

# *Chemische Analyseverfahren zur Identifizierung einer südamerikanischen Mumie*



Das schönste Glück des denkenden Menschen ist das  
Erforschliche erforscht zu haben und das Unerforschliche  
ruhig zu verehren.

*Johann Wolfgang von Goethe*

Facharbeit  
von

Miriam Meyer

## Inhaltsverzeichnis

Thema:

Chemische Analyseverfahren zur Identifizierung einer südamerikanischen Mumie

|                                                                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Einleitung (Geschichte der Mumie und äussere Merkmale)</b>                                                     | <b>3</b>  |
| <b>2. Aufgabenstellung</b>                                                                                           | <b>4</b>  |
| <b>3. Mumifikation</b>                                                                                               | <b>4</b>  |
| <b>4. <math>^{14}\text{C}</math> Datierung</b>                                                                       | <b>5</b>  |
| 4.1. Methode                                                                                                         | 5         |
| 4.1.1. AMS- Methode                                                                                                  | 5         |
| 4.1.2. Zählrohrmethode nach Libby                                                                                    | 6         |
| 4.1.3. Berechnung des Alters der Probe                                                                               | 7         |
| 4.1.4. Kalibrierung anhand Dendrochronologie                                                                         | 7         |
| 4.2. Ergebnis                                                                                                        | 7         |
| <b>5. Anthropologische Befunde</b>                                                                                   | <b>7</b>  |
| <b>6. Faseranalyse der Haarumwicklung</b>                                                                            | <b>8</b>  |
| 6.1. Methode: Auflichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie                                                    | 8         |
| 6.2. Ergebnis                                                                                                        | 9         |
| <b>7. Untersuchung der Mumienhaare</b>                                                                               | <b>10</b> |
| 7.1. Effekt des postmortalen Farbwechsels                                                                            | 10        |
| 7.2. Analysen des roten Farbauftrages und sonstigen Spurenelementen                                                  | 10        |
| 7.2.1. Infrarotspektroskopie                                                                                         | 10        |
| 7.2.2. Raman-Spektroskopie                                                                                           | 11        |
| 7.2.3. ICP-MS                                                                                                        | 12        |
| 7.2.4. Ergebnis                                                                                                      | 13        |
| <b>8. Chemische Untersuchung zur Klärung der Ernährung</b>                                                           | <b>14</b> |
| 8.1. Isotopenanalyse                                                                                                 | 14        |
| 8.2. Kohlenstoffkreislauf                                                                                            | 14        |
| 8.3. $\delta^{13}\text{C}$ Werte in Pflanzen                                                                         | 15        |
| 8.4. Stickstoffkreislauf                                                                                             | 17        |
| 8.5. $\delta^{15}\text{N}$ Werte in Pflanzen                                                                         | 17        |
| 8.6. Methode                                                                                                         | 18        |
| 8.7. Ergebnis                                                                                                        | 18        |
| <b>9. Konservierung der Mumie</b>                                                                                    | <b>19</b> |
| 9.1. Material und Methode                                                                                            | 19        |
| 9.1.1. Infrarotspektroskopie                                                                                         | 19        |
| 9.1.2. Ergebnis                                                                                                      | 20        |
| 9.1.3. REM/EDX                                                                                                       | 20        |
| 9.1.4. Ergebnis                                                                                                      | 21        |
| <b>10. Schluss (Spekulation über die Stammeszugehörigkeit der Mumie und ihr Weg von Südamerika nach Deutschland)</b> | <b>22</b> |
| <b>11. Literaturverzeichnis</b>                                                                                      | <b>24</b> |
| <b>12. Danksagung</b>                                                                                                | <b>25</b> |
| <b>13. Selbständigkeitserklärung</b>                                                                                 | <b>25</b> |
| <b>14. Anhang</b>                                                                                                    | <b>26</b> |

## 1. Einleitung

„Die Moorleiche aus dem Dachauer Moos — Abschied von einer alten Bekannten“.<sup>1</sup>

Unter diesem Slogan wurde das Rätsel der „Moorleiche“, die sich in der Archäologischen Staatssammlung in München befindet, mit Hilfe von zahlreichen Personen und Institutionen, gelöst.

Seit 1904 ist die „Moorleiche“ in der Anatomischen Anstalt München registriert. Sie wurde im zweiten Weltkrieg zweimal irrtümlicherweise beerdigt, da man sie für ein Bombenopfer hielt. Glücklicherweise wurde sie wieder ausgegraben, gereinigt und getrocknet. Danach erfolgte die Kennzeichnung als „Moorleiche“ und seit 1977 ist sie



Abbildung 1: Frisur der „Moorleiche“ Archäologische Staatssammlung, Fotograf: M. Eberlein

als Dauerleihgabe der Anatomischen Anstalt in der Staatssammlung zu bewundern. Bereits zu dieser Zeit hat man den Zustand der „Moorleiche“ dokumentiert. Optisch kann man erkennen, dass sie noch über ihre volle Haarpracht verfügt. Ihre gescheitelte Frisur besteht aus insgesamt sechs Zöpfen, wobei jeweils drei zu einem Grossen

zusammen geflochten sind. Diese zwei Zöpfe werden am Ende aus noch unbekannten Tierhaaren zusammengehalten.<sup>2</sup> Ausserdem wurde sowohl ein roter Farbstoff auf den Haaren entdeckt, als auch eine Verfärbung der Haare, die nach dem Tod stattgefunden hat. In den Aufzeichnungen ist ausserdem die Rede davon, dass Rückstände von Verschnürungen der Oberschenkel erkennbar sind.<sup>3</sup> Bei Betrachtung der Moorleiche konnte ich feststellen, dass ihr Gesicht grösstenteils zerstört ist. Ihre Arme sind verschränkt und der Zeigefinger der linken Hand ist ausgestreckt. Ihre Oberschenkel sind in Hockhaltung. Ihr fehlen sowohl beide Unterschenkel, als auch die Füße (siehe Anhang Abb. 2). Ihre Haut ist „lederartig(...), mittelgrau bis anthrazitfarben(...) und matt-ölig glänzend(...)“<sup>2</sup>, wobei durch die dünne Haut einzelne Muskelpartien und Rippen erkennbar sind. Da die „Moorleiche“ 2007, nach der Annahme auf Parasitenbefall, erstmals aus ihrer Vitrine genommen wurde, stellte man fest, dass die Benennung „Moorleiche“ nicht auf dieses Exemplar zutraf.

<sup>1</sup> freundlicher Hinweis von Frau Brigitte Haas-Gebhard

<sup>2</sup> R. Aigner & O. Heller, Über die Moorleiche der Anatomischen Anstalt München In: 75 Jahre Anthropologische Staatssammlung München. Festschrift 1977, 159-163.

<sup>3</sup> R. Aigner & O. Heller, Über die Moorleiche der Anatomischen Anstalt München In: 75 Jahre Anthropologische Staatssammlung München. Festschrift 1977, 159-163.

Merkmale wie zum Beispiel die gut erhaltenen Knochen und die angezogene Haltung sind untypisch für Moorleichen, denn bei Menschen, die in Mooren konserviert werden ist es in der Regel so, dass die Knochen durch die im Moor enthaltene Huminsäure entkalken und zersetzt werden. Ausserdem sind diese Leichen in einer ausgestreckten Lage vorzufinden.<sup>4</sup>

Auf Grund dessen, dass es sich hierbei wahrscheinlich um keine Moorleiche handelt, wird diese Leiche im Folgenden als Mumie tituliert, da laut Definition damit „ein(...) menschliche(r) Körper, der durch (...) chemische Verhältnisse vor Verwesung geschützt ist und in seiner allgemeinen Form erhalten bleibt“<sup>5</sup>, bezeichnet wird.

## **2. Aufgabenstellung**

Aufgrund der in der Einleitung beschriebenen Zweifel kommen die Fragen auf, ob es sich hierbei überhaupt um eine Moorleiche handelt, woher sie stammt und wie sie nach Deutschland gekommen ist?

Im Folgenden wird versucht, die Frage nach der Herkunft, der Ernährung, den Lebensumständen, der Todesursache und der Art der Konservierung durch chemische Analyseverfahren zu beantworten.

