

VII. Geochemische und mineralogische Untersuchungen römischer Keramiken aus Haltern und Anreppen

(Taf. 116 – 120)

Cornelia Schmitt-Riegraf

Zur Beschreibung des Materials und der Herstellungstechnik der in Haltern und Anreppen geborgenen Proben römischer Keramiken und zweier Töpfertone wurden folgende naturwissenschaftliche Methoden herangezogen, die bei MOMMSEN⁷⁶⁸ und SCHNEIDER⁷⁶⁹ großenteils ausführlich beschrieben sind:

1. Quantitative chemische Analyse zur Herkunftsbestimmung
2. Dünnschliffanalyse zur Identifikation der Magerungsbestandteile, zur Bestimmung der Korngrößen, Volumenverhältnisse und allgemeinen Gefügeansprache
3. Röntgenographische Phasenanalyse zur Identifikation der in der feinstkörnigen, gesinterten Matrix vorliegenden Mineralphasen
4. Differentialgravimetrische und differentialthermoanalytische Untersuchungen (25-1300°C) an zwei Töpfertonen zur Charakterisierung des Sintervorgangs
5. Temperversuche im oxidierenden Milieu (600, 700, 800, 900, 1000, 1100, 1300°C) an zwei Töpfertonen zur Abklärung der Brennbedingungen bei der Keramikherstellung

Quantitative chemische Analyse – Hauptelement-Analytik

Die Ton- und Keramikproben wurden mittels Röntgenfluoreszenzanalyse auf ihre Hauptelementzusammensetzung (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂, P₂O₅) sowie gravimetrisch auf ihren Glühverlust und calcimetrisch auf ihren CO₂-Gehalt hin untersucht. Da die Glühverluste wenig aussagekräftig und die P₂O₅-Gehalte in den Scherben sekundär verändert sind, wurden sämtliche Analysen zur besseren Vergleichbarkeit ohne Berücksichtigung des Glühverlustes und des Phosphorgehaltes auf 100 Prozent umgerechnet (Tab. 1a,b). Die absoluten P₂O₅-Gehalte sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Probenpräparation: Schmelztabletten aus Lithiumtetraborat (6 g) + Probenpulver (1g)

Gerätetyp: Siemens SRS 200 (wellenlängendispersives Sequenz-Röntgenfluoreszenz-Spektrometer)

Anregung: Rhodium-Anode, 50 KV, 40 mA für alle Elemente (K_α-Linien)

Standards: 54 internationale Gesteinsstandards

Probe-Nr.	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %
12	77,62	15,84	1,79	0,01	0,71	0,41	0,35	1,84	1,43
28	72,84	19,67	2,27	0,01	1,08	0,31	0,44	1,87	1,50
HAL 289	77,42	17,95	1,48	0,00	0,44	0,00	n. d.	1,33	1,38
39	83,75	8,50	3,06	0,07	0,84	0,27	1,15	1,68	0,68
40	87,93	6,38	1,83	0,05	0,31	0,73	1,08	1,27	0,42

Tabelle 1a Hauptelementanalysen der mutmaßlichen Töpfertone Probe-Nr. 12 und 28 im Vergleich mit der Tonprobe HAL 289 aus LAS-FARGUES & PICON 1982, 183, Tab. 9⁷⁷⁰ und den beiden Tonen Probe-Nr. 39 und 40 aus einer ehemaligen Ziegeleigrube bei Haltern.

768 H. MOMMSEN, Archäometrie. Neuere naturwissenschaftliche Methoden und Erfolge in der Archäologie (Stuttgart 1986).

769 G. SCHNEIDER, Naturwissenschaftliche Kriterien und Verfahren zur Beschreibung von Keramik. Acta Praehist. et Arch. 21, 1989, 7-39.

770 Vgl. dazu auch S. VON SCHNURBEIN, Germania 64,1, 1986, 50 Abb. 2.

Probe-Nr.	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO %	MgO %	CaO %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %
1	74,38	11,45	5,25	0,05	1,07	4,33	0,91	1,85	0,71
2	77,75	11,44	5,87	0,10	1,08	0,92	0,79	1,35	0,69
3	76,49	12,07	6,30	0,17	1,04	1,07	0,76	1,40	0,69
4	77,88	13,10	4,96	0,01	0,66	0,77	0,63	1,22	0,75
5	80,29	10,65	5,24	0,06	0,77	0,73	0,71	0,98	0,57
6	77,10	12,49	5,58	0,03	0,83	0,73	0,62	1,82	0,81
8	76,16	12,06	6,51	0,16	1,00	1,08	0,83	1,31	0,87
9	79,04	13,52	2,83	0,01	0,87	0,79	0,81	1,22	0,90
10	79,27	13,45	2,74	0,01	0,82	0,71	0,89	1,20	0,91
11	74,72	17,27	2,88	0,01	1,15	0,62	0,48	1,79	1,07
13	74,41	12,40	5,59	0,03	0,93	3,63	0,54	1,67	0,80
14	72,22	15,48	5,36	0,05	1,65	1,26	0,95	2,21	0,80
15	76,40	14,12	4,56	0,02	1,13	0,83	0,87	1,31	0,76
16	71,62	20,06	2,36	0,01	1,24	0,52	0,34	2,56	1,28
17	78,51	13,69	3,52	0,02	0,95	0,94	0,74	0,95	0,68
26	78,55	15,70	1,51	0,01	0,72	0,37	0,36	1,26	1,50
27	67,98	18,14	6,44	0,05	1,76	1,09	0,91	2,77	0,86
27a	70,18	17,85	6,33	0,02	1,13	0,42	0,62	2,42	1,03
29	71,91	19,78	2,90	0,01	1,19	0,53	0,43	1,90	1,33
30	78,92	15,20	1,95	0,01	0,41	0,44	0,33	1,26	1,48
30a	79,30	14,48	1,41	0,01	0,36	0,87	0,66	1,31	1,60
30b	65,92	20,81	5,99	0,02	1,75	0,75	0,79	3,08	0,91
31	71,85	19,81	2,67	0,01	1,19	0,60	0,54	2,03	1,31
32	77,02	12,56	6,29	0,08	0,73	0,46	0,65	1,48	0,72
33	73,28	14,86	7,13	0,03	1,24	1,02	0,43	1,26	0,75
34	74,22	13,87	7,49	0,04	0,98	1,07	0,50	1,14	0,69
35	78,53	13,62	3,63	0,02	0,88	0,78	0,88	0,94	0,71
36	78,49	13,16	3,55	0,02	0,89	0,92	0,89	1,22	0,85
37	76,84	15,16	3,03	0,01	0,80	0,71	0,94	1,56	0,95
38	68,78	17,72	5,61	0,04	1,99	2,19	1,09	1,80	0,79

Tabelle 1b Hauptelementanalysen römischer Keramiken aus Haltern und Anreppen.

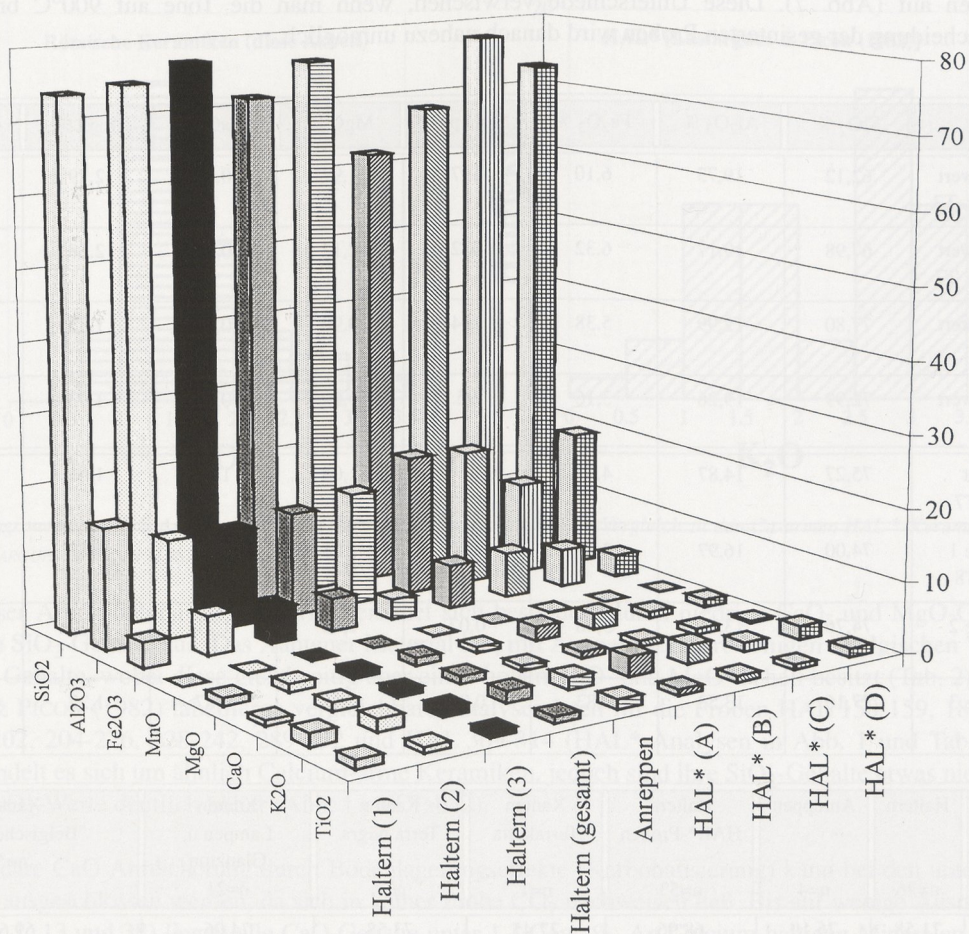


Abb. 1 Vergleich der Mittelwerte der Halterner und Anreppener Keramiken mit den Ca-armen HAL*-Proben.⁷⁷¹

Diskussion der chemischen Analysen

Die chemische Zusammensetzung ist nach LASFARGUES & PICON,⁷⁷² MOMMSEN,⁷⁷³ NOLL⁷⁷⁴ SOWIE LIESEN⁷⁷⁵ u. v. a. ein geeignetes Mittel zur Herkunftsbestimmung von antiken Keramiken. Ein Vergleich mit Referenzanalysen von Keramiken bekannter Herkunft ermöglicht häufig eine vorläufige Zuordnung. Diese sollte jedoch sinnvollerweise durch weitere Verfahren der Petrographie (vor allem Dünnschliffmikroskopie) und röntgenographischen Phasenanalyse (Pulverdiffraktometrie) untermauert werden.

Die beiden Töpfertone (Probe-Nr. 12 und 28) zeigen eine sehr ähnliche chemische Zusammensetzung (Tab. 1a). Diese ist auch derjenigen der Tonprobe HAL 289⁷⁷⁶ sehr ähnlich. Zieht man die röntgendiffraktometrischen Tonmineraluntersuchungen mit hinzu, so fallen deutliche Unterschiede in den auftretenden Tonminer-

771 Auflistung s. S. 290 ff.

772 LASFARGUES u. PICON in: VON SCHNURBEIN, Sigillata 6 ff.

773 H. MOMMSEN, Archäometrie.

774 W. NOLL, Alte Keramiken und Pigmente. Studien zu Material und Technologie (Stuttgart 1991).

775 B. LIESEN, Töpfereischutt des 1. Jahrhunderts n. Chr. aus dem Bereich der Colonia Ulpia Traiana. Xantener Ber. 4 (1994) 128 ff.

776 LASFARGUES & PICON, 1982.

aphasen auf (Abb. 7). Diese Unterschiede verwischen, wenn man die Tone auf 900°C brennt. Eine Unterscheidung der gesinterten Proben wird danach nahezu unmöglich.

	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MnO ppm	MgO %	CaO %	K ₂ O %	TiO ₂ %
Mittelwert A T6 u. T7	62,12	19,73	6,10	197	1,97	0,92	2,79	0,87
Mittelwert B T5 u. T7	67,98	19,17	6,32	632	2,12	0,79	2,68	0,88
Mittelwert C T6	77,80	12,99	5,38	284	0,90	0,88	1,32	0,70
Mittelwert D T7	72,99	19,26	3,16	95	1,09	0,33	1,93	1,22
Gesamt T8 u. T7	75,27	14,87	4,52	0,04 %	1,04	1,04	1,61	0,93
Gruppe 1 T7 u. T8	74,00	16,97	3,57	0,02	1,08	0,76	1,83	1,17
Gruppe 2 T8	74,76	13,76	5,48	0,07	1,12	1,21	1,72	0,79
Gruppe 3 T8	77,16	13,53	4,83	0,02	0,91	0,87	1,22	0,77

	Haltern n=26	Anreppen n=4	Haltern HAL*-Proben n=53	Xanten Terrakotta n=1	Xanten Terra Nigra n=7	Xanten Lampen u. Glanztön n=21	Xanten "Belgische Ware" n=5
SiO ₂ %	71,58	76,19	68,96	77,45	73,58	74,06	69,64
Al ₂ O ₃ %	14,59	15,88	18,14	16,59	19,03	18,86	16,17
Fe ₂ O ₃ %	4,78	2,83	5,19	1,50	1,80	1,98	6,55
MnO %	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,23
MgO %	1,08	0,81	1,51	0,72	0,77	0,90	1,65
CaO %	1,09	0,69	0,73	0,34	0,74	0,46	0,77
K ₂ O %	1,60	1,65	2,24	1,84	2,09	2,20	3,22
TiO ₂ %	0,86	1,36	0,93	1,27	1,31	1,29	0,82

Tabelle 2 Vergleich der neuen Mittelwerte der römischen Keramiken mit den Ca-armen HAL*-Proben nach LASFARGUES & PICON (1982) und einigen Referenzgruppen aus Xanten nach LIESEN (1994).

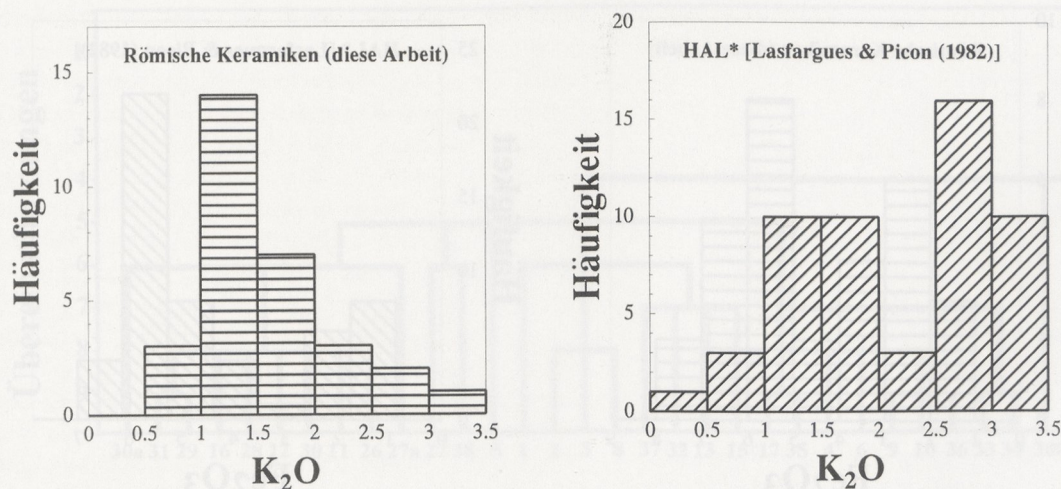


Abb. 2 Histogramme der K₂O-Anteile der untersuchten römischen Keramiken im Vergleich zu den Ca-armen HAL*-Keramiken von LASFARGUES & PICON (1982) aus Haltern.

Das in dieser Arbeit untersuchte Material zeichnet sich besonders durch niedrige CaO- und MgO-Gehalte sowie hohe SiO₂-Gehalte aus. Das Xantener Material hat, mit Ausnahme der rottonigen "Belgischen Ware", hohe TiO₂-Gehalte, wobei diese gleichzeitig aber einen hohen K₂O- und MgO-Gehalt besitzt (Tab. 2). LASFARGUES & PICON (1982) tabellieren vergleichbare Analysendaten für die Proben HAL 158-159, 189-190, 193, 199-202, 204-226, 228-242, 289-292 und HAL 309-314 (HAL*-Analysen in Abb. 1 und Tab. 2).⁷⁷⁷ Hierbei handelt es sich um ähnlich Calcium-arme Keramiken, jedoch sind ihre SiO₂-Gehalte etwas niedriger und die Al₂O₃-Werte deutlich höher (Abb. 1 und Tab. 2).

