

Modellbasierte Clusteranalyse römischer Ziegel aus Worms und Rheinzabern

Hans-Joachim Mucha, Hans-Georg Bartel und Jens Dolata

Zusammenfassung – Chemische Analysen antiker Keramik werden häufig zur Unterstützung archäologischer Interpretation herangezogen. Da die Dimension dieser Daten gewöhnlich hoch ist, sind hierbei multivariate statistische Methoden anzuwenden, zu denen die einfachen modellbasierten Clusteranalysen gehören, über deren erfolgreiche Anwendungen auf römische Ziegel z.B. von MUCHA et al. 2001 und DOLATA et al. 2003 berichtet wurde. Unter Verwendung weiterer Proben von Funden aus Boppard werden hier einfache Modelle in lokal-adaptiver Weise benutzt, wobei nur zwei Herstellungsprovenienzen betrachtet wurden. Nach einem einleitenden geschichtlichen Abriss zur Clusteranalyse römisch-obermanischer Ziegel werden einige Clusteranalysemethoden und Datentransformationen dargestellt, deren Einsatz Fragestellungen zu beantworten erlaubt wie: Ist allein aufgrund der chemischen Zusammensetzung eine Unterscheidung zwischen Heeresziegeleien von Rheinzabern und Worms möglich? In welchem dieser beiden Orte sind die in Boppard gefundenen Ziegel vermutlich hergestellt worden?

Schlüsselwörter – Clusteranalyse, Skalierung, gestempelte Ziegel

Abstract – Chemical analysis of ancient ceramics has been used frequently to support archaeological interpretation. Often the dimensionality in the data has been high. Therefore multivariate statistical techniques like cluster analysis have been applied. Successful applications of simple model-based Gaussian clustering of Roman bricks and tiles have been reported by MUCHA et al. 2001 and DOLATA et al. 2003. Using an extended set of samples of findings excavated in Boppard simple models will be applied in a local adaptive fashion considering two supposed brickyards only. Here, after giving a brief history of clustering Roman bricks and tiles, some cluster analysis models including different data transformations will be applied in order to answer questions like: It is possible to differentiate between the military brickyards of Rheinzabern and Worms on basis of chemical contents only? Do the bricks and tiles found in Boppard belong to the brickyards of Worms or Rheinzabern?

Keywords – Cluster analysis, Scaling, stamped bricks and tiles

Archäologische Fragestellung

Es konnte im letzten Jahrzehnt durch umfangreiche archäologische Materialbearbeitung in Verbindung mit mehr als tausend Röntgenfluoreszenzanalysen gestempelter Ziegel von südwestdeutschen Fundplätzen ein komplexes Organisations- und Chronologiemodell römischer Ziegelproduktion erarbeitet werden (BARTEL et al. 2000, 2001, 2002, 2003, 2004; DOLATA 1994, 1996, 1997-2001, 1998, 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2000c, 2001a, 2001b, 2001c, 2002; DOLATA et al. 1998, 2001a, 2003a, 2003b; MUCHA et al. 1999, 2001, 2003, 2004; WERR 1998). Geochemische Referenzen für bedeutende Ziegeleiorte am Oberrhein (Rheinzabern, Straßburg-Königshofen, Frankfurt-Nied, Groß-Krotzenburg, Worms und zwei bisher unbekannte Herstellungsprovenienzen) wurden dabei definiert. Abbildung 2 zeigt die in den Datenanalysen untersuchten 613 Proben in der ersten Hauptkomponentenebene, die 80% der Variabilität der Daten erklärt und die damit eine sehr hohe Projektionsgüte des 19-dimensionalen Meßraumes aufweist. Hervorgehoben sind die 19 Proben aus Worms, die sich hier schwer von anderen Proben (Rheinzabern) trennen lassen und im Fokus neuer Datenanalysen in dieser Publikation stehen. Die Meßwerte und Beschreibungen der Proben

wurden dokumentiert (DOLATA 2000b). Eine „kontinuierliche“ Darstellung dieser Daten erreicht man durch nichtparametrische Dichteschätzungen (Abb. 3), die man sich so vorstellen kann: um jede Probe werden mit dem Datenpunkt selbst als Zentrum kleine symmetrische „Dichtehügel“ gelegt, über deren Gesamtheit summiert wird. Die entstehende „Berg- und Tallandschaft“ kann nunmehr durch Schnitte zu bestimmten Dichteniveaus zur Visualisierung von Clustern dienen. Abbildung 4 zeigt solche Schnitte und kennzeichnet, wie auch schon in Abbildung 3, die „Berge und Bergrücken“ (Cluster) durch die identifizierten Herstellungsprovenienzen. Die Anwendung und Fortentwicklung mathematisch-statistischer Verfahren ist ein Hauptmerkmal der oben aufgeführten Arbeiten, wobei der Visualisierung der Ergebnisse mit dem Ziel, diese aus archäologischer Sicht bestmöglich zu verstehen, besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die Auswertung der von Chemikern, Mineralogen und Werkstoffwissenschaftlern gelieferten Produktdaten antiker Ziegel (im vorliegenden Fall 19 gemessene Gehalte chemischer Haupt- bzw. Spurenelemente je Probe, siehe Tabelle 1) im Sinne archäologischer Interpretation und Verwendung als neu hinzugewonnene historische Quelle ist Absicht der hier dargestellten Zusammenarbeit.



Abb. 1 Ziegel (*later*) der *legio XXII Primigenia* (Flörsheimer Gruppe, Boppard Typ 1 [LEG \blacktriangledown IIXX]),
Inv.: Boppard ZS 185 = LDA Koblenz 66/234, MP: FM97-048
Nr. 451 = Analyse H861.

Anlass für die vorliegende Untersuchung ist eine Vergrößerung der Menge chemisch analysierter Proben durch 47 weitere, die von Ziegeln des Kastellbades von Boppard am Mittelrhein genommenen wurden (Tabelle 1). In den 1960er Jahren wurde das Badegebäude dieses spätromischen Kastellplatzes vom Amt Koblenz der Archäologischen Denkmalpflege Rheinland-Pfalz in der heutigen St. Severus-Kirche vollständig ausgegraben, wobei 384 gestempelte Ziegel gefunden wurden. Bis auf ein späteres Stück mit einem Stempel der *milites Menapii* tragen alle weiteren Ziegel Stempel der *legio XXII Primigenia* aus der so genannten Flörsheimer Gruppe (Abb. 1). Für die Militärarchäologie des 4. Jahrhunderts n.Chr. besitzen die Ziegelstempel von Boppard große Bedeutung, da es sich um das bislang einzig bekannte größere Primärbauensemble mit diesen speziellen Ziegeln handelt. Das Fundensemble von Boppard ist hinsichtlich des Beschaffungs- und Verbauungszusammenhanges