## **3. Mumifikation**

Bei der Mumifikation führt ein natürlicher Prozess zur Mumienbildung, während die Mumifizierung künstlich durch verschiedene Konservierungstechniken erfolgt.

Die vom Immunsystem abgewehrten Bakterien und Mikroorganismen beginnen, ab dem Zeitpunkt des Todes, sich zu vermehren. Sie geben Enzyme ab die das Gewebe eines Körpers aerob abbauen. Das hat zur Folge, dass die organischen Bestandteile zu anorganischen Endprodukten, wie zum Beispiel: Kohlenstoffdioxid, Wasser, Ammoniak und Nitrat oxidiert werden. Dieser Vorgang nennt sich Verwesung. Bei der Mumifikation wird ein toter Körper so konserviert, dass er gar nicht oder nur sehr langsam verwest. Dadurch bleiben die Weichteile des Körpers erhalten. Dieser Zustand kann durch extreme Umweltbedingungen wie Hitze, Kälte und toxische Einflüsse, hervorgerufen werden.<sup>6</sup>

---

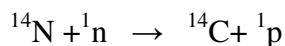
<sup>4</sup> freundlicher Hinweis von Frau Brigitte Haas-Gebhard

<sup>5</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Mumie>

<sup>6</sup> Arthur C. Aufderheide: The Scientific Study of Mummies, Cambridge 2003

## 4. $^{14}\text{C}$ Datierung

Dieses analytische Verfahren, das auch Radiokarbonmethode genannt wird, kann das Alter von organischen Stoffen bestimmen. Radioaktives  $^{14}\text{C}$  entsteht durch die Reaktion von dem in der Luft enthaltenem Stickstoff mit Neutronen, welche wiederum durch das Auftreffen von kosmischer bzw. Höhenstrahlung auf die obersten Schichten der Erdatmosphäre entstehen. Während dieser Reaktion gibt Stickstoff ein Proton ab.



Da das Kohlenstoffisotop  $^{14}\text{C}$  durch die oben aufgeführte Reaktion in die untere Atmosphäre gelangt und somit mit dem Luftsauerstoff zu  $^{14}\text{CO}_2$  reagiert, kann es von Pflanzen durch Photosynthese aufgenommen werden. Die Lebewesen nehmen Radiokarbon wiederum durch die Nahrung auf und geben sie durch die Atmung wieder ab. Dadurch entsteht ein Gleichgewicht zwischen der Aufnahme und der Abgabe von  $^{14}\text{C}$ . „Der Anteil an  $^{14}\text{C}$  im Vergleich zu  $^{12}\text{C}$  kann für den Zeitraum der Menschheitsgeschichte als nahezu konstant betrachtet werden und beträgt ca.  $1,2 \cdot 10^{-12}$ . Das heisst, dass auf eine Billion  $^{12}\text{C}$  Atome etwas mehr als ein  $^{14}\text{C}$  Atom zu stehen kommt.“<sup>7</sup> Durch den Tod der zu untersuchenden Mumie, konnte kein weiteres  $^{14}\text{C}$  mehr aufgenommen werden und somit begann das Radiokarbon mit der Halbwertszeit von 5730 Jahren zu zerfallen, wobei das stabile  $^{12}\text{C}$ - und  $^{13}\text{C}$ -Atom im toten Körper erhalten bleibt. Je geringer der Anteil an  $^{14}\text{C}$  zum unveränderten  $^{12}\text{C}$ , desto länger ist der Organismus tot. Somit kann aus der Menge von  $^{14}\text{C}$  die in der heutigen Atmosphäre vorhanden ist und dem verbliebenen  $^{14}\text{C}$  in der Leiche, die Zeit errechnet werden in der der Tod des Lebewesens eintrat.<sup>8</sup>

### 4.1 Methoden

Es gibt verschiedene Methoden zur Altersbestimmung, wie zum Beispiel die sog. AMS-Methode oder die Zählrohrmethode nach Libby.

<sup>7</sup> <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/grundlagen.htm>

<sup>8</sup> <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/anwendung.htm>

#### 4.1.1. AMS –Methode

Die AMS-Methode die 1979 erfunden wurde, wird auch Beschleuniger-Massenspektroskopie genannt. Es handelt sich bei dieser Altersbestimmung um einen direkten Nachweis der Isotopenverhältnisse. Zu Beginn muss die zu untersuchende Substanz so präpariert werden, dass der darin enthaltene Kohlenstoff in seiner reinen Form gewonnen wird. Die Kohlenstoffverbindungen, die durch verschiedene Möglichkeiten (z.B. Säurebad) aus der Probe gewonnen werden, werden zu  $\text{CO}_2$  verbrannt. Dieses  $\text{CO}_2$  wird durch Stickstoff in den festen Aggregatzustand gebracht und durch Wasserstoff (als Reduktionsmittel) und Eisen (Katalysator) zu elementarem Kohlenstoff reduziert.

Da Stickstoff ( $^{14}\text{N}$ ) und andere Moleküle ( $^{13}\text{CH}$  und  $\text{CH}_3$ ) die gleiche Masse wie  $^{14}\text{C}$  besitzen, reicht eine Massenspektroskopie alleine nicht aus, um den  $^{14}\text{C}$  Anteil in der Probe bestimmen zu können. Aus diesem Grund werden die Atome der Probe ionisiert. Das heisst, dass diese Atome durch Cäsiumionen-Beschuss zu Anionen werden und durch negative Spannung in den sog. Tandembeschleuniger gelangen. Da Stickstoff keine Elektronen aufnehmen kann, wird diese auch nicht von der negativen Spannung beschleunigt. Somit kann er die  $^{14}\text{C}$ -Messung nicht mehr beeinträchtigen. Im Tandembeschleuniger befindet sich eine positiv geladene Anode, die aus einer dünnen Folie besteht. Diese Anode zieht die Anionen an. Beim Durchdringen der Anionen durch die Folie, geben diese wegen dem Ladungsunterschied Elektronen ab. Somit werden aus den negativ geladenen Anionen positiv geladene Kationen, welche nun von der Anode abgestossen werden. Die Moleküle, die die gleiche Masse wie  $^{14}\text{C}$  besitzen und somit die Messung stören können, verlieren beim Durchdringen der Folie ihre Elektronen. Wenn diese Bindungselektronen, die die Atomverbindungen der Moleküle zusammenhalten verloren gehen, zerbricht das Molekül. Somit gelangen nur noch  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$  Atome in den Massenspektrometer, der die Anzahl der jeweiligen Atome bestimmt. Diese Daten werden als elektrische Impulse an einen Computer gesendet und ausgewertet. Durch das AMS kann man direkt die Anzahl  $^{14}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  und  $^{12}\text{C}$  Atome bestimmen und somit das Alter der Probe berechnen.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/anwendung.htm>

#### 4.1.2. Zählrohrmethode nach Libby

Die Zählrohrmethode nach Libby wurde 1977 von Willard Frank Libby entwickelt. Sie „beruht auf dem indirekten Nachweis des Isotopenverhältnisses von  $^{14}\text{C}$  zu  $^{12}\text{C}$  durch Zählen der radioaktiven Zerfälle.“<sup>10</sup> Die zu reinem Kohlenstoff reduzierte Probe wird anschliessend zu  $\text{CO}_2$  (Zählgas) verbrannt. Dieses somit entstandene Zählgas wird in ein Geiger-Müller-Zählrohr geleitet. Nun werden die Zerfälle der  $^{14}\text{C}$ -Kerne im  $\text{CO}_2$  gezählt. Das durch die Zerfälle ionisierte Zählgas wird als elektrischer Impuls an einen Computer weitergeleitet.<sup>11</sup>

#### 4.1.3. Berechnung des Alters der Probe

Durch die Formel

$$t = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} \cdot \ln \frac{A(0)}{A(t)}$$

kann man das Alter der Probe berechnen.

