Berliner Beiträge zur Archäometrie	Band 13	Seite 205-220	1995

Untersuchung von Wachsobjekten mit Hilfe der Pyrolyse Gaschromatographie

OLIVER HAHN, Köln

1. Zusammenfassung

Mit Hilfe der Methode der Pyrolyse-Gaschromatographie wurden Wachssiegel untersucht. Zur Identifizierung der Zusammensetzung der Proben wurden zusätzliche Chromatogramme von Vergleichssubstanzen (Bienenwachs, Wachs-Harzmischungen) aufgenommen. Es zeigt sich, daß Bienenwachs offensichtlich den Haupteil der organischen Komponenten bildet.

2. Kulturgeschichte des Wachses

Der Gebrauch von Bienenwachs ist seit der Antike bekannt, wobei Ägypten als Herkunftsland der Bienenzucht bezeichnet wird /1/. Älteste geschichtliche Zeugnisse über die Biene sind die durch Hieroglyphen ausgedrückten Namen zweier Könige der ersten Dynastie Mena und Teta. Dargestellt sind das Ideogramm der Biene für *suten* (König) und die Abbildung der Honigbiene auf dem Sarkophag des Königs Mena /2/.

Die Erhaltung des Körpers war in der mythisch betonten ägyptische Religion Voraussetzung für ein Weiterleben nach dem irdischen Tod. Daraus erklärt sich der aufwendige Totenkult der Mumifizierung. Zur Einbalsamierung wurden Mund, Ohren, Nase und Augen mit Wachs oder Harz getränkten Stoffstücken verschlossen /3/. Ferner finden sich in den mumifizierten Körpern Figuren aus Wachs als Amulette /4/. Das Wort Mumie (persischer Herkunft) leitet sich ab aus der ursprünglichen Bedeutung für bitumöses Wachs, in der arabischen Entlehnung steht *mumijah* für Stoffe wachsähnlichen Verhaltens /5/.

Seit frühesten Zeiten wurden Wachsfiguren für magische Handlungen verwendet: ein Zauberspruch übertrug die Eigenschaften lebender Personen auf die Wachsfiguren. Ein anderer Brauch vollzog religiöse Riten an der Wachsfigur, durch die der Tote Nutzen haben sollte /6/.

Ägyptische Wandmalereien lassen vermuten, daß Wachs zur Vervollkommnung des Glanzes der Farben diente. Es wird angenommen, daß Wachs entweder gelöst aufgetragen oder die Wand mit einer erhitzen Pfanne erwärmt wurde. Die so behandelte Stelle wurde mit Wachs eingerieben und nach dem Bemalen nochmals erwärmt, damit Malerei und Verputz das Wachs völlig aufnahmen /7/. Für den Anstrich oberägyptischer Katakombenwände mit rotem Eisenoxid wird als Bindemittel eine Wachs-Seife vermutet /8/.

Aus dem 1. Jahrhundert n. Chr. stammen die ältesten, erhaltenen Zeugnisse der antiken Wachsmalerei: die Mumienportraits, *enkaustisch* und nach *Temperatechnik* auf Holztafeln gemalte Bildnisse, die am Kopfende von Mumien eingelassen waren /9/. Die meisten Mumienportraits stammen aus El Faiyum.

In Babylonien wurden zahme Bienen wahrscheinlich seit dem 8. Jahrhundert v. Chr. gehalten /10/. Aus dem Alten Testament geht hervor, daß den Phoinikern Erzguß und Wachsausschmelzverfahren bekannt waren. In einem mesopotamischen Text aus dem 1. Jahrhundert v. Chr. wird ein Erzschmied erwähnt, der für die Anfertigung einer Arbeit Wachs erhielt /11/.

Die Kenntnisse über die Wachsverarbeitung gelangten wahrscheinlich durch Kolonisten von Ägypten nach Griechenland, dort sind künstliche Bienenkörbe erst nach 700 v. Chr. bekannt. Die griechische Bienenzucht war Ausgangspunkt für die Bienenzucht und den Wachshandel in andere Länder (Italien/Europa). Zur Zeit Columellas (um Christi Geb.) erreichte die römische Bienenzucht und die Wachsherstellung eine hohe Stufe, zu jedem Hof gehörte ein Bienenstand /1/.

Der Bronzeguß wurde von den Ägyptern über griechisch-mykenische Kleinbronzewerkstätten übernommen: ein frei modelliertes Wachsmodell wird mit einem Mantel aus Ton umgeben, wobei gleichzeitig Kanäle für das Eingießen des Metalls und das Entweichen von Luft angebracht werden. Beim Brennen der Form wird das Wachs herausgeschmolzen, in die so entstandene Negativform wird das Metall gegossen. Da nach dem Erkalten die Form zerschlagen werden muß, ist nur ein Abguß möglich. Seit dem 6. Jahrhundert v. Chr. wurde eine bedeutende Technik des Erzgusses mit Hilfe des Wachsausschmelzverfahrens *aus verlorener Form* geschaffen, die beispielsweise durch die Darstellung eines Pferdes aus dem 5. Jahrhundert v. Chr. bezeugt wird /12/.

Die Verwendung des Wachses zu kultischen Zwecken wird von lateinischen Schriftstellern erwähnt /13/. Die früheste Verwendung von Totenmasken wird in das 5. Jahrhundert datiert. Die römischen Adeligen, die kurulische Ämter bekleideten, ließen durch Wachsabgußtechnik Totenmasken, *imagines,* als Zeichen für ihre hohe Abstammung anfertigen. Diese *imagines* wurden bei Bestattungsfeierlichkeiten von den Nachkommen getragen /14/.

Wachs diente jedoch nicht nur zur Herstellung plastischer Werke. In seiner *Naturalis historia* unterscheidet Plinius d. Ä. mindestens drei Arten der *Enkaustik.* Zunächst wird die Arbeit auf Holz mit dem *Cauterium,* einem stäbchenartigen Metallinstrument zur Entnahme der erhitzen Wachsfarben sowie zum Auftrag und deren Vermalung beschrieben. Weiterhin wird die Malerei auf Elfenbein mit dem *Cestrum* erwähnt: hierbei handelt es sich um eine spitze Graviernadel zum Aufnehmen und Einarbeiten heißflüssigen Wachses in eingeritze Linien. Schließlich wird die Pinseltechnik mit Schiffswänden als Untergrund angeführt /15/. Offensichtlich muß zwischen Schiffsmalerei und farbigem Schiffsanstrich unterschieden werden.

Zudem scheint Wachs in der Malerei nicht nur enkaustisch verwendet worden zu sein. Nach dem zweiten Rezept des Dioskurides wird Wachs durch Behandlung mit einer Salzlake in eine Emulsion, *Punisches Wachs,* überführt. Das nachträgliche Einbrennen der Emulsion wird als *Wachs-Tempera-Enkaustik* bezeichnet /16/.

Unter *Ganosis* wird nach Plinius d. Ä. und Vitruv ein Verfahren verstanden, mit dem durch Auftragung eines Wachsfirnisses die Oberflächen von Wandmalereien geschützt werden und Marmorstatuen eine glänzende Oberfläche erhalten. Hierbei wurde mit einem Pinsel die geglättete, trockene Wand mit heißflüssigem, mit etwas Öl vermischten *Punischem Wachs* überstrichen, die so behandelte Oberfläche bis zum Schwitzen des Wachses erwärmt und poliert. Plinius d. Ä. und Vitruv sprechen vom *Punischen Wachs*

nur im Zusammenhang mit dem Überzug von Wandanstrichen, ferner von medizinischer Verwendung, nicht jedoch im Zusammenhang mit der Malerei /17/. Es wird unterschieden zwischen der *Ganosis* als Technik des Anstreichens und der *Enkaustik* als Technik der Malerei.