Eine sekundäre CaO-Anreicherung durch Bodenlagerungseffekte (Karbonatisierung) kann bei den untersuchten Proben ausgeschlossen werden, da sich in keiner Probe CO₂ nachweisen ließ. Bis auf wenige Ausnahmen (Proben-Nr. 1, 13 und 38) liegen alle CaO-Gehalte unter 1,3 Gew.-%. An Calcium-haltigen Mineralen finden sich in den meisten Proben etwas Plagioklas, selten Hornblende, Pyroxen und Apatit (Tab. 5).

Die zumeist relativ niedrigen K₂O- und Na₂O-Gehalte (Tab. 1a-b) könnten durch Auslaugungseffekte beeinflusst sein. Eine sichere Herkunftsbestimmung, wie sie für die Ca-reichen Scherben von LASFARGUES & PICON (1982) durch die Einführung von Referenzgruppen mittels der K₂O-Werte vorgeschlagen wurde, scheint nur bedingt möglich. Die K₂O-Werte der Keramiken (Abb. 2) streuen zwischen 0 und 3,5 Gew.-%. Die römischen Keramiken besitzen ein Maximum zwischen 1,0-1,5 % (Abb. 2, links), dagegen zeigen die Ca-armen HAL*-Proben von LASFARGUES & PICON (1982) eine bimodale Verteilung (Abb. 2, rechts) mit einem Maximum bei 1-2 % und einem zweiten bei 2,5-3,0 %.

Die Überlagerung der mehr oder weniger durchlässigen Keramiken durch die Eisen- und Mangan-schüssigen Halterner Sande dürfte zu einer sekundären Fe- und/oder Mn-Anreicherung geführt haben. Dies deutet sich insbesondere bei den Proben-Nr. 2, 3, 8 und 32 an, da hier merklich erhöhte MnO-Konzentrationen gegenüber allen anderen Proben zu erkennen sind.

Die römischen Keramiken zeigen wiederum eine bimodale Verteilung, deren erstes Maximum zwischen 2 und 3 Gew.-% und deren zweites Maximum zwischen 5 und 6 Gew.-% liegt (Abb. 3, links). Eine ähnlich bimodale Verteilung ist auch bei den von LASFARGUES & PICON (1982) untersuchten Ca-armen HAL*-Keramiken sichtbar (Abb. 3, rechts).

777 Vgl. unten Liste 2 auf S. 290 ff.

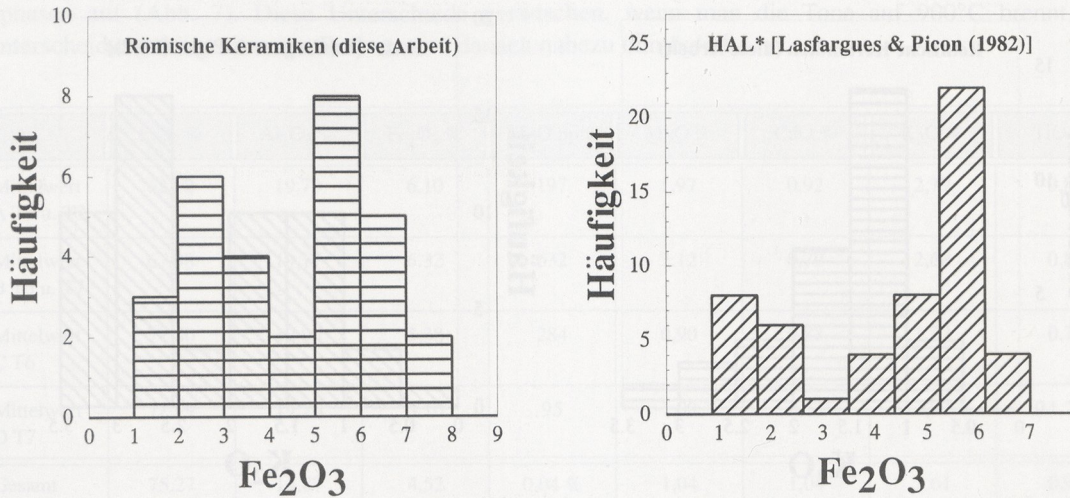


Abb. 3 Histogramme der Fe₂O₃-Anteile der untersuchten römischen Keramiken im Vergleich zu den Ca-armen HAL*-Keramiken von LASFARGUES & PICON (1982) aus Haltern.

Probe	P ₂ O ₅	Probe	P ₂ O ₅	Probe	P ₂ O ₅	Probe	P ₂ O ₅
1	0,62	11	0,12	27a	0,68		
2	0,16	12	0,06	28	0,15	34	1,08
3	0,17	13	2,72	29	0,17	35	0,10
4	0,27	14	0,19	30	1,66	36	0,11
5	0,12	15	0,12	30a	3,53	37	0,18
6	1,06	16	0,10	30b	0,89	38	6,21
8	0,19	17	0,05	31	0,99	39	0,10
9	0,10	26	0,32	32	0,25	40	0,07
10	0,11	27	0,29	33	0,07		

Tabelle 3 Absolute Phosphorgehalte der untersuchten römischen Keramikproben [in Gew.-%].

Vergleicht man die Fe₂O₃-Gehalte der Keramiken mit den möglichen Töpfertonen, so entspricht ein Teil der Proben (erstes Maximum der Histogramme) diesen Tonen. Das zweite Maximum in den Histogrammen läßt drei mögliche Deutungen zu: 1. sekundäre Fe-Imprägnation, 2. ortsfremder Ton als Ausgangsmaterial und 3. eine bewußte Zugabe von "Eisen" in den Töpferton als Flußmittel zur Verbesserung der Brennbedingungen.

Die sekundär erhöhten P₂O₅-Gehalte (*kursiv gehaltene Werte* in Tab. 3) erreichen in den Scherben bis zu 6,2 Gew.-%.⁷⁷⁸ Ein Teil der römischen Proben weist erhöhte P₂O₅-Gehalte auf (insbesondere die Proben 13, 30a und 38). Werte um 0,1 bis 0,3 Gew.-% sind normalerweise zu erwarten.

778 A. BORCHARDT-OTT führt diese Erhöhung des Phosphatanteiles auf die im Probenbereich des Ofens 10 begrabenen Leichen zurück, deren Knochenmaterial aus Calciumhydroxylapatit [Ca₅(PO₄)₃OH] besteht und sich im Laufe der Zeit umgewandelt hat. – LIESEN, Töpfereischutt 131 mit Anm. 522 macht geltend, daß auch der zum Mauken verwendete Pferdeurin den Phosphorgehalt gesteigert haben könnte.

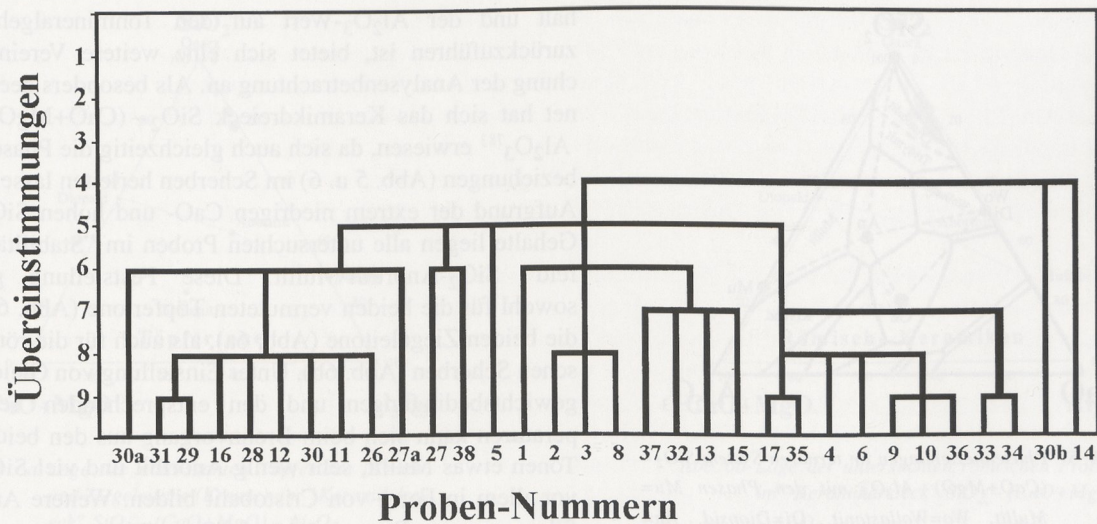


Abb. 4 Clusteranalyse der untersuchten römischen Keramiken sowie der beiden Töpfertone (Probe-Nr. 12 und 28). Verglichen wurde die relative Übereinstimmung der neun Elementoxide SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O und TiO_2 (Ordinate).

Die Clusteranalyse

Zur Charakterisierung des "chemischen Verwandtschaftsgrades" der untersuchten Keramiken untereinander und im Vergleich zu den mit P. FLOS gestempelten Sigillaten (Probe-Nr. 30 und 30a) wurden die geochemischen Analysen (Tab. 1a-b) zur Clusteranalyse herangezogen. Diese erfolgte in Anlehnung an die Arbeiten von LASFARGUES & PICON⁷⁷⁹, HEINER⁷⁸⁰ UND TÓTH & ENGI.⁷⁸¹ Die Ergebnisse der Clusteranalyse wurden in ein Dendrogramm (Abb. 4) eingezeichnet.⁷⁸²

Im Dendrogramm (Abb. 4) fallen mehrere Untergruppen innerhalb der römischen Keramiken auf:

1. Eine erste Untergruppe wird von den beiden Töpfertonen Probe-Nr. 12 und 28 sowie den chemisch sehr ähnlichen Keramiken Probe-Nr. 11, 16, 26, 27a, 29, 31 und den mit P. FLOS gestempelten Sigillaten Probe-Nr. 30 und 30a gebildet.
2. Einer zweiten Untergruppe gehören die Probe-Nr. 1, 2, 3, 8, 13, 15, 32 und 37 an.
3. Eine dritte Untergruppe setzt sich aus den Probe-Nr. 4, 6, 9, 10, 17, 33, 34, 35 und 36 zusammen.
4. Die noch fehlenden Proben bilden keine eigene Untergruppe im engeren Sinne. Während die Probe-Nr. 14 und 30b die größte Übereinstimmung mit der zweiten Untergruppe besitzen, tendieren die Probe-Nr. 5, 27 und 38 gleichermaßen zur ersten wie zur dritten Untergruppe.

Das "Keramikdreieck" $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$

Aus dem in Tabelle 2 vorgenommenen Vergleich der untersuchten Keramiken mit verschiedenen Referenzgruppen geht hervor, daß sich die römischen Keramiken hauptsächlich durch ihren CaO-, SiO_2 - und Al_2O_3 -Gehalt unterscheiden. Da der CaO-Wert hauptsächlich auf den Kalkgehalt, der SiO_2 -Wert auf den Quarzge-

779 LASFARGUES & PICON (1982)

780 R. HEINER, Eine Merkmalanalyse von Siedlungskeramik mit Hilfe faktoren- und clusteranalytischer Verfahren. Acta Praehist. et Arch., 21, 1989, 41-51.

781 T.M. TÓTH und M. ENGI, A new cluster analysis method for altered rock samples. Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 77, 1997, 439-447.

782 Die Software zur Clusteranalyse programmierte dankenswerterweise Herr Dr. D. Stöckelmann, Münster.

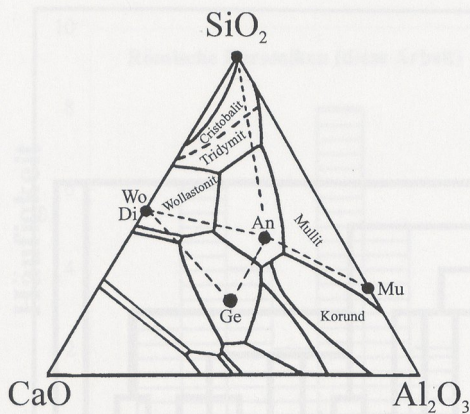


Abb. 5 Phasenbeziehungen im ternären System $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$ mit den Phasen $\text{Mu} = \text{Mullit}$, $\text{Wo} = \text{Wollastonit}$, $\text{Di} = \text{Diopsid}$, $\text{An} = \text{Anorthit}$, $\text{Ge} = \text{Gehlenit}$ sowie Tridymit , Cristobalit , Korund und nicht weiter eingetragenen Calcium-Silikaten und Calcium-Aluminaten (modifiziert nach HEIMANN, 1989).

halt und der Al_2O_3 -Wert auf den Tonmineralgehalt zurückzuführen ist, bietet sich eine weitere Vereinfachung der Analysenbetrachtung an. Als besonders geeignet hat sich das Keramickreieck $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$ ⁷⁸³ erwiesen, da sich auch gleichzeitig die Phasenbeziehungen (Abb. 5 u. 6) im Scherben herleiten lassen. Aufgrund der extrem niedrigen CaO- und hohen SiO_2 -Gehalte liegen alle untersuchten Proben im "Stabilitätsfeld" SiO_2 -Anorthit-Mullit. Diese Feststellung gilt sowohl für die beiden vermuteten Töpfertone (Abb. 6a), die beiden Ziegeleitone (Abb. 6a), als auch für die römischen Scherben (Abb. 6b). Unter Einstellung von Gleichgewichtsbedingungen und den entsprechenden Temperaturen kann sich beim Brennvorgang aus den beiden Tonen etwas Mullit, sehr wenig Anorthit und viel SiO_2 , vor allem in Form von Cristobalit bilden. Weitere Ausführungen zum Brennvorgang folgen später.

Mineralogische Phasenanalyse

Zur Identifizierung und Korngrößenbestimmung der Magerungsbestandteile wurden Dünnschliff-Untersuchungen am Polarisationsmikroskop durchgeführt (Taf. 116-120).⁷⁸⁴

Da die Ton- bzw. Scherbenmatrix mittels polarisationsmikroskopischer Methoden nicht mehr auflösbar ist, schließen sich röntgendiffraktometrische Untersuchungen (Tab. 6 u. Abb. 12) an ausgewählten Proben an. Von Probe-Nr. 7 (Bohrprobe Kalkriese) lag nur wenig Pulver zur röntgenographischen Phasenanalyse vor (Abb. 8). Eine chemische Analyse und mikroskopische Beschreibung fehlen deshalb.

Polarisationsmikroskopische Beobachtungen

Unter dem Polarisationsmikroskop (u. d. M.) wurden an den ca. 25 μm dicken Keramik-Dünnschliffen ein Großteil der auftretenden Mineralphasen identifiziert (Tab. 4), ihre Korngrößen gemessen (Tab. 5) und eine Gefügeansprache einschließlich ihrer volumenspezifischen Verteilung durchgeführt. Das u. d. M. nicht mehr auflösbare Feinstkorn, insbesondere die Tonminerale sowie Neubildungen wie Mullit und Cristobalit, wurde röntgenographisch nachgewiesen (Abb. 7-11).

783 NOLL, 1982, 1991 und R.B. HEIMANN, Assessing the technology of ancient pottery: The use of ceramic phase diagrams. *Archeomaterials*, 3, 1989, 123-148.

784 Eine ausführliche Beschreibung dieser Methode in der Sintertechnik, insbesondere der keramischen Produkte ist bei H. FREUND, *Handbuch der Mikroskopie in der Technik IV: Mikroskopie der Silikate. Teil 3: Mikroskopie in der Sintertechnik, insbesondere der keramischen und pulvermetallurgischen Produkte* (Frankfurt/Main 1965) nachzulesen.

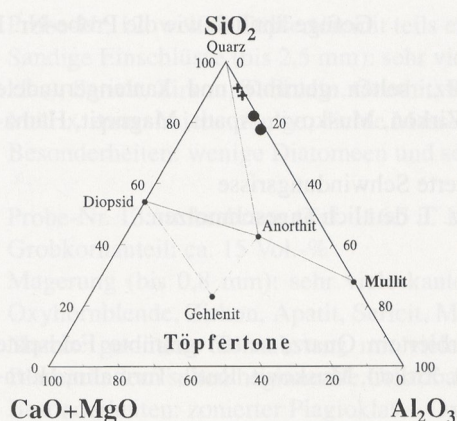


Abb. 6a Lage der untersuchten Töpferterone (Kreise) und Ziegeleitone (Kreuze) im "Keramikdreieck" $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$.