[  $t$  = Alter,  $T_{1/2} / \ln 2$  = Zerfallskonstante;  $N_0$  = Zahl der  $^{14}\text{C}$  Zerfälle zu Beginn des Todes;  $N_t$  = Zahl der  $^{14}\text{C}$  Zerfälle nach der Zeit  $t$  ]

#### 4.1.4. Kalibrierung anhand Dendrochronologie

Durch die zwei aufgezeigten Methoden wird zwar  $N_t$  bestimmt, jedoch ist noch  $N_0$  unbekannt. Da diese Grösse auf Grund von schwankenden Sonnenaktivitäten nicht konstant ist, wird sie mittels Dendrochronologie bestimmt. Dabei werden die Jahresringe eines Baumes betrachtet. Diese können auf Grund klimatischer Unterschiede in ihrer Beschaffenheit variieren. Ist das Alter des Baumes bekannt, kann durch das gegenwärtige  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  Verhältnis, das Verhältnis zur Zeit des Todes der Probe berechnet werden. Somit kann man  $N_0$  für die vergangenen 11000 Jahre bestimmen.<sup>12</sup>

#### 4.2. Ergebnis

An der Universität Kiel hat man die Zeit, in der die Leiche gelebt hat, bestimmt. Dabei wurde ein  $^{14}\text{C}$  Datum von 1440-1630 nach Christus ermittelt. (siehe Anhang Abb.3)

<sup>10</sup> <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/anwendung.htm>

<sup>11</sup> <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/anwendung.htm>

<sup>12</sup> <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/anwendung.htm>

## 5. Anthropologische Befunde

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen, dass es sich eindeutig um ein weibliches Individuum handelt. Ihr Alter wird auf 20 bis 25 Jahre datiert, da die Apophysen (Knochenfortsatz an der Wirbelsäule) noch nicht komplett verwachsen sind. Ausserdem konnte ein sog. „Inkabein“ nachgewiesen werden. Hierbei handelt es sich um eine Besonderheit im Bereich des Schädelknochens, die vorwiegend bei der Inkabevölkerung aufgetreten ist. Dabei ist ein zusätzlicher Knochen im Bereich der Lambdanaht des menschlichen Schädels erkennbar. (siehe Anhang Abb.4) Diese genetische Besonderheit kommt in Deutschland nicht vor. Die Häufigkeit in Europa liegt bei weniger als 2%. Das Vorkommen ist mit 8% in Südamerika am Grössten.<sup>13</sup>

## 6. Faseranalyse der Haarumwicklung

### 6.1 Methoden: Auflichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie

Wie bereits erwähnt, sind die Haarzöpfe der Leiche mit Fäden umwickelt, deren Herkunft unbekannt ist. Die Werkzeuge zur qualitativen Bestimmung der Haarumwicklung sind das Auflichtmikroskop und das Rasterelektronenmikroskop. Bei der Auflichtmikroskopie werden die optischen Merkmale der Probe erkennbar gemacht, indem diese durch das Objektiv beleuchtet und 1000fach vergrössert werden.

Beim Rasterelektronenmikroskop, kurz REM, wird ein Elektronenstrahl über die zu untersuchende Probe gerastert. Dies geschieht in einem bestimmten Muster, welches somit ein vergrössertes Bild des Objekts und eine sehr gute Tiefenschärfung liefert. Das REM befindet sich im Hochvakuum, damit der erzeugte Elektronenstrahl nicht durch Luftmoleküle abgelenkt wird.

Zur Vorbereitung präpariert man die Probe so, dass sie eine leitende Oberfläche hat und völlig wasserfrei ist. Aus diesem Grund wird die zu untersuchende Substanz durch Glutaraldehyd fixiert. Die fixierte Probe wird mittels Alkohol in steigender Konzentration entwässert und anschliessend getrocknet. Zum Schluss wird sie mit einer dünnen Metallschicht wie zum Beispiel Gold bedampft, damit sie eine leitende

---

<sup>13</sup> S. Lösch: Anthropologische Daten und stabile Isotope, mündlicher Vortrag beim Workshop in den Werkstätten –Neubau der Archäologischen Staatssammlung München am 10.11.2007

Oberfläche bekommt. Die Entwässerung des Objekts ist notwendig, da ansonsten das Wasser wegen des niedrigen Drucks im REM kochen würde.<sup>14</sup> (siehe Anhang Abb. 5)

Die Kathode besteht aus einem auf 2000 °C erhitzten Wolframdraht. Sie befindet sich im Steuerzylinder und erzeugt Elektronen. Durch Spannung von 1-30 KeV, die zwischen der Kathode und Anode angelegt ist, entsteht ein Elektronenstrahl. Der Strahl wird durch ein elektromagnetisches Linsensystem, das aus zwei Kondensorlinsen und einer Endlinse besteht, gebündelt. Mit Hilfe der XY-Ablenkung rastert der Elektronenstrahl Zeile für Zeile über die Oberfläche der Probe. Der Rastergenerator synchronisiert den Zeilenraster und den Schreibstrahl auf dem Bildschirm. Das heisst, dass die Probe Punkt für Punkt vergrössert auf dem Bildschirm erscheint. Trifft der Strahl nun die Probe, treten Wechselwirkungen zwischen dieser und dem Strahl auf, welche zur Folge haben, dass unter anderem Sekundärelektronen (SE) und Rückstreuielektronen aus der Probe austreten. Die SE werden durch angelegte Spannung zum Sekundärelektronendetektor beschleunigt. Dieser wandelt die optischen Signale die durch die SE eintreffen, in elektronische Signale um. Diese Signale werden durch die elektronische Signalverarbeitung verstärkt. Dadurch entsteht ein Abbild der Probe mit bis zu 100000facher Vergrösserung. Das mikroskopierte Objekt sieht dreidimensional aus, da der Detektor schräg zur Probe angebracht ist. Je dichter die Oberfläche der Probe ist, desto mehr Sekundärelektronen entstehen und umso mehr kommen bis zur Signalverarbeitung. Somit wird der entstandene Punkt auf dem Bildschirm heller.<sup>15</sup>

## 6.2. Ergebnis

Im Fall der Fadenproben der Haarumwicklung wurde sowohl die Grösse, Form und Pigmentierung des „Fadens“, als auch die Breite und Ausgestaltung des Marks untersucht. Dabei kam heraus, dass es sich um Haare aus der Familie der Kamele handeln muss. Um genauere Unterscheidungen von Altwelt- und Neuweltkamelen zu machen, analysierte man deren Schuppenschicht durch das REM. Das Ergebnis ist, dass es sich um ein Neuweltkamel handelt, da der Rand der Haarschuppen flach und gewellt ist. Zu diesen Exemplaren zählen sowohl Lamas, als auch Alpakas. Damit nun ermittelt werden kann um welches Tier es sich genau handelt, werden das Mark des Alpakas und das des Lamas mit der Haarumwicklung der Mumie verglichen. Alpakas weisen eine durchbrochene Markstruktur auf, wobei hingegen das Lama ein durchgehendes Mark

<sup>14</sup> [http://www.icbm.de/~gmb/download/Skript\\_VP\\_REM\\_2007.pdf](http://www.icbm.de/~gmb/download/Skript_VP_REM_2007.pdf)

<sup>15</sup> <http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/REMHHerbst2001.html>

hat. Der Vergleich mit der Probe der Mumie hat ergeben, dass es sich um ein Alpakahaar handelt.<sup>16</sup>

## **7. Untersuchung der Mumienhaare**

### 7.1. Effekt des postmortalen Farbwechsels

Melanine verursachen den postmortalen Farbwechsel. Diese Pigmente sind für die Haarfarbe eines Lebewesens ausschlaggebend. Sie setzen sich aus Eumelanin, welches vermehrt in braunen bis schwarzen Haaren vorkommt und Phäomelanin, das bei roten bis blonden Haaren auftritt, zusammen. Da Eumelanin nach dem Tod degeneriert, wird das Phäomelanin sichtbar.<sup>17</sup> Somit entsteht eine rote Verfärbung der Haare.

### 7.2. Analysen des roten Farbauftrages und sonstigen Spurenelementen

Die Absicht dieser qualitativen Analyse ist es, den roten Farbstoff der an manchen Stellen des Kopfhaares der Mumie angebracht wurde und sonstige Spurenelemente am Haar, zu untersuchen. Dabei finden unterschiedliche Methoden Verwendung.