Da die Weichheit des Wachses eine gute Ritzbarkeit zuläßt, wurde das Material in großem Umfang als Beschreibstoff verwendet. Zu diesem Zweck wurde es als Schicht auf einen tafelförmigen Träger aus Holz oder Elfenbein aufgebracht. Mit Hilfe eines Griffels aus Eisen, Bronze, Knochen oder Elfenbein konnten diese Tafeln beschrieben, durch Einebnen die Beschriftung gelöscht werden. Das älteste literarische Zeugnis über die Verwendung von Wachs als Beschreibstoff stammt offenbar aus dem 5. Jahrhundert v. Chr.: die Übermittlung einer geheimen Botschaft des Demaratos an seine Landsleute /18/.

Aus frühchristlicher Zeit gilt das Epigramm des Agathias als literarisches Zeugnis der Verwendung von Wachsfarben für Ikonen /19/. Die ältesten, erhaltenen christlichen Ikonen stammen aus dem 6. Jahrhundert. Im Stil und in der Gleichheit der Wachsfarbentechnik werden der Anschluß an antike Traditionen deutlich: Träger der gestalterischen Kontinuität ist die enkaustische Verwendung des Farbenbindemittels Wachs. *Dem Farbenbindemittel Wachs war offenbar die maltechnische Aufgabe zugefallen, die antike Kunst der Tafelbildmalerei auf Holz über Mumienportraits und Ikonen mit der christlichen Malerei zu verbinden.* Als Beispiel seien hier die Petrus-Ikonen des Sinai-Klosters angeführt /1/.

Im Mittelalter erfuhr vor allem der Gebrauch von Wachskerzen neben Öllampen als Lichtquelle in Kirchen, Schlössern und Privathäusern eine bedeutende Ausweitung. Daneben war Bienenwachs in den Ländern nördlich der Alpen der gebräuchlichste Siegelstoff des Mittelalters.

Zur Herstellung der ältesten Wachssiegel wurde ungefärbtes, teilweise vollständig reines Bienenwachs verwendet. Aufgrund der Empfindlichkeit gegenüber Wärme sowie der geringen Konsistenz des reinen Bienenwachses sollte mit Zusätzen von Harz, Weißpech und ähnlichen Stoffen eine größere Festigkeit erzielt werden. Bereits bei den Karolingern sind derartige Mischungen nachgewiesen /20/. Um den Siegelstoff geschmeidiger und zum Abdrücken geeigneter zu machen, wurde Terpentin oder Leinöl zugesetzt.

Seit der ersten Hälfte des 12. Jahrhunderts wurde das Siegelwachs häufig gefärbt. Im späteren Mittelalter waren vor allen Dingen rot und grün gefärbte Siegel verbreitet. Aus den erhaltenen Rezepten geht hervor, daß rotes Siegelwachs durch Beimischung von Zinnober oder Mennige, grünes durch Beimischung von Grünspan erhalten wurde. Weiterhin sind sogenannte Malthasiegel unter Verwendung rotbrauner Boluserde bekannt /21/. Feste Regeln für den Gebrauch der einzelnen Wachsfarben haben im frühen Mittelalter offenbar nicht bestanden. Erst gegen Ende des 14. Jahrhunderts wurde vielfach der Gebrauch des roten Siegelwachses als besondere, von deutschen Kaisern und Königen verliehene Vergünstigung betrachtet. In Frankreich hingegen wurden grüne bzw. ungefärbte Siegel an bedeutende Urkunden gehängt. Das Siegelwachs kam im 18. Jahrhundert als fertiger Artikel in den Handel /22/, ob dies bereits in früheren Zeiten der Fall war, ist zu untersuchen.

Auch wenn die Kleinbronze erst in der Renaissance als Gattung wiederentdeckt wurde, ist der Bronzeguß *aus verlorener Form* das gesamte Mittelalter hindurch in großem Umfang praktiziert worden.

Der Wunsch, das einmal angefertigte Modell zu erhalten, um mehrere Abgüsse davon herstellen zu können, führte zu einem weiteren komplizierteren Verfahren. Nachweisbar ist es zum erstem Mal bei Pier Jacopo Alari Bonacolsi, genannt Antico, der diese Technik seit den achziger Jahren des 15. Jahrhunderts beherrschte. Vom Urmodell aus Wachs wurde eine zerlegbare Negativform aus Gips hergestellt. Ausgehend von diesen Gipsformen konnten dann beliebig viele Abgüsse hergestellt werden. Antico setzte die Teilformen sektionsweise zusammen, so daß Kopf, Rumpf und Gliedmaßen noch getrennt blieben. In die angefeuchteten Hohlformen wurde heißes Wachs gegeben, daß an der kalten Form sofort erstarrte. Nach Außgießen des restlichen Wachses kleidete eine dünne Wachsschicht die Formen von innen aus. In den verbleibenden Hohlraum wurde eine flüssige Mischung aus Gips und Sand eingefüllt. Erst nach dem Trocknen dieser Gipsmasse konnten die in Wachs ausgeformten Teile der Figur zum Gußmodell zusammengefügt werden. Nach Anbringung der Guß- und Luftkanäle hielten Eisennägel, in den Kern aus Gips und Sand getrieben, diesen später, nach dem Ausschmelzen des Wachses in der ursprünglichen Position. Erst dann wurde das Modell mit dem Gußmantel aus Gips und Ton umgeben. Beim Brennen des ausgehärteten Gußmantels floß das Wachs durch die vorbereiteten Kanäle hinaus. Anschließend konnte das geschmolzene Metall eingegossen werden /23/.

3. Chemische Zusammensetzung des Bienenwachses

Mit Beginn der klassischen Chemie im 19. Jahrhundert wurden die Wachse, die sich allmählich zu Industrieprodukten entwickelten, näher erforscht. Der „ölige" Charakter des Bienenwaches wurde untersucht und man stellte fest, daß tierische und auch pflanzliche Wachse vorwiegend aus Estern höherer Fettsäuren und Alkoholen bestehen. Für die grobe Zusammensetzung des Bienenwachses werden in der Literatur folgende Werte angegeben:

Wachsester:	70 — 80 %
freie Säuren:	~ 15 %
Paraffine:	10 — 16 %

Als Nebenkomponenten sind Alkene, i-Paraffine, Cholesterylester und Pollenfarbstoffe bekannt /24/. Untersuchungen zeigen, daß sich die Bienenwachssäuren durch einen hohen Anteil an Palmitinsäure auszeichnen und vor allem Ester dieser Säure mit einer homologen Reihe von Wachsalkoholen (C_{24} — C_{32}) den überwiegenden Esteranteil ausmachen, während die längerkettigen Wachssäuren fast ausschließlich im ungebundenen Zustand vorliegen /25/. Eine weitere Besonderheit ist der relativ hohe Gehalt an 14-Hydroxypalmitinsäure.

Bienenwachs und andere tierische bzw. pflanzliche Wachse bestehen aus gesättigten Kohlenwasserstoffketten und Estern, infolgedessen sind sie chemisch recht beständig und unterliegen weniger den Alterungsprozessen als Öle oder natürliche Harze. Eine Unterscheidung von anderen Naturstoffen, beispielsweise durch Bestimmung des Schmelzpunktes, diente in der Vergangenheit zur Identifizierung des Wachses /26/.