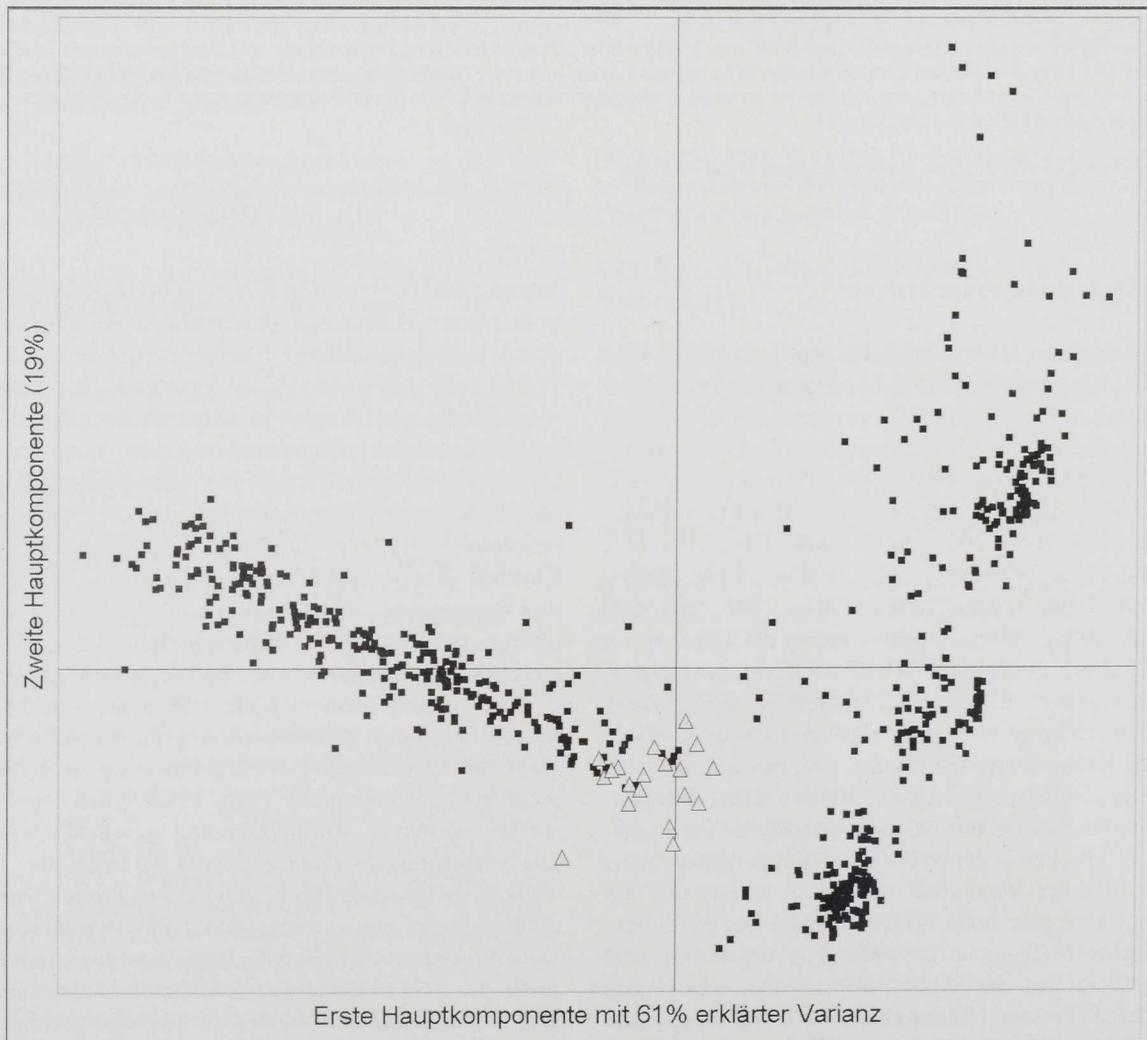


Abb. 2 Hauptkomponentenplot der 613 Ziegel aus früheren Untersuchungen (die 19 Proben aus der Herstellungsprovenienz Worms sind hell hervorgehoben).

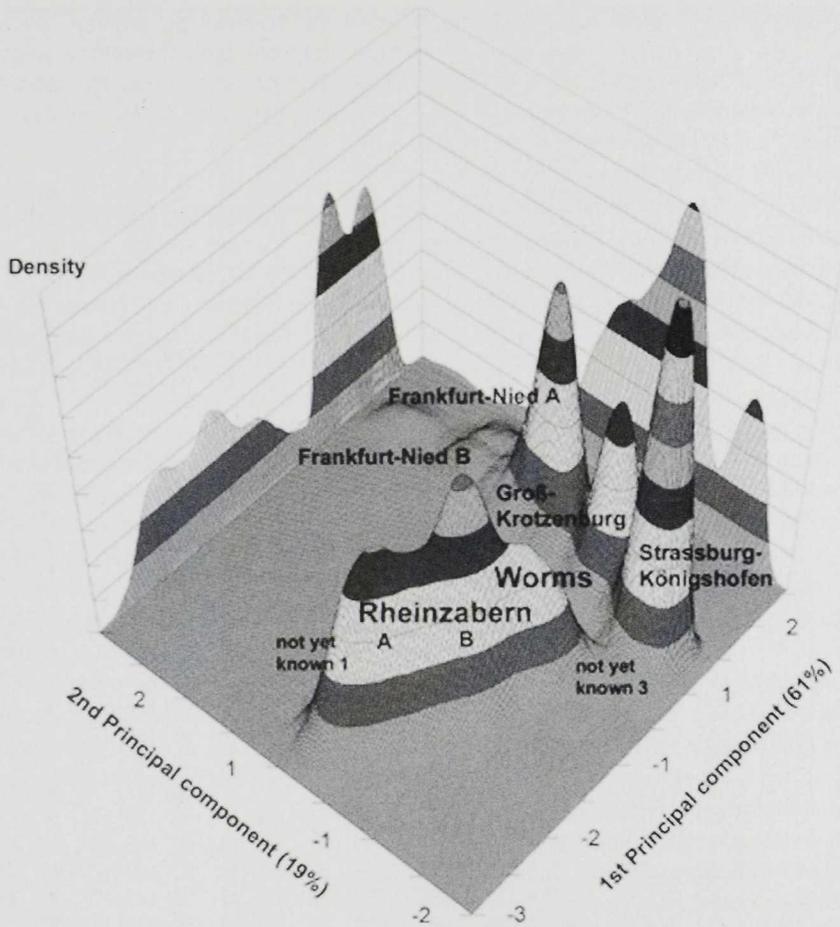
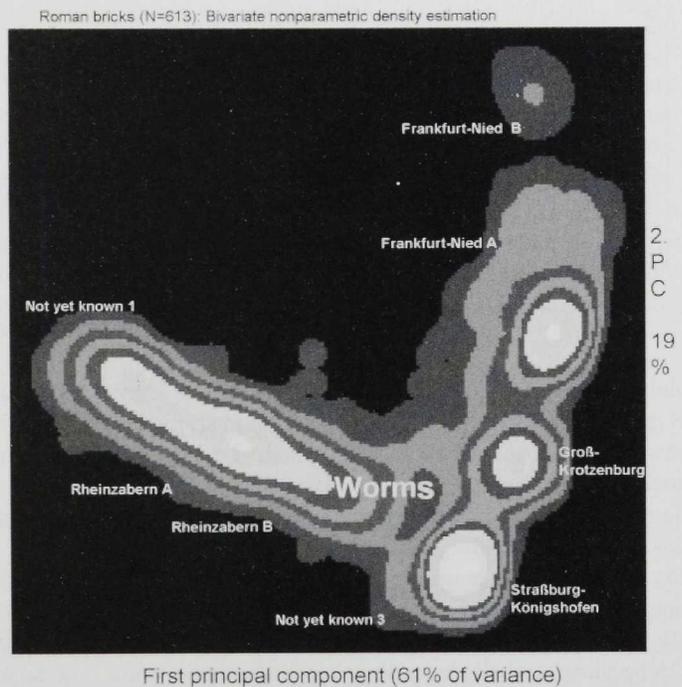