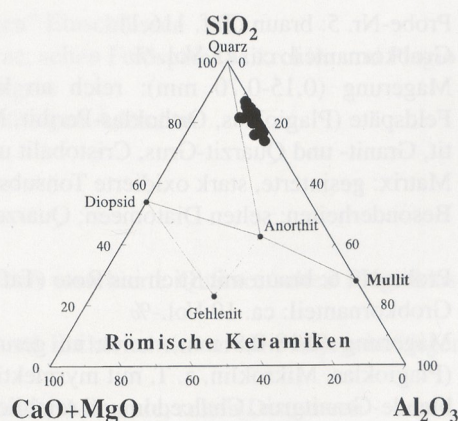


Abb. 6b Lage der untersuchten römischen Proben im "Keramikdreieck" $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Probe-Nr. 1: graubraun

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (0,16-0,64 mm): reich an kantengerundetem, teilweise randlich resorbiertem Quarz; selten getrübbte und kantengerundete Feldspäte (Plagioklas, Orthoklas-Perthit, Mikroklin); vereinzelt Zirkon, Muskovit, Apatit, "Holz", Magnetit, Hämatit, Granit- und Quarzit-Grus

Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit vielen kleinen, eckigen Quarz-Kristalliten; wenige, längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: selten Diatomeen, selten Quarz mit Rutil-Einschlüssen (Sagenitgitterung)

Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 2, 3, 4, 5

Probe-Nr. 2: grauschwarz

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (0,1-1,0 mm): reich an kantengerundetem Quarz; selten kantengerundeter Feldspat (Plagioklas, verwitterter Orthoklas); kugelige Erzaggregate, Turmalin, Zirkon, Hämatit

Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit vielen kleinen, eckigen Quarz-Kristalliten; viele längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: selten Diatomeen

Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 1, 3, 4, 5

Probe-Nr. 3: rotbraun

Grobkornanteil: ca. 25 Vol.-%

Magerung (0,1-4,0 mm): öfters rundliche, sphärolithische Erzeinschlüsse (bis 4 mm), viel Quarz (bis 0,1 mm), wenig Quarzit- und Granitgrus, Mikroklin, Zirkon, Chalcedon, selten Plagioklas und braune Hornblende

Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz; sehr viele längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: zonierter Plagioklas + braune Hornblende \Rightarrow vulkanische Minerale; selten Diatomeen; Quarze und Plagioklase sind z. T. deutlich angeschmolzen; äußerer Rand stärker oxidiert als der Kernbereich

Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 1, 2, 4, 5

Probe-Nr. 4: rot

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (bis 0,68 mm): viel Quarz (gerundet), wenig sericitisierter Plagioklas, Orthoklas, Zirkon, Epidot, braune Hornblende, Rutil, Turmalin, Hämatit, Granit- und Quarzitgrus

Matrix: gesinterte, extrem oxidierte Tonsubstanz, keine Schwindungsrisse

Besonderheiten: selten Diatomeen

Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 1, 2, 3, 5

Probe-Nr. 5: braun (Taf. 116,1) Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 1
 Grobkornanteil: ca. 25 Vol.-%
 Magerung (0,15-0,70 mm): reich an kantengerundetem Quarz; selten getrübe und kantengerundete Feldspäte (Plagioklas, Orthoklas-Perthit, Mikroklin); vereinzelt Zirkon, Muskovit, Apatit, Magnetit, Hämatit, Granit- und Quarzit-Grus, Cristobalit und Rutil
 Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz; viele längsorientierte Schwindungsrisse
 Besonderheiten: selten Diatomeen; Quarze und Plagioklase sind z. T. deutlich angeschmolzen.

Probe-Nr. 6: braun mit Stich ins Rote (Taf. 116,2)
 Grobkornanteil: ca. 10 Vol.-%
 Magerung (0,18-0,8 mm): reich an gerundetem, randlich resorbiertem Quarz; selten getrübe Feldspäte (Plagioklas, Mikroklin, z. T. mit myrmektischem Gefüge), Apatit, Zirkon, Muskovit, Rutil, Turmalin, Hornblende-Granitgrus, Chalcedon und reichlich Hämatit
 Matrix: gesinterte, gelblichbraune Tonsubstanz mit vielen Mikrolithen und Hämatitkügelchen; längsorientierte Magerungsbestandteile in "fluidaler Matrix", keine Schwindungsrisse
 Besonderheiten: rundlicher "Schamotte-Einschluß" mit Diatomeen-Führung

Probe-Nr. 8: rot Gefüge ähnlich wie Probe-Nr. 3
 Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%
 Magerung (bis 2,5 mm): reich an kantengerundetem, z. T. randlich resorbiertem Quarz; selten zonierter bzw. nach dem Albit-Gesetz verzwilligter, angedauter Plagioklas sowie Mikroklin mit beginnender Isotropisierung, Oxyhornblende, Biotit, Rutil, Turmalin, Epidot und wenigen, großen "Schamottekügelchen", Hämatit
 Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit mikrolithischen Nadelchen und feinen, längsorientierten Schwindungsrissen
 Besonderheiten: zonierter Plagioklas + Oxyhornblende \Rightarrow vulkanische Minerale; keine Diatomeen

Probe-Nr. 9: gelbbraun (Taf. 116,3) Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 10, 11
 Grobkornanteil: ca. 5 Vol.-%
 Magerung (bis 1 mm): einzelne zerbrochene, kantengerundete Quarze sowie (vulkanischer?) Plagioklas; selten Zirkon (0,03 mm) und Rutil
 Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit nahezu gleichkörnigen, eckigen Mineralbruchstücken (\approx 0,05 mm); selten schmale, längsorientierte Schwindungsrisse
 Besonderheiten: sehr viele Diatomeen, z. T. mit Hämatit-Kern; die Mineralbruchstücke sind großteils randlich stark korrodiert
 Brand: oxidierend, Kern stärker oxidiert als der Rand

Probe-Nr. 10: gelb bis rötlichbraun (Taf. 120,1) Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 9, 11
 Grobkornanteil: ca. 5 Vol.-%
 Magerung (bis 0,8 mm): einzelne zerbrochene, kantengerundete und angeschmolzene Quarze; selten (vulkanischer?) Plagioklas, Biotit und Muskovit sowie Zirkon (0,03 mm), Magnetit- und Hämatit-Körnchen
 Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit nahezu gleichkörnigen, eckigen Mineralbruchstücken (\approx 0,05 mm); selten längsorientierte Schwindungsrisse
 Besonderheiten: sehr viele Diatomeen, lokale Anhäufung von Cristobalit, ein kantengerundeter Schamotte-Einschluß (0,6 mm); Kern stärker oxidiert als der Rand

Probe-Nr. 11: gelblichbraun (Taf. 116,4) Gefüge sehr ähnlich den Probe-Nr. 9, 10
 Grobkornanteil: ca. 3 Vol.-%
 Magerung (bis 1 mm): einzelne zerbrochene, kantengerundete und angeschmolzene Quarze; selten Plagioklas, Biotit und Muskovit sowie Zirkon (0,03 mm), Rutil, Magnetit- und Hämatit-Körnchen
 Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit nahezu gleichkörnigen Quarz-Kristalliten (\approx 0,05 mm), selten längsorientierte, elliptische Blasenräume
 Besonderheiten: sehr viele Diatomeen

- "Magerung" (bis 0,1 mm): eckiger Quarz, Plagioklas, Muskovit, Hämatit, Turmalin, Zirkon
 Matrix: längsorientierte, stark gesinterte, feinstfilzige Matrix, selten Mullitnadeln (?), mit ca. 20 Vol.-% eckigem bis gerundetem Quarz-Feinkornanteil (meist um 0,05 mm), selten Turmalin und Rutil; wenige kurze, richtungslose "Schwindungsrisse"
 Besonderheiten: ungemagert, gesiebt (?)
- Probe-Nr. 27a: gelblichorange (Taf. 117,6) Gefüge ähnlich wie Probe-Nr. 27
 Grobkornanteil: ca. 1 Vol.-%
 "Magerung" (bis 0,3 mm): gerundeter Quarz, Hämatit und Keramikbruch
 Matrix: stark gesinterte, feinfilzige Tonsubstanz mit ca. 10 Vol.-% eckigem bis gerundetem Quarz-Feinkornanteil (meist um 0,05 mm), selten Plagioklas (bis 0,1 mm), Turmalin, Sericit und Zirkon; wenige, längsorientierte Schwindungsrisse
 Besonderheiten: ungemagert, gesiebt (?)
- Probe-Nr. 28: beigefarbener bis ockergelber Töpferton
 Matrix: feinstverfilzter Ton aus Illit mit ca. 10 Vol.-% eckigen bis gerundetem Quarz-, Plagioklas-, Turmalin-, Zirkon-, Rutil- und Hämatit-Feinkorn (<0,05 mm), selten bis 0,1 mm lange Sericit-Nadeln
- Probe-Nr. 29: weiß bis cremefarben (Taf. 118,1)
 Grobkornanteil: 2 Vol.-%
 Magerung (um 0,3 mm): nur Quarz, relativ gleichkörnige, kantengerundete Kristalle
 Matrix: stark gesinterte Tonsubstanz mit hohem Feinkorn-Anteil (um ca. 0,03 mm): viel Quarz, etwas Plagioklas (vulkanische Bildung), selten Orthoklas, Mikroklin, Turmalin und stark alterierter Plagioklas (plutonische Bildung), Rutil, Magnetit, Cristobalit; öfters längsorientierte Schwindungsrisse
 Besonderheiten: häufig Diatomeen, randlich angeschmolzenes Grob- und Feinkorn
- Probe-Nr. 30: gelblichorange (Taf. 118,2) Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 26, 30a
 Grobkornanteil: 1 Vol.-%
 "Magerung" (0,2 mm): eckiger Quarz und Plagioklas
 Matrix: stark gesinterte Tonsubstanz mit wenigen, unregelmäßigen Poren; gleichkörniges Feinkorn (ca. 0,05 mm): Quarz, Plagioklas, Magnetit, Turmalin, Hämatit, Zirkon, Sericit, Rutil
 Besonderheiten: selten Diatomeen
- Probe-Nr. 30a: weiß bis cremefarben Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 26, 30
 Grobkornanteil: kein Grobkorn
 Feinkorn (0,01-0,05 mm): Quarz, Plagioklas, Sericit, Rutil, Magnetit, Hämatit, Zirkon, Turmalin, Apatit, Biotit
 Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit stärker gesintertem Rand; wenige runde Hohlräume (ca. 2 Vol.-%)
 Besonderheiten: selten Diatomeen; sehr hart gebrannt
- Probe-Nr. 30b: rotoranger Kern, gelboranger Rand (Taf. 118,3)
 Grobkornanteil: ca. 5 Vol.-%
 Magerung (bis 0,4 mm): randlich teilweise angeschmolzener Quarz und Orthoklas-Perthit (z. T. getrübt), Turmalin, Hämatit, Sericit, braune Hornblende (vulkanisch?), Plagioklas mit Gleitzwillingen, Epidot-Quarzitgrus, Quarzite mit Dihedralwinkeln der Quarze (Sammelkristallisation)
 Matrix: gesinterte, längsorientierte Tonsubstanz, wenige längsorientierte Schwindungsrisse
 Besonderheiten: selten Diatomeen, selten Keramikscherben-Einschlüsse
- Probe-Nr. 31: weißer Kern, schwarzer Rand (Taf. 118,4)
 Grobkornanteil: ca. 2 Vol.-%
 Magerung (bis 0,5 mm): z. T. randlich angeschmolzener Quarz und Mikroklin; Sericit, Rutil,

Matrix: gesinterte Tonsubstanz, ausgeprägte Längsorientierung des Feinkorns (Quarz, Magnetit, Sericit, dehydratisierte Tonminerale) und der Diatomeen

Besonderheiten: wenige Diatomeen (bis 0,16 x 0,01 mm lange "Nadeln")

Probe-Nr. 32: bräunlich mit roten Flecken (Taf. 118,5)

Grobkornanteil: ca. 40 Vol.-%

Magerung (bis 0,6 mm): viel kantengerundeter Quarz (oft randlich angeschmolzen), wenig Orthoklas-Perthit (randlich resorbiert) und saussuritierter Plagioklas, Keramikscherben-Bruchstücke, Zirkon, Hämatit, Turmalin, Sericit, Rutil, Apatit, Epidot

Matrix: gesinterte Tonsubstanz, längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: Bruchstück eines verkieselten Holzes (?)

Probe-Nr. 33: schwarzbrauner Kern, rostroter Rand (Taf. 118,6)

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (bis 0,8 mm): stark kantengerundet; viel Quarz, selten Plagioklas (vulkanisch), Mikroklin, Orthoklas-Perthit, rundliche Keramikscherben-Bruchstücke

Matrix: gesinterte Matrix mit schmalen, längsorientierten Schwindungsrisse

Besonderheiten: keine Diatomeen

Brand: zweifach gebrannt: 1. reduzierend (-> Kern), 2. oxidierend (-> Rand)

Probe-Nr. 34: schwarzer Kern, brauner Rand

Gefüge ähnlich wie die Probe-Nr. 1-5

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (bis 4 mm): viel Quarz, wenig Orthoklas-Perthit, selten Mikroklin, Zirkon, Biotit, Sericit, gerundete Keramikscherben-Bruchstücke, Hämatit, Magnetit

Matrix: gesinterte Tonsubstanz, sehr viele längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: keine Diatomeen

Brand: zweifach gebrannt: 1. reduzierend (-> Kern), 2. oxidierend (-> Rand)

Probe-Nr. 35: ockerfarben

ähnlich den Probe-Nr. 13, 15, 36

Grobkornanteil: ca. 10 Vol.-%

Magerung (bis 0,6 mm): viel Quarz, selten Plagioklas, ein gerundetes Schamotte-Bruchstück, Zirkon, Hämatit, Magnetit, Oxyhornblende, Apatit

Matrix: gesinterte Tonsubstanz, selten dünne, längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: viele Diatomeen, Randbereich z. T. mit glasigen Partien, 1 idiomorphe Oxyhornblende und wenig vulkanischer Plagioklas

Probe-Nr. 36: gelbbrauner Kern, roter Rand

ähnlich den Probe-Nr. 35, 13 und 15

Grobkornanteil: ca. 10 Vol.-%

Magerung (bis 0,4 mm): randlich resorbierter Quarz, angeschmolzener Orthoklas und Mikroklin, Zirkon

Matrix: gesinterte Tonsubstanz, selten dünne, längsorientierte Schwindungsrisse; selten breitere unregelmäßige Risse

Besonderheiten: viele Diatomeen im Rand und Kernbereich; unregelmäßige, sehr feinkörnige, helle Schlieren vom Kern bis in den Randbereich hineinreichend: zusätzlich Rutil-führend, jedoch keine Diatomeen (Verkleben eines Risses durch Fremdmaterial ?)

Brand: zweifach gebrannt: 1. reduzierend (-> Kern), 2. oxidierend (-> Rand)

Probe-Nr. 37: ockerfarbener Kern, cremefarbener Rand

ähnlich den Probe-Nr. 9, 10, 11

Grobkornanteil: ca. 5 Vol.-%

Magerung (bis 0,5 mm): rundlicher, teilweise randlich resorbierter Quarz (häufig) und Plagioklas (selten), Zirkon, Sericit, Rutil, braune Hornblende

Matrix: gesinterte Tonsubstanz mit wenigen (ca. 5 Vol.-%) unregelmäßigen, aber längsorientierten Schwindungsrisse

Besonderheiten: viele Diatomeen

Probe-Nr. 38: rotbrauner Kern, schwarzbrauner Rand

Grobkornanteil: ca. 1 Vol.-%

Magerung (bis 0,5 mm): Quarz, Plagioklas, Sericit, Rutil, Hämatit, wenige gerundete Keramikscherben-Bruchstücke

Matrix: gesinterte Matrix mit wenigen, teils unregelmäßigen Hohlräumen, teils längsorientierten Schwindungsrisen

Besonderheiten: selten Diatomeen

Zur besseren Übersicht sind die lichtoptisch identifizierten Mineralphasen in Tab. 4 zusammengefaßt. Tab. 5 gibt Auskunft über die maximale Korngröße der Magerungsbestandteile, deren Volumenanteile sowie Gefügeverwandtschaften und Diatomeenföhrung.

Anhand des Mineralbestandes der Keramiken ist es nicht möglich, die genaue Herkunft der Töpfertone zu ermitteln. Es liegen keine Fundort-spezifischen Phasen vor. Als einziger Unterschied gegenüber anderen Keramiken erweist sich die Diatomeenföhrung. Die römischen Keramiken besitzen teils größere Mengen (++), teils nur wenige Exemplare im Scherben (+), teils fehlen sie völlig. Der aus dem Ofen 10 stammende weiße Töpferton (Probe-Nr. 12) besitzt geringe Mengen an Diatomeen, während sie im ungebrannten Ton aus Haltern Gr. 3/64 (Probe-Nr. 28) fehlen.

