

Bestimmung der ursprünglichen Brenntemperatur archäologischer Funde aus gebranntem roten Ton mittels Dilatometrie

Fang Wang, Applications Laboratory Shanghai, und Doreen Rapp, Applications Laboratory Selb

Einleitung

Gebrannter roter Ton ist ein besonderes Relikt, das durch die Beschäftigung der Menschen im Altertum mit Feuer entstanden ist. Er fand sich häufig in Wohnstätten, Töpferöfen, Opfergruben und anderen Überresten vom Neolithikum bis in historische Epochen und dient als direkter materieller Beweis für die Erforschung der Feuertechnik, der Bautechniken und der Subsistenzstrategien der Menschen dieser Zeit [2].

Bestimmung der Brenntemperatur

Als wichtiger physikalisch-chemischer Indikator spiegelt die ursprüngliche Brenntemperatur nicht nur die Fähigkeit unserer Vorfahren zur Feuerbeherrschung und den Reifegrad der Brenntechnik wider, sondern liefert auch eine wichtige Grundlage für Rückschlüsse auf die gesellschaftliche Produktivität und die Muster der Ressourcennutzung.

Aufgrund ihrer einfachen Handhabung, der minimalen Probenbeschädigung, der hohen Messgenauigkeit und der guten Wiederholbarkeit hat sich die Dilatometrie (DIL) nach und nach zu einem der am häufigsten verwendeten Verfahren zur Bestimmung der Brenntemperatur von archäologischem gebranntem rotem Ton entwickelt. Gebrannter roter Ton durchlief während des antiken Brennvorgangs verschiedene Phasen: Dehydratation (Abgabe von physikalisch gebundenem Wasser), Dehydroxylierung (Abspaltung von OH-Gruppen aus der Kristallstruktur, Strukturwasser), Phasenumwandlung und anfängliche Sinterung, und bildete dabei eine stabile Mikrostruktur aus. Daher zeigt die Probe beim erneuten Aufheizen, solange die Temperatur unter der ursprünglichen Brenntemperatur liegt, lediglich eine reversible thermische Ausdehnung. Sobald die Temperatur die ursprüngliche Brenntemperatur jedoch überschreitet, werden die verbleibenden amorphen Phasen und ungesinterten Mikrobereiche im Inneren der Probe

weiter verdichtet was zu einer Schrumpfung und einer niedrigeren thermischen Ausdehnung führt [3]. Diese Methode findet in der Forschung zur Temperaturbestimmung archäologischer Fundstücke breite Anwendung.

Der in dieser Studie verwendete Probenkörper besteht aus frischem, unverwittertem, gebranntem roten Ton einer bestimmten archäologischen Fundstätte, präpariert als Quader mit regelmäßigem Querschnitt und einer Länge von etwa 25 mm. Die Untersuchungen wurden mit einem NETZSCH-Dilatometer DIL 402 *Expedis*® *Classic* durchgeführt.



1 Probenkörper aus rotem gebranntem Ton im Quarzglas-Probenhalter

Die Messbedingungen sind in Tabelle 1 gelistet. Insgesamt wurden fünf Aufheizungen durchgeführt, zwei mit einer Endtemperatur von 400 °C und drei mit einer Endtemperatur von 500 °C. Nach jedem Test wurde die Probe im Ofen auf Raumtemperatur abgekühlt, um einen einheitlichen Ausgangszustand für jede nachfolgende Aufheizung zu gewährleisten.