Abb. 3 Nichtparametrische uni- und bivariate Dichteschätzungen in der ersten Hauptkomponentenebene (siehe Abb. 2) mit Kennzeichnung der bestätigten oder gefundenen Herstellungsprovenienzen.

Abb. 4

Schnitte auf verschiedenen Dichteniveaus der nichtparametrischen bivariaten Dichteschätzung aus Abb. 3 mit Kennzeichnung der bestätigten oder gefundenen Herstellungsprovenienzen.



Probe	SiO2	TiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	V	Cr	Ni	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
H883	67,98	0,625	14,19	4,735	0,0578	2,369	6,040	0,848	3,025	69	98	44	72	131	171	35	279	15	495
H838	70,42	0,609	12,78	4,314	0,0582	1,918	5,581	0,980	3,067	60	84	41	79	120	154	35	308	12	430
H848	68,12	0,644	13,74	4,679	0,0578	2,144	6,525	0,867	3,015	76	89	45	75	121	131	35	295	15	466
H863	66,61	0,636	13,90	4,640	0,0622	2,337	7,641	0,852	3,167	78	100	43	73	137	186	37	288	13	491
H885	67,29	0,632	16,64	3,839	0,0412	2,273	4,978	0,689	3,429	94	102	48	79	175	165	37	229	13	626
H882	67,24	0,656	15,16	5,082	0,0614	2,463	5,204	0,860	3,123	89	103	45	82	150	167	40	283	15	574
H862	66,18	0,659	15,83	5,333	0,0549	2,532	5,238	0,765	3,276	94	105	48	95	158	164	40	280	15	625
H878	66,61	0,640	15,76	5,297	0,0561	2,497	4,961	0,758	3,237	98	104	48	83	156	158	40	264	16	618
H857	66,49	0,640	15,82	5,244	0,0593	2,488	4,932	0,673	3,513	94	105	47	223	165	165	38	270	14	625
H858	68,10	0,651	14,17	4,931	0,0613	2,341	5,666	0,895	3,054	77	96	45	72	138	166	37	294	14	534
H847	68,59	0,639	13,95	4,729	0,0558	2,192	5,788	0,875	3,021	66	93	43	74	134	152	36	306	13	455
H842	70,17	0,625	13,14	4,420	0,0593	2,004	5,493	0,940	2,970	68	100	41	66	130	160	36	314	14	468
H874	69,00	0,615	14,59	4,912	0,0596	2,225	4,549	0,824	3,086	78	105	45	94	144	157	37	279	15	529
H880	68,86	0,656	15,53	4,198	0,0424	1,780	5,415	0,642	2,760	103	99	49	250	127	164	34	178	11	409
H870	66,27	0,606	12,89	4,341	0,0731	3,055	9,046	0,941	2,801	75	91	40	66	117	191	34	291	13	469
H849	69,63	0,646	13,61	4,657	0,0593	2,025	5,276	0,893	3,013	70	90	43	72	131	148	35	305	13	489
H873	65,94	0,645	15,63	5,265	0,0608	2,504	5,658	0,759	3,357	92	108	48	103	151	175	39	278	16	597
H851	65,68	0,635	16,06	3,837	0,0516	2,471	6,617	0,733	3,415	94	101	45	74	179	206	37	248	15	609
H877	66,67	0,606	13,25	4,449	0,0650	2,516	8,401	0,934	2,926	75	91	41	130	128	199	36	287	14	522
H846	67,85	0,614	13,26	4,479	0,0618	2,173	7,193	0,887	3,094	75	90	43	71	115	170	36	290	14	440
H865	65,72	0,641	15,66	5,159	0,0548	2,767	5,767	0,763	3,314	92	101	46	97	158	161	39	271	15	580
H855	65,43	0,646	14,32	4,977	0,0605	2,650	7,986	0,886	2,858	71	98	43	71	137	190	39	292	16	528
H875	66,14	0,659	16,51	5,522	0,0584	2,604	4,364	0,784	3,243	104	106	50	88	169	160	41	266	16	632
H868	67,14	0,637	14,05	4,821	0,0564	2,679	6,636	0,919	2,901	81	104	45	78	137	184	37	289	15	590
H867	66,74	0,630	13,68	4,638	0,0643	2,661	7,667	0,910	2,874	78	96	42	69	134	190	36	293	13	491
H850	67,99	0,636	16,65	3,842	0,0431	1,979	3,438	0,570	3,980	105	91	48	86	186	179	37	254	14	629
H856	68,69	0,667	15,00	5,090	0,0544	2,380	4,019	0,897	3,039	80	106	46	76	148	152	36	300	15	528
H872	66,63	0,649	15,74	5,107	0,0511	2,582	4,953	0,783	3,338	81	107	47	106	157	175	39	275	16	624
H839	69,23	0,616	13,13	4,430	0,0674	2,059	6,229	0,946	3,009	61	89	43	66	128	171	36	304	14	495
H852	62,77	0,589	15,29	3,781	0,0719	2,235	9,771	0,692	3,346	71	87	44	86	165	251	40	251	15	588
H871	66,36	0,655	15,82	5,352	0,0574	2,619	5,019	0,777	3,205	89	107	48	93	160	178	41	286	16	633
H866	67,12	0,668	14,56	5,042	0,0569	2,677	5,979	0,835	2,922	83	107	47	83	143	177	37	306	15	523
H864	68,57	0,640	13,99	4,732	0,0535	2,267	5,648	0,870	3,088	82	90	44	89	133	153	37	288	14	507
H840	67,57	0,646	14,78	4,986	0,0633	2,195	5,550	0,865	3,153	80	90	46	80	144	155	40	284	15	548
H843	68,96	0,620	13,12	4,436	0,0626	2,027	6,555	0,940	3,103	75	87	41	70	122	166	36	304	12	483
H836	66,27	0,657	16,18	5,466	0,0617	2,390	4,647	0,798	3,272	73	106	48	90	162	162	42	270	17	636
H860	66,98	0,670	14,69	5,066	0,0595	2,656	5,850	0,845	3,027	65	109	46	77	144	171	36	303	14	509
H844	70,20	0,624	13,10	4,434	0,0580	1,929	5,528	0,917	3,024	78	88	43	68	127	153	37	318	13	464
H881	66,37	0,676	15,25	5,278	0,0615	2,458	5,287	0,765	3,721	67	111	49	81	114	167	39	290	16	519
H869	67,40	0,639	14,26	4,809	0,0672	2,596	6,168	0,902	2,971	77	99	45	81	141	176	37	288	15	520
H841	67,34	0,628	14,25	4,771	0,0673	2,091	6,476	0,864	3,111	63	86	46	73	126	172	39	284	15	522
H859	66,49	0,651	15,94	5,321	0,0563	2,800	4,580	0,762	3,271	90	107	48	90	163	167	40	277	16	624
H861	66,51	0,632	15,74	5,150	0,0580	2,529	5,167	0,754	3,338	91	107	47	84	163	176	39	270	16	630
H884	67,14	0,634	15,91	3,787	0,0485	2,273	5,653	0,654	3,609	80	94	46	81	173	191	37	261	15	604
H854	67,43	0,598	15,45	4,749	0,0502	2,406	4,172	1,048	3,852	78	84	45	79	156	157	37	254	15	554
H845	69,59	0,606	13,03	4,317	0,0577	1,991	6,195	0,940	3,105	65	99	44	62	126	144	34	305	12	450
H853	68,31	0,594	14,07	3,526	0,0637	2,308	6,569	0,888	3,078	59	86	43	76	153	212	33	256	13	538