#### 7.2.1 Infrarotspektroskopie

Die Infrarotspektroskopie, die auch kurz IR genannt wird, analysiert die Zusammensetzung von chemischen Verbindungen. Hierbei ermittelt man die Transmission von infraroter (IR) Strahlung durch feste, flüssige und gasförmige Stoffe. Zu Beginn der Messung sollte man die zu untersuchende Substanz entsprechend vorbereiten. Feststoffe müssen durch Zugabe von flüssigem Stickstoff trocken und spröde werden. Zusätzlich wird die Substanz mittels Kaliumbromid (KBr), welches als Trägermaterial fungiert, zu einem weissen Pulver zermahlen. Anschliessend wird dieses Pulver unter Vakuum mittels Hydraulikpressen in Form eines „Presslings“ gebracht. Dieser „Pressling“ gelangt als Probe in die Apparatur.<sup>18</sup> (siehe Anhang Abb. 6)

---

<sup>16</sup> K.Gonda: Faseranalyse der Haarumwicklung mündlicher Vortrag beim Workshop in den Werkstätten – Neubau der Archäologischen Staatssammlung München am 10.11.2007

<sup>17</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Melanin>

<sup>18</sup> mit freundlicher Unterstützung von Prof. Berberich

Der infrarote (IR) Strahl, der durch einen elektrisch erhitzten Siliciumcarbid- oder Zirkoniumoxidstab entsteht, teilt sich durch Spiegelung in zwei Strahlen auf. Der Messstrahl geht durch die Probe, wobei der andere Strahl, der Vergleichsstrahl heisst, durch die Referenz geht und somit unbeeinflusst bleibt. Am Sektorspiegel werden die beiden Strahlen periodisch auf den Monochromator geleitet, welcher nur einen bestimmten Wellenlängenbereich der IR-Strahlung durchlässt und diesen auf dem Detektor anzeigt.

Der Messstrahl wird durch die Probe energieärmer und zeigt dadurch ein schwächeres Signal am Detektor auf, als der Vergleichsstrahl. Diese Differenz wird mit Hilfe einer Kammbende, die den Vergleichsstrahl soweit abschwächt bis er die gleiche Intensität wie der Messstrahl hat, ausgeglichen. Die Bewegung der Kammbende, die aufzeigt wie stark die Probe den Messstrahl adsorbiert, wird verstärkt und vom Computer angezeigt.

Der soeben beschriebene optische Nullabgleich findet nur noch bei älteren Modellen Verwendung. Moderne Geräte benötigen die Kammbende nicht mehr, da der Unterschied von Mess- und Vergleichsstrahl bereits im Computer ausgewertet wird.<sup>19</sup>

### 7.2.2. Raman-Spektroskopie

Die Raman-Spektroskopie untersucht angeregte Proben auf ihre Rotations- und Schwingungszustände. Somit kann man Aussagen über die qualitative Beschaffenheit von unbekannten Substanzen machen. Sie basiert auf dem Raman-Effekt der im Folgenden beschrieben wird.

Unter dem Raman-Effekt versteht man die unelastische Streuung von Licht an einer zu untersuchenden Substanz. Bestrahlt man diese Probe, also deren Moleküle, mit monochromatischem Licht, tritt im Spektrum nicht nur die Frequenz des eingestrahnten Lichts, die sog. Rayleigh-Strahlung auf, sondern auch eine verschobene Linie, die Raman-Strahlung genannt wird. Der Effekt basiert auf den Wechselwirkungen, die zwischen dem Molekül und der elektromagnetischen Strahlung stattfinden. Somit kommt es zu einer Energieübertragung von Photon zum bestrahlten Molekül, oder umgekehrt. Das hat zur Folge, dass sich die Schwingungs- und Rotationsenergie des Moleküls verändert. Wenn die Probe Photonen emittiert, gelangt diese auf ein höheres Energieniveau. Folglich haben die gestreuten Photonen eine längere Wellenlänge und

---

<sup>19</sup> [http://www.chemielehrer.ch/lm\\_skript%20in%20pdf/9.5\\_infrarot\\_spektroskopie.pdf](http://www.chemielehrer.ch/lm_skript%20in%20pdf/9.5_infrarot_spektroskopie.pdf)

somit eine niedrigere Frequenz. Dieser Prozess wird als Stokes–Streuung bezeichnet. Die Anti- Stokes–Streuung ist im Gegensatz dazu ein Vorgang, bei dem die Photonen von dem bestrahlten Molekül Energie erhalten und somit eine kürzere Wellenlänge und eine höhere Frequenz haben. Die Frequenzverschiebung beschreibt die Differenz der Energie zwischen den eingestrahnten und den gestreuten Photonen.

Der Raman–Effekt wurde 1923 von dem deutschen Physiker Adolf Smekal theoretisch vorhergesagt. Jedoch erst 1928 wurde diese Theorie von dem Inder Chandrasekhara Venkata Raman praktisch bewiesen. 1930 erhielt dieser dafür den Nobelpreis in Physik.<sup>20</sup>

Da der Aufbau des Raman–Spektrometers, dem des IR–Spektrometers ähnelt, wird dieser nur grob beschrieben. Die Strahlungsquelle ist in diesem Fall ein monochromatischer Laser. Wenn dieser auf die Probe trifft, wird sowohl Raman–Strahlung, als auch Rayleigh–Strahlung frei. Die Strahlung wird gefiltert, damit nur die im Vergleich schwache Raman–Streuung in das Spektrometer gelangen kann. Da die Frequenzverschiebung für jedes Molekül charakteristisch ist, kann das jeweilige Molekül ermittelt werden.<sup>21</sup>

### 7.2.3. ICP-MS

ICP-MS ist die Abkürzung für induktiv gekoppeltes Plasma-Massenspektrometer.

Dieses Gerät ist bedeutend für die Spurenanalyse, da wenig Probenmengen benötigt werden und alle bekannten Elemente analysiert werden können.<sup>22</sup>

Zur Vorbereitung muss man die feste Probe zu Pulver zerkleinern, damit sie von dem Trägergas absorbiert und zum Plasma gebracht werden kann. Dieser Vorgang der Probenzerkleinerung kann auch durch eine Laser-Ablation erfolgen. Dabei wird die zu untersuchende Substanz mit Hilfe von Laserimpulsen verdampft. Der so entstandene Dampf wird anschliessend ins Plasma geleitet.<sup>23</sup> (siehe Anhang Abb. 7)

Das Plasma entsteht durch Ionisierung eines Gases in der Fackel. Diese besteht aus drei Quarzrohren und ist mit einer Spule umwickelt, welche unter Hochspannung steht. Dadurch wird das Plasma aufrechterhalten. Wenn die Probe, die im Trägergas enthalten ist, das auf 6000 - 8000 K erhitzte Plasma erreicht, verdampft und ionisiert das Gas

---

<sup>20</sup> <http://www.physnet.uni-hamburg.de/hp/kettemann/tpa/Rohde.pdf>

<sup>21</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/Ramanstreuung>

<sup>22</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/ICP-MS>

<sup>23</sup> <http://de.wikipedia.org/wiki/ICP-MS>

unter Normaldruck. Diese so entstandenen Ionen gelangen durch den gekühlten Sampler, in eine Zwischenkammer in der eine Art Vorvakuum herrscht. Durch den Skinner, der genau wie der Sampler eine Art Lochblende ist, kommen die Ionen in den Hochvakuumbereich. Dort werden sie durch die elektrisch geladene Ionenoptik gebündelt und in das Massenspektrometer geleitet, wo die Ionen nach ihrer Masse aufgeteilt werden und zum Detektor gelangen. Dieser leitet die Ergebnisse zum Rechner weiter<sup>24</sup>

#### 7.2.4. Ergebnis

Um ein optimales Ergebnis zu bekommen, hat man die entnommenen Haarproben aufgeteilt. Dabei beinhaltet Probe A Haare mit dem roten Farbaufschlag, welche vom Zopfende der linken Seite stammen. Die Probe B ist von Schläfennähe der rechten Seite entnommen und ungefärbt, also ist dort kein roter Farbstoff vorhanden. Diese Einteilung der Proben wird in allen Analyseverfahren zur Untersuchung der Mumienhaare verwendet.

