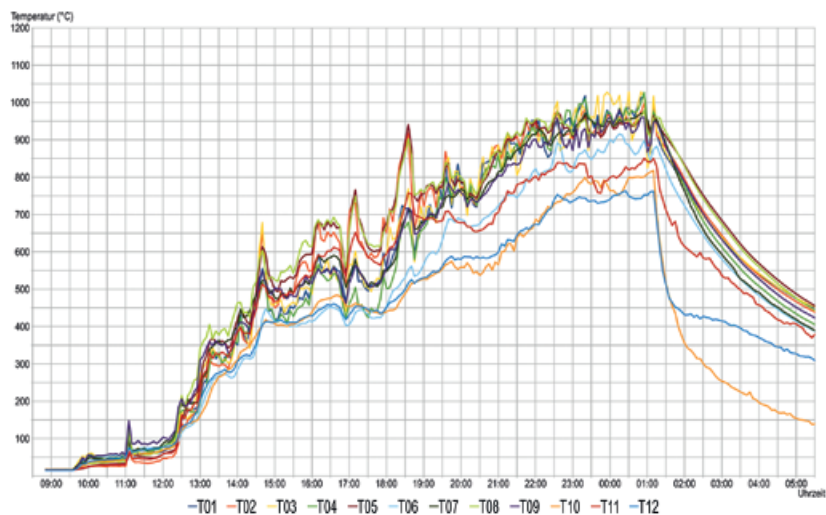


Abb. 3 Die Brennkurve des Experimentalbrandes im Jahr 2015. Messintervall alle fünf Minuten. Brenndauer 16,0 Stunden. – (Grafik B. Streubel).

geringer waren. Ein Grund dafür ist die Auslastung des Ofens zu 100 %. Außerdem konnte bereits auf die Erfahrungen mit der Brennführung des Ofens aus dem Jahr 2014 zurückgegriffen werden. Schon beim Einsetzen des Brenngutes wurde der vordere Bereich des Brennraumes über dem Schürloch weniger dicht besetzt und damit mehr Zug ermöglicht. Die vergleichsweise stark gezackten Kurven sind darauf zurückzuführen, dass die Messintervalle für diesen und die folgenden Experimentalbrände im einstelligen Minutenbereich liegen. Damit kann die Reaktionsgeschwindigkeit des Ofens bei Energiezufuhr (Nachlegen von Brennmaterial) besser beurteilt und abgebildet werden. Die Brennführung bis 11:00 Uhr ist als optimal zu beschreiben. Danach sollte die Temperatur im Ofen ausgeglichen und langsam gesteigert werden. Aufgrund der Witterungsbedingungen (Gewitter, Starkregen und Wind) entwickelte der Töpferofen nur wenig Zug. Daher wurde Stroh in die Feuerung gegeben, um die Thermik im Ofen zu beschleunigen und einen besseren Zug zu erzeugen. Die Reaktionsgeschwindigkeit bei Energiezufuhr ist bei diesem Ofen bis zum Bereich von 500 °C als sehr gut zu bewerten. Deshalb führte die Zugabe von Stroh auch zu einem sprunghaften Temperaturanstieg von 150 °C (11:00 Uhr). Der folgende Brennverlauf ist etwas zu steil, die Temperaturverteilung bis 14:45 Uhr jedoch der Brennanlage entsprechend nahezu optimal. Ab diesem Zeitraum beginnen die Temperaturen im oberen Brennraumbereich unterhalb der Deckschalen (T10, T11 und T12) weniger schnell zu steigen und der Abstand zu den anderen Temperaturkurven wird größer. Das liegt an der kühlen Luft und dem Sauerstoffüberschuss, die während des Brennens über die Deckschalen streichen. Mit Zunahme des Temperaturunterschiedes zwischen Ofeninnenraum und Umgebungstemperatur verstärkt sich dieser Effekt. Auch die Temperaturverteilung im gesamten Ofen zeigte einen Wandel. Der bis dahin gleichmäßige proportionale Temperaturanstieg fing im Bereich von 550 °C an sich zu verändern und die Temperaturunterschiede im Ofen wurden größer. In der Folge wurde versucht, durch Änderung der Position des Feuers unter der Speichentenne, temporäres Schließen des Schürloches und Verschieben der Deckschalen einen Temperatenausgleich im Ofen herzustellen und dabei die Temperatur weiter nach oben zu führen. Das gelang schließlich ab 18:30 Uhr; jedoch hatte der Ofen wieder einen Zug gegenüber der Schüröffnung im hinteren Bereich entwickelt. Das beeinträchtigte insbesondere den Brennraumbereich rechts unten (T6). Hier konnte erst um 22:00 Uhr die Temperatur wieder der Hauptkurve angenähert und inklusive der Haltezeit bis zum Abschluss des Brandes gegen 1:00 Uhr gehalten werden. Zu diesen Beobachtungen ist anzumerken, dass sie sehr deutlich zeigen, wie sehr die moderne Messtechnik die Brennführung beeinflusst. Für eine experimentalarchäologische Evaluierung einer Töpferofenanlage wäre es daher sinnvoll, mit Erreichen eines gewissen Erfahrungslevels einen Brand so durch-

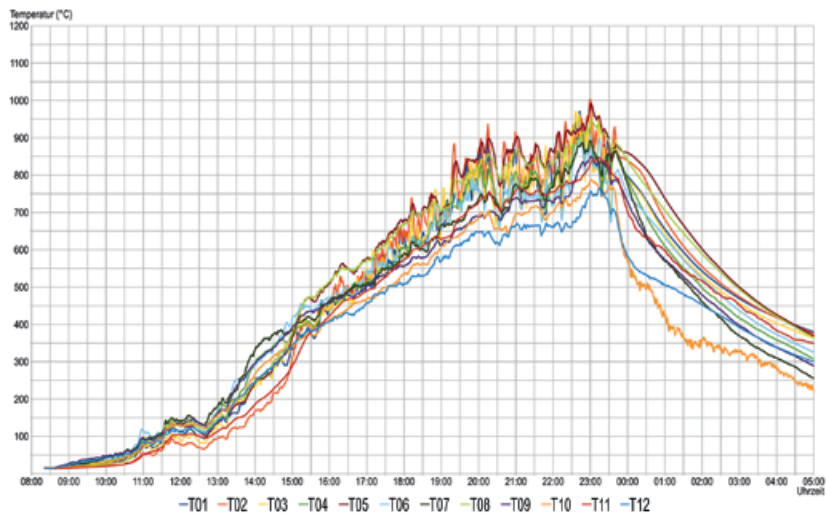


Abb. 4 Die Brennkurve des Experimentalbrandes im Jahr 2016. Messintervall jede Minute. Brenndauer 15,5 Stunden. – (Grafik B. Streubel).

zuführen, dass zur Brennführung nur jene Beobachtungsmöglichkeiten genutzt werden, die auch den zeitgenössischen Töpfern zur Verfügung standen. Die Dokumentation erfolgt dabei wie bei allen Bränden zuvor. Die Messdaten werden aber in einer Art Blackbox aufgezeichnet und stunden während des Brandes nicht zur Verfügung.