Tab. 1 Chemische Zusammensetzung der 47 neuen Proben aus Boppard (Angaben: Masse-% für die Oxide, ppm für die Spurenelemente). Messungen G. Schneider, Berlin.

einheitlich. Alle Ziegelstempel wurden aus dem Hypokaustunterboden und den Hypokaustpfeilern sowie einem Abwasserkanal des nach der Befundanalyse einphasigen Badegebäudes geborgen, das keine umfassenden Reparaturen mit baulicher Änderung des Raumprogramms erfahren hat. Die erwähnten, für die Beprobung ausgewählten 47 Ziegel repräsentieren das gesamte Spektrum von Baukeramiktypen (Hypokaustplatten unterschiedlicher Formate, *tubuli* und Dachplatten) und alle bekannten Ziegelstempeltypen.

Die hier untersuchten Daten bestehen aus insgesamt 258 Proben. Davon waren 192 „Rheinabern“ und 19 „Worms“ zugeordnet worden (DOLATA 2000b), hinzu kommen die 47 Proben aus Boppard (Tabelle 1). Abbildung 5 zeigt die Projektion der Proben in die erste Hauptkomponentenebene. Die hauptsächlich auf dieser Datenbasis zu klärenden Fragestellungen sind: Gehören die Bopparder Ziegel zu den bisherigen Wormsreferenzen? Läßt sich eine stabile Zerlegung der untersuchten Ziegel in die Provenienzklassen „Worms“

und „Rheinzabern“ allein nach deren chemischer Zusammensetzung auffinden? Sind eventuell festzustellende „Fehleinordnungen“ sinnvoll archäologisch zu deuten, oder erschweren sie die Interpretation?

Einfache modellbasierte Clusteranalyse

Multivariate Gaußsche Modelle beruhen auf dem Normalverteilungsmodell und haben sich in vielen praktischen Anwendungen zur Clusteranalyse als geeignet erwiesen (PAPAGEORGIOU et al. 2001). Es wird hierbei von der Annahme ausgegangen, daß die zu einer gesuchten Klasse C_α (die einer Provenienz, Herstellungstechnologie oder Epoche entspricht) gehörenden Beobachtungen \mathbf{x}_i (Proben) um den Erwartungswertvektor (Mittelwert) ihrer Klasse zufällig mit normalverteilten Fehlern schwanken. Das Modell solcher Fehler wird durch die Kovarianzmatrix je Klasse als Parameter beschrieben (BARTEL et al. 2002). Ein einfaches Modell ist die Annahme einer sphärischen Kovarianzstruktur in den Klassen, wobei jede Klasse unterschiedliches Volumen haben kann (MUCHA 1992; BANFIELD & RAFTERY 1993). In der Clusteranalyse ist dann das Zielkriterium zu opti-

$$V_k = \sum_{\alpha=1}^k \omega_\alpha \log \operatorname{tr} \left(\frac{\mathbf{W}_\alpha}{\omega_\alpha} \right) \rightarrow \text{Minimum}$$

ren. Es ist unter der Modellannahme hergeleitet, daß $\Sigma_\alpha = \sigma_\alpha^2 \mathbf{I}$ für die Kovarianzmatrizen in den einzelnen Klassen C_α (oder kurz: α), $\alpha = 1, 2, \dots, k$, gilt. Dabei sind die Streuungen σ_α^2 spezifisch für jede einzelne von ihnen.

$$\mathbf{W}_\alpha = \sum_{i \in C_\alpha} (\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}_\alpha)(\mathbf{x}_i - \bar{\mathbf{x}}_\alpha)^T$$

bedeuten hierbei die Produktsummenmatrix für Cluster C_α und ω_α die ihm zugeordnete Kardinalzahl (Probenanzahl). Mit $\bar{\mathbf{x}}_\alpha$ ist der Mittelwertvektor im Cluster C_α bezeichnet. Das obige Kriterium ist nicht skaleninvariant, d.h. Daten, die in verschiedenen Skalen gemessen worden sind (wie im vorliegenden Anwendungsfall) sind vor der Clusteranalyse geeignet zu transformieren, um die Werte in den verschiedenen Merkmalen (hier Element- und Oxidgehalte) untereinander vergleichbar zu machen.

Danach soll für die transformierten Daten das obige Kriterium mit unterschiedlichen Methoden der Clusteranalyse optimiert werden.