Die IR-Spektroskopie eignet sich zur Untersuchung einzelner Wachse, zur Bestimmung der funktionellen Gruppen, ebenso gibt sie Hinweise auf mögliche Zusatzstoffe /27/. Al-

lerdings ist die Identifikation einzelner Substanzklassen aus einem Gemisch schwierig, da die Banden einzelner Komponenten von den Banden der Hauptkomponenten überlagert werden können.

Die Methode der Gaschromatographie trennt die Substanzgemische in einzelne Fraktionen auf, die anhand von Vergleichssubstanzen identifiziert werden können. Dies setzt jedoch die Verdampfbarkeit der Proben voraus. Wird der Gaschromatographie eine Pyrolyse vorgeschaltet, werden hochmolekulare schwerverdampfbare Substanzen zu festgelegten Bedingungen in kleinere Einheiten zerlegt, die leichter einer Gaschromatographie unterworfen werden können /28/.

4. Experimenteller Teil

Alle Proben werden bei einer Temperatur von 610 °C pyrolysiert. Hierfür wird eine geringe Menge der Substanz (etwa 10 bis 30 mg) vollständig mit einem Draht umgeben (Curie-Temperatur der Legierung: 610 °C), diese Drahtschlaufe wird in ein Quarzglasröhrchen eingebracht und in den Pyrolysator eingeführt. Durch elektromagnetische Strahlung werden Draht und Probe exakt auf 610 °C erhitzt, um reproduzierbare Pyrolysen (Pyrolysedauer = 1.5 s) zu gewährleisten.

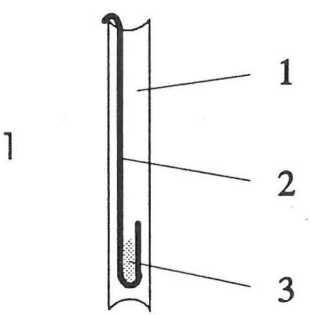


Abb. 1: Probenpräparation (1), Quarzglasrohr (2), Draht (3), Probe

Für das Experiment steht eine Kieselgelsäule Vinyl Silicone Gum Phase 50 m x 0.32 mm x 1.05 μm zur Verfügung. Die Apparatur ist mit einem Flammen-Ionisations-Detektor, FID, ausgestattet. Die Säulentemperatur wird für 3 min auf einer Temperatur von 50 °C gehalten, die Heizrate beträgt 8 °C/min bis zu einer Temperatur von 300 °C. Die Flußgeschwindigkeit des Trägergases Helium beträgt 60 ml/min.

Die erhaltenen Chromatogramme (Zwei- bis Dreifachbestimmung jeder Probe) werden im Bereich einer Retentionszeit von 10 bis 30 min normiert, dabei wird der höchste Peak gleich 10 gesetzt. Für den Vergleich der Chromatogramme werden jeweils die 20 Peaks mit den höchsten Intensitäten herangezogen. Die Abbildung (2) zeigt ein Chromatogramm von Bienenwachs, in der Abbildung (3) ist das normierte Chromatogramm dargestellt.

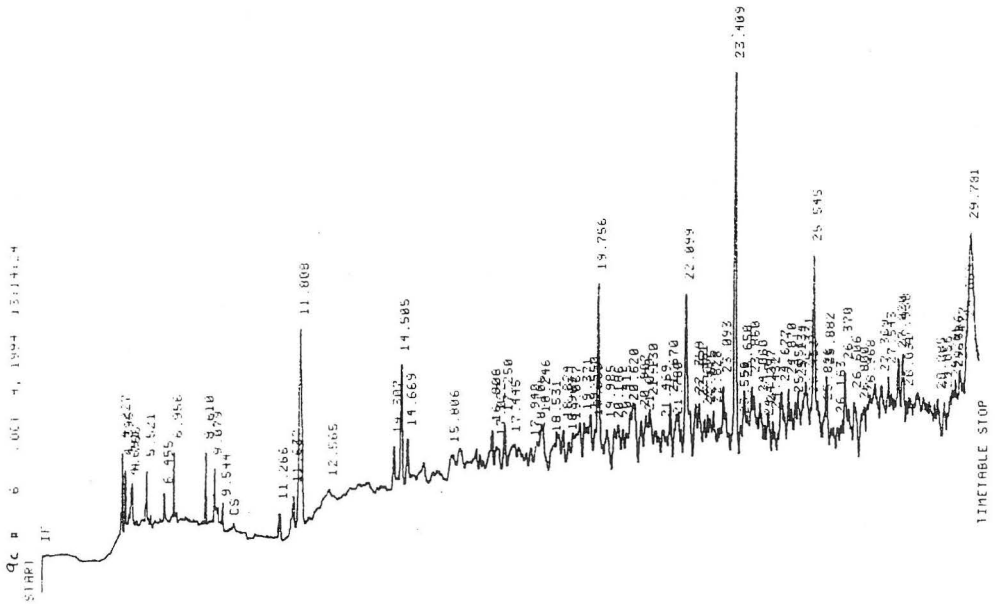


Abb. 2: Chromatogramm von Bienenwachs. Parameter wie im Text beschrieben

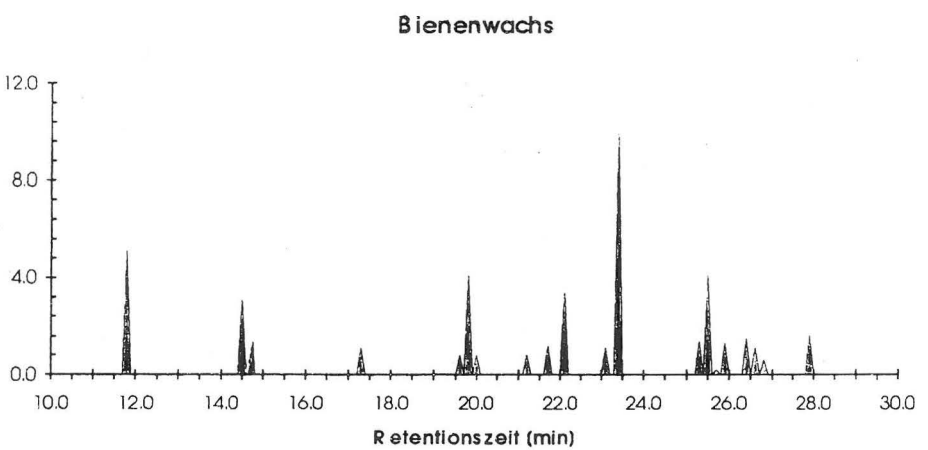


Abb. 3: Normiertes Chromatogramm

Die nachfolgende Tabelle dokumentiert die untersuchten Proben. Ferner sind die mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse, RFA in den Proben nachgewiesenen Metalle angegeben. In der letzten Spalte sind die zur Färbung der Siegel möglicherweise verwendeten Pigmente aufgeführt.