Nach dem Beenden dieses Brandes und dem Verschließen der Schüröffnung kühlt der obere Brennraumbereich unter den Deckschalen (T10, T11 und T12) schneller ab als der Rest des Ofens. Die Temperaturen in den anderen Bereichen beginnen sich in der Abkühlungsphase durch die Strahlungswärme der Gefäße zu egalisieren und die Temperaturen nehmen gleichmäßig ab bis zur Abnahme der Deckschalen.

EXPERIMENTALBRAND IM JAHR 2016

Die Temperaturkurven des im Jahr 2016 durchgeführten Experimentalbrandes liegen eng beieinander und bilden eine Art Brennoptimum für diese Brennanlage (**Abb. 4**). Bis 11:30 Uhr erfolgt ein flacher, linearer Temperaturanstieg, der die Haltezeit bis 100°C beschreibt, um das restliche Anmachwasser aus dem Besatz entweichen zu lassen. Die Plateauphase bei 150°C und das anschließende Absinken der Temperatur sind auf das Nachlegen von zu wenig Brennmaterial zurückzuführen. Das passiert vor allem dann, wenn der Ofenbrand von mehreren Teams, die sich in Schichten abwechseln, durchgeführt wird. Besonders die Übergabe kann zu einem Absinken führen, bevor das eingewechselte Team seinen Rhythmus gefunden hat. Dieses Phänomen tritt noch einmal gegen 18:45 Uhr auf, jedoch mit einem deutlich geringeren Temperaturabfall. Die Messfühler T10 und T12 (im Brennraum links und rechts unterhalb der Offenöffnung) trennen sich ab 450°C von der Hauptkurve und steigen deutlich langsamer. Es handelt sich hierbei wieder um den Effekt der kühlen Luft, die über die Deckschalen streicht. Die Kurve des Messfühlers T11 (im Brennraum hinten oben) reagiert bis 370°C verzögert. Hier wurde beim Einsetzen und während des Heizens versucht, die Flamme nicht wieder nach hinten im Feuerungsraum wegziehen zu lassen. Zu diesem Zweck wurde der Ofen nur im vorderen Bereich befeuert und die Glut nicht im hinteren Teil unter die Speichentenne geschoben. Ab 400°C entwickelt der Ofen aber wieder einen Zug im hinteren Bereich und die Temperatur steigt bzw. gleicht sich an. Bis 20:15 Uhr verläuft der Brand optimal für diese Brennanlage. Danach, im Temperaturbereich zwischen 750°C und 800°C, beginnt die Brennkurve deutlich flacher zu werden und die zugeführte Energie wird weniger optimal ausgenutzt. Hier beginnt eine Art Plateauphase, die generell für

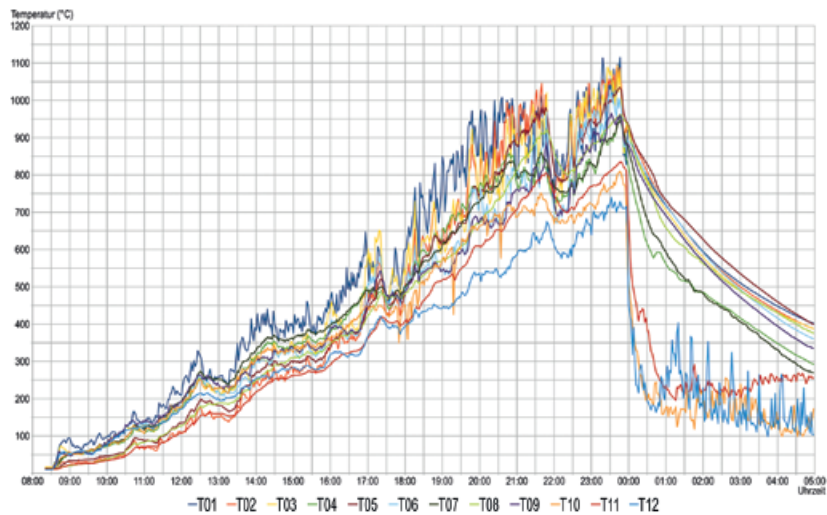


Abb. 5 Die Brennkurve des Experimentalbrandes im Jahr 2018. Messintervall alle zwei Minuten. Brenndauer 15,5 Stunden. – (Grafik B. Streubel).

diesen Ofen zu bemerken ist. Ab diesem Temperaturbereich ist die Temperatursteigerung, trotz Nachlegens von Brennmaterial, schwer. Der Ofen »hängt« und reagiert verzögert. Innerhalb des Ofens kann – aufgrund der Konstruktionsweise (oben offen, nur mit Deckschalen abgedeckt) – kein Ofeninnendruck oder gar Überdruck aufgebaut werden. Zusätzlich wird der Ofen von oben gekühlt und es entsteht ein Sauerstoffüberschuss. Gegen 23:00 Uhr wurde für diesen Brand das Temperaturmaximum (mit einem Peak bei 1000 °C im Feuerungsraum) erreicht. Weiteres Befeuern zur Temperatursteigerung war nicht möglich bzw. sinnvoll. Bis 23:30 Uhr bestand das Ziel nun darin, die Temperatur zu halten, damit die Brennatmosfera ausreichend lange auf den gesamten Besatz einwirken konnte. Nach Beenden des Brandes und Verschließen des Ofens sanken die Temperaturbereiche um die Messfühler T10 und T12 schneller ab, da sie am oberen Ende der Brennraumöffnung liegen. Nur der Messfühler T11 weist eine höhere Temperatur auf, was aber an dem Feuerzug und der höheren Temperatur in diesem Bereich liegt. Grundsätzlich beginnt sich die Temperatur im Ofen zu egalisieren und die natürliche Kühlung setzt ein. Die stärkeren Ausschläge von T10 zwischen 0:00 Uhr und 5:00 Uhr morgens sind auf Wind zurückzuführen, der in diesem Bereich über die Deckschalen strich.