Geeignete Datentransformationen

Damit die Variablen (Merkmale), die einen großen Wertebereich überspannen (wie hier Angaben in ppm und Masse-%, siehe Tabelle 1), untereinander vergleichbar werden, kann die folgende einfache Transformation erfolgen (UNDERHILL & PEISACH 1985; MUCHA 1992; BARTEL et al. (2002); DOLATA et al. 2003a): jeder originale Meßwert wird durch den Mittelwert des zugehörigen Merkmals dividiert. Das entspricht tatsächlich einer spezifischen Gewichtung der Merkmale nach dem Variationskoeffizienten. Tabelle 2 zeigt drei ausgewählte Proben (siehe auch Abb. 1, Abb. 7, Abb. 8) im Original und nach der Transformation. Alle Merkmale haben nach der Transformation denselben Mittelwert (= 1) und eine Standardabweichung, die dem Variationskoeffizienten der Originalwerte proportional ist. In Tabelle 2 wurden hohe Standardabweichungen der transformierten Merkmale durch Fettdruck hervorgehoben.

Eine weitere einfache Datentransformation besteht darin, daß jeder originale Meßwert durch die über alle Cluster gemittelte Standardabweichung des zugehörigen Merkmals dividiert wird. Im Unterschied zur oben genannten Transformation sind die Schätzwerte für die gemittelten Standardabweichungen vorab nicht bekannt. Deshalb werden sie direkt und automatisch in einem (adaptiven) Clusterverfahren in iterativer Weise geschätzt (MUCHA 1992; MUCHA et al. 2001).

Den transformierten Merkmalen wird in den nun folgenden Cluster- und Hauptkomponentenanalysen eine bedeutendere Rolle zukommen als denjenigen mit geringer Standardabweichung. Diese Bewertung der Merkmale ist lokal-adaptiv (bezogen auf den konkreten Datensatz aus den vermuteten zwei Provenienzklassen „Worms“ und „Rheinzabern“) und weicht von der früheren Bewertung der Merkmale auf Basis der 613 Proben ab (BARTEL et al. 2002). Man erwartet durch die lokal-adaptive Vorgehensweise eine bessere Trennbarkeit der Provenienzklassen, die sonst nicht gut (Abb. 2) und mit Standardmethoden noch nicht gelingt (Abb. 5).

Clusteranalysemethoden und Ergebnisse

Das obengenannte Zielkriterium kann mit verschiedenen Clusteranalysemethoden optimiert werden. Abb. 6 zeigt das Dendrogramm des modifizierten hierarchischen WARD-Verfahrens (BARTEL et al. 2002) nach der Datentransformation „Wert dividiert durch Mittelwert“. Ersichtlich und entsprechend gekennzeichnet ist ein homogenes Cluster „Worms“ und ein

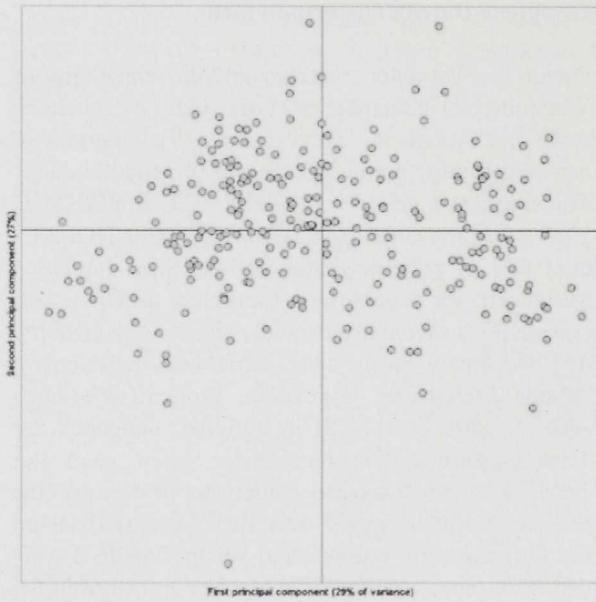


Abb. 5
Hauptkomponentenplot aller 258 Proben der neuen multi-variaten statistischen Analyse auf Basis der Korrelationsmatrix.

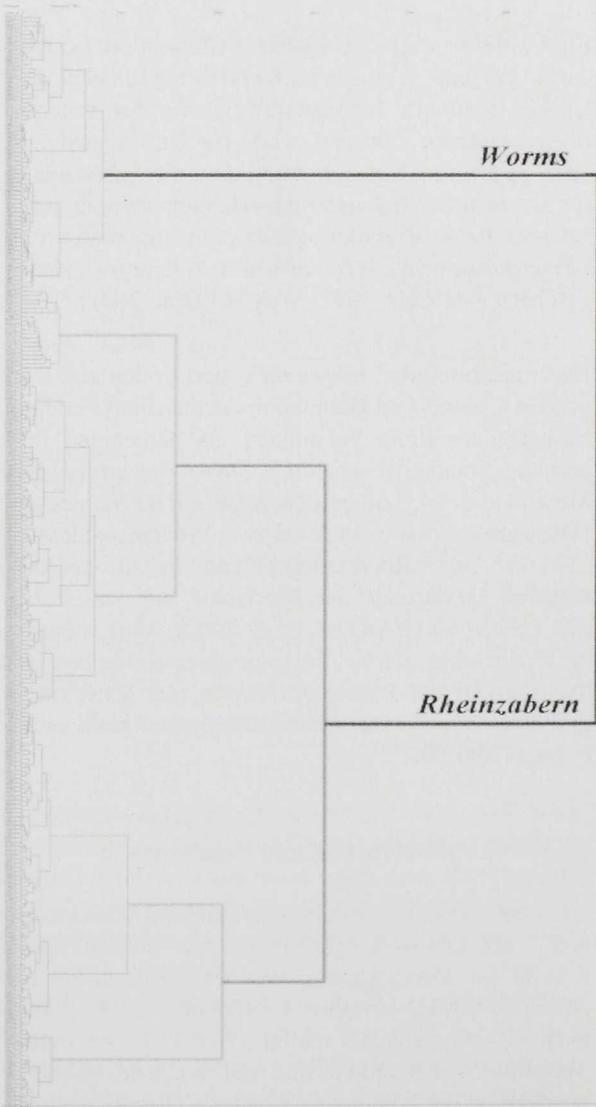
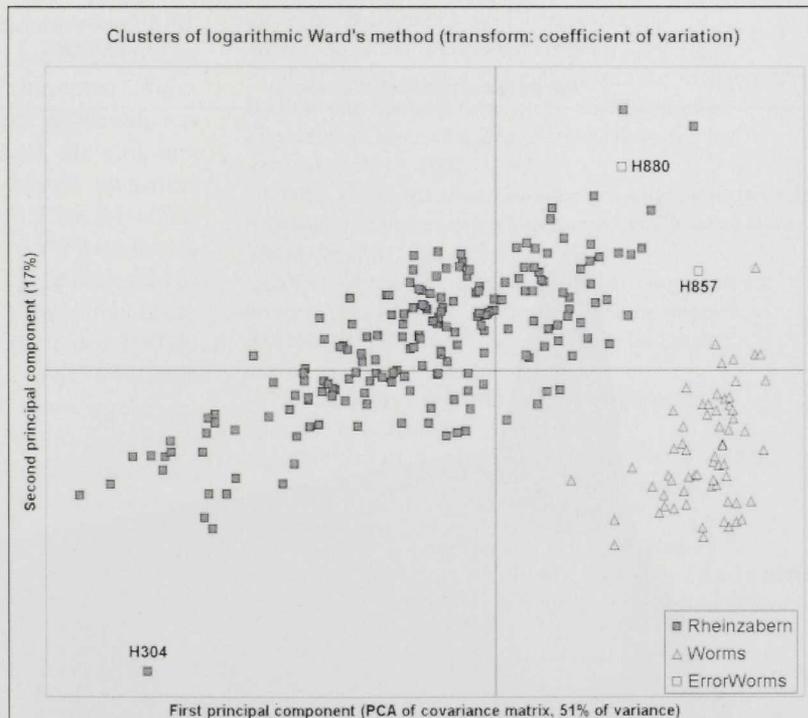