Die identifizierten vulkanischen Plagioklase und braunen Hornblenden einzelner römischer Keramiken deuten auf eine Mineralföhrung aus quartären Vulkaniten der Eifel. Möglicherweise stammen diese Minerale aus den aus Blaubasalt bestehenden römischen Mahlsteinen, mit denen der Keramikbruch gemahlen und wieder als Magerung in neue Keramiken eingebracht wurde.⁷⁸⁵

Die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchungen (Tab. 4 u. 5) ermöglichen also keine eindeutige Herkunftsbestimmung der Tone, sie erlauben aber eine Gruppierung der römischen Keramiken:

Probe-Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 8, 34

Probe-Nr. 13, 15, 17, 35, 36

Probe-Nr. 26, 30, 30a

Probe-Nr. 27, 27a

Probe-Nr. 9, 10, 11, 37

ohne Zuordnung verbleiben: Probe-Nr. 6, 14, 16, 29, 30b, 31, 32, 33, 38

Diese Gruppierungen entsprechen größtenteils den sich aus der Clusteranalyse ergebenden Untergruppen. Eine Diskussion der Ergebnisse folgt später.

785 In der Wandung des Ofen 10 wurden auch vereinzelt Blaubasaltstücke festgestellt (z.B. Ofen 10/3546).

Probe-Nr.	Q	Or	Mikr.	Pl	Hgl	Bi	Hbl	Pyr	Tur	Zr	Ap	Mag.	Häm.	Ru	Cr	Gr-G	Q-G	Ep	Mu	Ker
1	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-
2	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
3	+	+	+	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-
4	+	+	-	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-
5	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-
6	+	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+
8	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+
9	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
10	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+
11	+	-	-	+	+	+	-	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
13	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-
14	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-
15	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
16	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
17	+	-	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-
26	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
27	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	-	-	-	+	-
27a	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
29	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-
30	+	-	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
30a	+	-	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-
30b	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+
31	+	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
32	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	+
33	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+
34	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+
35	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-	-	+
36	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
37	+	-	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
38	+	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	+

Tabelle 4 Mineralogische Zusammensetzung der römischen Keramiken. Abkürzungen: Q=Quarz, Or=Orthoklas, Mikr.=Mikroclin, Pl=Plagioklas, Hgl=Hellglimmer Sericit/Muskovit, Bi=Biotit, Hbl=Hornblende, Pyr=Pyroxen, Tur=Turmalin, Zr=Zirkon, Ap=Apatit, Mag.=Magnetit, Häm.=Hämatit, Ru=Rutil, Cr=Cristobalit, Gr-G=Granitgrus, Q-G=Quarzitgrus, Ep=Epidot, Mu=Mullit, Ker=Keramikscherben/Schamotte.

Probe-Nr.	Grobkornanteil [Vol.-%]	max. Korngröße der Magerung [mm]	vulkanische Minerale	Diatomeen-Führung	Risse, Poren	Probe-Nr. mit vergleichbarem Gefüge
1	20	0,64	-	+	+	2, 3, 4, 5, 8, 34
2	20	1,0	-	+	+	1, 3, 4, 5, 8, 34
3	25	4,0	+	+	+	1, 2, 4, 5, 8, 34
4	20	0,68	+	+	-	1, 2, 3, 5, 8, 34
5	25	0,70	-	+	+	1, 2, 3, 4, 8, 34
6	10	0,80	-	(+)	-	-
8	20	2,5	+	-	+	1, 2, 3, 4, 5, 34
9	5	1,0	+	++	+	10, 11, 37
10	5	0,8	+	++	+	9, 11, 37
11	3	1,0	-	++	+	9, 10, 37
13	15	0,8	+	+	+	15, 17, 35, 36
14	3	0,73	+	+	+	-
15	5	1,0	+	++	+	13, 17, 35, 36
16	-	-	-	-	+	-
17	2	1,0	+	++	+	13, 15, 35, 36
26	1	0,2	-	+	-	30, 30a
27	1	0,1	-	-	+	27a
27a	1	0,3	-	-	+	27
29	2	0,3	+	++	+	-
30	1	0,2	-	+	+	26, 30a
30a	-	-	-	+	+	26, 30
30b	5	0,4	+	+	+	-
31	2	0,5	-	+	-	-
32	40	0,6	-	-	+	-
33	20	0,8	+	-	+	-
34	20	4,0	-	-	+	1, 2, 3, 4, 5, 8
35	10	0,6	+	++	+	13, 15, 17, 36
36	10	0,4	-	++	+	13, 15, 17, 35
37	5	0,5	+	++	+	9, 10, 11
38	1	0,5	-	+	+	-

Tabelle 5 Gefügebetrachtung und Besonderheiten in den untersuchten römischen Keramiken.

Röntgenographische Phasenanalyse

Die Röntgenpulverdiffraktometrie ermöglicht die Identifikation der feinstkörnigen, unter dem Lichtmikroskop nicht mehr auflösbaren Mineralphasen. Da die Nachweisgrenze dieser Methode bei ca. 3 bis 5 Vol.-% liegt, unterscheiden sich die in Tabelle 6 zusammengestellten Ergebnisse erkennbar von der Dünnschliffanalyse (Tab. 4).

Die in Abb. 7-11 dargestellten Diffraktogramme wurden an einem Philips-Pulverdiffraktometer PW 1050 mit einer Kupferrohre bei 40 KV und 30 mA (CuK α -Strahlung: Wellenlänge $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$, Nickelsektivfilter) an Texturpräparaten aufgenommen. Es wurden aus zwei Gründen anstelle von untexturierten Präparaten Texturpräparate angefertigt: 1. zur exakten Identifikation der Schichtsilikate, 2. zur Verringerung der beim "Normalverfahren" benötigten Probenmenge.

Probe-Nr.	rml I/M	Illit/Sericit	Kaolinit	Quarz	Feldspat	Hämatit	Graphit	Cristobalit	Mullit
1	-	-	-	+	+	-	-	-	-
4	-	+	-	+	+	-	-	-	-
6	-	+	-	+	+	-	-	-	-
7	-	-	-	+	+	-	-	-	-
8	-	-	-	+	+	+	-	-	-
10	-	-	-	+	+	-	-	+	+
12	+	+	+	+	-	-	-	-	-
13	-	-	-	+	+	-	-	-	-
14	-	-	-	+	+	-	+	+	-
16	-	-	-	+	-	-	-	-	+
17	-	-	-	+	-	-	-	+	+
26	-	-	-	+	+	-	-	-	-
28	-	+	-	+	-	-	-	-	-
29	-	-	-	+	+	-	-	-	-
30a	-	+	-	+	+	-	-	-	-
30b	-	+	-	+	+	-	-	-	-
33	-	-	-	+	-	+	-	+	+
35	-	-	-	+	+	-	-	+	+
36	-	-	-	+	+	-	-	+	+
37	-	-	-	+	+	-	-	-	-
38	-	-	-	+	+	-	+	-	-
39	-	+	+	+	+	-	-	-	-
40	-	+	+	+	+	-	-	-	-

Tabelle 6 Ergebnisse der pulverdifferenzmetrischen Untersuchungen an Texturpräparaten (Abb. 7-12) (rml Illit/Montmorillonit= unregelmäßige Wechsellagerungen von Illit und Montmorillonit).

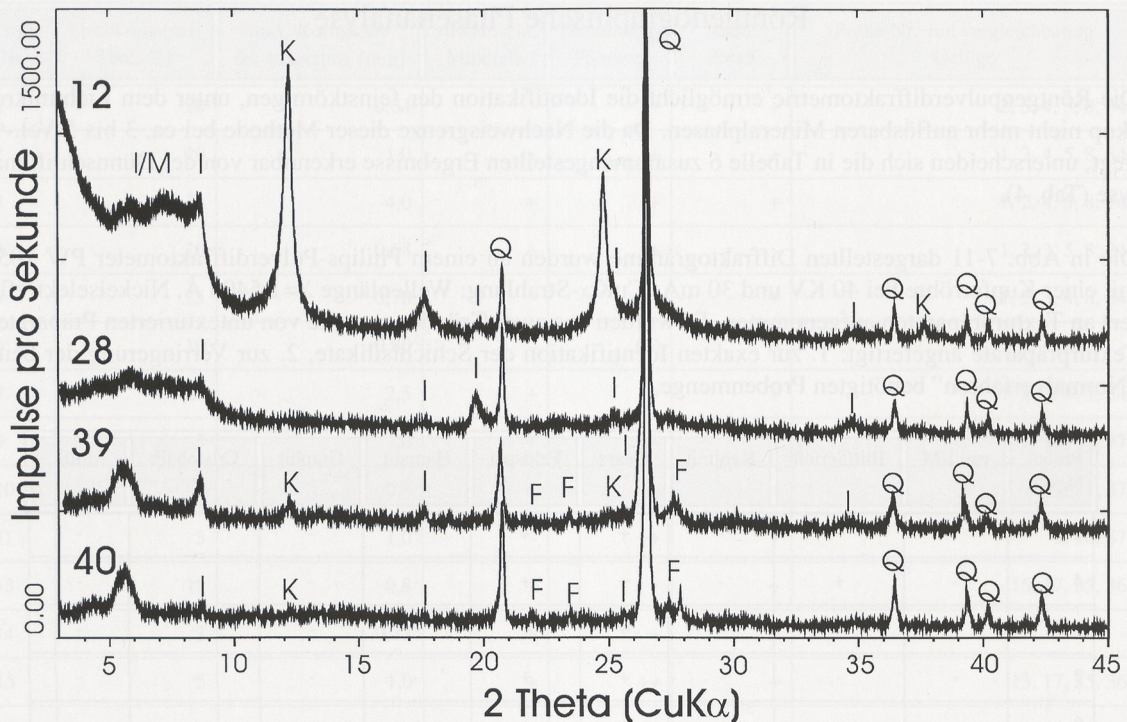


Abb. 7 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen von Texturpräparaten der beiden Töpfertone (Probe 12 und 18) sowie der beiden Ziegeleitone aus dem Raum Haltern (Probe 39 und 40). Probe-Nr. 12: Kaolinit (K), Illit/Montmorillonit (I/M) mit unregelmäßigen Wechsellagerungen (rml I/M), Quarz (Q); Probe-Nr. 28: Illit (I), Quarz (Q); Probe-Nr. 39 und Probe-Nr. 40 Illit (I), Kaolinit (K), Quarz (Q), Feldspat (F).

Zur Untersuchung kamen nicht nur die Töpfertone, sondern auch eine repräsentative Anzahl von Keramiken und die gebrannten Tonproben (Tab. 6). Die ungetemperten Tonproben wurden luftgetrocknet sowie mit Ethylenglykol behandelt und zur Identifikation von quellfähigen Tonmineralen wie Montmorillonit geröntgt (Abb. 7, 13, 15).

Die getemperten Tonproben (Abb. 13,15-16) wurden teils an Texturpräparaten am Pulverdiffraktometer (Abb. 13-15), teils an untexturierten Proben mit der Guinier-Jagodzinski-Kamera untersucht (Abb. 16).

Aus den Pulverdiffraktogrammen der untersuchten Tonproben (Abb. 7) geht hervor, daß es sich um Tone unterschiedlicher Lokalitäten handelt. Probe-Nr. 12 besteht überwiegend aus Kaolinit neben Quarz, Illit und quellfähigem Illit/Montmorillonit mit unregelmäßigen Wechsellagerungen (Quellung mit Ethylenglykol von $d=12,18$ auf $15,66 \text{ \AA}$; d =Netzebenenabstand). Es handelt sich demnach um einen kaolinitischen Ton.

Probe-Nr. 28 hat als einziges Tonmineral Illit aufzuweisen. Daneben tritt im Pulverdiffraktogramm nur noch Quarz in Erscheinung. Man muß also davon ausgehen, daß dieser Töpferton von einem anderen Fundort stammt als die Probe-Nr. 12.

Probe-Nr. 39 und 40 stammen aus verschiedenen Horizonten einer ehemaligen Ziegeleigrube bei Haltern. Sie unterscheiden sich nur im quantitativen Mineralbestand: Illit, Kaolinit, Quarz, Feldspat.

Die Pulverdiffraktogramme der Keramiken (Abb. 8-11) ermöglichen es, in Verbindung mit Brennversuchen an den beiden vermuteten Töpfertonen, Aussagen über die Brenntemperaturen zu machen. Besonders charakteristisch ist das Auftreten von Illit (bzw. Sericit) in einigen Keramiken. Dies deutet auf relativ niedrige Brenntemperaturen, während das Vorkommen von Cristobalit bzw. Mullit auf relativ hohe Brenntemperaturen schließen läßt.

Zum anderen soll ein Vergleich der relativen Peakhöhen eine eventuell gemeinsame Gruppenzugehörigkeit weiter erhärten.

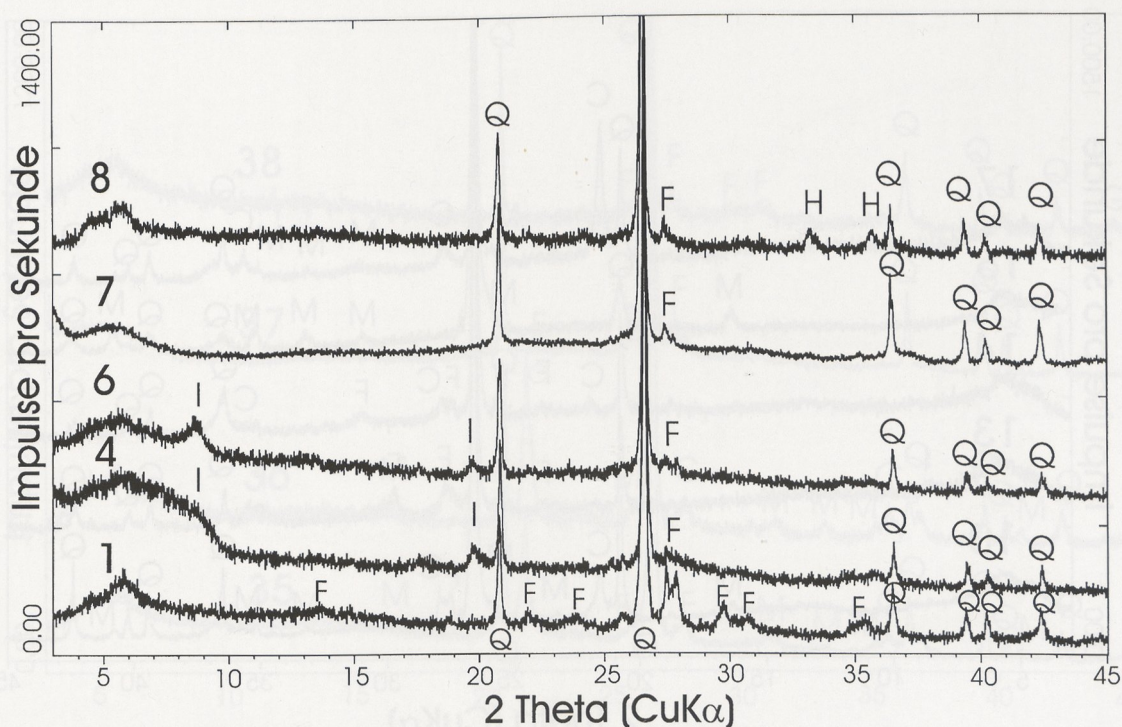


Abb. 8 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen der Probe-Nr. 1, 4, 6, 7, 8. Texturaufnahmen. Probe-Nr. 1: Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 4: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 6: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 7 (Kalkriese): Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 8: Quarz (Q), Feldspat (F), Hämatit (H).

Vorsicht ist bei der Interpretation des 2-Theta-Winkels bei ca. 6° geboten. Dieser Peak ist zum einen charakteristisch für quellfähige Tonminerale (s. Abb. 7), zum anderen tritt dieser Peak leider in allen Röntgenaufnahmen mehr oder weniger stark ausgeprägt auf. Dies ist bedauerlicherweise für das verwendete Diffraktometer gerätespezifisch. Nur bei einer Verschiebung des 2-Theta-Winkels nach Ethylenglykolbehandlung liegt in der Probe wirklich ein Tonmineral wie Montmorillonit vor. Sonst ist das Auftreten dieses Peaks zu vernachlässigen.