EXPERIMENTALBRAND IM JAHR 2018

Bei dem Experimentalbrand des Jahres 2018 waren Großgefäße Teil des Besatzes. Das schwerste Gefäß besaß ein Rohgewicht von knapp 50,00 kg. Mit den Brennerfahrungen der vorangegangenen Brände wurde geprüft, ob diese Brennanlage auch für die Herstellung von Großgefäßen geeignet ist. Die Größe der Gefäße stellt dabei nicht die eigentliche Herausforderung dar. Von größerer Bedeutung für den keramischen Brand ist hierbei die stärkere Wandung dieser Gefäße, die mehr Restwasser enthalten als Tafel- und Kochgeschirr und deshalb deutlich länger zum Durchglühen benötigen. Insgesamt wurde daher die Brennkurve etwas flacher gefahren als in den Jahren zuvor (**Abb. 5**). Die Temperaturrückgänge um 13:45 Uhr und 17:30 Uhr sind hier nicht auf den Wechsel des Brennteams zurückzuführen, sondern auf den Versuch, recht früh während des Brandes einen Temperatenausgleich im Ofen herzustellen. Bis zu einer Temperatur im Bereich von 850 °C im Brennraum konnte der lineare Temperaturanstieg gehalten werden. Wegen der Großgefäße musste die Temperatur aber weiter gesteigert werden, damit alle Gefäße von der Brenn- und Temperaturatmosphäre

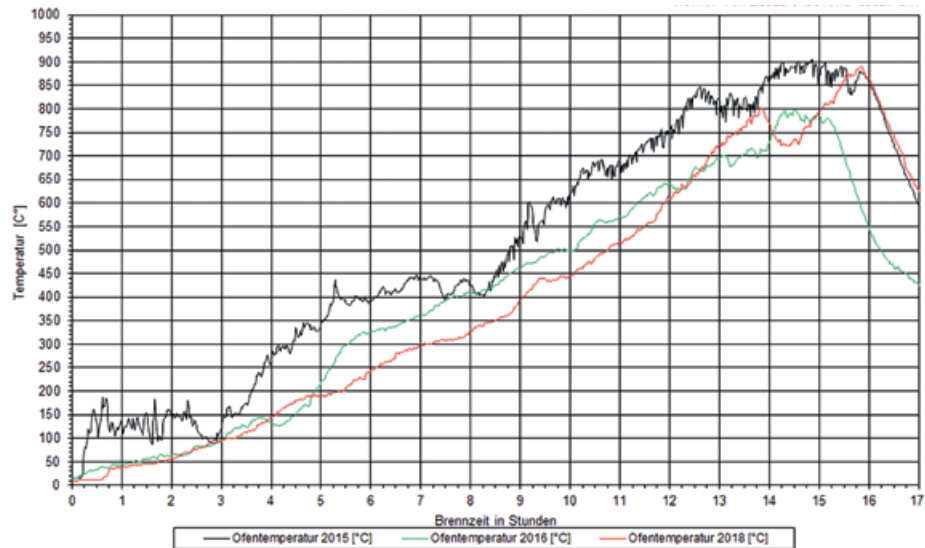


Abb. 6 Gemittelte Temperaturkurven der Experimentalbrände aus den Jahren 2015, 2016 und 2018. – (Grafik U. Katschmarck, IZF).

erfasst werden konnten. Das Nachlegen von Brennmaterial führte aber zu einem Absacken der Temperatur bis in den Bereich von 730°C. Ein Grund dafür war die entstandene Reduktion, die zu einer Kühlung im Ofen führte. Außerdem wird die Temperatur im Brennraum auch maßgeblich durch die Strahlungswärme des ab 700°C glühenden Besatzes beeinflusst. Sowohl der Temperatursausgleich als auch das Halten der Temperaturen ist davon abhängig. Gefäße mit stärkeren Wandungen brauchen eine höhere Temperatur im Ofen, um durchzuglühen. Offenbar war dieser Zustand bei diesem Brand noch nicht erreicht, da die Einwirkzeit der Temperatur zu kurz war. Daher sackte die Temperatur schneller ab und es wurden 1,5 Stunden benötigt, um die Temperatur im Ofen wieder ansteigen zu lassen. Dabei wurden im Feuerungsraum kurzzeitig Temperaturen von über 1100°C und im Brennraum von über 1000°C erreicht. Mit dem Erreichen dieser Temperaturen bis ca. 23:45 Uhr wurde der Brand beendet. Die Temperaturen egalisierten sich wieder, wobei die oberen Brennraumbereiche aufgrund der kalten Luft deutlich schneller abkühlten (T10, T11, T12). Im Vergleich zu den Experimentalbränden aus den Vorjahren stürzten die Temperaturen an diesen Messfühlern regelrecht ab. Das könnte auf die geringere Strahlungswärme der Großgefäße zurückzuführen sein. Hinzu kam ein ungünstiger Windeinfall, der offenbar genau im Messbereich von T10, T11 und T12 auftrat. Ab 1:00 Uhr kann man beobachten, dass sich die Phasen von Windböen und Windstille abwechselten. Deshalb zeigen die Kurven hier starke Ausschläge nach oben und unten.

ZUSAMMENFASSUNG DER EXPERIMENTALBRÄNDE AUS DEN JAHREN 2015, 2016 UND 2018

Die schwarze Kurve aus dem Jahr 2015 zeigt den ersten Brand im Schachtofen unter Vollast ohne spezifisch auf diesen Ofen anwendbare Erfahrungen des Bedienpersonals (**Abb. 6**). Besonders der Temperaturanstieg in den ersten beiden Brennstunden ist zu schnell. Insgesamt entwickelt sich der Temperaturanstieg bis zur achten Brennstunde zu steil. Der Grund dafür war die fehlende Erfahrung bezüglich der Reaktionsgeschwindigkeit und Temperaturverteilung der Brennanlage bei der Zufuhr von Brennmaterial. Die grüne Kurve des Jahres 2016 und die rote Kurve des Jahres 2018 zeigen einen linearen Temperaturanstieg ohne größere Ausschläge bis zu einer Temperatur von 800°C. In den ersten beiden Brennstunden wurde eine Haltezeit zum