Bei der Infrarot Spektroskopie und der Raman-Spektroskopie wurden ein differenziertes Spektrum von Probe A erstellt. Hierbei hat man nur von dieser Probe Stellen sowohl mit als auch ohne rote Farbanhaftung verwendet. Das Resultat zeigt, dass eine Mischung von Koalin (Aluminium-Silikat) und Hämatit (Eisen-(III)-Oxid) für die rote Farbe verantwortlich ist, da diese Verbindungen Hauptbestandteile von dem rötlichen Erdpigment Ocker sind.

Mittels ICP-MS analysierte man die elementare Zusammensetzung der zu untersuchenden Substanzen. Probe A beinhaltet eine hohe Konzentration von Eisen (Fe), Arsen (As) und Antimon (Sb), welche Bestandteile vom Hämatit sind. Probe B enthält hohe Ablagerungen von Magnesium (Mg), Aluminium (Al), Kalium (K), Calcium (Ca), Strontium (Sr) und Barium (Ba). Diese Elemente sind mit Bombenschutt vergleichbar und können von den Zerstörungen des zweiten Weltkrieges stammen. Zusätzlich durchgeführte Waschversuche ergaben, dass im Waschrückstand Kupfer, Zink, Quecksilber und Blei enthalten waren. Das bedeutet, dass diese Elemente aus dem Haarinneren stammen und vermutlich durch Nahrung aufgenommen wurden. Da man die rot gefärbten Haare aus Probe A vom Zopfende entnahm, sind sie älter als die

---

<sup>24</sup> <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~i02/jfrank/Wie%20funktioniert%20eigentlich%20ein%20ICP-MS.pdf>

Farblosen der Probe B. Daraus kann man auf einen Auswascheffekt durch Haarwäsche schliessen.<sup>25</sup>

## 8. Chemische Untersuchung zur Klärung der Ernährung

### 8.1. Isotopenanalyse

Eine Methode zur Bestimmung der Essgewohnheiten und damit auch zur Herkunft der zu untersuchenden Mumie, ist die Isotopenanalyse. Dabei werden stabile Kohlenstoff- (<sup>13</sup>C) und Stickstoffisotope (<sup>15</sup>N), die sich in den Haaren des Individuums befinden, untersucht. Stabile Isotope sind Nuklide, die die gleiche Ordnungszahl besitzen und nicht radioaktiv sind. Somit können sie auch nicht zerfallen und bleiben erhalten.

Um die stabilen Isotope messen zu können, muss man das Verhältnis von schweren Isotopen zu leichten mit der unten aufgeführten Formel berechnen.

$$\delta (\text{‰}) = [(R \text{ Probe} / R \text{ Standard}) - 1] \times 1000 \text{ }^{26}$$

Die Angaben werden in ‰ aufgeführt. Je positiver ein δ-Wert, desto stärker ist die zu untersuchende Probe mit dem Isotop angereichert.

Die Isotopenzusammensetzungen sind in allen Standorten auf der Erde, wegen der verschiedenen pflanzlichen Stoffwechselkreisläufe, unterschiedlich. Es kann zwischen zwei grossen Gruppen der Ökosysteme unterschieden werden. Zum einen gibt es terrestrische (lateinisch: terra: Land) Ökosysteme. Diese werden hauptsächlich von der Vegetation bestimmt. Zum anderen gibt es marine Ökosysteme welche Meer- und Küstengebiete beinhalten. Zusätzlich kann man auch zwischen verschiedenen Pflanzenarten unterscheiden.

Dies geht aber nur, wenn ein entsprechendes Vergleichsmaterial vorhanden ist (siehe Anhang Abb. 8 und 9) und der Kohlenstoff- und der Stickstoffkreislauf bekannt sind.<sup>27</sup>

---

<sup>25</sup> M. Gimbel und E. Gebhart: Chemische Untersuchung der Kopfhare, mündlicher Vortrag beim Workshop in den Werkstätten –Neubau der Archäologischen Staatssammlung München am 10.11.2007

<sup>26</sup> Mc Kinney et al.1950 in Ambrose 1993

<sup>27</sup> S. Lösch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

## 8.2. Kohlenstoffkreislauf

An diesem weltweiten Kreislauf ist der Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), beteiligt. Das aus der Atmosphäre stammende  $\text{CO}_2$  wird von den Pflanzen (Produzenten) durch Photosynthese aufgenommen. Durch Assimilation wird das aufgenommene  $\text{CO}_2$  zu Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen umgewandelt und somit in die Pflanze eingebaut. Die in der Pflanze gespeicherten Kohlenstoffverbindungen werden von Pflanzenfressern (Konsumenten) durch Nahrungsaufnahme aufgenommen. Konsumenten können sowohl Tiere als auch Menschen sein. Damit die Pflanzenfresser Energie gewinnen, müssen die C-Verbindungen durch Dissimilation zu  $\text{CO}_2$  abgebaut werden, wobei ein Grossteil durch Atmung wieder freigesetzt werden kann. Das  $\text{CO}_2$ , das nicht durch Atmung in die Atmosphäre gelangt, wird in den Organismus eingebaut und von Fleischfressern, die sich von den tierischen Pflanzenfressern ernähren, aufgenommen. Durch deren Tod tritt die Zersetzung der Kohlenstoffverbindungen ein. Dadurch gelangt Kohlenstoffdioxid wieder in die Atmosphäre. Somit entsteht ein Kreislauf, da ca. 1/7 des  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre durch Pflanzen aufgenommen und die gleiche Menge durch Respiration wieder abgegeben wird.<sup>28</sup>

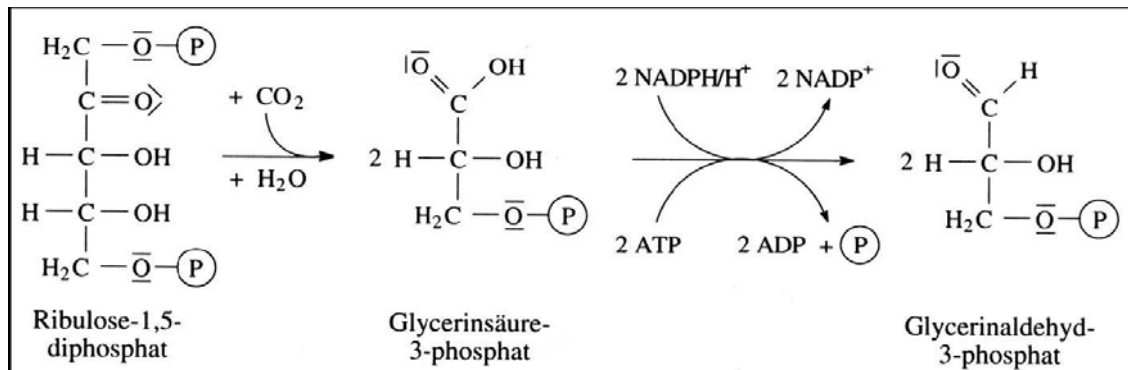
## 8.3. $\delta^{13}\text{C}$ -Werte in Pflanzen

Zunächst werden die Unterschiede der Pflanzenart analysiert, damit man bestimmen kann, welche vorwiegend von dem Individuum als Nahrung aufgenommen wurde. Grundsätzlich kann zwischen  $\text{C}_3$ - und  $\text{C}_4$ -Pflanzen unterschieden werden.  $\text{C}_3$ -Pflanzen sind zum Beispiel Früchte, Weizen, Reis und Gemüsearten. Dagegen sind  $\text{C}_4$ -Pflanzen Mais, Hirse und Zuckerrohr.

Um die zwei Pflanzenarten unterscheiden zu können, wird die jeweilige Dunkelreaktion (Calvin-Zyklus) betrachtet. Aus der vorangegangenen Lichtreaktion werden NADPH/ $\text{H}^+$  und ATP verwendet. Zunächst wird diese Reaktion anhand der  $\text{C}_3$ -Pflanze mit Hilfe von Abbildung 10 beschrieben.