Tabelle 1 Messbedingungen

Gerät	DIL 402 <i>Expedis</i> ® <i>Classic</i>
Probindimensionen	Quaderförmig, ca. 10 x 10 x 25 mm
Heizrate	5 K/min
Statische Kraft	100 mN
Probenhalter	Quarzglas
Temperaturbereich	RT - 400 °C, RT - 500 °C
Atmosphäre	Stickstoff (inerte Atmosphäre)

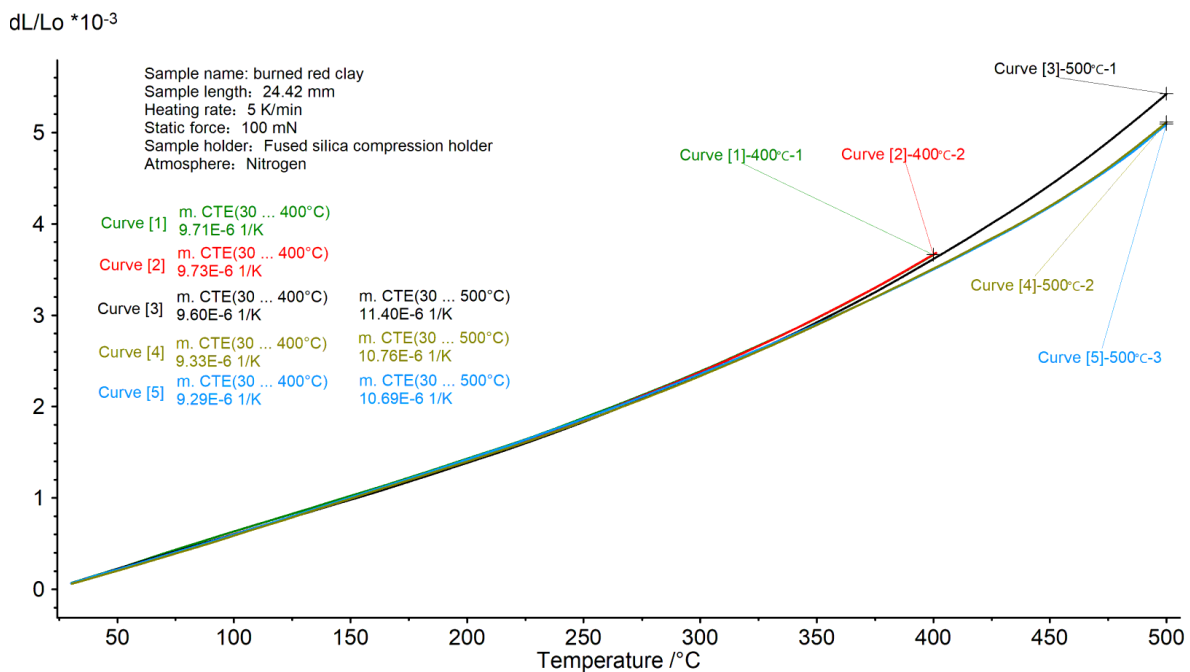
APPLICATIONNOTE Bestimmung der ursprünglichen Brenntemperatur archäologischer Funde aus gebranntem roten Ton mittels Dilatometrie

Ergebnisse und Diskussion

Wie bereits in der Literatur [3] und im vorangegangenen Text beschrieben, erfahren die Tonminerale im gebrannten roten Ton (z. B. Illit und Montmorillonit) während des ursprünglichen Brennvorgangs bei charakteristischen Temperaturen Prozesse der Dehydratation und Dehydroxylierung sowie eine strukturelle Umordnung. Infolgedessen bildet sich eine metastabile Mikrostruktur aus. Liegt die Temperatur beim erneuten Brennen unterhalb der ursprünglichen Brenntemperatur, finden innerhalb der Probe keine neuen Phasenumwandlungen statt. In diesem Fall überlappen sich die zugehörigen Ausdehnungskurven zweier aufeinanderfolgender Aufheizungen. Wird die ursprüngliche Brenntemperatur beim erneuten Brennen überschritten, treten während der ersten Aufheizung zusätzliche irreversible Reaktionen auf (z. B. Entfernung von restlichem Strukturwasser, Heilung von Gitterfehlern), was zu einem erhöhten Verdichtungsgrad führt. Infolgedessen zeigt die Probe bei der zweiten Aufheizung ein reduziertes thermisches Ausdehnungsverhalten. Dies spiegelt sich makroskopisch in einer verringerten Steigung und einer allgemeinen Verschiebung der dL/L_0 -Kurve nach unten wider. Auf dieser Grundlage lässt sich der Bereich der ursprünglichen Brenntemperatur bestimmen.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, lässt sich Folgendes beobachten:

- Im Bereich von Raumtemperatur bis 400 °C überlappen sich die erste (Curve [1], grün) und die zweite Kurve (Curve [2], rot) des Wiederaufheizungszyklus fast vollständig. Sie weisen im linearen Bereich nahezu identische Steigungen (Wärmeausdehnungskoeffizienten) auf und zeigen keine offensichtliche Abweichung oder Verschiebung nach unten.
- Im Bereich von Raumtemperatur bis 500 °C stimmt der Verlauf der dritten Kurve des Wiederaufheizungszyklus (Curve [3], schwarz) unterhalb von 400 °C mit den Kurven [1] und [2] überein. Die vierte Kurve (Curve [4], oliv) zeigt während des Aufheizens jedoch eine deutliche Änderung. Sie ist nach unten verschoben und weist eine deutlich geringere Steigung als die vorherigen drei Kurven auf. Zur Verifizierung des Ergebnisses wurde eine fünfte Aufheizung (Curve [5], hellblau) bis 500 °C durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass Kurve [5] fast vollständig mit Kurve [4] überlappt. Dies bestätigt, dass sich die Probe nach dem Erhitzen auf 500 °C stabilisiert.



2 Messergebnisse der gebrannten roten Tonprobe

APPLICATIONNOTE Bestimmung der ursprünglichen Brenntemperatur archäologischer Funde aus gebranntem roten Ton mittels Dilatometrie

Tabelle 2 mCTE der einzelnen Aufheizungen

Temperaturbereich	Curve [1]	Curve [2]	Curve [3]	Curve [4]	Curve [5]
RT - 400 °C	$9,71 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$9,73 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$9,60 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$9,33 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$9,29 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
RT - 500 °C	-	-	$11,40 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10,76 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$10,69 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$

Die mittleren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten (mCTE) der einzelnen Kurven des Wiederaufheizungszyklus sind in Tabelle 2 aufgeführt. Aus den Testergebnissen lässt sich ableiten, dass die ursprüngliche Brenntemperatur der Probe zwischen 400 °C und 500 °C lag.

Fazit

Die Anwendung der Dilatometrie (DIL) zur Analyse der Brenntemperaturen von gebranntem Ton basiert auf der Irreversibilität des thermischen Verhaltens von Tonmineralien. Durch die Ermittlung der Steigungsänderung der Ausdehnungskurve beim erneuten Brennen lässt sich der ursprüngliche Brenntemperaturbereich von archäologischem, gebranntem rotem Ton genau bestimmen. Aufgrund ihrer benutzerfreundlichen Anwendung, der eindeutigen Bewertungsmaßstäbe, der hohen Messgenauigkeit und der minimalen Probenbeschädigung eignet sich diese Methode besonders für die Analyse wertvoller archäologischer Funde. Sie hat sich als zuverlässige Technik zur Ermittlung der maximalen Aufheiztemperatur gebrannter Artefakte auf Tonbasis etabliert.

Referenzen

- [1] Li X, Wu Y J, Mao L J, et al. Study on the firing temperature of burned clay samples from Sujiacun Site. *Sciences of Conservation and Archaeology*, 2022, 34(1): 63-70. <https://doi.org/10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20200901886>
- [2] Wu Q, Xiang F, Guo Y, et al. Determination of burning environment and temperature by colour and magnetic susceptibility based on heating simulation experiments and its application in Sanxingdui site in Sichuan, China. *Journal of Archaeological Science*, 2025, 183: 106399. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2025.106399>
- [3] Zhou L K, Wang T, Li J, et al. Study on firing temperature of early pottery from Nanzhuangtou site. *Rock and Mineral Analysis*, 2010, 29(2): 1-5. <https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-5357.2010.02.013>