Verdampfen des restlichen Anmachwassers bei durchschnittlich 50°C gefahren. Die Zusammenstellung der gemittelten Temperaturkurven aus drei Experimentalbränden zeigt sehr deutlich, dass für eine technische Evaluierung einer Brennanlage mehrere Brände notwendig sind. Bereits durch die Erfahrungen aus dem ersten Brand unter Volllast konnten direkte Änderungen für eine ausgeglichene Temperaturführung gewonnen und angewandt werden. Zusätzlich führten kleine Änderungen beim Einsetzen des Besatzes zu einer besseren Temperaturverteilung im Ofen. Der Brand des Jahres 2016 wurde bei 800°C mit einer Haltezeit von etwas mehr als einer Stunde beendet. Im Jahr 2018 führte der gezielte Versuch, signifikant über die 800°C zu kommen, als Test für die Leistungsfähigkeit des Ofens und seine Reaktion in höheren Temperaturbereichen, zunächst zu einem Temperaturabfall. Dieser trat ein, da durch das Nachlegen die Reduktionsphase im Ofen zur Kühlung im Bereich von 730°C führte und die Strahlungswärme der Gefäße noch nicht ausreichte, um die Temperatur im Ofen stabil zu halten. Erst danach konnte innerhalb von 1,5 Stunden ein Temperaturanstieg bis auf durchschnittlich 870°C erreicht werden. Der signifikante Temperaturanstieg war auch deshalb gewünscht, da sich im Besatz Großgefäße mit dickerer Wandungsstärke befanden, die eine höhere Temperatur bzw. längere Einwirkzeit zum Brennen benötigten. Aufgrund der thermischen Belastung für den Ofen, aber ausreichender Brenndauer, wurde auf eine Haltezeit bei Erreichen der Brennendtemperatur von durchschnittlich 870°C verzichtet. Mit dieser gemittelten Brennendtemperatur war auch die maximal realisierbare Durchschnittstemperatur bei einem Brand erreicht. Als optimaler Brennverlauf für diese Ofenanlage ist die Kurve aus dem Jahr 2016 zu betrachten.

GAS- UND OFENDRUCKMESSUNGEN WÄHREND DES IM JAHR 2015 ERFOLGTEN EXPERIMENTALBRANDES (IZF)

Der Einbau der Sonden und der Thermoelemente erfolgte über das Schauloch in der Ofenwandung vorne links. Die Einbautiefe betrug für die Gasentnahmesonde und das Thermoelement 0,67 m. Die Sonde zur Messung des Ofendrucks hatte eine Einbautiefe von 0,54 m. Da Schachtofen keinen Rauchgassammelkanal oder Kamin besitzen, müssen die Messgassonden für die Analyse der Ofenatmosphäre innerhalb des Ofenbesatzes platziert werden. Mit den Messgassonden werden auch ein Thermoelement für die Temperaturmessung und ein Sondenrohr für die Ofendruckmessung eingesetzt. Das obere Diagramm (**Abb. 7, 1**) zeigt den CO-Gehalt in mg/m³ (grüne Kurve), den Sauerstoffgehalt in Vol.-% (blaue Kurve) und den durchschnittlichen Temperaturverlauf (schwarze Kurve) in der Brennraummitte für den Brennverlauf im Jahr 2015 an. Das mittlere Diagramm (**Abb. 7, 2**) bildet den Temperaturverlauf (schwarze Kurve) im Verhältnis zu C_{gesamt} in mg/m³ und zum Ofendruck in mbar (violette Kurve) ab. Das untere Diagramm (**Abb. 7, 3**) zeigt die Umgebungstemperatur in °C während des Brandes an. Der Schachtofen wurde mit einer Mischung aus Hart- und Weichholz beheizt (zum Verhältnis der beiden Holzarten s. die **Abb. 10-11** zum Holzverbrauch aus den Jahren 2015 und 2016). Dabei wurde das Brennmaterial abhängig von der Brennkurve händisch aufgelegt. Das Nachlegen von Brennmaterial lässt sich in drei typische Phasen unterteilen: Anfeuerungsphase, stationäre Phase und Ausbrand. Abhängig von der Ofentemperatur und Atmosphäre im Ofen erfolgen diese Phasen mit unterschiedlicher Konzentration bzw. Ausschlägen im Diagramm. Mit dem Anheizen des Ofens um 9:30 Uhr bis 13:30 Uhr findet ein besonders hoher Anstieg von CO und C_{gesamt} statt. Bei steigender Verbrennungstemperatur sinkt die CO-Emission. Dabei sinkt auch die Luftüberschusszahl, die das Verhältnis zwischen Brennstoffen und Luft angibt. Dabei ist die Luftüberschusszahl λ=1 das optimale Verhältnis, bei der alle Brennstoffmoleküle vollständig mit dem Luftsauerstoff reagieren können. Dies beschreibt das Idealverhältnis und würde eine vollständige Verbrennung bedeuten.

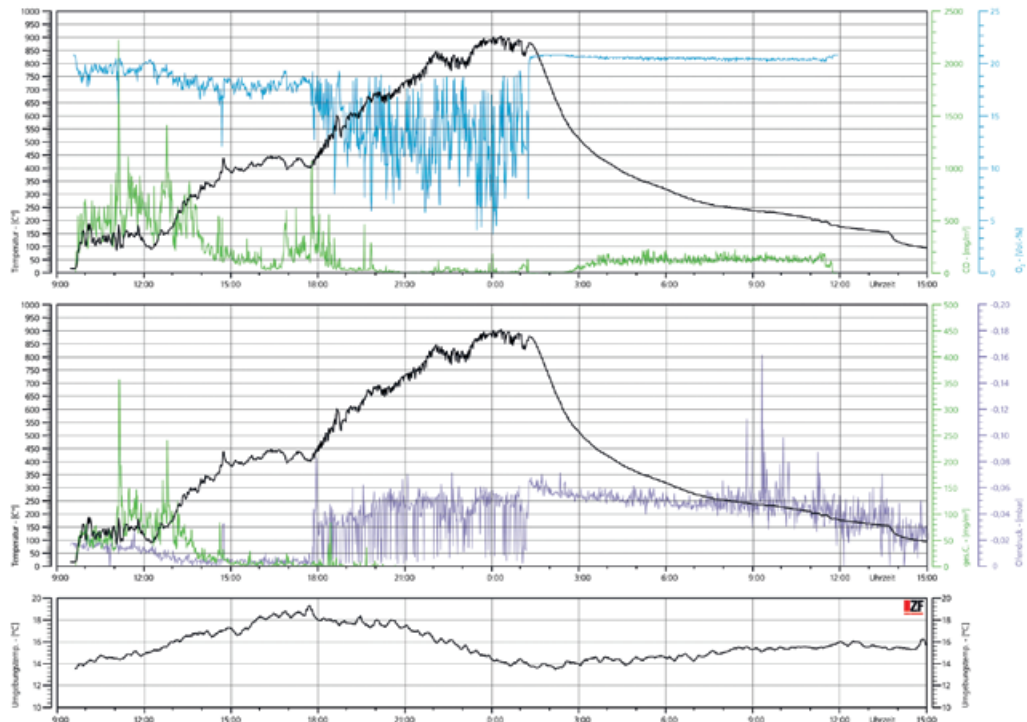


Abb. 7 Gas- und Ofendruckmessungen während des im Jahr 2015 erfolgten Experimentalbrandes. – (Grafik U. Katschmarek, IZF).