---

<sup>28</sup> S. Lösch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

Abbildung 10: Dunkelreaktion der C<sub>3</sub>-Pflanzen<sup>29</sup>

Das aus der Atmosphäre gewonnene CO<sub>2</sub> bindet sich unter Zugabe von Wasser durch das Enzym „RuBisCo“ an Ribulose-1,5-diphosphat (RuDP). Dadurch entstehen zwei Glycerinsäure-3-phosphat Moleküle. Unter den Verbrauch von 2 ATP und 2 NADPH/H<sup>+</sup> werden die Glycerinsäure-3-phosphat Moleküle zu zwei Glycerinaldehyd-3-phosphate (C3 Körper) oxidiert. Die dadurch entstandenen 2 ADP und 2 NADP<sup>+</sup> finden wiederum Verwendung bei der Lichtreaktion. 1/6 der somit entstandenen C3 Körper verlassen diesen Calvin-Zyklus für die Synthese von Glucose.<sup>30</sup>

Bei hohen Temperaturen schliessen die Pflanzen ihre Spaltöffnungen, damit kein Wasser verloren geht. Jedoch kann dann auch nicht mehr so viel CO<sub>2</sub> in die Pflanzen gelangen. Das hat zur Folge, dass die Photosynthese eingeschränkt ist.

Damit die C<sub>4</sub>-Pflanzen, die hauptsächlich in tropischen und subtropischen Ländern wachsen, geringe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nutzen können, wird das CO<sub>2</sub> anders als bei den C<sub>3</sub>-Pflanzen fixiert. In diesem Fall wird CO<sub>2</sub> durch das Enzym PEP-Carboxylase an PEP (Phosphoenolpyruvat) gebunden, wodurch dann Oxalacetat entsteht. Da dieses Enzym eine höhere CO<sub>2</sub>-Affinität als „RuBisCo“ besitzt, reichen auch kleine CO<sub>2</sub> Mengen aus. Da das Oxalacetat als Maltat zu Pyruvat und CO<sub>2</sub> zerfällt, wird NADPH/H<sup>+</sup> frei. Anschliessend gelangt das entstandene CO<sub>2</sub> und NADPH/H<sup>+</sup> in den Calvin-Zyklus, der dann genauso wie bei der C<sub>3</sub>-Pflanze abläuft.

Durch diesen Unterschied sind die C<sub>4</sub>-Pflanzen unempfindlich gegenüber hohen Temperaturen, hohen Lichtintensitäten und sie können mit wenig Wasser auskommen.<sup>31</sup>

<sup>29</sup> K. Gallenberger: Skript zum LK Chemie - Stoffwechselprozesse

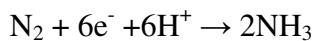
<sup>30</sup> S. Lösch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

<sup>31</sup> S. Lösch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

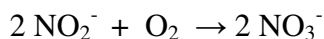
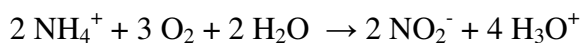
Da der  $\text{CO}_2$  Gehalt unserer Atmosphäre auch 1,1 ‰  $^{13}\text{C}$  beinhaltet, kann das  $\text{CO}_2$  sowohl aus  $^{12}\text{C}$  als auch aus  $^{13}\text{C}$  bestehen. Bei der  $\text{CO}_2$  Fixierung durch die Enzyme wird  $^{12}\text{CO}_2$  bevorzugt. Somit wird  $^{13}\text{CO}_2$  diskriminiert. Das hat zur Folge, dass der  $^{13}\text{C}$ -Gehalt in der Pflanze niedriger ist als in der Luft. Jedoch diskriminieren die  $\text{C}_4$ -Pflanzen weniger  $^{13}\text{CO}_2$  als die  $\text{C}_3$ -Pflanzen. Dadurch erhält man für die  $\text{C}_4$ -Pflanzen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Bereich von -11‰ bis -12‰ und für die  $\text{C}_3$ -Pflanzen  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte im Bereich von -23‰ bis -35‰.<sup>32</sup>

#### 8.4. Stickstoffkreislauf

Wie bereits bekannt, bestehen Aminosäuren, Proteine und die DNA aus Stickstoff, deswegen werden sie von den Lebewesen benötigt. Der reine Stickstoff kann nur von Prokaryonten (Bakterien) fixiert werden. Alle anderen Pflanzen können ihn nur in Form von Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) aufnehmen. Aus diesem Grund wird der Stickstoff durch ein Nitrogenase-Enzymkomplex zu Ammoniak katalysiert.



Da Böden angesäuert sind, bildet sich durch Protonenaufnahme aus dem Ammoniak, Ammonium. Dieser kann zwar von Pflanzen aufgenommen werden, sie bevorzugen jedoch Nitrat. Aus diesem Grund oxidieren Nitrosomonas und Nitrobacter (Bakterien), Ammonium zu Nitrat. Dieser aerobe, energieliefernde Prozess läuft in zwei Teilschritten ab.



Das somit entstandene Nitrat wird von den Pflanzen aufgenommen und durch Reduktion in organische Verbindungen umgesetzt. Diese Pflanzen und somit das Nitrat, gelangen durch Nahrungsaufnahme in den menschlichen oder tierischen Organismus und werden durch Exkremente, Kadaver und Humus wieder freigesetzt. Durch hydrolytische Spaltung wird das freigesetzte Nitrat von Destruenten in Ammoniumverbindungen umgesetzt und erneut von Bakterien aufgenommen.

Somit schliesst sich der Stickstoffkreislauf.<sup>33</sup>

---

<sup>32</sup> S. Lössch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

<sup>33</sup> S. Lössch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

### 8.5 $\delta^{15}\text{N}$ -Werte in Pflanzen

Das Klima spielt bei den  $\delta^{15}\text{N}$ -Werten im Boden und in der Pflanze eine grosse Rolle. Je trockener und wüstenähnlicher ein Boden ist, desto höher ist der  $\delta^{15}\text{N}$ -Gehalt in dieser Erde und in den Pflanzen. (siehe Anhang Abb. 8 und 9)<sup>34</sup>

### 8.6. Methode

Um die Verhältnisse von ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) und ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) messen zu können, verwendet man ein Analysesystem, das mit einem Isotopenmassenspektrometer gekoppelt ist. Die zu untersuchende Substanz verbrennt im Analysesystem unter Sauerstoffzugabe zu einem Gasgemisch. Dieses Gas wird mit Hilfe von Chemikalien zu  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  umgewandelt. Als Trägergas fungiert Helium, welches  $\text{CO}_2$  und  $\text{N}_2$  zum Isotopenmassenspektrometer bringt. Dort wird es dann ausgewertet und das Ergebnis in ‰ angegeben.<sup>35</sup>

### 8.7. Ergebnis

Untersucht wurde eine 10 cm lange Haarsträhne, die von der Kopfhaut der Mumie stammt. Diese Länge entspricht den letzten 10 Lebensmonaten. Anschliessend wurde diese Strähne noch mal in 1 cm lange Segmente unterteilt. Diese Strähnen untersuchte man auf  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte und  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte. Die Resultate liegen, für den  $\delta^{15}\text{N}$ -Wert im Bereich von 22 ‰ – 25,5‰ und bei dem  $\delta^{13}\text{C}$ -Wert bei -12,5‰ bis -11,5‰. Überträgt man diese Ergebnisse auf Diagramme (siehe Abb. 10 und 11), die auf Vergleichswerte basieren, weisen die  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte darauf hin, dass die Mumie in einer Wüstenregion und/oder in einem Küstengebiet von Nordchile oder Peru gelebt hat. Vergleicht man diese Werte ausserdem mit Chinchorro-Mumien, welche aus Südamerika stammen, kann man ähnliche Isotopen-Muster erkennen.<sup>36</sup> (siehe Abb. 11 und 12)

---

<sup>34</sup> S. Lösch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

<sup>35</sup> S. Lösch: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003

<sup>36</sup> S.Lösch: Anthropologische Daten und stabile Isotope, mündlicher Vortrag beim Workshop in den Werkstätten –Neubau der Archäologischen Staatssammlung München am 10.11.2007

Die Ergebnisse für die  $\delta^{13}\text{C}$ -Werte beweisen, dass die Mumie  $\text{C}_4$ -Pflanzen gegessen hat. Erstaunlicherweise nahm der Konsum von maritimer Nahrung in den letzten 4 Monaten vor dem Tod ab. Das kann man anhand der Abweichungen der  $\delta^{15}\text{N}$ -Werte erkennen. Die Ursache dafür kann ein Umzug der Mumie ins Landesinnere gewesen sein.<sup>37</sup>