Siegel	Datierung	Chrom.	RFA	Pigment
von . . . zu Wart	1340	Abb. 4	Hg	Zinnober
Maria Theresia Kaiserin Österreich	Mitte 18. Jahrh.	Abb. 5	Hg, Spur Pb	Zinnober Mennige (?)
Nicolaus . . .	1494	Abb. 6	Hg	Zinnober
Kaiser Leopold II	1612	Abb. 7	Spur Hg	Zinnober (?)
Leopold II	1612	Abb. 8	Hg, Pb	Zinnober Mennige
Reichssiegel des Kaisers Leopold II	1790/92	Abb. 9	Hg, Pb	Zinnober Mennige
Universität zu Innsbruck	1675	Abb. 10	Hg, Pb	Zinnober Mennige
Constants Tearales	1440	Abb. 11	Hg, Pb	Zinnober Mennige
Ferdinand Erzherzog von Österreich	1550	Abb. 12	Hg, Pb	Zinnober Mennige
Die deutschen . . . Städte	1600	Abb. 13	Ca ? Zn ?	
Abt Braun ? Rechberg	1417	Abb. 14	Spur Pb	
Franz Marth	1427	Abb. 15	—	
Sigl Lustgarten unv Curn Thurin Beiern	1584	Abb. 16	—	
von Beseich	1432	Abb. 17	Cu	Grünspan
von Ehin	1597	Abb. 18	Cu	Grünspan
Kaiser Maximilian II	1564/76	Abb. 19	Hg, Spur Sb	Zinnober

5. Ergebnisse und Diskussion

In den Abbildungen (4) bis (19) sind die normierten Chromatogramme der einzelnen Siegelproben im Vergleich zu Bienenwachs aufgetragen. Die Übereinstimmung der Chromatogramme der Siegelproben und des Wachses sind unterschiedlich, daher sind die Abbildungen zu drei Gruppen mit abnehmender Ähnlichkeit zusammengefaßt (vergl. Tabelle). Allen Vergleichen gemein ist die Übereinstimmung des Hauptpeaks bei einer Retentionszeit von 23.4 min.

Abb. 4:

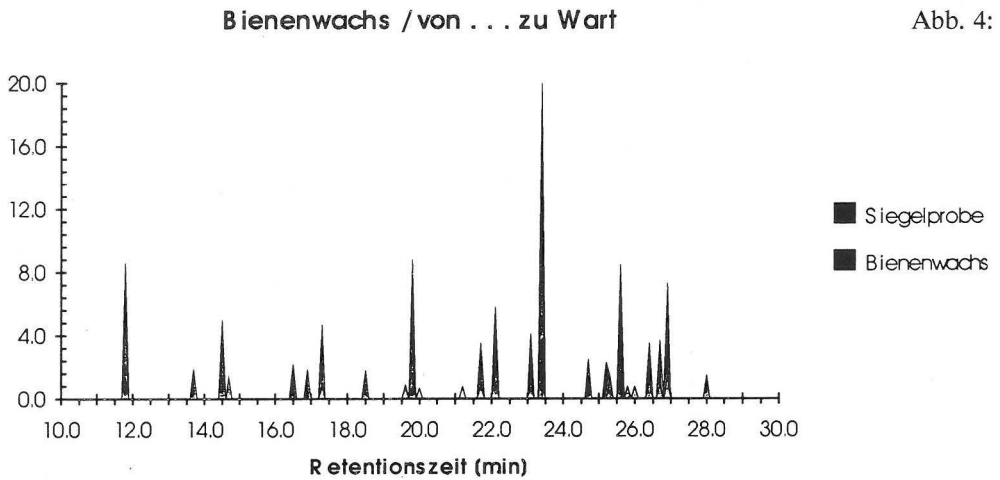


Abb. 5:

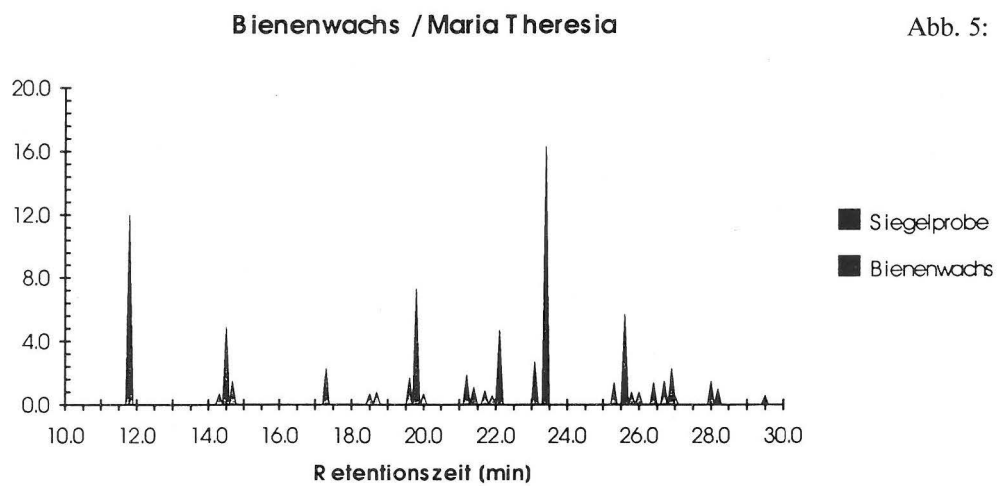
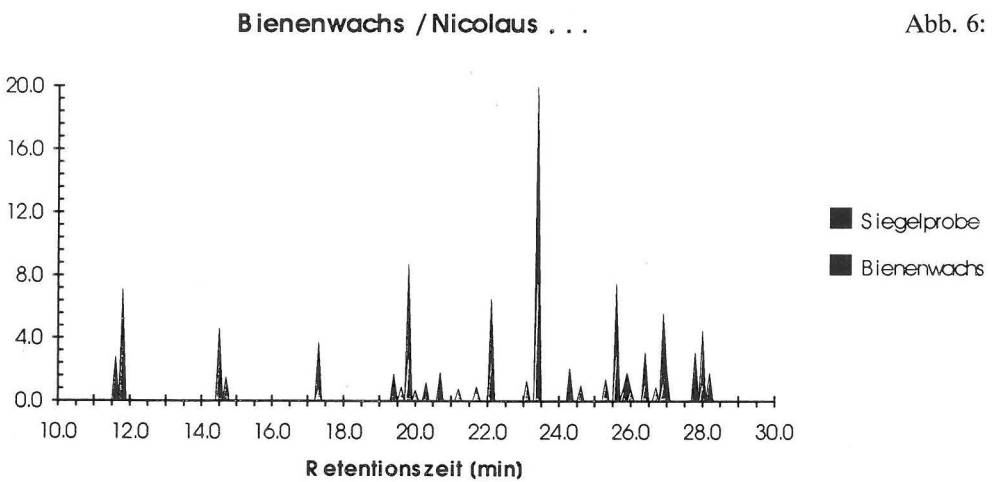


Abb. 6:



Die Abbildungen (4) bis (6) zeigen eine sowohl qualitativ wie auch quantitativ gute Übereinstimmung zwischen den Chromatogrammen von Siegelproben und Bienenwachs. Unter der Annahme, daß die exakte chemische Zusammensetzung von Bienenwachsen verschiedener Herkunft variiert (z.B. durch die Anwesenheit unterschiedlicher Pollenstoffe), kann dieses als Hauptbestandteil der drei oben genannten Siegel eindeutig nachgewiesen werden.

Die nachfolgenden Abbildungen (7) bis (14) illustrieren eine relativ gute Übereinstimmung zwischen Objekt und Bienenwachs. Bienenwachs bildet auch hier den organischen Hauptbestandteil der Siegel.