Bei diesem Ofen ist die Luftüberschusszahl immer sehr hoch, da er keinen zentralen Abzug besitzt. In der Folge treten beim Nachlegen von Brennmaterial kurzfristig immer Emissionsspitzen auf, die zeitweise einen Luftmangel herbeiführen und auf der Gefäßoberfläche zu Teilreduktionen führen können. Im Anschluss ist das Holz entgast und es liegt nur noch Holzkohle vor. Durch Nachlegen von Brennmaterial beginnt dieser Prozess erneut. Mit Erhöhen der Brenntemperatur im Ofen ist jedoch die Taktung des Zuführens von Brennmaterial so hoch, dass diese Prozesse beginnen, sich zu überlagern. Zwischen 18:00 Uhr und 1:00 Uhr ist ein Sinken und Steigen des Sauerstoffs in rascher Folge zu sehen. Dabei wechseln sich Phasen mit kurzzeitigem Luftmangel (Reduktion) mit Phasen eines hohen Luftüberschusses ab. Beide Phasen führen zur Kühlung im Ofen. Mit steigender Temperatur kann daher keine vollständige Verbrennung im Ofen stattfinden. Daraus resultiert auch das »Hängen« des Ofens, also eine erschwerte Erhöhung der Brenntemperatur trotz des Nachlegens von Brennmaterial.

Die Gasmessungen bei allen Experimentalbränden zeigen an, in welchem Verhältnis Luft und Brennmaterial stehen bzw. wie die tatsächliche Brennstoffausnutzung erfolgt. Eine höhere Kohlenmonoxidkonzentration ist ein Indikator für eine unvollständige Verbrennung. Dabei gilt: Um in diesem Ofen und bei Schachtofen allgemein eine bessere Brennstoffausnutzung zu erzielen, müsste der Luftüberschuss verringert werden. Das ist jedoch aufgrund des Ofenkonstruktionsprinzips nur bedingt möglich. Kleinere Verbesserungen in der Brennstoffausnutzung könnten eventuell durch eine veränderte Brennführung bewirkt werden. Bei diesem Brand wurde versucht, über den Ofeninnendruck eine verbesserte Temperaturverteilung und einen Temperaturanstieg zu erreichen, indem nach dem Auflegen des Brennmaterials und dem Beginn der stationären Phase das Schürloch mit einem Blech verschlossen wurde. Gleichzeitig sollte der Luftüberschuss im Ofen gesenkt werden. Der gemessene Ofendruck ist zu gering, um eine verbesserte Verbrennung zu erzielen. Hauptgrund ist, dass Schachtofen nicht als »geschlossene Systeme« betrieben werden können, da sie keinen zentralen Abzug besitzen. Die leichte Erhöhung des Ofeninnendrucks führte aber zu einer Verbesserung der Temperaturverteilung im Ofen.

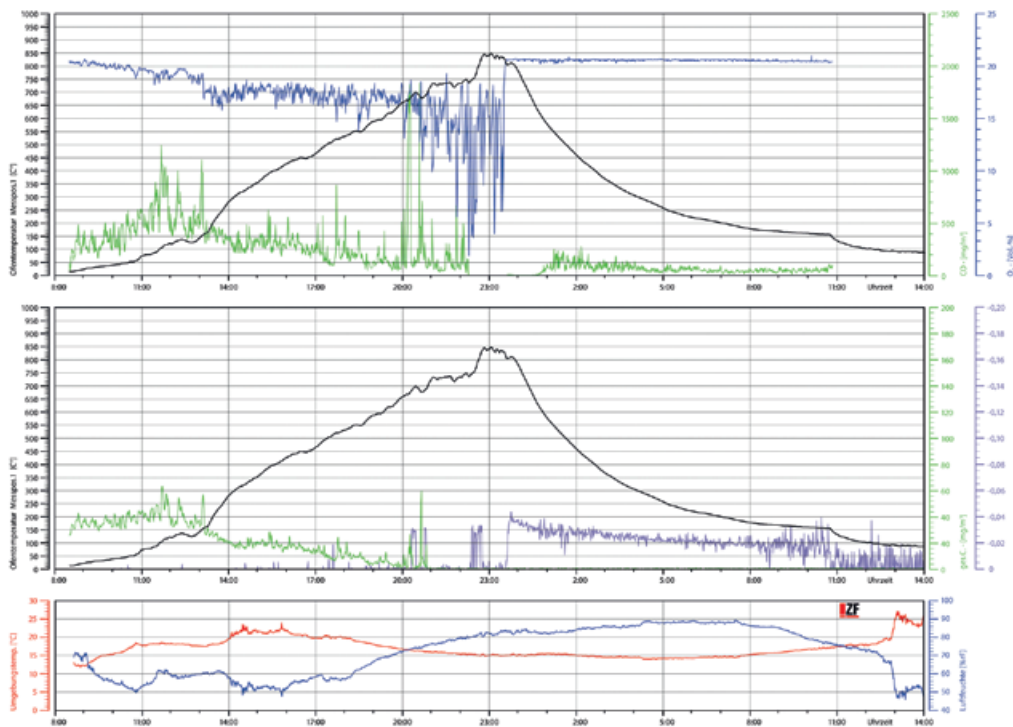
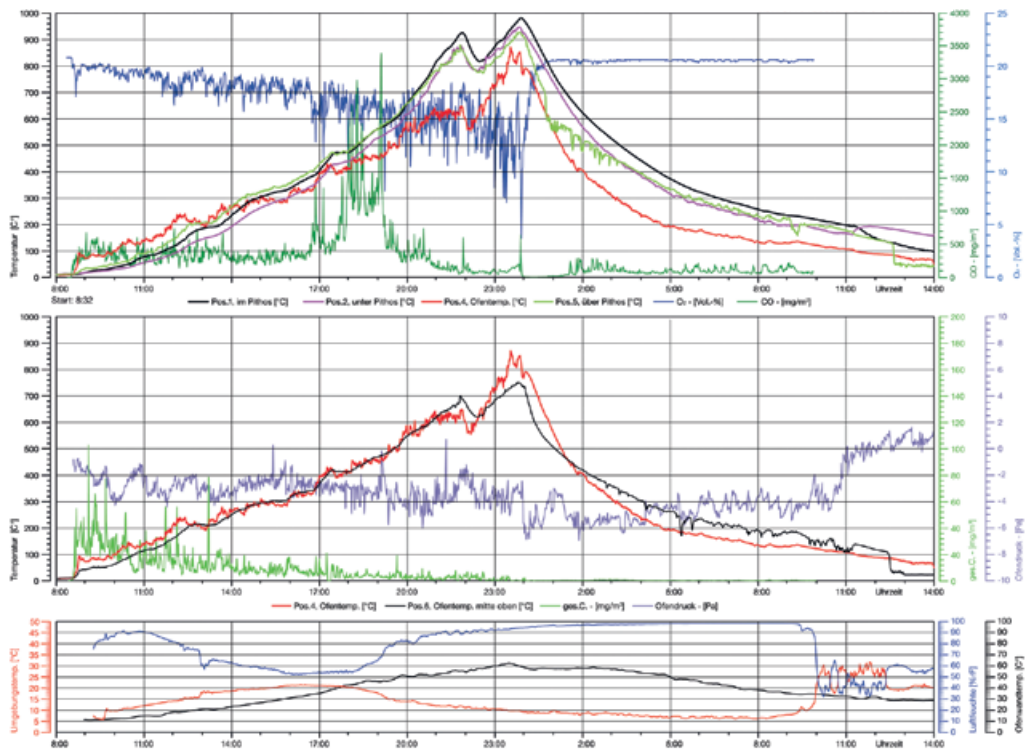