Abb. 6
Dendrogramm des logarithmischen Ward-Verfahrens auf Basis der transformierten Daten (Variationskoeffizienten-Transformation).

Originalwerte ausgewählter Proben und Mittelwerte und Variationskoeffizienten aller 258 Proben																			
Name	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	V	Cr	Ni	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
H861	66,5	0,63	15,74	5,15	0,06	2,53	5,17	0,75	3,34	91	107	47	84	163	176	39	270	16	630
H304	61,2	0,43	9,00	3,38	0,12	2,45	19,34	0,95	2,90	62	63	26	42	84	472	24	169	10	354
H880	68,9	0,66	15,53	4,20	0,04	1,78	5,42	0,64	2,76	103	99	49	250	127	164	34	178	11	409
Mittel	63,4	0,64	15,17	4,87	0,07	2,42	9,42	0,75	3,03	84,9	100	51	96,1	141	246	30,5	172	15,1	468
Variationsk.	6,6	6,4	8,1	9,9	28,0	10,6	41,9	14,4	10,3	17,4	13,7	14,1	21,6	11,1	29,6	15,2	36,8	24,8	16,9
Transformierte Werte ausgewählter Proben und neue Mittelwerte und Standardabweichungen																			
Name	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	V	Cr	Ni	Zn	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Ba
H861	1,05	0,98	1,04	1,06	0,80	1,04	0,55	1,00	1,10	1,07	1,07	0,92	0,87	1,15	0,72	1,28	1,57	1,06	1,35
H304	0,97	0,66	0,59	0,69	1,64	1,01	2,05	1,26	0,96	0,73	0,63	0,51	0,44	0,59	1,92	0,79	0,98	0,66	0,76
H880	1,09	1,02	1,02	0,86	0,58	0,73	0,57	0,65	0,91	1,21	0,99	0,96	2,60	0,90	0,67	1,12	1,03	0,73	0,87
Mittel	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Stand. Abw.	0,07	0,06	0,08	0,10	0,28	0,11	0,42	0,14	0,10	0,17	0,14	0,14	0,22	0,11	0,30	0,15	0,37	0,25	0,17

Tab. 2 Die Wirkung der Datentransformation „Originalwert dividiert durch zugehörigen Mittelwert“ am Beispiel von drei ausgewählten Proben.

Abb. 7 Hauptkomponentenplot aller 258 Proben auf Basis der Kovarianzmatrix nach erfolgter Transformation der Variablen auf Mittelwert 1 und Standardabweichung proportional zum Variationskoeffizienten der Originalwerte.



großes Cluster „Rheinzabern“. Diese beiden Cluster und die zugehörigen Proben sind in Abbildung 7 in einer Projektion dargestellt. Die Punktwolke erscheint nun wesentlich differenzierter als in Abbildung 5 und ist in mindestens zwei gut getrennte Cluster aufgeteilt. Zwei ursprünglich archäologisch „Worms“ zugeordnete Proben (H880, H857) werden hier in das Cluster „Rheinzabern“ eingeordnet.

Partitionierende Methoden, wie z.B. das *k*-Means Verfahren, optimieren das Zielkriterium durch Aus-

tausch der Proben zwischen den Clustern (MUCHA 1992). Sie erfordern die Vorgabe einer Startpartition, d.h. die vorgegebene Einteilung der zu betrachtenden Objekte auf eine bestimmte Anzahl *k* von Cluster. Das adaptive modifizierte *k*-Means Verfahren (MUCHA et al. 2001) transformiert automatisch die Merkmale und bewertet (gewichtet) sie gleichzeitig im Sinne ihrer „Eignung“ zur Trennung der Cluster. Abbildung 8 zeigt die Cluster und die zugehörigen Proben in der ersten Hauptkomponentenebene, die auf der Grundlage der Kovarianzmatrix dieser gewichteten Merkmale

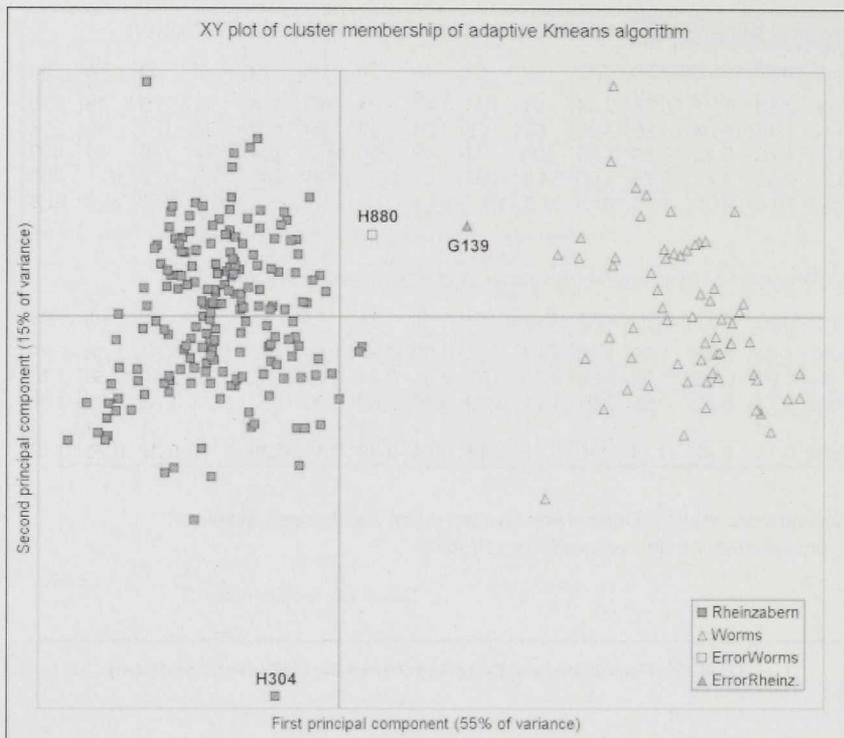


Abb. 8
Hauptkomponentenplot aller 258 Proben auf Basis der adaptiven Kovarianzmatrix.