Abb. 7:

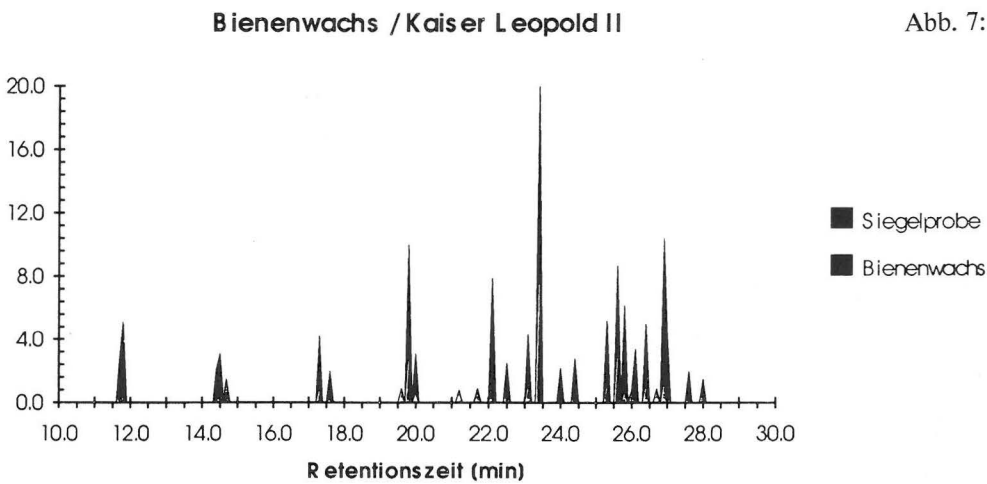


Abb. 8:

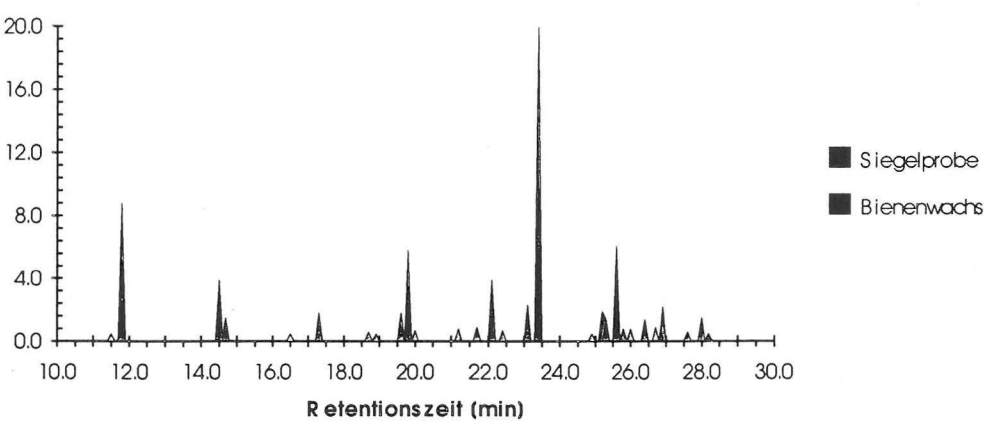


Abb. 9:

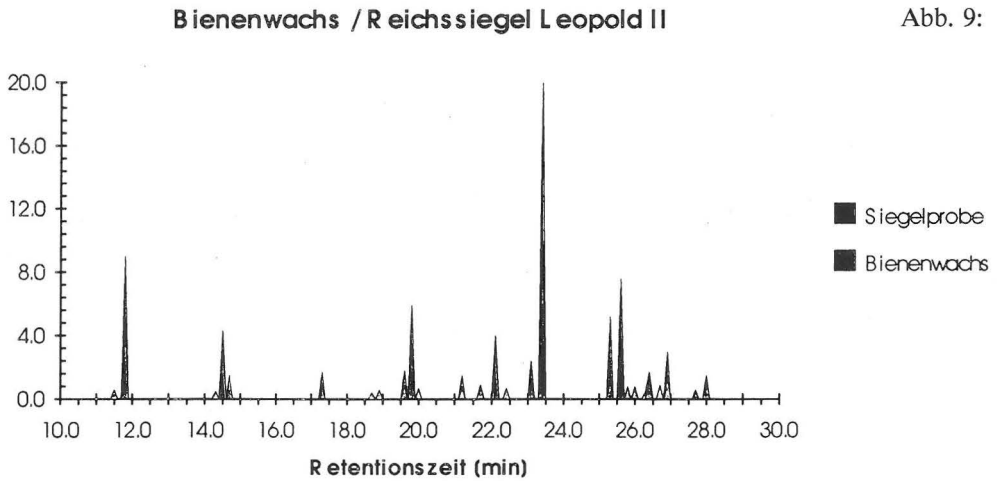


Abb. 10:

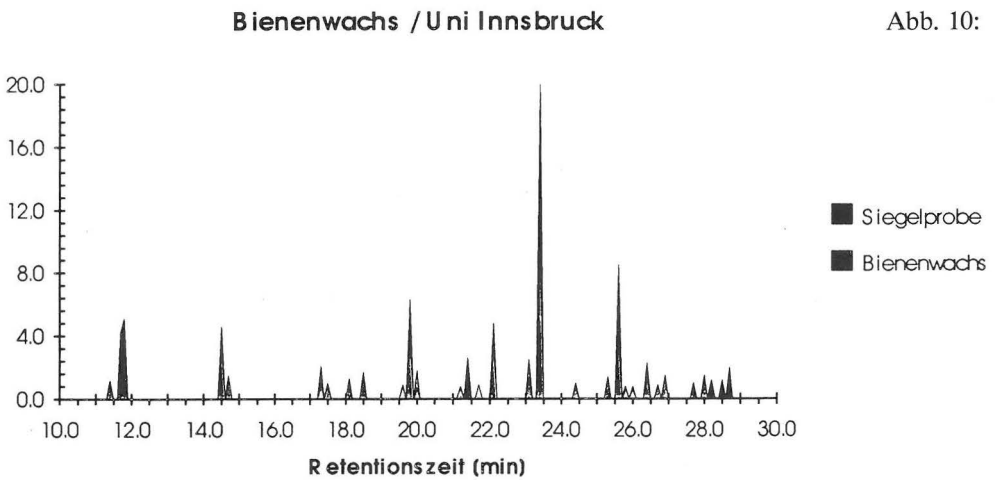


Abb. 11:

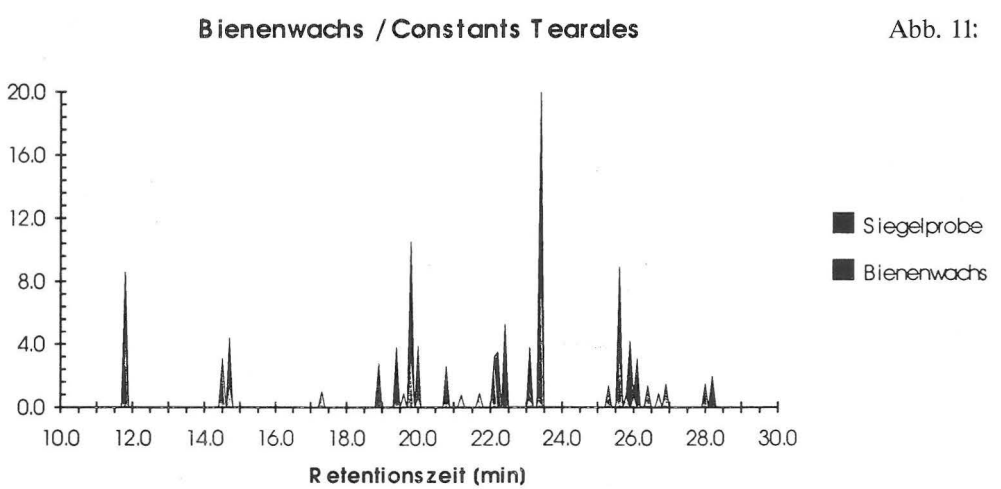


Abb. 12:

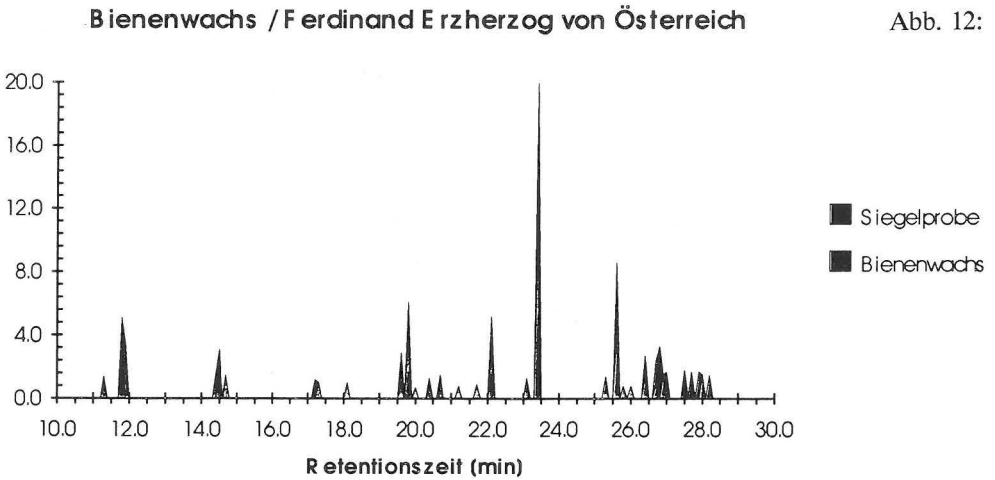


Abb. 13:

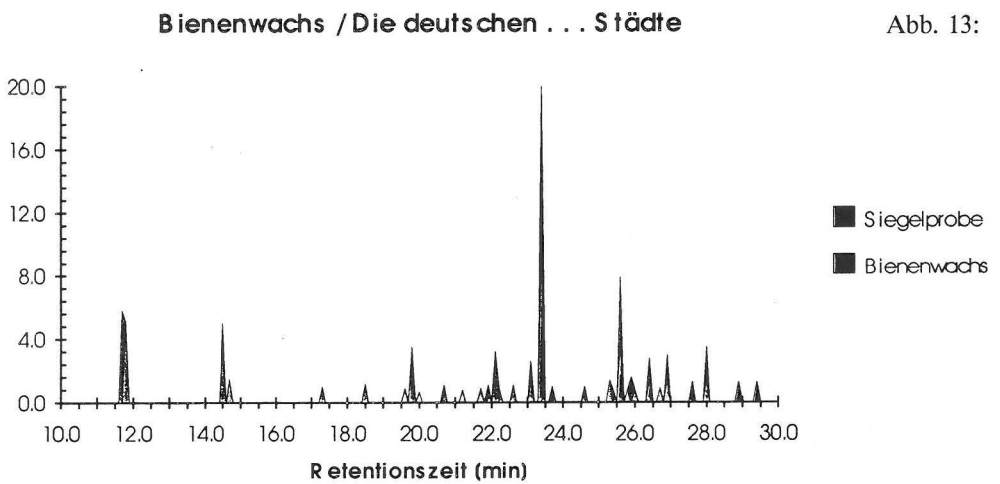
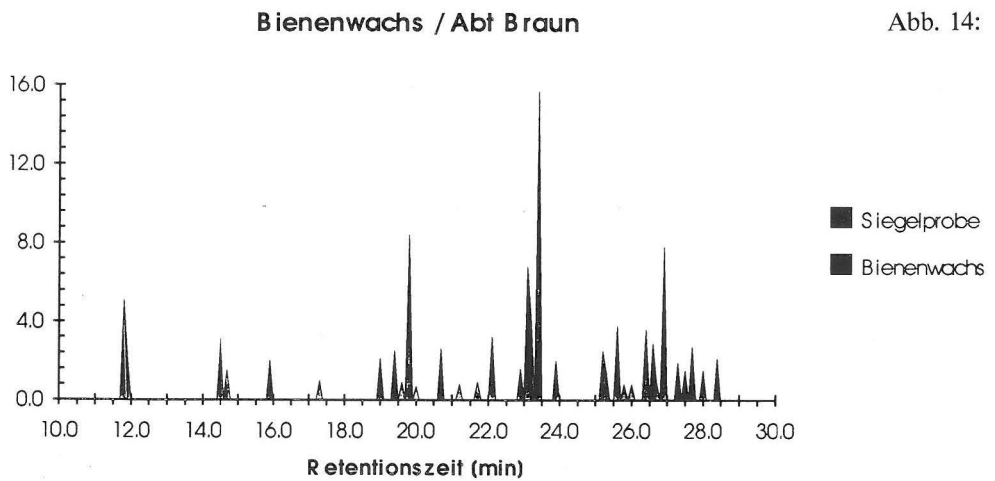


Abb. 14:



In den Abbildungen (15) bis (19) zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Chromatogrammen von Proben und Vergleichsubstanz. Der Rohstoff Bienenwachs läßt sich auch in diesen Siegeln nachweisen, jedoch finden sich Fragmente von weiteren organischen Substanzen.

Abb. 15: **Bienenwachs / Franz Marth**

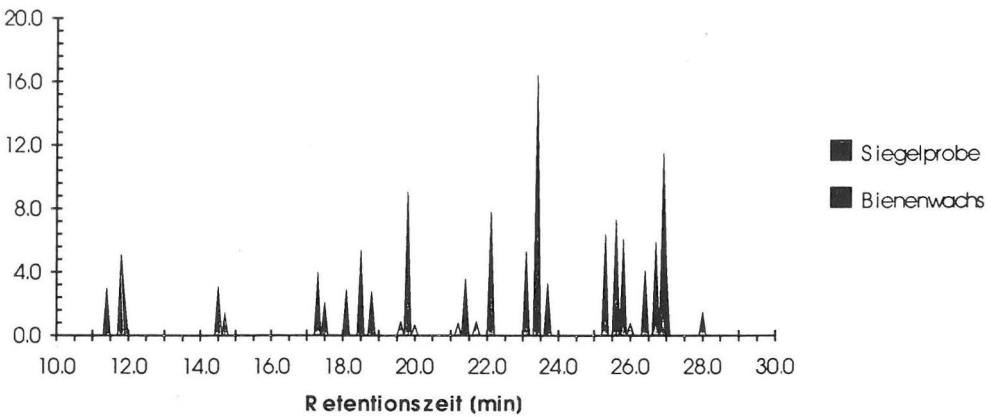
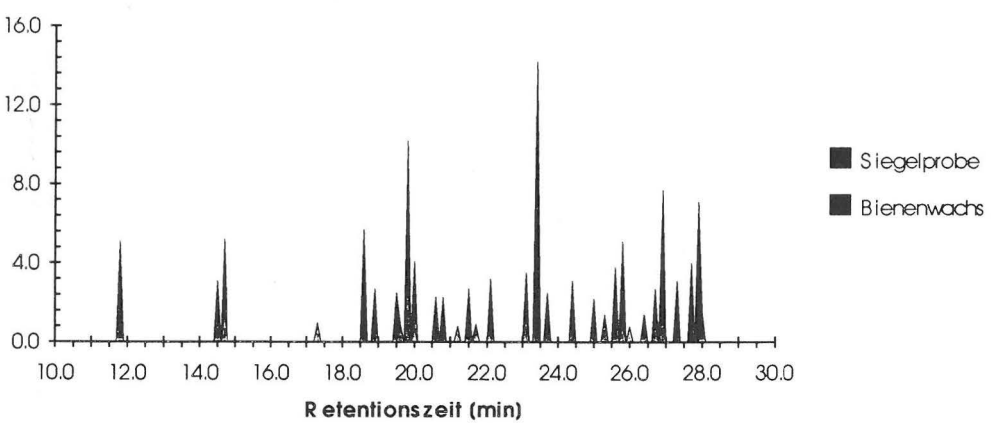


Abb. 16: **Bienenwachs / Sigl Lustgarten**



Zur Identifizierung der zusätzlich auftretenden Peaks, insbesondere in den Chromatogrammen der Siegelproben *Franz Marth, Kaiser Maximillian II* und *von Ehin* wurden Mischungen aus Bienenwachs und den Zusätzen Fichtenharz, Leinöl und Terpentinöl hergestellt /20/ (Volumenanteil Wachs zu Harz / Öl etwa 5 : 1) und der Pyrolyse-Gaschromatographie unterworfen. Die Chromatogramme der einzelnen Substanzen sowie der Mischungen sind in den Abbildungen (20) bis (22) dargestellt.