Abb. 8 Gas- und Ofendruckmessungen während des im Jahr 2016 erfolgten Experimentalbrandes. – (Grafik U. Katschmareck, IZF).

GAS- UND OFENDRUCKMESSUNGEN WÄHREND DES IM JAHR 2016 ERFOLGTEN EXPERIMENTALBRANDES (IZF)

Der Einbau der Sonden und Thermoelemente erfolgte über das Schauloch in der Ofenwandung vorne links. Die Einbautiefe betrug für die Gasentnahmesonde und das Thermoelement 0,70m. Die Sonde zur Messung des Ofendruckes hatte eine Einbautiefe von 0,66m. Alle Messfühler waren in den Ofenbesatz eingesetzt. Das obere Diagramm (**Abb. 8, 1**) zeigt den CO-Gehalt in mg/m^3 (grüne Kurve), den Sauerstoffgehalt in Vol.-% (blaue Kurve) und den durchschnittlichen Temperaturverlauf (schwarze Kurve) in der Brennraummitte für den Brennverlauf im Jahr 2016 an. Das mittlere Diagramm (**Abb. 8, 2**) bildet den Temperaturverlauf (schwarze Kurve) im Verhältnis zu C_{gesamt} in mg/m^3 und zum Ofendruck in mbar (violette Kurve) ab. Das untere Diagramm (**Abb. 8, 3**) zeigt die Umgebungstemperatur in $^{\circ}\text{C}$ während des Brandes an (rote Kurve). Zusätzlich wurde auch die relative Luftfeuchte in %rF während des Brandes und der Abkühlungsphase gemessen. Mit den Erfahrungen des Experimentalbrandes des Jahres 2015 wurde der Temperaturanstieg flacher gefahren, d. h., der Anstieg der Temperatur pro Stunde ist geringer. Der Brennverlauf bis 20:00 Uhr zeigt die typischen Emissionsspitzen durch das Nachlegen des Brennmaterials. Im Unterschied zum Brennverlauf im Jahr 2015 fällt auf, dass die Phase mit Reduktionsspitzen bei diesem Brand später einsetzt und ab 20:00 Uhr bis zum Schließen des Ofens um 23:30 Uhr anhält. Bis 20:00 Uhr war der Luftüberschuss zwar wieder konstruktionsbedingt zu hoch, aber das Auftreten der Reduktionsspitzen, also der kurzzeitige Luftmangel, erfolgte nur über 3,5 Stunden bis zum Beenden des Brandes. Dem Einsetzen der Reduktionsspitzen und der erhöhten Emission im Ofen folgte ein Absacken der Temperatur. Reduktion und anschließender Luftüberschuss führten wieder zur Abkühlung des Ofens. Das schlechte Luft/Brennstoffverhältnis im Ofen führte dazu, dass erst ab 22:20 Uhr wieder ein signifikanter Temperaturanstieg erzielt werden konnte. Der Ofeninnendruck bei diesem Brand ist noch geringer als im Jahr 2015 und schwankt während des Brandes um 0mbar. Der eingesetzte Druckmessumformer konnte nur negative Werte messen. Mit Schließen der

Abb. 9 Gas- und Ofendruckmessungen während des im Jahr 2018 erfolgten Experimentalbrandes mit zusätzlichen Thermoelementen. – (Grafik U. Katschmareck, IZF).



Schüröffnung setzte die natürliche Abkühlungsphase im Ofen ein. Die Kurve verläuft flacher als im Jahr 2015, d. h., die Abkühlung findet langsamer statt. Beim Aufheizen des Ofens ist der Temperaturanstieg im Bereich von 573 °C (Zeitpunkt des Quarzsprungs) flacher und auch in der Abkühlungsphase verläuft hier die Kurve weniger steil als im Jahr 2015. Grund für die langsamere Abkühlung ist nicht die Umgebungstemperatur, die beim Schließen des Ofens in beiden Jahren im Wesentlichen gleich war, sondern möglicherweise der Besatz. Im Jahr 2016 wurde der Besatz aus Masseversatz mit Zuschlagstoffen hergestellt. Daher könnte hier, durch die veränderten Materialeigenschaften des verwendeten Tones, die Strahlungswärme im Abkühlungsprozess wesentlich langsamer abgegeben worden sein. Der Ofeninnendruck ist erst mit dem Beenden und Verschließen des Ofens wieder messbar. Die kleineren Emissionsspitzen in der Abkühlungsphase entstanden durch wiederholtes Aufflackern und Verbrennen von bis dahin unverbranntem Holz, das kurz vor Schließen des Ofens noch aufgelegt wurde.