Vergleicht man die Diffraktogramme der römischen Keramiken miteinander, so fallen deutliche Unterschiede auf. Da die Brenntemperaturen und die Herkunft des Töpfertones von besonderer Bedeutung sind, werden entsprechende Untergruppierungen durchgeführt:

Römische Keramiken mit Illit-Führung: Probe-Nr. 4, 6, 13, 30a, 30b

Römische Keramiken ohne Illit-, Cristobalit- und Mullit-Führung: 1, 7, 8, 26, 29, 37

Römische Keramiken mit Graphit-Führung: Probe-Nr. 14, 38

Römische Keramiken mit Cristobalit (ohne erkennbaren Mullit): 14, 17, 33

Römische Keramiken mit Mullit-Führung (ohne erkennbaren Cristobalit): 16

Römische Keramiken mit Cristobalit- und Mullit-Führung: 10, 35, 36

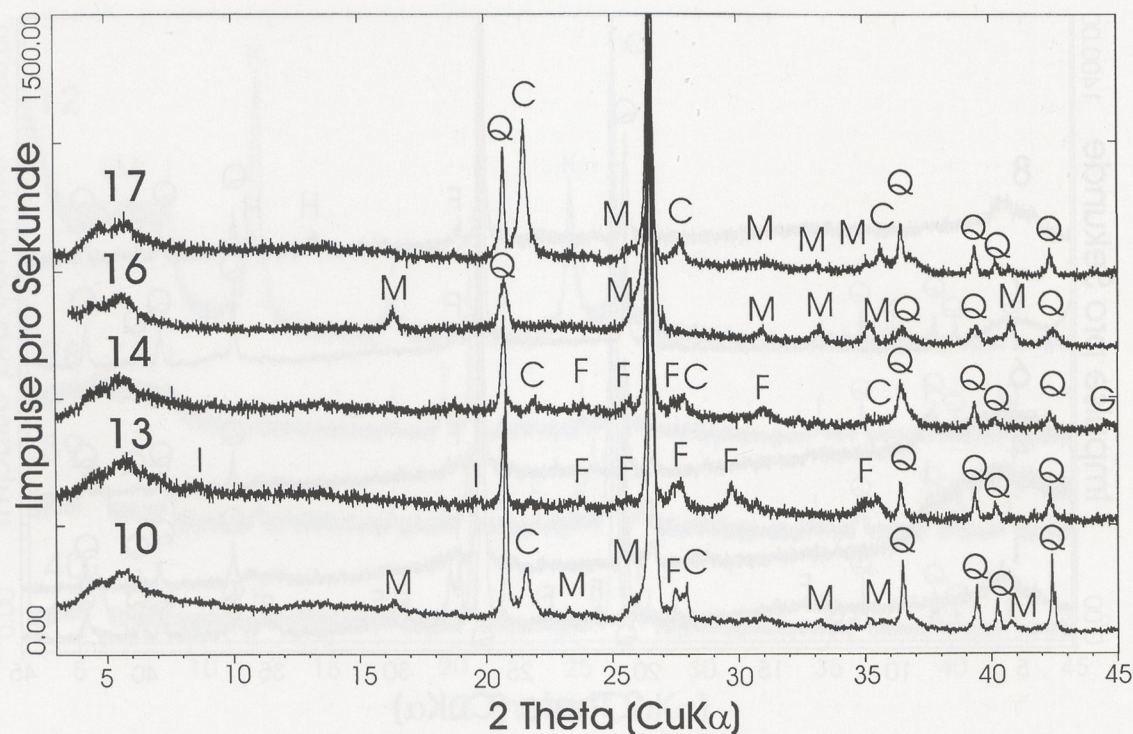


Abb. 9 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen der Probe-Nr. 10, 13, 14, 16, 17. Texturaufnahmen. Probe-Nr. 10: Quarz (Q), Cristobalit (C), Mullit (M); Probe-Nr. 13: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 14: Quarz (Q), Feldspat (F), Graphit? (G), Cristobalit (C); Probe-Nr. 16: Quarz (Q), Mullit (M); Probe-Nr. 17: Quarz (Q), Cristobalit (C), Mullit? (M).

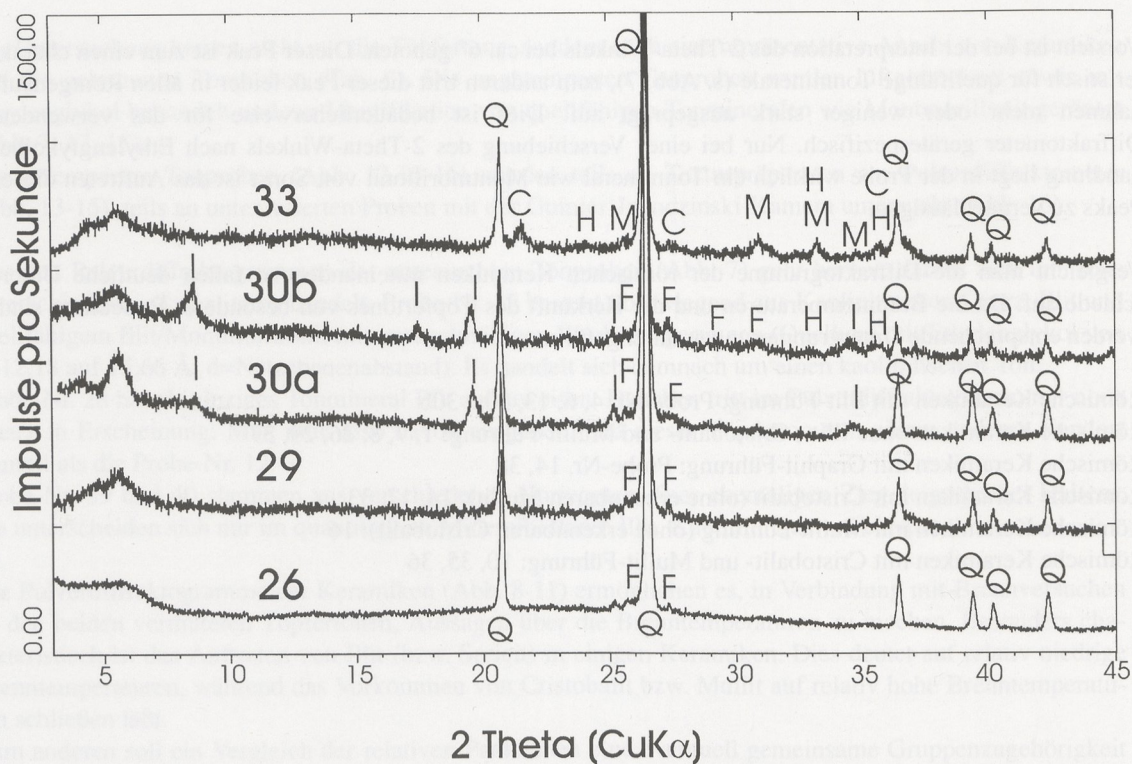


Abb. 10 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen der Probe-Nr. 26, 29, 30a, 30b, 33. Texturaufnahmen. Probe-Nr. 26: Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 29: Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 30a: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 30b: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 33: Quarz (Q), Hämatit (H), Cristobalit (C), Mullit (M).

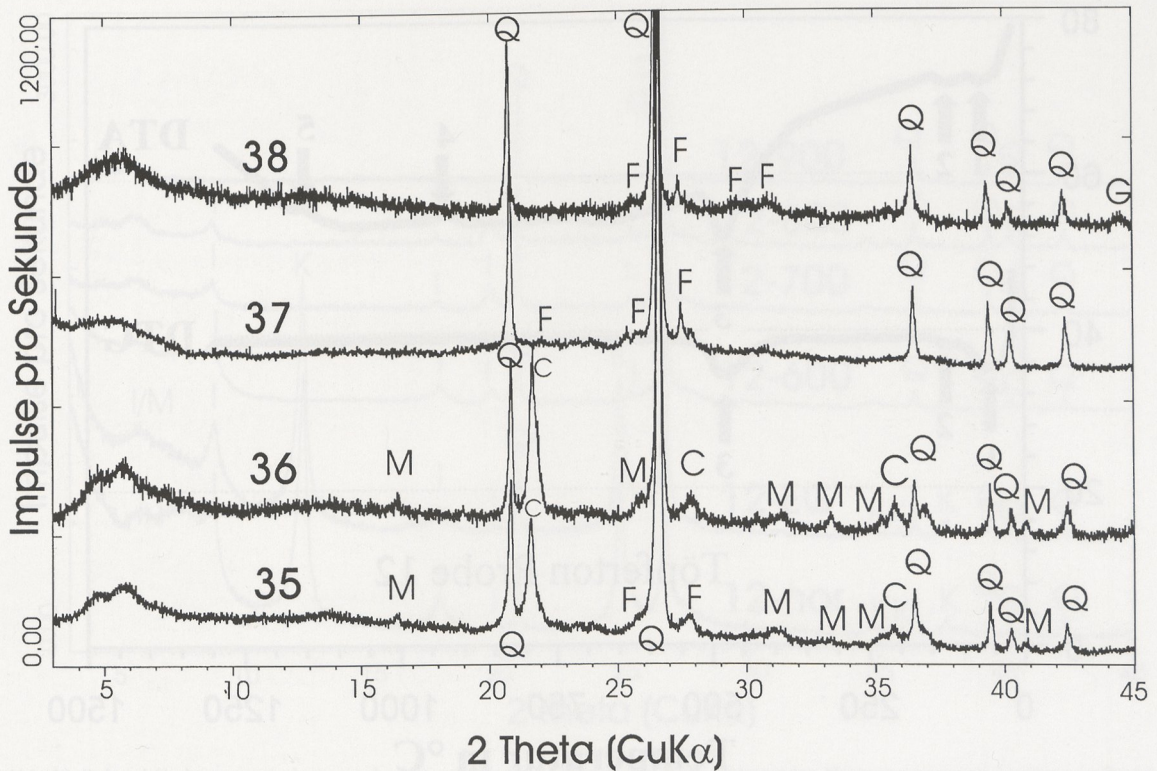


Abb. 11 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen der Probe-Nr. 35, 36, 37, 38. Texturaufnahmen. Probe-Nr. 35: Quarz (Q), Feldspat (F), Cristobalit (C), Mullit (M); Probe-Nr. 36: Quarz (Q), Feldspat (F), Cristobalit (C), Mullit (M); Probe-Nr. 37: Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 38: Quarz (Q), Feldspat (F), Graphit? (G).

Der keramische Brand

Da es sich bei den hier untersuchten Proben um kalkarme Tone bzw. Keramiken handelt, fehlen im allgemeinen im Temperaturbereich zwischen etwa 500-1000°C Phasenneubildungen als exakte Temperaturmarken. Es kommt dann im wesentlichen darauf an, welche Tonminerale im Scherben noch identifizierbar sind. Kaolinit läßt auf Brenntemperaturen um $\leq 600^\circ\text{C}$ (s. Abb. 13) schließen, Illit weist je nach Ausgangsmaterial auf Werte zwischen max. 850-950°C hin. Die Bildung von Cristobalit und Mullit liefert für kaolinitische Tone etwa eine Temperaturmarke von 950°C, bei illitischen Tonen 1050°C.⁷⁸⁶ Diese Temperaturmarken stehen jedoch nur für eine partielle Mullitisierung, bei der Mullit ein Netzwerk von Skelettkristallen bildet.⁷⁸⁷ Zur relativen Eingrenzung der Brennbedingungen wurden an beiden vorliegenden "Töpfertonen" (Proben 12 und 28) Brennversuche unter oxidierenden Bedingungen bei 600, 700, 800, 1000 und 1300°C (Probe-Nr. 28) bzw. 600, 700, 800, 1000, 1100 und 1300°C (Probe-Nr. 12) durchgeführt und die gebrannten Tone röntgenographisch untersucht (Abb. 13, 15-16).

Für die Brennversuche wurde jeweils 1 g Probenmaterial im Platintiegel in einen entsprechend temperierten Muffelofen eingebracht und 3 Stunden im Ofen belassen. Der Abkühlprozeß dauerte jeweils 14 Stunden. Parallel dazu erfolgten an beiden Töpfertonen und am Ziegeleiton Probe-Nr. 39 gravimetrische (DTG=Differentialthermogravimetrie) und thermoanalytische (DTA=Differentialthermoanalyse) Untersuchungen unter oxidierenden Bedingungen bis 1300°C (Abb. 12, 14, 17) zur Festlegung der Phasenumwandlungstemperaturen an einer Mettler-Thermowaage. Als Inertsubstanz wurde Korund eingesetzt. Probe und

⁷⁸⁶ NOLL, 1991.

⁷⁸⁷ W.E. LEE U. W.M. RAINFORTH, Ceramic microstructures. Property control by processing (London 1994).

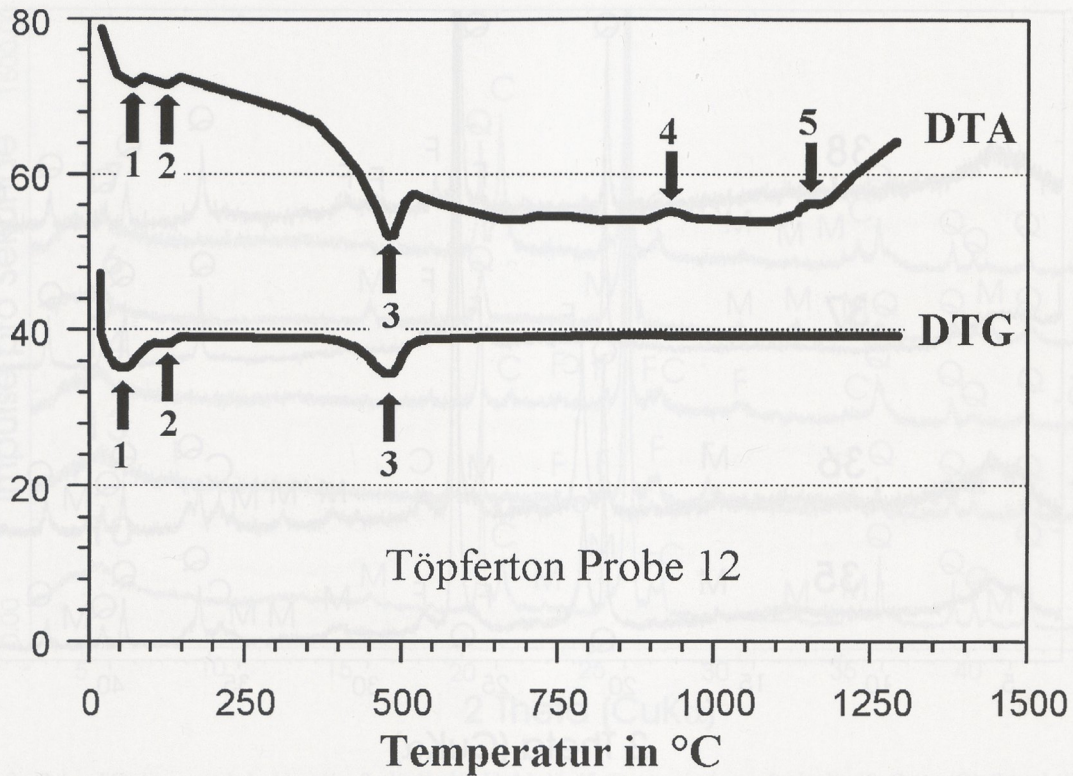


Abb. 12 DTA- und DTG-Aufnahme des weißen Töpfertones Probe-Nr. 12 im oxidierenden Milieu zwischen 25 und 1300°C. Die Umwandlungen 1, 2 und 3 sind endotherm, die Umwandlungen 4 und 5 exotherm abgelaufen.

Referenzmaterial (je 100 mg) wurden mit 8°C pro Minute von 25°C auf 1300°C unter Luftstrom (oxidierende Bedingungen) im Platintiegel aufgeheizt. Die sich hieraus ergebenden Kurven und die simultan dazu gemessenen DTG-Kurven (⇒ Gewichtsveränderungen) sind in Abb. 12 u. 14 dargestellt.

Endotherm ablaufende Reaktionen (Peak nach unten in der DTA-Kurve) verbrauchen Energie, d.h. die Inertsubstanz (Referenzmaterial Korund) wird schneller aufgeheizt, während beim Probenmaterial Energie verbraucht wird, z. B. durch Abgabe von H₂O- oder (OH)-Gruppen. Solche Reaktionen spiegeln sich in der DTG-Kurve ebenfalls durch einen nach unten laufenden Peak (= Gewichtsverlust) wider. Exotherm verlaufende Reaktionen liefern Energie, z. B. durch Oxidation, Phasenumwandlungen bzw. durch die Kristallisation neuer Phasen in einer amorphen Matrix (= Kristallisationswärme). Diese letztgenannte Kristallisation einer neuen Phase führt jedoch zu keiner Änderung (Gewichtsverlust oder Gewichtszunahme) in der DTG-Kurve.⁷⁸⁸

Da in den Diffraktogrammen (Abb. 13 und 15) keine sichtbaren systematischen Intensitätsverschiebungen zwischen dem (002)- bei ca. 9° und (110)- Reflex bei ca. 19,75° 2-Theta des 2M2-Illits bei steigender Temperatur zu erkennen ist, kann die Brenntemperatur, wie dies NOLL⁷⁸⁹ für den Temperaturbereich zwischen 700 und 900°C vorschlägt, anhand der Intensitätsverhältnisse der beiden Reflexe nicht abgeschätzt werden.