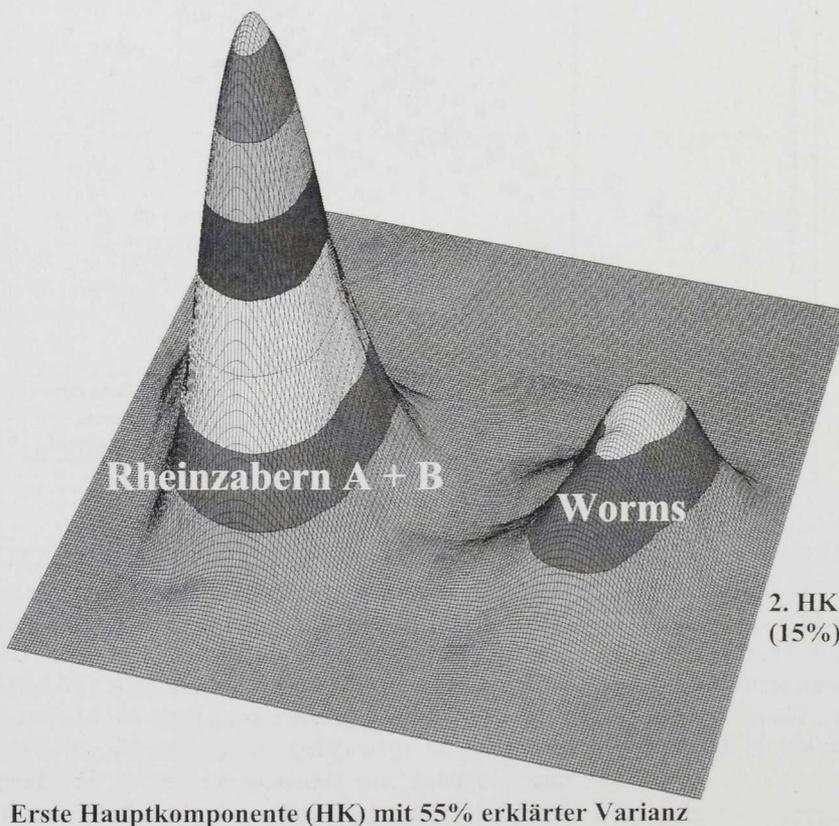


Abb. 9
Nichtparametrische bivariate Dichteschätzung in der ersten Ebene der adaptiven Hauptkomponenten (siehe Abb. 8) mit ersichtlicher Anhäufung der Daten in zwei „Bergen“ (Cluster), die den Herstellungsprovenienzen Rheinzabern bzw. Worms entsprechen.

erhalten wird. Im Vergleich zu Abbildung 5 ist die Punktwolke der 258 Proben hier ersichtlich klar in zwei Cluster geteilt. Nur die Proben H880 (wie bereits in Abb. 7) und G139 werden entgegen der ursprünglichen archäologischen Zuordnung „fehlerhaft“ gruppiert. Bei H304 handelt es sich um ein Ausreißerprobe (siehe auch Abb. 7 und Tab. 2). Abbildung 9 zeigt eine „kontinuierliche“ Variante der Abbildung 8.

Archäologische Schlußfolgerungen

Von den 47 analysierten Proben gestempelter Ziegel aus Boppard sind 46 geochemisch homogen und können mit den bisher untersuchten Wormser Heeresziegeleiprodukten verbunden werden. Ohne Ausnahme gehören alle unterschiedlichen Stempeltypen (nach der revidierten Typentafel: Boppard Typ 1-6) zu den Wormsreferenzen.

Die Probe H880 stellt eine Ausnahme dar (Abb. 6; Abb. 8). Sie kann Rheinzabern zugeordnet werden. Bei dem analysierten Fundstück handelt es sich um einen *tubulus* ohne Ziegelstempel, der als Reparaturziegel identifiziert werden kann. *Tubuli* sind Kaminziegel, die aufgrund thermischer Beanspruchung nach Jahren intensiver Nutzung ausgetauscht werden müssen. Eine Reparatur der Unterbodenheizung des Bopparder Kastellbades erfolgte offenbar zu einer Zeit, als Reparaturziegel vor Ort nicht mehr vorhanden und aus Worms nicht nachlieferbar waren, da die dortige Ziegelei den Betrieb vermutlich bereits eingestellt hatte. Unter Valentinian I. (364-375) wurde die längst stillgelegte Ziegelei des 1. Jahrhunderts in Rheinzabern wieder eröffnet. Es ist durchaus möglich, daß Truppenkörper des spätantiken Limitanheeres wie die *milites Menapii* auch den *tubulus* H880 fertigten und nach Boppard lieferten.

Die Probe H857 liegt in geochemischer Hinsicht etwas abseits der mit Sicherheit Worms zugewiesenen Ziegelreferenzen. Aufgrund der bekannten Inhomogenität grob- und baukeramischer Produkte (DOLATA & WERR 1998; WERR 1998) ergibt sich hieraus kein archäologisches Deutungsproblem. Auch eine eventuelle Zuordnung des Spezialziegels G139 (Hypokaustsäule) zu den Referenzen von Worms, anstelle von Rheinzabern, würde keine Schwierigkeit der archäologischen Interpretation bedeuten. Der damit verbundene Hinweis, daß solche aufwendigen Spezialziegel möglicherweise noch in spätantiker Zeit Verwendung fanden, ist sogar überaus interessant.

Die um den Bopparder Fundbestand vermehrte Wormsreferenz (66 Proben) erlaubt eine auf den jetzt gewonnen Erkenntnissen aufbauende und weiterführende

statistische Untersuchung, die alle zur Verfügung stehenden spätrömischen Baukeramikproben aus den Ziegeleien von Rheinzabern, Worms und der noch nicht lokalisierten Herstellungsprovenienz „Unbekannt 1“ behandeln soll.