GAS- UND OFENDRUCKMESSUNGEN WÄHREND DES IM JAHR 2018 ERFOLGTEN EXPERIMENTALBRANDES (IZF)

Der Einbau der Sonden und der Thermoelemente erfolgte über das Schauloch in der Ofenwandung vorne links. Die Einbautiefe betrug für die Gasentnahmesonde und das Thermoelement 0,78 m. Die Sonde zur Messung des Ofendrucks hatte eine Einbautiefe von 0,67 m. Alle Messfühler waren in den Ofenbesatz eingebaut. Bei diesem Brand wurde getestet, inwiefern sich die Ofenanlage zum Brennen von Großgefäßen eignet. Deshalb wurden zusätzliche Thermoelemente eingesetzt, die nicht in der Brennkurve von 2018

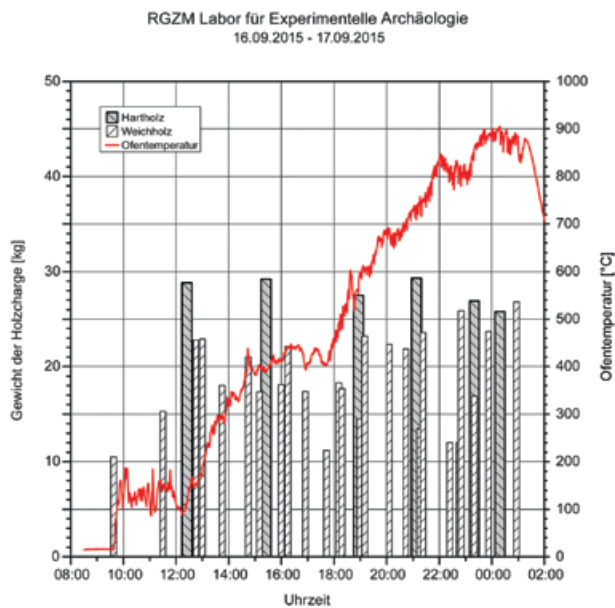


Abb. 10 Diagramm zum Verhältnis zwischen Holzverbrauch und Temperaturanstieg beim Experimentalbrand des Jahres 2015. – (Grafik G. Döhner/U. Katschmareck).

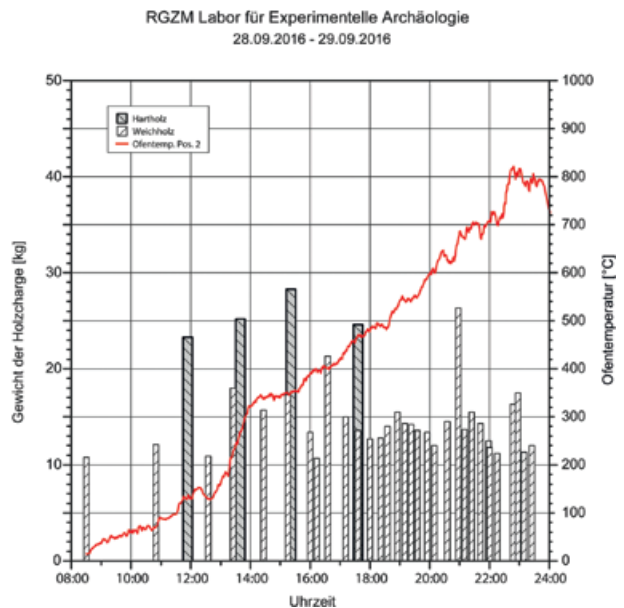


Abb. 11 Diagramm zum Verhältnis zwischen Holzverbrauch und Temperaturanstieg beim Experimentalbrand des Jahres 2016. – (Grafik G. Döhner/U. Katschmareck).

abgebildet wurden, da sie ausschließlich der Überwachung des Brennverlaufs dienten. Die zusätzlichen Thermolemente (Pos. 1 bis Pos. 6) befanden sich an folgenden Positionen: Position 1: Thermolement im Pithos (schwarze Kurve), Position 2: unter dem Pithos (violette Kurve), Position 3: ausgefallen (keine Messung erfolgt), Position 4: durchschnittliche Ofentemperatur in der Mitte des Brennraumes (rote Kurve), Position 5: Temperatur über dem Pithos (grüne Kurve), Position 6: Besatz oben Mitte (schwarze Kurve im mittleren Diagramm (Abb. 9, 2)). Alle anderen Temperaturkurven wurden im oberen Diagramm (Abb. 9, 1) dargestellt. Im Diagramm unten (Abb. 9, 3) sind neben der Umgebungstemperatur in °C (rote Kurve), die relative Luftfeuchte in %rF (blaue Kurve) und die Temperatur der Ofenwandung außen (schwarze Kurve) abgebildet. Der Brennverlauf zeigt eine flachere Temperaturkurve als bei den Experimentalbränden in den Jahren 2015 und 2016. Hier wurde bewusst der Temperaturanstieg gedrosselt, da die Großgefäße aufgrund ihrer deutlich stärkeren Wandung längere Zeit zum Entweichen des Anmachwassers und zum Aufheizen benötigen. Zwischen 18:00 Uhr und 19:00 Uhr sind wieder hohe CO-Emissionen zu beobachten, die durch Auflegen von Brennmaterial entstehen, nachdem die Temperatur zuvor abgesackt war. Ein deutlich stärkeres Absacken der Temperatur erfolgt gegen 22:00 Uhr. Das anschließende Hochheizen des Ofens gelingt diesmal mit deutlich weniger Reduktionsspitzen, bei gleichbleibend hohem Luftüberschuss. Allerdings führten der Luftüberschuss und die damit verbundene Kühlung wieder dazu, dass eine weitere Temperatursteigerung nur schwer möglich und insgesamt auch nicht sinnvoll war. Insgesamt ist der CO-Wert auch bei diesem Brand hoch und zeigt damit eine nicht optimale Verbrennung an. Die Experimentalbrände haben gezeigt, dass das Brennverhalten des Ofens konstruktionsbedingt nur geringfügig beeinflusst werden kann. Die zusätzlichen Thermolemente unter, im und über dem Pithos zeigen aber auch, dass die Besatzart sowie die unterschiedlichen Strahlungswärmeabgaben eine Rolle für den Brennverlauf spielen können. Die Temperatur im unmittelbaren Bereich des Pithos liegt über der durchschnittlichen Brenntemperatur, was auch auf die erhöhte Strahlungswärme durch die stärkere Wandung bedingt ist. Die Druckmessungen zeigen, dass der Ofen sich während der gesamte Brenn- und Abkühlungsdauer im Unterdruck befand.