Die parallel durchgeführten DTA- und DTG-Untersuchungen lassen sich mithilfe der Röntgenuntersuchungen (Abb. 13, 15-16) an den getemperten Proben folgendermaßen interpretieren:

788 Die Theorie zur Differentialthermoanalyse ist bei W. SMYKATZ-KLOSS, Differential thermal analysis.- Application and results in mineralogy (Berlin 1974) ausführlich beschrieben.

789 NOLL, 1991.

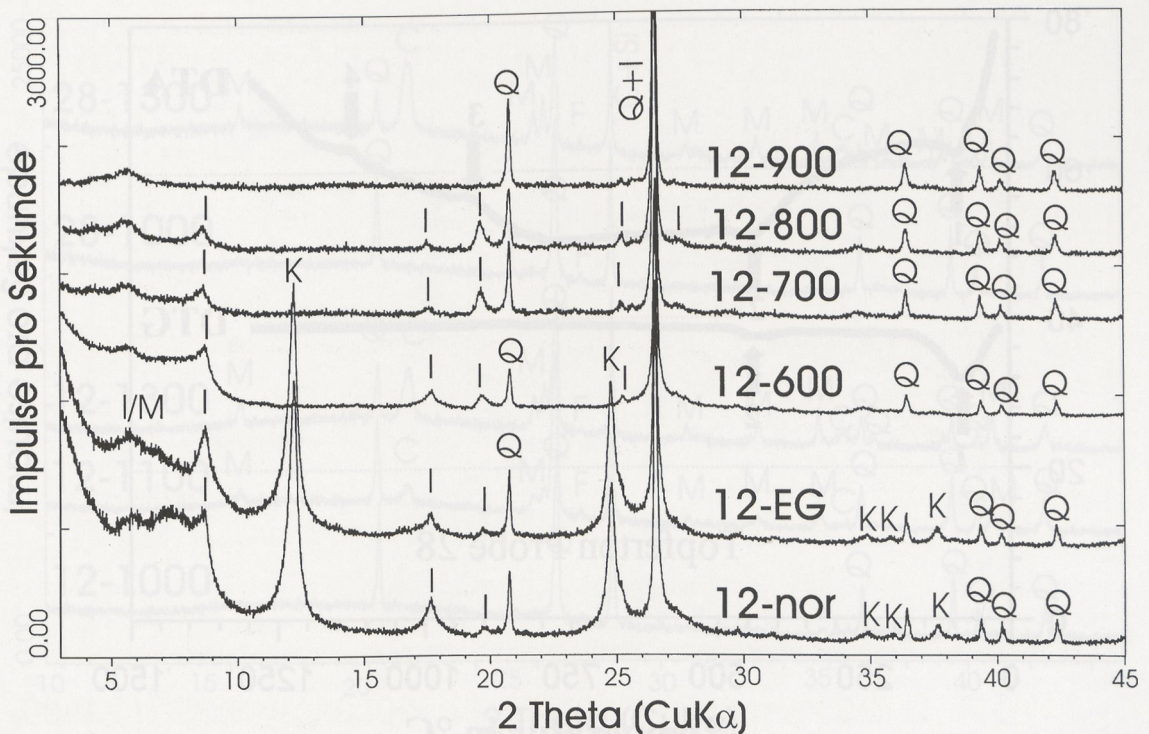


Abb. 13 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen des bei verschiedenen Temperaturen im oxidierenden Milieu getemperten Töpfertones Probe-Nr. 12. Texturaufnahmen.

600°C: Kaolinit (K) ist völlig zu röntgenamorphem Metakaolinit umgesetzt;

600-800°C: keine Änderungen;

900°C: Verschwinden des Illits (I); Quarz (Q) bleibt erhalten.

Probe-Nr. 12:

Punkt 1 und Punkt 2 in Abb. 12: Abgabe des adsorptiv gebundenen Wassers und des Zwischenschichtwassers von rml Illit/Montmorillonit (endotherme Peaks bei der DTA-Kurve, Gewichtsverlust bei der DTG-Kurve) zwischen ca. 70°C und 100°C und von Kaolinit zwischen 110°C bis 160°C;

Punkt 3: Dehydratation der Hydroxylgruppen von rml I/M und Kaolinit, Umwandlung des Kaolinit zu Metakaolinit (endotherme Peaks bei der DTA-Kurve, Gewichtsverlust bei der DTG-Kurve) zwischen 420°C und 530°C ;

Punkt 4: Bildung von Cristobalit und "Primärmullit"⁷⁹⁰ ab 900°C, ausgeprägte Kristallisation bei 930°C.

Punkt 5: Bildung von Cristobalit und "Sekundärmullit"⁷⁹¹ bei 1140°C.

Die entsprechenden Diffraktogramme sind in Abb. 13 und 16 dargestellt.

Probe-Nr. 28:

Punkt 1 in Abb. 14: Abgabe des adsorptiv gebundenen Wassers von Illit (endotherme Peaks bei der DTA-Kurve, Gewichtsverlust bei der DTG-Kurve) zwischen 70 und 110°C;

Punkt 2: Dehydratation der Hydroxylgruppen von Illit (endotherme Peaks bei der DTA-Kurve, Gewichtsverlust bei der DTG-Kurve) zwischen 360°C und 480°C;

Punkt 3: Kristallisation von Cristobalit und "Primärmullit" (s. Abb. 16 und 17) ab 850°C, ausgeprägte Kristallisation bei 900°C;

790 H. SALMANG u. H. SCHOLZE, Keramik. Teil 2: Keramische Werkstoffe (Berlin 1983).

791 K. JASMUND u. G. LAGALY, Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt (Darmstadt 1993).

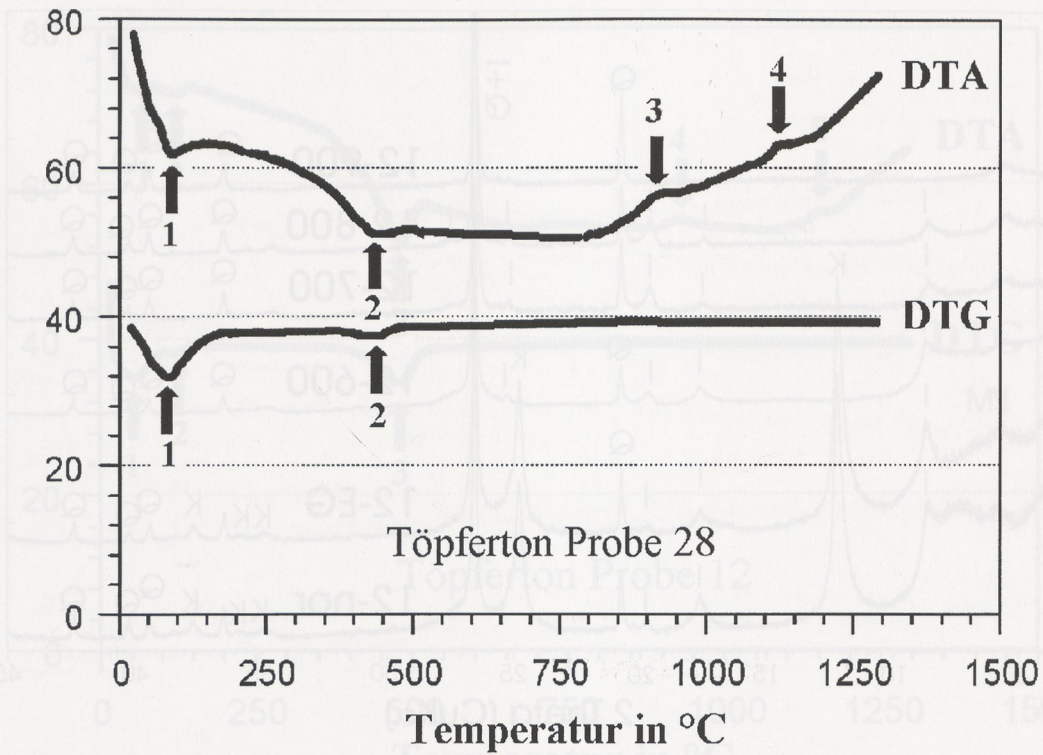


Abb. 14 DTA- und DTG-Aufnahme des ungebrannten Töpfertones Probe-Nr. 28 im oxidierenden Milieu zwischen 25 und 1300°C. Die Umwandlungen 1 und 2 sind endotherm, die Umwandlungen 3 und 4 exotherm abgelaufen.

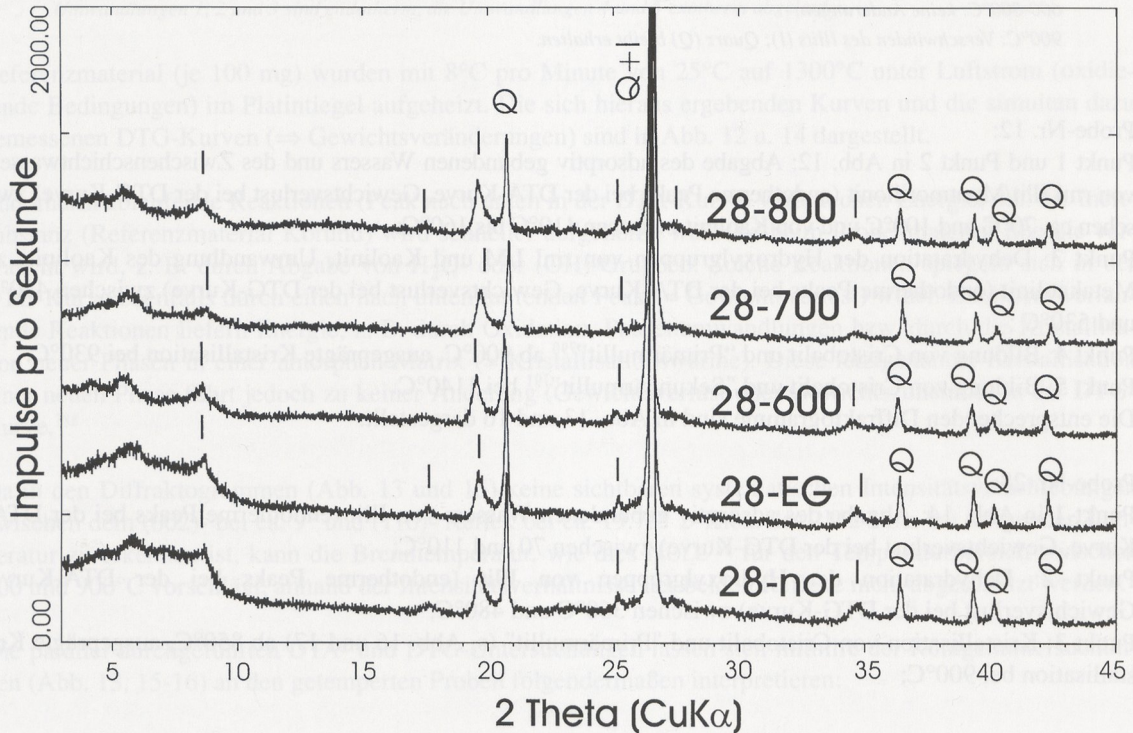


Abb. 15 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen des bei verschiedenen Temperaturen im oxidierenden Milieu getemperten Töpfertones Probe-Nr. 28. Texturaufnahmen.

600-800°C: keine Änderungen gegenüber dem ungetemperten Ton sichtbar.

Quarz (Q) und Illit (I) sind zwischen 25°C und 800°C unverändert nachweisbar.

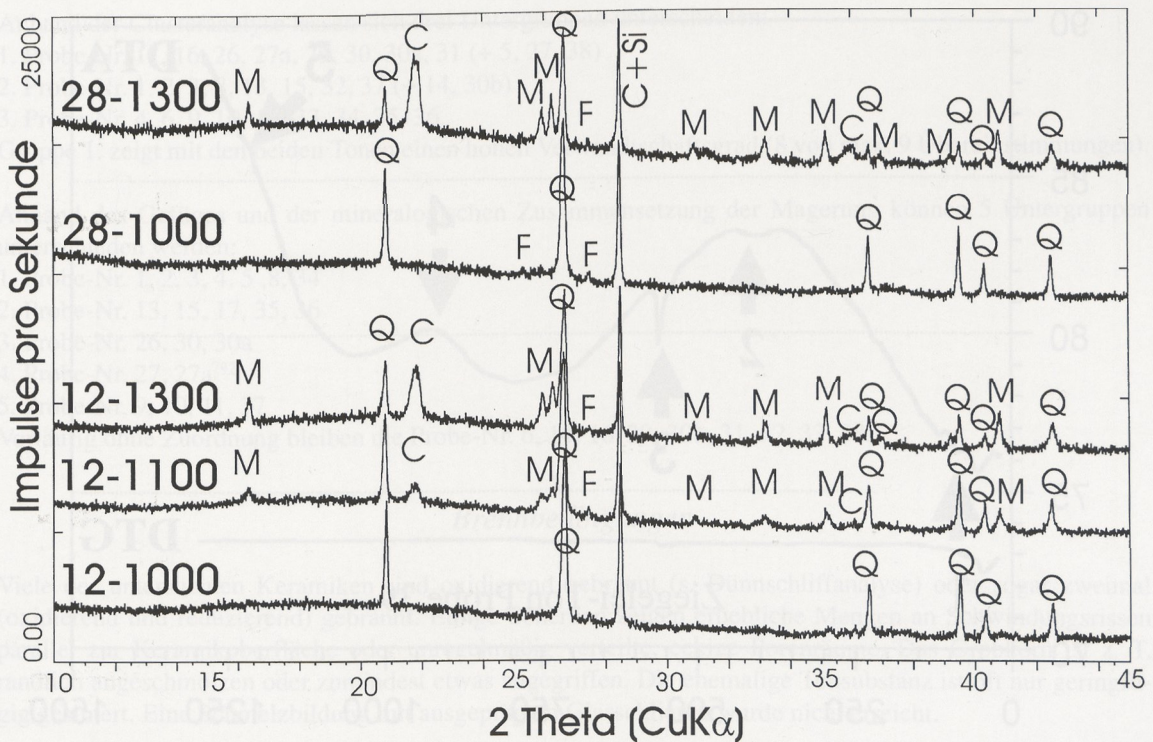


Abb. 16 Röntgenaufnahmen mit der Guinier-Jagodzinski-Kamera an untexturiertem, im oxidierenden Milieu getempertem Ton (Probe-Nr. 12 und 28). Nachweisgrenze (0,5%)

1000°C: Quarz (Q), Feldspat (F), Mullit? (M)

1100°C: Cristobalit (C) und Primärmullit (M);

1300°C: starke Zunahme des Cristobalit- und Mullit-Anteils (Sekundärmullit).

Si=Silicium-Standard als Geräteeichung (Korrektur der Filmdehnung)

Punkt 4: Bildung von Cristobalit und "Sekundärmullit" bei 1130°C.

Probe-Nr. 39:

Punkt 1 in Abb. 17: Abgabe des adsorptiv gebundenen Wassers von Illit zwischen 70°C und 100°C und von Kaolinit zwischen 110°C bis 160°C (endothemer Peaks der DTA-Kurve);

Punkt 2: Entwässerung und Zerfall von röntgenamorphem Goethit (α -FeOOH) zwischen 380°C und 420°C (endothemer Peak der DTA-Kurve);

Punkt 3: Dehydratation der Hydroxylgruppen von Kaolinit, Umwandlung des Kaolinitis zu Metakaolinit (endothemer Peak der DTA-Kurve, Gewichtsverlust bei der DTG-Kurve) zwischen 530°C und 560°C;

Punkt 4: Bildung von Cristobalit und "Primärmullit" bei 920°C (exothermer Peak der DTA-Kurve);

Punkt 5: Kristallisation von Cristobalit und "Sekundärmullit" bei ca. 1190°C (exothermer Peak).