Literatur

- BANFIELD, J.D. & A.E. RAFTERY (1993) Model-Based Gaussian and non-Gaussian Clustering. *Biometrics* 49, 1993, 803-821.
- BARTEL, H.-G., DOLATA, J. & H.-J. MUCHA (2000) Klassifikation gestempelter römischer Ziegel aus Obergermanien. *Archäometrie und Denkmalpflege* 2000, 86-88.
- BARTEL, H.-G., MUCHA, H.-J. & J. DOLATA (2001) Parametrische und nichtparametrische Identifikationsmethoden, dargestellt am Beispiel römischer Baukeramik aus Obergermanien. *Archäometrie und Denkmalpflege* 2001, 104-106.
- (2002) Automatische Klassifikation in der Archäometrie: Berliner und Mainzer Arbeiten zu oberrheinischen Ziegeleien in römischer Zeit. *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 19, 2002, 31-62.
- (2003) Über eine Modifikation eines graphentheoretisch basierten partitionierenden Verfahrens der Clusteranalyse. *Match* 48, 2003, 209-223.
- (2004) Über Identifikationsmethoden, dargestellt am Beispiel römischer Baukeramik aus Obergermanien. *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 19, im Druck.
- DOLATA, J. (1994) Custos Castelli Figlinarum. *Mainzer Arch. Zeitschr.* 1, 1994, 67-72.
- (1996) Hin zu einer archäologischen Nutzenanwendung geochemischer Analytik römischer Baukeramik. *Mainzer Arch. Zeitschr.* 3, 1996, 105-125.
- (1997-2001) Inventarisierung und Forschung zu archäologischem Quellenmaterial: Römische Ziegelstempel aus Mainz - Erreichte und Perspektiven. *Denkmalpflege in Rheinland-Pfalz* 52-56, 1997-2001, 488-494.
- (1998) Archäologische und archäometrische Untersuchung an römischer Baukeramik und Ziegelstempeln. *Archäometrie und Denkmalpflege* 1998, 93-95.
- (1999a) Ingenieurtechnische Untersuchung an antiken Ziegelsteinen aus Mainz: Interdisziplinäre Erforschung römischer Baukeramik und Ziegelstempel. *Ziegel Zeitschrift* 6, 1999, 421-423.
- (1999b) Referenzmaterialien für die Herstellungsprovenienzen römischer Baukeramik im nördlichen Obergermanien. *Mainzer Arch. Zeitschr.* 6, im Druck.
- (2000a) Antike Ziegelsteingeschichten aus Mogontiacum. *Mainz* 1, 2000, 95-100.

- (2000b) Römische Ziegelstempel aus Mainz und dem nördlichen Obergermanien - Archäologische und archäometrische Untersuchungen zu chronologischem und baugeschichtlichem Quellenmaterial. Inauguraldissertation, Johann Wolfgang Goethe-Universität, Frankfurt/M. 2000.
- (2000c) Keine Heeresziegelei der legio XIV Gemina in Hockheim. *Archäometrie und Denkmalpflege*, 2000, 89-91.
- (2001a) Römische Ziegelstempel der sogenannten Flörsheimer Gruppe. *Flörsheimer Geschichtshefte* 3, 2001, 4-7.
- (2001b) Die spätantike Heeresziegelei von Worms – Ein Beitrag zur Geschichte der legio XXII Primigenia aufgrund ihrer Ziegelstempel. *Der Wormsgau* 20, 2001, 43-77.
- (2001c) Gestempelte Ziegel als Referenzmaterial für Rheinzabern und Worms. *Saalburg Jahrbuch* 51, 2001, 41-53, 78.
- (2002) Zum Fund eines spätantiken Militärziegelstempels in einer römischen Villa in Weinsheim, Kreis Bad Kreuznach. *Archäologie in Rheinland-Pfalz*, 2002, 107-109.
- DOLATA, J. & U. WERR (1998) Wie gleich ist derselbe? - Homogenität eines römischen Ziegels und Aussagegrenzen geochemischer Analytik aufgrund von Messtechnik und Materialvarianz. *Mainzer Arch. Zeitschr.* 5, im Druck.
- DOLATA, J., MUCHA, H.-J. & H.-G. BARTEL (2001a) Untersuchungsperspektiven zum kombinierten archäologischen und materialanalytischen Nachweis römischer Ziegelherstellung in Mainz und Worms. *Archäometrie und Denkmalpflege* 2001, 107-109.
- (2003a) Archäologische und mathematisch-statistische Neuordnung der Orte römischer Baukeramikherstellung im nördlichen Obergermanien. *Xantener Berichte* 13, 2003, 381-409.
- DOLATA, J., BARTEL, H.-G. & H.-J. MUCHA (2003b) Statistische Untersuchung zur Aufklärung der Binnenstruktur römischer Ziegelproduktion von Frankfurt-Nied. *Archäometrie und Denkmalpflege* 2003, 40-42.
- MUCHA, H.-J. (1992) Clusteranalyse mit Mikrocomputern. Berlin 1992.
- MUCHA, H.-J., DOLATA, J. & H.-G. BARTEL (1999) Klassifikation von 613 Proben als Referenzen für die Herstellungsprovenienzen römischer Baukeramik im nördlichen Obergermanien. *Mainzer Arch. Zeitschr.* 6, im Druck.
- (2001) Validation of Results of Cluster Analysis of Roman Bricks and Tiles. In: GAUL, W. & G. RITTER (eds.) *Classification, Automation, and New Media*. Berlin 2001, 471-478.
- MUCHA, H.-J., BARTEL, H.-G. & J. DOLATA (2003) Core-Based Clustering Techniques: Methods, Software, and Applications. In: SCHADER, M., GAUL, W. & M. VICHI (eds.) *Between Data Science and Applied Data Analysis*. Berlin 2003, 74-82.
- (2004) Model-based Cluster Analysis of Roman Bricks and Tiles from Worms and Rheinzabern. In: WEIHS, C. & E.-E. DOBERKAT (eds.) *Classification: The Ubiquitous Challenge*. Berlin, im Druck.
- PAPAGEORGIOU, I., BAXTER, M.J. & M.A. CAU (2001) Model-based cluster analysis of artefact compositional data. *Archaeometry* 43 (4), 2001, 571-588.
- UNDERHILL, L.G. & M. PEISACH (1985) Correspondence analysis and its application in multielement trace analysis. *J. Trace and microprobe techniques* 3 (1&2), 1985, 41-65.
- WERR, U. (1998) Grenzen der Aussagekraft chemischer Analytik für römische Baukeramik. *Archäometrie und Denkmalpflege*, 1998, 96-98.

Dipl.-Math. Hans-Joachim Mucha
WIAS
Mohrenstraße 39
D-10117 Berlin
muchaj@wias-berlin.de

PD Dr. Hans-Georg Bartel
Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Chemie
Brook-Taylor-Straße 2
D-12489 Berlin

Dr. Jens Dolata
Landesamt für Denkmalpflege Rheinland-Pfalz
Abt. Archäologie
Amt Mainz
Große Langgasse 29
D-55116 Mainz
Dolata@em.uni-frankfurt.de