VERHÄLTNIS ZWISCHEN HOLZVERBRAUCH UND TEMPERATURANSTIEG BEIM EXPERIMENTALBRAND DES JAHRES 2015

Das Diagramm (**Abb. 10**) zeigt das Verhältnis von zugeführter Brennstoffmenge in kg zur durchschnittlichen Temperatur in °C. Dabei sind das Verhältnis zwischen Hart- und Weichholz sowie der Zeitpunkt des Nachlegens dargestellt. Der Brennmaterialverbrauch wurde in Kilogramm ermittelt. Dazu wurden in der Vorbereitung des Brandes Mörtelwannen nach Holzarten getrennt befüllt und abgewogen. Der lineare Temperaturanstieg bis durchschnittlich 800 °C zeigt ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Energiezufuhr und Temperaturanstieg mit kleineren Temperaturverlusten aufgrund von Luftüberschuss und Reduktionen. Um die Temperatur nun weiter zu erhöhen, muss mehr Energie in Form von Brennmaterial zugeführt werden. Durch die Verbrennung wird das Brennmaterial in nutzbare Energie umgewandelt. Mit der zugeführten Energie muss der erreichte Temperaturlevel im Ofen gehalten und gleichzeitig muss so viel Energie zugeführt werden, dass es zu einer Temperatursteigerung kommt. Dadurch steigt die Zufuhr von Brennmaterial ab 800 °C deutlich an. Aufgrund des Konstruktionsprinzips von Schachtofen kann das zugeführte Brennmaterial nicht in die notwendige Menge nutzbarer Energie umgewandelt werden, um einen kontinuierlichen Temperaturanstieg zu erreichen. Der Grund dafür ist die unvollständige Verbrennung aufgrund des hohen Luftüberschusses im Wechsel mit Reduktionen, die beide zum Absinken (Kühlen) der Temperatur im Ofen führen und damit zum »Hängen« im Bereich des Temperaturlevels um 800 °C. Die Folge ist eine erschwerte Erhöhung der Brenntemperatur trotz des Nachlegens von Brennmaterial.

VERHÄLTNIS ZWISCHEN HOLZVERBRAUCH UND TEMPERATURANSTIEG BEIM EXPERIMENTALBRAND DES JAHRES 2016

Das Diagramm (**Abb. 11**) zeigt das Verhältnis von zugeführter Brennstoffmenge in kg zur durchschnittlichen Temperatur in °C. Die Temperaturkurve verläuft weniger steil als bei dem Experimentalbrand des Jahres 2015. Das Abfallen der Temperatur gegen 12:30 Uhr ist auf das nicht rechtzeitige Nachlegen von Brennmaterial zurückzuführen. Anschließend wurde etwas zu schnell aufgeheizt. Insgesamt zeigt die Kurve einen optimalen Verlauf im Verhältnis zwischen Temperaturanstieg und Brennstoffzufuhr für diese Art der Brennanlage. Zur Verbesserung des Verhältnisses zwischen zugeführter Energie und nutzbarer Energie wurde fein gespaltenes Holz in kleinen Mengen kontinuierlich zugeführt. Aber auch hier tritt bei durchschnittlich 800 °C, trotz geringerer Reduktionsspitzen, der Effekt des »Hängens« ein, da der hohe Luftüberschuss zu einer unvollständigen Verbrennung führt.

Anmerkung

- 1) Siehe Beitrag »Überlegungen zum wirtschaftsgeschichtlichen Potenzial der Experimentellen Keramikarchäologie. Entwurf eines Betriebsmodells für einen spätantiken Schachtofen des Mayener Töpfereireviere« in diesem Band.

Kommentierte Messdiagramme zur spätantiken Töpferofentechnologie. Zum Nutzen langfristig angelegter experimentalarchäologischer Evaluierungen historischer Produktionsanlagen

Die kommentierten Messdiagramme der Versuchsbrände in dem Nachbau eines Schachtofens des Mayener Töpferviertels »Siegfriedstraße«, der um 500 n. Chr. in Betrieb war, geben nicht nur Aufschluss über das Brennverhalten des Ofens. Sie zeigen ebenso deutlich, wie notwendig ein Set von Experimenten auch mit variierenden Fragestellungen ist. Dadurch werden Aufbau und Entwicklung des Wissensfundaments bei den Experimentatoren gewährleistet – auch dann, wenn es sich um erfahrene Handwerksspezialisten handelt. Darüber hinaus können die Reproduzierbarkeit bzw. die Streuweite von Ergebnissen überprüft sowie die Wirkungsmächtigkeit einzelner Variablen mit wechselnden Parametern näher bestimmt werden.

Annotated Measurement Diagrams on Late Antique Pottery Kiln Technology. On the Usefulness of Long-Term Experimental Archaeological Evaluations of Historical Production Facilities

The annotated measurement diagrams of the test firings in the replica of a shaft kiln from the Mayen pottery district »Siegfriedstraße«, which was in operation around 500 AD, not only provide information on the firing behaviour of the kiln. They show just as clearly how necessary a set of experiments is, even with varying questions. This ensures the building and development of a foundation of knowledge among the experimenters – even if they are experienced craft specialists. In addition, the reproducibility or the scattering range of results can be checked and the effectiveness of individual variables with changing parameters can be determined in more detail.

Diagrammes de mesure annotés sur la technologie des fours de poterie de l'Antiquité tardive. Sur l'utilité des évaluations archéologiques expérimentales à long terme des installations de production historiques

Les diagrammes de mesure annotés des cuissons d'essai dans la réplique d'un four à cuve du quartier de la poterie de Mayen »Siegfriedstraße«, qui était en service vers 500 après J.-C., ne fournissent pas seulement des informations sur le comportement de cuisson du four. Ils montrent tout aussi clairement à quel point une série d'expériences est nécessaire, même avec des questions différentes. Cela garantit la construction et le développement d'un socle de connaissances parmi les expérimentateurs – même s'ils sont des spécialistes expérimentés de l'artisanat. En outre, il est possible de vérifier la reproductibilité ou la dispersion des résultats et de déterminer plus en détail la puissance d'effet des variables individuelles avec des paramètres variables.

Schlüsselwörter / Keywords / Mots-clés

Spätantike / Frühmittelalter / Experimentelle Keramikarchäologie / Temperaturmessungen / Temperaturkurve / Gas- und Ofendruck / Schachtofen / Holzverbrauch / Holzbrand / Kohlenstoffmessungen

Late Antiquity / Early Middle Ages / experimental pottery archaeology / temperature measurements / temperature curve / gas and kiln pressure / shaft kiln / wood consumption / wood firing / carbon measurements

Antiquité tardive / Haut Moyen Âge / archéologie expérimentale de la poterie / mesures de température / courbe de température / pression du gaz et du four / four à cuve / consommation de bois / cuisson du bois / mesures de carbone