Abb. 17:

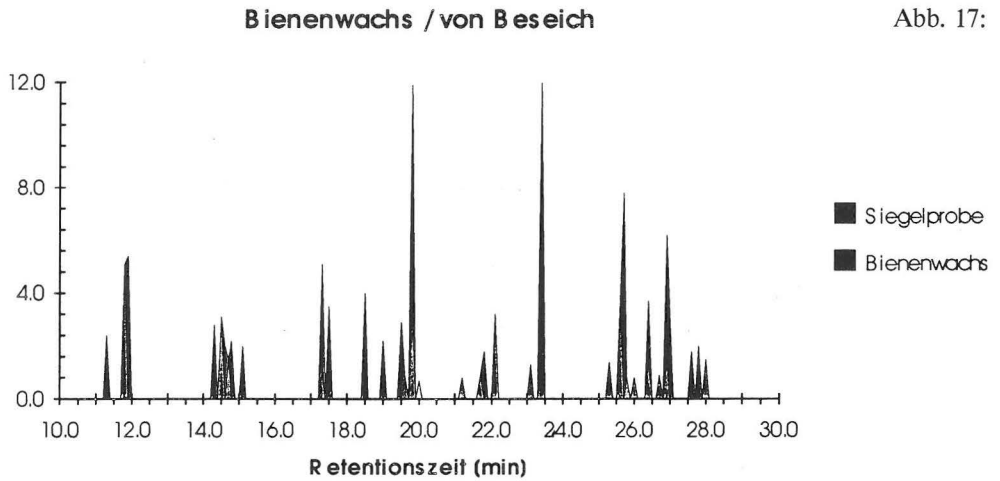


Abb. 18:

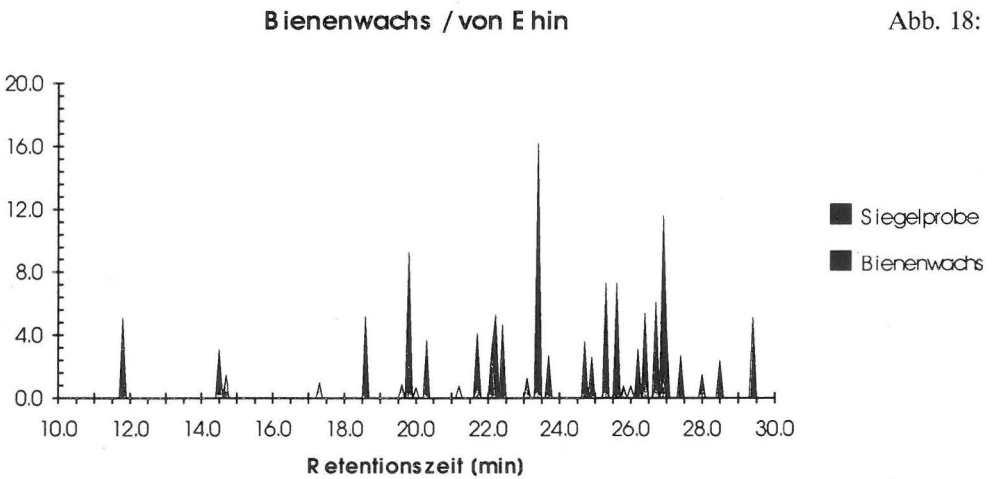


Abb. 19:

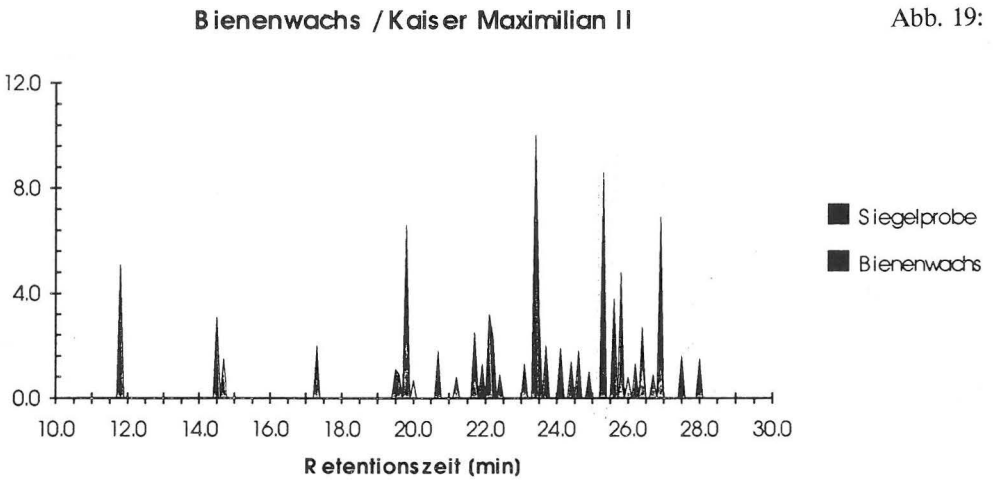


Abb. 20: **Wachs-Leinölmischung**

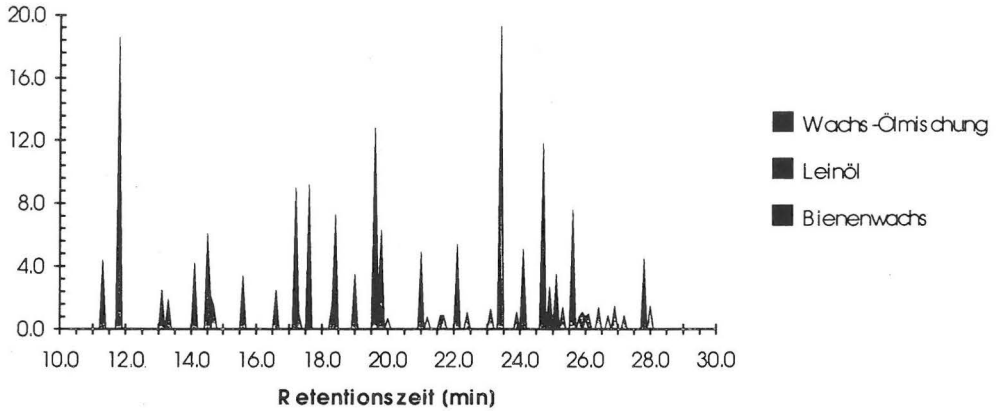


Abb. 21: **Wachs-Terpentinölmischung**

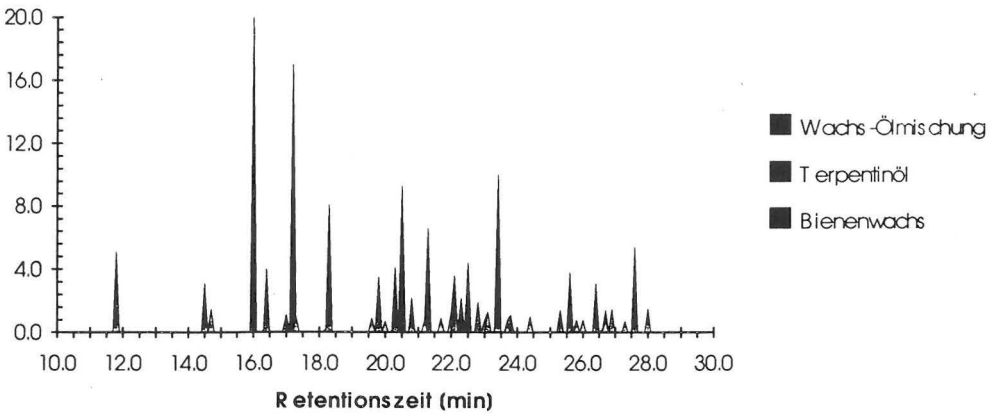
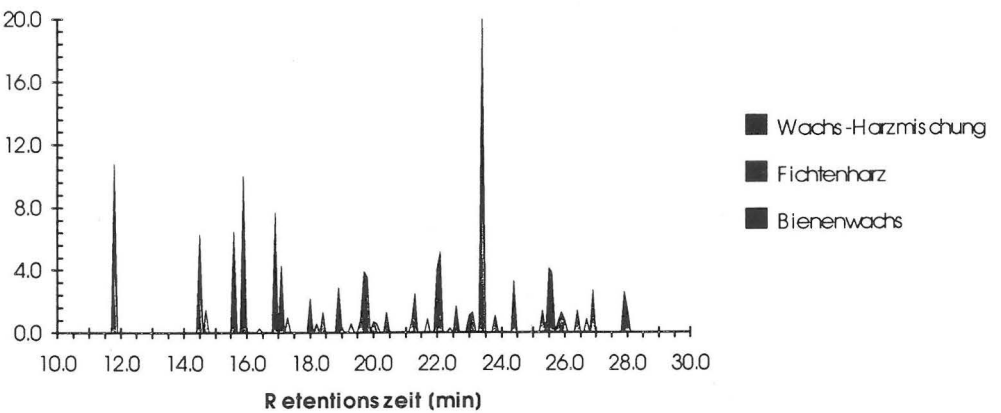


Abb. 22: **Wachs-Harzmischung**



Ein Vergleich mit den Chromatogrammen der Siegelproben zeigt jedoch, daß sich keiner der untersuchten Zusätze in den Proben wiederfindet. Es muß allerdings berücksichtigt werden, daß diese Substanzen, im Gegensatz zu Bienenwachs, Alterungsprozessen unterliegen. Als Beispiel sei an dieser Stelle Leinöl genannt, welches als frisches Öl eine chemisch andere Zusammensetzung aufweist als gealtertes Öl, wie sich an den Ergebnissen der Pyrolyse-Gaschromatographie ablesen läßt /29/.

6. Ausblick

Mit Hilfe der Pyrolyse-Gaschromatographie konnte eindeutig nachgewiesen werden, daß Bienenwachs den Hauptbestandteil der untersuchten Siegelproben bildet. Zusätzlich auftretende Peaks organischer Fragmente in den Chromatogrammen einiger Proben *(Franz Marth, Kaiser Maximillian II, von Ehin)* konnten nicht identifiziert werden.

Eine mögliche Zuordnung charakteristischer Moleküle zu den Hauptpeaks im Chromatogramm von Bienenwachs würde den Nachweis dieser Substanz in anderen Objekten erleichtern. Zu diesem Zwecke wäre es sinnvoll, Pyrolyse-Chromatogramme von nachgewiesenen Bienenwachsbestandteilen wie Palmitinsäure, Palmitaten und 14-Hydroxypalmitinsäure aufzunehmen und auch diese als Standardsubstanzen für Vergleiche heranzuziehen. Die so gewonnen Chromatogramme wären unabhängig von der Herkunft der Substanzen (Dies ist bei einer beliebigen Sorte Bienenwachs nicht unbedingt der Fall /25/!) und bildeten eine allgemeinere Grundlage für eine Vergleichsmethode.

7. Literatur

[1] R. BÜLL, „Vom Wachs", Hoechster Beiträge zur Kenntnis der Wachse, [1959], Hoechst AG, Frankfurt-Hoechst.
[2] L. ARMBRUSTER, Arch. f. Bienenkunde.
[3] W.R. DAWSON, Journ. of Egypt Arch. XIII, [1927].
[4] G.E. SMITH, A Contribution to the Study of Mummification, Egypt., Mémoires prés. à l'Inst. Egypt VI, [1906], 3 ff.
[5] J.R. PARTINGTON, Origins and Development of Appl. Chem., [1935], 175 ff.
[6] E.A.W. BUDGE, The Life and Exploits of Alexander the Great XI, [1896], 6 ff.
[7] E. MACHAY, Anc. Egypt I, [1920], 35 ff.
[8] J.F. JOHN, Im Anhang III; 330 von H.M. Minutoli, Reise zum Tempel des Jupiter Amin nach Oberägypten, [1827].
[9] KL. PARLASCA, Mumienportraits und verwandte Denkmäler, [1966].
[10] H.M. RANSOME, [1937], 40 ff.
[11] J.N. STRASSMAIER, Inschr. v. Nabuchodonoser, [1889], 429, 1-3.
[12] K. KLUGE, Die Antike Erzgestaltung und ihre technischen Grundlagen aus: Die antiken Großbonzen I, [1927], 91 ff.
[13] VERGIL, Eclogae 8, 64 ff.
[14] POLYBIOS, VI 53, 4 ff.
[15] E. BERGER, Die Maltechnik des Altertums, Beiträge zur Entwicklungsgeschichte der Maltechnik, [1904], I. und II. Folge, 189 ff.

[16] O. DONNER v. RICHTER, bei P. BUBERL, Die griechisch-ägyptischen Mumienbildnisse der Sammlung Th. Graf, [1922], 62.
[17] PLINIUS, Naturalis historia XXXIII, 122 und VITRUV, de Architectura VII, 9, 3.
[18] HERODOT, VII, 239.
[19] AGATHIAS, Anthal. Pal. I, 34.
[20] W. EWALD, Siegelkunde, R. Oldenbourg Verlag München Wien 1975 (reprographischer Nachdruck der Ausgabe München und Berlin 1914).
[21] SEYLER, Geschichte, 163.
[22] ILGEN, 11, Anm. 76, Rheinische Siegel II, 10.
[23] R.E. STONE, Antico and the Development of Bronce Casting in Italy at the End of Quattrocento. In: The Metropolitan Museum of Art Journal, 16, 94 ff, [1982].
[24] A.H. WARTH, The Chemistry and Technology of Waxes. Reinhold Publ. Corp., New York, [1956].
[25] R.J. HOLLOWAY, J. Am. Oil Chem. Soc. 46, 189-199, [1969].
[26] E. DOW, The Medium of Encaustic Painting, Technical Studies in the Field of the Fine Arts, 5, [1936], 3 ff.
[27] R. WHITE, The Application of Gas-Chromatography to the Identification of Waxes, Stud. in Conserv., 23, 57-68, [1978].
[28] A.M. SHEDRINSKY, T.P. WAMPLER, N.S. BAER, Pyrolysis Gas Chromatography applied to the study of natural waxes in art and archaeology, Science, Technology and European Cultural Heritage, Bologna, [1989], 553 f.
[29] H. HECK, mündliche Mitteilung, Berlin, 1994.