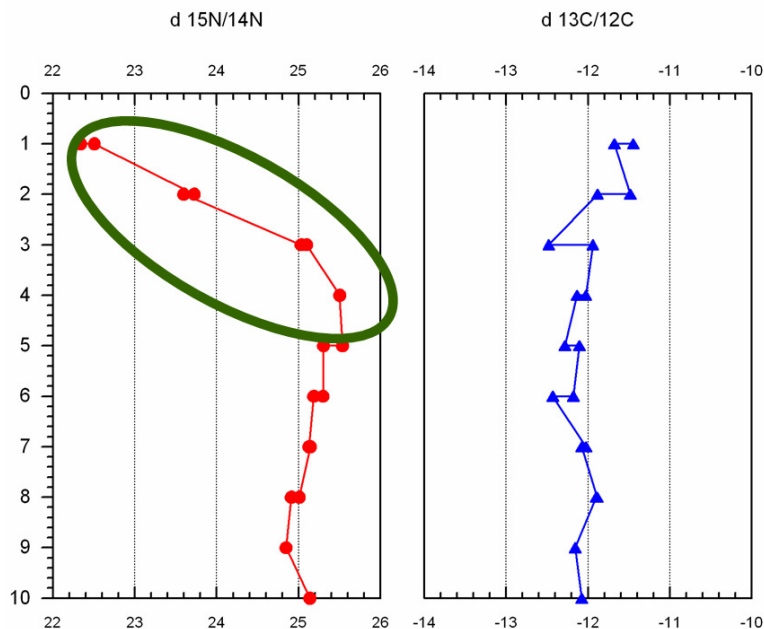


Abbildung 13: Änderung der Isotopenwerte<sup>38</sup>

## 9. Konservierung der Mumie

Um herauszufinden, ob die Mumie künstlich oder natürlich konserviert wurde, habe ich in Zusammenarbeit mit Prof. Härter und Prof. Berberich verschiedene Techniken angewandt, die nicht alle zu einem Ergebnis kamen.

### 9.1. Material und Methode

#### 9.1.1. Infrarot Spektroskopie

Bei dem ersten Versuch sollte die chemische Zusammensetzung der Moorleichenhaut mit der Zusammensetzung einer Hühnerhaut verglichen werden um herauszufinden, ob

<sup>37</sup> S.Lösch: Anthropologische Daten und stabile Isotope, mündlicher Vortrag beim Workshop in den Werkstätten –Neubau der Archäologischen Staatssammlung München am 10.11.2007

<sup>38</sup> mit freundlicher Unterstützung von S.Lösch

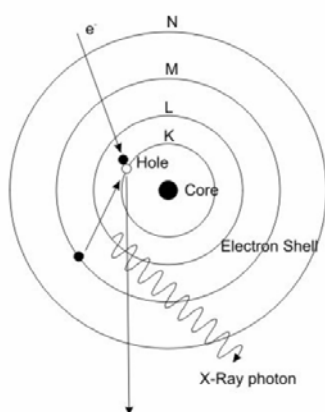
die Mumie Elemente enthält, die auf eine künstliche Konservierung hinweisen. Dabei sollten beide Proben mittels Infrarot-Spektroskopie analysiert werden.

Zu Beginn präparierte ich die Hühnerhaut so, dass sie kein Fett enthielt und möglichst trocken war. Dabei wurde die Hühnerhaut mit Calciumchlorid ( $\text{CaCl}_2$ ) unter Luftabschluss ausgelaugt. Nach einem Monat schienen die Probe und das darin enthaltene Fett getrocknet zu sein.

### 9.1.2. Ergebnis

Bei der Probenvorbereitung für die Infrarot-Spektroskopie konnte die getrocknete Hühnerhaut nicht zu einem Pulver zerkleinert werden. Dadurch kam es bei dieser Methode zu keinem Ergebnis. Da die IR bei der Hühnerhaut fehlschlug, konnte auch kein Vergleich angestellt werden. Aus diesem Grund wurde beim nächsten Versuch nur noch die Probe der Mumienhaut untersucht.

### 9.1.3. REM/EDX



Mittels gekoppelter REM und EDX Technik ermittelten wir die elementare Zusammensetzung der Mumienhaut. Dabei wurde die Probe im bereits beschriebenen REM durch Elektronenbeschuss oder Röntgenstrahlen angeregt. Folglich emittiert ein Elektron aus einer Innenschale des Atoms. Da deswegen ein instabiler Zustand entsteht, rückt ein energiereicheres Elektron aus einem äusseren Orbital auf den freigewordenen

Platz. So entstehen zum Beispiel  $K\alpha$ -Linien auf dem Spektrum, durch zurückfallende Elektronen aus der L-Schale auf die K-Schale. Bei den  $K\beta$ -Linien rücken Elektronen aus der M-Schale auf ein Loch in der K-Schale. Analog ist diese Benennung auch auf L- und M-Schalen anwendbar. Die daraus entstandene Energiedifferenz wird durch emittierte Röntgenquanten ausgedrückt. Diese

<sup>39</sup> <http://images.google.de/imgres?imgurl=http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/matem/techniques/edx.jpg&imgrefurl=http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/matem/techniques/spectroscopy.html&h=408&w=323&sz=19&hl=de&start=5&um=1&tbnid=XdHZebriFjwpdM:&tbnh=125&tbnw=99&prev=/images%3Fq%3Dedx%2B%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26channel%3Ds%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DN>

Röntgenquanten treffen nun auf das in Stickstoff gekühlte energiedispersive Röntgenspektroskop (EDX). In dem EDX befindet sich ein Silicium Kristall. In diesem Halbleiter-Kristall gehen die vier Valenzelektronen des Silicium Atoms mit jeweils einem benachbarten Aussenelektron Elektronenpaarbindungen ein. Somit entsteht ein Gitter. Durch Energiezufuhr eines Röntgenquants auf das Silicium-Gitter, werden Elektronen aus ihren Elektronenpaarbindungen gelöst. Die dadurch entstandene freie Stelle wird „Loch“ genannt. Die Anzahl der daraus resultierten Elektronen-Loch-Paare ist proportional zur Energie des elektronenspezifischen Röntgenquants. Die Elektronen-Loch-Paare werden in einem elektrischen Feld gesammelt und zu Spannungsimpulsen umgewandelt. Im Vielkanalanalysator werden diese Impulse gezählt und als Linie auf einem Impulsspektrum angezeigt. Die Höhe der einzelnen Linien entspricht der Zahl der gezählten Impulse in einer bestimmten Zeit. Da EDX- Spektren eine geringe Auflösung haben, kommt es vor, dass Linien von verschiedenen Elektronen übereinander liegen können. Jedoch erkennt der Computer die möglichen Elemente.<sup>40</sup>

#### 9.1.4. Ergebnis

Unglücklicher Weise konnten die Untersuchungen bezüglich der Konservierungsmethode nicht abgeschlossen werden. Die bis dahin bekannten Ergebnisse von REM und EDX zeigen, dass keine Rückstände von Materialien, die typisch für eine künstliche Mumifizierung sind, auf der Probe nachgewiesen werden können.

Das Resultat bei der EDX Analyse ergab, dass in hohen Konzentrationen Antimon (Sb), Eisen (Fe) und Silicium (Si) in der Probe enthalten sind (siehe Anhang Abb.15-17). Die Elemente Eisen und Antimon können, wie auch die Haaranalyse ergab, Bestandteile von Hämatit sein. Da Silicium in Sand enthalten ist, liegt Nahe, dass es sich hierbei um eine Trockenmumie handelt. In Wüsten ist ein hoher Nitrat-Gehalt vorhanden, welcher einen osmoseähnlichen Effekt mit sich bringt. Das heisst, dass den Mikroorganismen und dem toten Körper Wasser entzogen wird. Dadurch wird den Bakterien die Lebensgrundlage genommen und ausserdem können sie sich nicht mehr vermehren. Folglich wird der Verwesungsprozess aufgehalten oder verlangsamt.