Abschließende Interpretation der naturwissenschaftlichen Untersuchungen

Aus den vorgestellten naturwissenschaftlichen Untersuchungen ergeben sich für die Töpfertone und die römischen Keramiken folgende Verwandtschaftsbeziehungen und Brenntemperaturen:

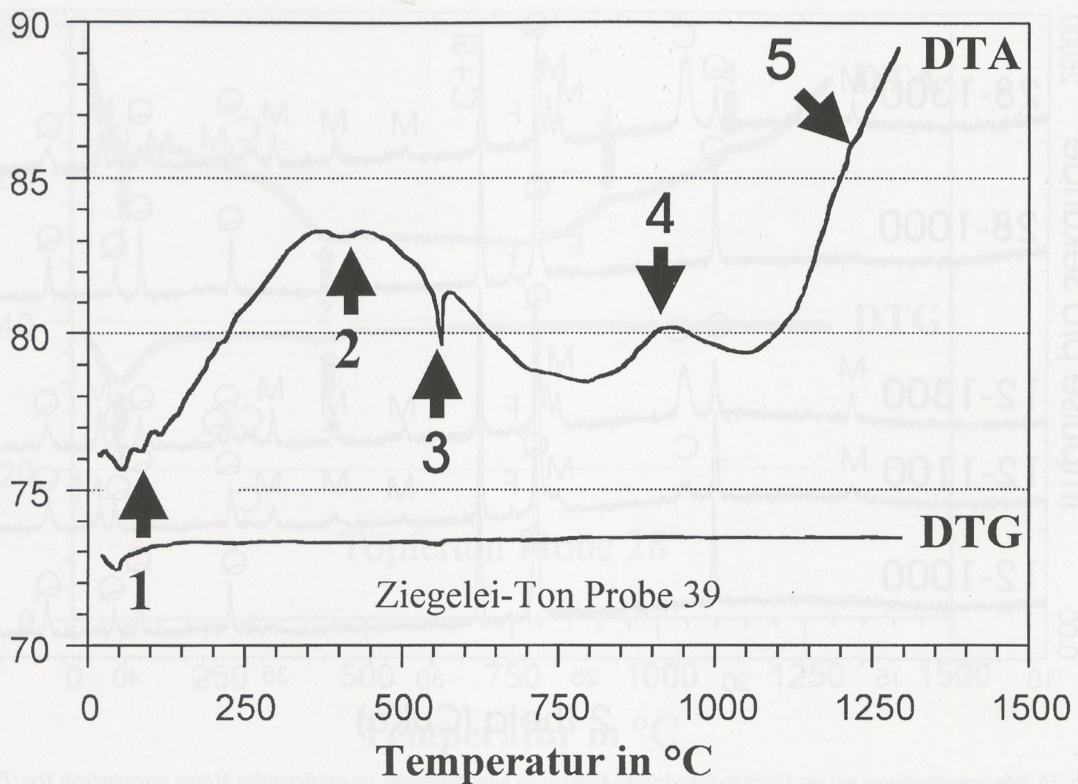


Abb. 17 DTA- und DTG-Aufnahme des Ziegeleitones Probe-Nr. 39 im oxidierenden Milieu zwischen 25 und 1300° C. Die Umwandlungen 1, 2 und 3 sind endotherm, die Umwandlungen 4 und 5 exotherm abgelaufen.

Verwandtschaftsbeziehungen

Die Töpfertone (Probe-Nr. 12 und 28):

Die beiden Proben sind chemisch sehr ähnlich zusammengesetzt. Ihre mineralogische Zusammensetzung ist deutlich unterschiedlich. Probe-Nr. 12 ist ein Illit-führender, Kaolinit-reicher Ton, während Probe-Nr. 28 ein Illit-reicher Ton ohne Kaolinit-Anteil ist. Beiden gemeinsam ist ein recht hoher TiO_2 -Gehalt von ca. 1,5 Gew.-%. Zieht man die Clusteranalyse heran, so ergeben sich trotz zum Teil deutlich geringerer TiO_2 -Gehalte der römischen Keramiken enge Verwandtschaftsbeziehungen mit den Keramiken 11, 16, 26, 27a, 29, 30, 30a und 31; also auch mit den mit P. FLOS gestempelten Sigillaten.

Die Ziegeleitone (Probe-Nr. 39 und 40):

Die beiden Proben unterscheiden sich im wesentlichen durch einen unterschiedlichen Quarzanteil voneinander. Dies drückt sich entsprechend in der chemischen Analyse aus. Sie sind aber deutlich verschieden zu den Töpfertonen 12 und 28 sowie HAL 289.

Die römischen Keramiken (Probe-Nr. 1-6, 8-11, 13-17, 26-27a, 29-38):

Die römischen Keramiken unterscheiden sich chemisch zum Teil sehr deutlich. Dies wird zum einen in der Cluster-Analyse (Abb. 4), zum anderen im K_2O - und Fe_2O_3 -Verteilungsdiagramm (Abb. 2 und 3) sichtbar.

Anhand der Clusteranalyse lassen sich drei Untergruppen unterscheiden:

1. Probe-Nr. 11, 16, 26, 27a, 29, 30, 30a, 31 (+ 5, 27, 38)
2. Probe-Nr. 1, 2, 3, 8, 13, 15, 32, 37 (+ 14, 30b)
3. Probe-Nr. 4, 6, 9, 10, 17, 33, 34, 35, 36

Gruppe 1. zeigt mit den beiden Tonen einen hohen Verwandtschaftsgrad (8 von max. 9 Übereinstimmungen).

Anhand des Gefüges und der mineralogischen Zusammensetzung der Magerung können 5 Untergruppen unterschieden werden:

1. Probe-Nr. 1, 2, 3, 4, 5, 8, 34
2. Probe-Nr. 13, 15, 17, 35, 36
3. Probe-Nr. 26, 30, 30a
4. Probe-Nr. 27, 27a⁷⁹²
5. Probe-Nr. 9, 10, 11, 37

Vorläufig ohne Zuordnung bleiben die Probe-Nr. 6, 14, 16, 29, 30b, 31, 32, 33, 38.

Brennbedingungen

Viele der untersuchten Keramiken sind oxidierend gebrannt (s. Dünnschliffanalyse) oder sogar zweimal (oxidierend und reduzierend) gebrannt. Einige Scherben zeigen erhebliche Mengen an Schwindungsrissen parallel zur Keramikoberfläche oder unregelmäßig verteilte, eckige Porenräume. Das Grobkorn ist z. T. randlich angeschmolzen oder zumindest etwas angegriffen. Die ehemalige Tonsubstanz ist oft nur geringfügig gesintert. Eine Schmelzbildung mit ausgeprägten Glasschlieren wurde nicht erreicht.

Die Töpfertone (Probe-Nr. 12 und 28):

Führt man an beiden Tonen Brennversuche durch, so treten ab ca. 600°C keine merklichen Unterschiede in den Röntgenaufnahmen zutage. Es gibt daher kaum eine Möglichkeit, zu entscheiden, welcher Ton für welche Keramik benutzt wurde, wenn man davon ausgeht, daß die beiden in Haltern gefundenen Tonproben auch tatsächlich die Töpfertone der Keramiken waren. Als einzige denkbare Unterscheidungsmöglichkeit haben sich die in vielen Proben und im Ton Probe-Nr. 12 auftretenden Diatomeen erwiesen.

Die römischen Keramiken (Probe-Nr. 1-11, 13-17, 26-27a, 29-38):

Die Brennbedingungen der römischen Keramiken unterscheiden sich untereinander erheblich. So gibt es Scherben, die noch Illit, andere, die schon Cristobalit und/oder Mullit aufweisen. Hieraus werden im folgenden drei Temperaturbereiche abgeleitet:

1. Illit-Führung: Probe-Nr. 4, 6, 13, 30a, 30b. Da alle genannten Proben Diatomeen enthalten (Tab. 5), wird die Probe-Nr. 12 als Töpferton angenommen. Daraus leitet sich eine Brenntemperatur zwischen 600° und ca. 850°C ab.
2. ohne Illit, Cristobalit und Mullit: Probe-Nr. 1, 7, 8, 26, 29, 37, 38. Als Ausgangston diente möglicherweise Probe-Nr. 12 für die Scherben 1, 26, 29, 37, 38. Probe-Nr. 8 wurde vielleicht mit dem Ton Probe-Nr. 28 hergestellt. Die Brenntemperatur lag also zwischen 900° und 1000°C.
3. mit Cristobalit und/oder Mullit: 10, 14, 16, 17, 33, 35, 36. Die Scherben 10, 14, 17, 35 und 36 enthalten wiederum Diatomeen, weshalb Ton 12 zugrundegelegt wird. Für die Probe-Nr. 16 und 33 wird Probe-Nr. 28 als Töpferton angenommen. Alle Keramiken wurden demnach höher als 1000°C gebrannt, wobei sich aus der relativen Peakhöhe von Cristobalit und Mullit wiederum eine Reihung bezüglich zunehmender Brenntemperatur ableiten läßt: 14 < (33 < 16) < 10 < 35 < 36 < 17. Vergleicht man die Diffraktogramme

792 s. dazu auch KÜHLBORN 1997, 181 ff.

Anhang – Untersuchung germanischer Keramiken aus Haltern, Anreppen und Lünen-Alstedde

Erste mineralogische und geochemische Untersuchungen an germanischen Keramiken sollten zur Bildung einer Referenzgruppe führen. Die Methodik hierzu ist im vorhergehenden Beitrag⁷⁹³ ausführlich erläutert.

Probe-Nr.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
18	69,84	16,11	6,23	0,04	1,48	1,27	1,34	3,00	0,69
19	71,79	15,43	5,85	0,04	1,01	1,10	1,11	3,00	0,66
20	66,44	19,50	6,65	0,07	0,94	0,67	1,36	2,48	1,89
21	73,10	15,12	6,21	0,03	1,30	0,66	0,66	2,13	0,79

Tabelle 1a Hauptelementanalysen germanischer Keramiken aus Anreppen.

Probe-Nr.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
22	72,47	15,28	6,76	0,06	0,96	0,60	1,07	2,13	0,68
23	70,69	15,77	5,86	0,05	1,39	0,79	1,48	3,26	0,73

Tabelle 1b Hauptelementanalysen germanischer Keramiken aus Haltern.

Probe-Nr.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂
24	76,11	13,66	5,66	0,05	1,06	0,48	0,49	1,74	0,76
25	74,31	14,63	6,00	0,05	1,19	0,54	0,60	1,92	0,76

Tabelle 1c Hauptelementanalysen germanischer Keramiken aus Lünen-Alstedde.

	Haltern n=2	Anreppen n=4	Lünen-Alstedde n=2
SiO ₂ %	71,58	70,29	75,21
Al ₂ O ₃ %	15,53	16,54	14,15
Fe ₂ O ₃ %	6,31	6,24	5,83
MnO %	0,06	0,04	0,05
MgO %	1,18	1,18	1,13
CaO %	0,70	0,93	0,51
K ₂ O %	2,70	2,65	1,83
TiO ₂ %	0,71	1,00	0,76

Tabelle 2 Mittelwerte der untersuchten germanischen Keramiken.

793 s. S. 251 ff.

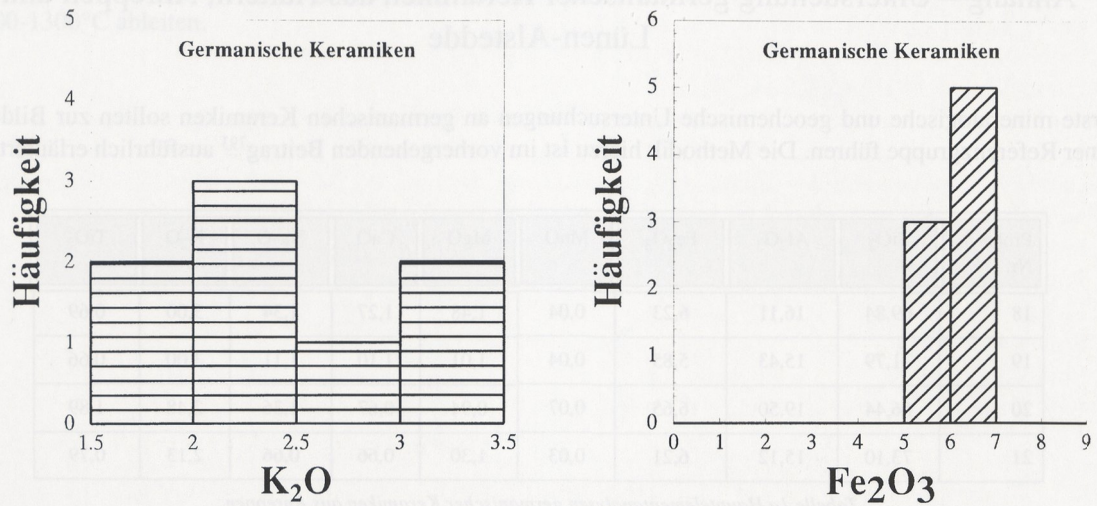


Abb. 1 Histogramme der K_2O - und Fe_2O_3 -Anteile der untersuchten germanischen Keramiken von Haltern, Anreppen und Lünen-Alstedde.

Die K_2O -Gehalte der germanischen Keramiken streuen zwischen 1,5 und 3 Gew.-% (Abb. 1, links). Ihre Fe_2O_3 -Werte (Abb. 1, rechts) liegen in einem eng begrenzten Bereich zwischen 5,66 und 6,76 Gew.-%. Die Phosphorgehalte der germanischen Proben sind alle um den Faktor 10 bis 20 gegenüber den anzunehmenden Ausgangstonen angereichert. Auf eine weitere Aussage hierzu wird bewußt verzichtet.

Probe-Nr.	P_2O_5
18	1,12
19	1,90
20	2,31
21	0,70
22	1,18
23	1,11
24	1,67
25	2,01

Tabelle 3 Absolute Phosphorgehalte der untersuchten germanischen Keramikproben [in Gew.-%].

Im Dendrogramm (Abb. 2) fallen innerhalb der germanischen Keramiken zwei Untergruppen auf:

1. die Probe-Nr. 18, 19 und 23
2. die Probe-Nr. 24, 25, 21 und 22.

Von beiden Untergruppen hebt sich die Probe-Nr. 20 deutlich ab. Betrachtet man die Verteilung der K_2O -Gehalte (Abb. 1), so streuen diese zwischen 1,5 und 3,5 Gew.-%. Bei einer Einzelbetrachtung der K_2O -Analysen (Tab. 1a-c) bestätigt sich die, mittels Clusteranalyse gewählte, Untergruppierung.

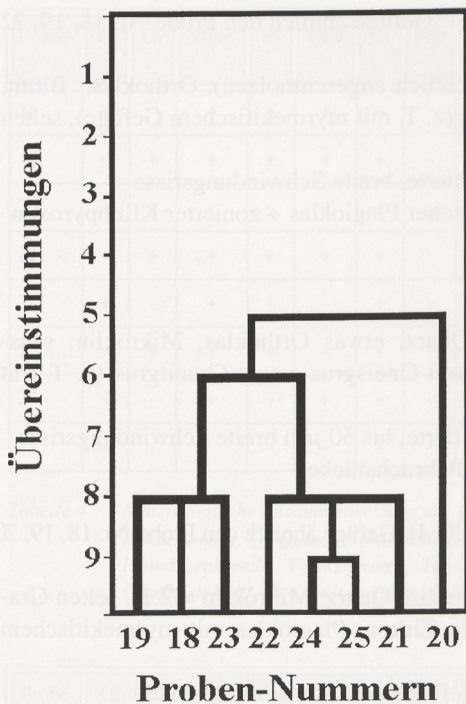


Abb. 2: Clusteranalyse der untersuchten germanischen Keramiken. Verglichen wurde die relative Übereinstimmung der neun Elementoxide SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O und TiO_2 (Ordinate).

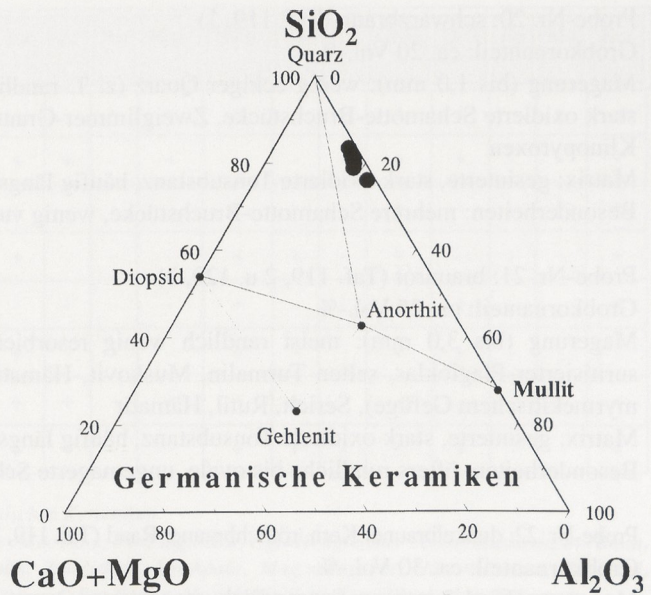


Abb. 3 Lage der untersuchten germanischen Proben im "Keramikdreieck" $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$.

Vergleicht man die Lage der germanischen Keramiken im $\text{SiO}_2 - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3$ -Dreieck mit derjenigen der römischen Keramik, so liegen beide im selben Bereich, dem zwischen SiO_2 -Anorthit-Mullit.

Polarisationsmikroskopische Beobachtungen

Probe-Nr. 18: schwarzbraun

Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 19, 20, 22

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (bis 2,0 mm): viel rundlicher, teilweise randlich resorbierter Quarz, wenig Plagioklas, Mikroklin, Biotit, Sericit, Granit- und Quarzitgrus

Matrix: gesinterte, extrem oxidierte Tonsubstanz, häufig längsorientierte, breite Schwindungsrisse

Besonderheiten: keine Diatomeen

Probe-Nr. 19: schwarzbraun

Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 18, 20, 22

Grobkornanteil: ca. 25 Vol.-%

Magerung (bis 1,6 mm): viel rundlicher, teilweise randlich resorbierter Quarz, wenig Plagioklas, Mikroklin, perthitischer Orthoklas, Biotit, Sericit, Turmalin, Magnetit, Zirkon, Quarzit- und Zweiglimmer-Granitgrus (teilweise mit Einschlüssen von saussuritisiertem Plagioklas), selten Klinopyroxen

Matrix: gesinterte Tonsubstanz, häufig längsorientierte, breite Schwindungsrisse

Besonderheiten: keine Diatomeen; die Klinopyroxen- und ein Teil der Plagioklasbruchstücke (oft randlich resorbiert) sind vulkanischen Ursprungs

Probe-Nr. 20: schwarzbraun (Taf. 119, 1)

Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 18, 19, 22

Grobkornanteil: ca. 20 Vol.-%

Magerung (bis 1,0 mm): wenig eckiger Quarz (z. T. randlich deutlich angeschmolzen), Orthoklas, Biotit, stark oxidierte Schamotte-Bruchstücke, Zweiglimmer-Granitgrus (z. T. mit myrmekitischem Gefüge), selten Klinopyroxen

Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz, häufig längsorientierte, breite Schwindungsrisse

Besonderheiten: mehrere Schamotte-Bruchstücke, wenig vulkanischer Plagioklas + zonierter Klinopyroxen

Probe-Nr. 21: braunrot (Taf. 119, 2 u. 120, 3)

Grobkornanteil: ca. 25 Vol.-%

Magerung (bis 3,0 mm): meist randlich wenig resorbierter Quarz, etwas Orthoklas, Mikroklin, saursuritierter Plagioklas, selten Turmalin, Muskovit, Hämatit, Biotit-Gneisgrus sowie Granitgrus (z. T. mit myrmekitischem Gefüge), Sericit, Rutil, Hämatit

Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz, häufig längsorientierte, bis 50 μ m breite Schwindungsrisse

Besonderheiten: öfters rundliche bis ovale, ungemagerte Schamottebruchstücke

Probe-Nr. 22: dunkelbrauner Kern, rötlichbrauner Rand (Taf. 119, 3 u. 120, 4) Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 18, 19, 20

Grobkornanteil: ca. 30 Vol.-%

Magerung (bis 1,2 mm): meist randlich resorbierter Quarz, Mikroklin (Quarz: Mikroklin = 2:1), selten Granit- und Quarzitgrus, Plagioklas vulkanischen Ursprungs, Biotit, Zirkon, Plagioklas mit myrmekitischem Gefüge (plutonischen Ursprungs), Hämatit

Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz, richtungsloses Gefüge ohne Schwindungsrisse

Besonderheiten: selten kleine, rundliche Schamotte-Einschlüsse

Probe-Nr. 23: schwarzbraun (Taf. 119, 4)

Gefüge ähnlich den Probe-Nr. 18, 19, 20, 22

Grobkornanteil: ca. 25 Vol.-%

Magerung (bis 1 mm): viel randlich resorbierter Quarz und Mikroklin (Q:M=2:1), wenig Orthoklas-Perthit, Plagioklas (teils plutonischen, teils vulkanischen Ursprungs), Turmalin, Granit- und Quarzitgrus

Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz, viele längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: teils eckige, teils deutlich gerundete Quarze

Probe-Nr. 24: umbrabraun (Taf. 119, 5)

Gefüge ähnlich wie Probe-Nr. 25

Grobkornanteil: ca. 5 Vol.-%

Magerung (bis 1,0 mm): viel Quarz, selten Mikroklin, Sericit, Turmalin, Zirkon sowie wenige Keramikscherben, Hämatit, Magnetit, Rutil

Matrix: gesinterte, stark oxidierte Tonsubstanz, selten schmale, längsorientierte Schwindungsrisse

Besonderheiten: mehrere Keramikscherben-Einschlüsse, wenige kleine Holzfasern

Probe-Nr. 25: umbrabraun mit schwarzbraunem Kern (Taf. 119, 6)

Gefüge ähnlich wie Probe-Nr. 24

Grobkornanteil: ca. 5 Vol.-%

Magerung (bis 2,0 mm): wenig Quarz neben Keramikscherben, selten Turmalin, Rutil, Zirkon, Quarzit- und Biotit-Granitgrus

Matrix: gesinterte Matrix, öfters schmale, längsorientierte Schwindungsrisse neben breiten, quer verlaufenden Rissen

Besonderheiten: Keramikbruchanteil macht ca. 50 % der Magerung aus

Probe-Nr.	Q	Or	Mikr.	Pl	Hgl	Bi	Hbl	Pyr	Tur	Zr	Ap	Mag.	Häm.	Ru	Cr	Gr-G	Q-G	Ep	Mu	Ker
18	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-
19	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	-	-
20	+	+	-	-	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	+
21	+	+	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+
22	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
23	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-
24	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+
25	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	+	-	+	+	-	-	+

Tabelle 4 Mineralogische Zusammensetzung der germanischen Keramiken.

Abkürzungen: Q=Quarz, Or=Orthoklas, Mikr.=Mikroclin, Pl=Plagioklas, Hgl=Hellglimmer Sericit/Muskovit, Bi=Biotit, Hbl=Hornblende, Pyr=Pyroxen, Tur=Turmalin, Zr=Zirkon, Ap=Apatit, Mag.=Magnetit, Häm.=Hämatit, Ru=Rutil, Cr=Cristobalit, Gr-G=Granitgrus, Q-G=Quarzitgrus, Ep=Epidot, Mu=Mullit, Ker=Keramikscherben /Schamotte.

Probe-Nr.	Grobkornanteil [Vol.-%]	max. Korngröße der Magerung [mm]	vulkanische Minerale	Diatomeen-Führung	Risse, Poren	Proben mit vergleichbarem Gefüge
18	20	2,0	-	-	+	19, 20, 22, 23
19	25	1,6	+	-	+	18, 20, 22, 23
20	20	1,0	+	-	+	18, 19, 22, 23
21	25	3,0	-	-	+	-
22	30	1,2	+	-	-	18, 19, 20, 23
23	25	1,0	+	-	+	18, 19, 20, 22
24	5	1,0	-	-	+	25
25	5	2,0	-	-	+	24

Tabelle 5 Gefügebetrachtung und Besonderheiten in den untersuchten germanischen Keramiken.

Die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchung erlauben bei den germanischen Keramiken folgende Gruppierung:

Probe-Nr. 18, 19, 20, 22, 23

Probe-Nr. 24, 25

Ohne Zuordnung verbleibt die Probe-Nr. 21

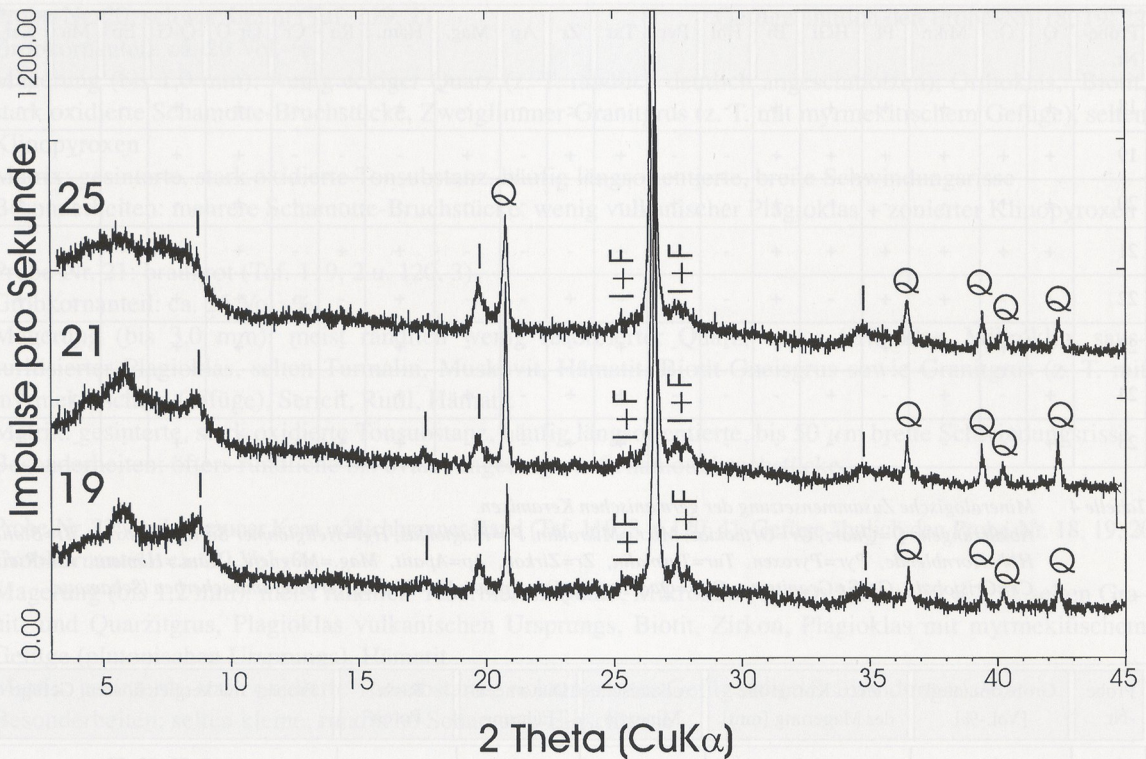


Abb. 4 Pulverdiffraktometer-Aufnahmen der Probe-Nr. 19, 21, 25. Texturaufnahmen. Probe-Nr. 19: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 21: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F); Probe-Nr. 25: Illit (I), Quarz (Q), Feldspat (F).

Röntgenographische Phasenanalyse

Probe-Nr.	rml I/M	Illit/Sericit	Kaolinit	Quarz	Feldspat	Hämatit	Graphit	Cristobalit	Mullit
19	-	+	-	+	+	-	-	-	-
21	-	+	-	+	+	-	-	-	-
25	-	+	-	+	+	-	-	-	-

Tabelle 6 Ergebnisse der pulverdiffraktometrischen Untersuchungen an Texturpräparaten. (rml Illit/Montmorillonit= unregelmäßige Wechsellagerungen von Illit und Montmorillonit).

Die Pulverdiffraktogramme der germanischen Keramiken (Abb. 4) zeigen eine sehr monotone Verteilung von Illit, Quarz und Feldspat. Das Auftreten von Illit belegt eine relativ niedrige Brenntemperatur (s. unten). Ein Vergleich der Peakhöhen läßt auf eine sehr ähnliche mineralogische Zusammensetzung der Keramiken schließen. Dies wird auch durch die petrographische Dünnschliffanalyse und durch die chemische Analyse bestätigt.

Abschließende Interpretation der naturwissenschaftlichen Untersuchungen

Verwandtschaftsbeziehungen der germanischen Keramiken (Probe-Nr. 18 bis 25):

Die germanischen Keramiken sind chemisch recht ähnlich zusammengesetzt. Die Clusteranalyse erlaubt eine Gruppierung in zwei Gruppen. Probe-Nr. 20 unterscheidet sich etwas. Vergleicht man die mineralogische Zusammensetzung, so fällt sie auch hier auf. Sie besitzt als einzige germanische Probe Pyroxen als Magerungsbestandteil. Vom Gefüge her kann man 2 Untergruppen unterscheiden: Probe-Nr. 18-23 mit "hohem" und die Probe-Nr. 24-25 mit "geringem" Grobkornanteil. Die Röntgenaufnahmen der drei untersuchten Probe-Nr. 19, 21 und 25 sehen nahezu identisch aus.

Brennbedingungen der germanischen Keramiken (Probe-Nr. 18 bis 25):

Ihre Brennbedingungen dürften annähernd gleich gewesen sein. Da Illit noch überall vorhanden ist, lagen die Brenntemperaturen zwischen 600° und ca. 850°C (vgl. etwa oben Abb. 13), wenn der Ausgangston Kaolinit enthielt. War der Töpferthon ein Illit-reicher Ton ohne Kaolinitanteil, so kann eine Obergrenze von ca. 850°C angegeben werden, wie man aus Abb. 15 vergleichsweise ersieht. Eine weitere Eingrenzung ist aufgrund fehlender Intensitätsverschiebungen zwischen dem (002)- und (110)-Peak (Abb. 13 und 15) des Illits nicht möglich.

Literatur

- FRECHEN, J. (1972): Petrographische Untersuchungen an römischer Keramik aus Neuss in: P. FILTZINGER, Die römische Keramik aus dem Militärbereich von Novaesium (etwa 25 bis 50 n. Chr.). Novaesium V. Limesforsch. 11 (Berlin 1972) 41-49.
- FREUND, H. (1965): Handbuch der Mikroskopie in der Technik IV: Mikroskopie der Silikate. Teil 3: Mikroskopie in der Sintertechnik, insbesondere der keramischen und pulvermetallurgischen Produkte (Frankfurt/Main 1965).
- HEIMANN, R. B. (1989): Assessing the technology of ancient pottery: The use of ceramic phase diagrams. *Archeomaterials*, 3, 1989, 123-148.
- HEINER, R. (1989): Eine Merkmalanalyse von Siedlungskeramik mit Hilfe faktoren- und clusteranalytischer Verfahren. *Acta Praehist. et Arch.*, 21, 1989, 41-51.
- JASMUND, K. & LAGALY, G. (1993): Tonminerale und Tone. Struktur, Eigenschaften, Anwendung und Einsatz in Industrie und Umwelt (Darmstadt 1993).
- KÜHLBORN, J.-S. (1997): Eine groteske Terrakottafigur aus Anreppen. In: D. BERÈNGER (Hg.) *Arch. Beiträge zur Gesch. Westfalens – Studia Honoraria 2*. Festschr. K. Günther. (Rahden 1997) 181-184
- LASFARGUES, J. & PICON, M. (1982): Die chemischen Untersuchungen in: S. v. SCHNURBEIN, Die unverzierte Terra Sigillata aus Haltern. *BAW* 19 (Münster 1982) 6-21.
- LEE, W. E. & RAINFORTH, W. M. (1994): *Ceramic microstructures. Property control by processing* (London 1994).
- LIESEN, B. (1994): Töpfererschutt des 1. Jahrhunderts n. Chr. aus dem Bereich der Colonia Ulpia Traiana (Schnitt 76/20). *Xantener Ber.* 4 (Köln 1994) 128-140.
- MOMMSEN, H. (1986): *Archäometrie. Neuere naturwissenschaftliche Methoden und Erfolge in der Archäologie* (Stuttgart 1986).
- NOLL, W. (1991): *Alte Keramiken und ihre Pigmente* (Stuttgart 1991).
- SALMANG, H. & SCHOLZE, H. (1983): *Keramik. Teil 2: Keramische Werkstoffe* (Berlin 1983).

- SCHNEIDER, G. (1989): Naturwissenschaftliche Kriterien und Verfahren zur Beschreibung von Keramik. *Acta Praehist. et Arch.* 21, 1989, 7-39.
- SCHNURBEIN, S. V. (1982): Die unverzierte Terra Sigillata aus Haltern. BAW 19 (Münster 1982).
- SMYKATZ-KLOSS, W. (1974): Differential thermal analysis.- Application and results in mineralogy (Berlin 1974).
- STRUNK-LICHTENBERG, G. (1972): Naturwissenschaftliche Untersuchungen an Neußer Keramik in: P. FILTZINGER, Die römische Keramik aus dem Militärbereich von Novaesium (etwa 25 bis 50 n. Chr.). *Novaesium V. Limesforsch.* 11 (Berlin 1972) 38-40.
- TÓTH, T. M. & ENGI, M. (1997): A new cluster analysis method for altered rock samples. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 77, 1997, 439-447.

Dank

Die Autorin dankt besonders Herrn Dr. D. Stöckelmann für die Programmierung der "Clusteranalysen-Software" sowie den Mitarbeitern des Instituts für Mineralogie der WWU Münster, besonders Frau A. Breit, Herrn Dipl.-Min. M. Dülmer, Frau B. Heying, Herrn P. Löbke, Frau C. Middendorf und Frau V. Rapelius für ihre laborative Unterstützung.