---

<sup>40</sup><http://images.google.de/imgres?imgurl=http://www.reclot.de/kapitel/grafik/211edx.gif&imgrefurl=http://www.reclot.de/kapitel/21edx.htm&h=247&w=403&sz=5&hl=de&start=2&um=1&tbnid=PtY5VO0OmrNxPM:&tbnh=76&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3Dedx%2B%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26channel%3Ds%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DN>

## 10. Schluss

Zum Schluss werden die Ergebnisse der analytischen Untersuchungen aufgeführt. Eine Radiokarbonmethode datiert die Mumie auf 1400–1630 nach Christus. Anthropologische Daten haben ergeben, dass es sich um ein weibliches Individuum handelt, das 20 bis 25 Jahre alt wurde. Auffallend ist, dass sie ein Inkabein besitzt, welches typisch für die südamerikanische Bevölkerung ist. Die „Fäden“ mit denen ihre Frisur zusammengehalten wird, wurden mittels REM und Auflichtmikroskop analysiert. Dabei kam heraus, dass es sich um Alpakahaare handelt. Die Analysen der Mumienhaare haben ergeben, dass der rote Farbauftrag aus Ocker besteht. Des Weiteren fand man heraus, dass die Mumie im Bauschutt lag und Schwermetalle durch Nahrung aufgenommen hat. Auf Grund der Ernährung lässt sich darauf schliessen, dass die Mumie in einer Küsten- oder Wüstenregion lebte und sich maritim und von C<sub>4</sub>-Pflanzen ernährte. Die Konservierungsanalyse beweist, dass die Mumie natürlich mumifizierte. Alle diese Ergebnisse bestätigen die Vermutung, dass die Mumie keine Moorleiche aus dem Dachauer Moos ist.

Es stellt sich jetzt jedoch die Frage, woher sie kommt. Das Inkabein, das Alpakahaar, die Ernährung und die anderen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Mumie aus Südamerika stammt. Nahe liegend ist, dass sie in der Atacamawüste (Nordchile/Küste) gelebt hat. Da sich diese Region im Regenschatten der Anden befindet, bringen trockene Ostwinde Jahrzehnte lang keinen Regen. Das hat zur Folge, dass kein Grundwasser vorhanden ist. Diese Wüste gilt als die trockenste der Welt und sie besitzt somit ausgezeichnete Voraussetzungen für Trockenmumifikationen. (siehe Anhang Abb. 18)

Mit Hilfe von Literatur<sup>41</sup> wird spekuliert, zu welchem südamerikanischen Stamm die Mumie gehören könnte. Der rote Farbaufschlag aus Ocker ist für den Stamm der Chinchorro, der ca. 3000 v. Chr. bis 1200 n. Chr. in Nordchile gelebt hat, typisch. Demnach wurden sogar die „red mummies“ benannt, deren gesamter Körper mit Ocker bemalt wurde. Die Mumie könnte auch zu den Chiribayas gehören, da diese von 1000-1470 n. Chr. in dem Gebiet von Jlo bis Moquegua (Südperu) existierten. Sie vergruben ihre Toten in Hockposition im Wüstensand. Die extravagante Frisur der Mumie ist vergleichbar mit der von südamerikanischen Frauen, die zur Inkazeit gelebt haben<sup>42</sup>. Die Hochkultur der Inka existierte von 1470 bis 1534 n. Chr. und herrschte in ihrer

---

<sup>41</sup> Arthur C. Aufderheide: The Scientific Study of Mummies, Cambridge 2003

<sup>42</sup> mit freundlicher Unterstützung von B. Haas-Gebhart

„Blütezeit“ über ein riesiges Gebiet, welches vom heutigen Ecuador über Peru bis nach Chile und Argentinien reichte. Zeitgleich lebte auch die untersuchte Mumie in diesem Gebiet. In den Küstenregionen lebte eine Inkagruppe die ihre Toten in maximaler angewinkelter Haltung vergruben. Diese mögliche Stammeszugehörigkeit der Mumie ist eine reine Mutmaßung.

Über den Weg der Mumie von Südamerika nach Deutschland kann ebenfalls nur spekuliert werden. Man nimmt an, dass diese von der Wittelsbacher Prinzessin Therese Charlotte Marianne Auguste von Bayern hergebracht wurde. Die Tochter des Prinzregenten Luitpold von Bayern war als berühmte Forscherin und Gelehrte bekannt. Ihre Interessen für Ethnologie, Zoologie, Botanik und Anthropologie waren zur damaligen Zeit ungewöhnlich. Die Reiseberichte der Naturforscher Alexander von Humboldt und Carl Friedrich von Martius weckten schon früh Thereses Neugier auf die südamerikanische Tropenwelt. Aus diesem Grund unternahm sie viele Studienreisen, bei der sie zahlreiche anthropologische, botanische und zoologische Fundstücke nach Deutschland mitbrachte. Nach einiger Zeit besass sie eine immense Privatsammlung, die sie im Leuchtenberg-Palais aufbewahrte (siehe Anhang Abb.19). 1898 unternahm Prinzessin Therese ihre aufwendigste Expedition. Dabei folgte sie den Spuren von Alexander von Humboldt nach Südamerika. Der Augenarzt Dr. Eduard Gaffron begleitete sie mitunter nach Kolumbien, in die Karibik, über die Anden und nach Peru. Bei dieser Reise brachte Therese unter anderem zwei südamerikanische Mumien mit, die sie in der Nähe von Lima erworben hatte. Eine Mumie grub sie eigenhändig aus und für die Andere bezahlte sie einen Preis von 38 peruanischen Soles (entspricht 3.000 €). Über die gekaufte Mumie, die sogar über Grabbeilagen verfügte, gibt es unzählige Aufzeichnungen. Bei der zweiten Mumie, die die angebliche „Moorleiche aus dem Dachauer Moos“ sein könnte, ist es vorstellbar, dass sie auf Grund ihrer Gesichtsfrakturen an die Anatomische Anstalt zu wissenschaftlichen Zwecken gebracht wurde. Ihre anderen Sammlungsstücke vermachte Therese nach ihrem Tod der Zoologischen Staatssammlung und dem Völkerkundemuseum in München. Diese wurden im zweiten Weltkrieg nahezu vollständig zerstört. (siehe Anhang Abb. 20)

Im Schlussgedanken möchte ich festhalten, dass die Erforschung der Mumie eine einmalige und höchst interessante Erfahrung für mich war. Es ist faszinierend, dass man mittels modernster Untersuchungsmethoden die Vergangenheit von jahrtausend alten Mumien erforschen und rekonstruieren kann. Auf Grund der Einblicke in diesen

Berufszweig, habe ich herausgefunden, dass meine berufliche Laufbahn in die Richtung gehen soll.

Zusätzlich konnte ich durch diese Arbeit zahlreiche Bekanntschaften mit äusserst netten und hilfsbereiten Menschen knüpfen. Ich hoffe, dass wir trotz Beendigung meiner Untersuchungen in Kontakt bleiben werden.

## 11. Literaturverzeichnis

1. Aigner Reinhard und Heller Oskar: 75 Jahre Anthropologische Staatssammlung, München
2. Aufderhiede, Arthur C. The Scientific Study of Mummies, Cambridge, 2003
3. Lösch Sandra: Nahrungsnetze im frühneolithischen Nevali Cori- Rekonstruktion mittels stabiler C-, N- und O- Isotope in archäologischen Skelettfunden; Diplomarbeit München 2003
4. Mc Kinney et al. 1950 in Ambrose 1993

### Benutzte Internetseiten:

1. <http://de.wikipedia.org/wiki/ICP-MS>
2. <http://de.wikipedia.org/wiki/Melanin>
3. <http://de.wikipedia.org/wiki/Mumie>
4. <http://de.wikipedia.org/wiki/Ramanstreuung>
5. <http://home.arcor.de/elj-regelsbach/c14/files/anwendung.htm>
6. <http://images.google.de/imgres?imgurl=http://www.reclot.de/kapitel/grafik/211edx.gif&imgrefurl=http://www.reclot.de/kapitel/211edx.htm&h=247&w=403&sz=5&hl=de&start=2&um=1&tbnid=PtY5VO0OmrNxPM:&tbnh=76&tbnw=124&prev=/images%3Fq%3Dedx%2B%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26channel%3Ds%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DN>
7. <http://images.google.de/imgres?imgurl=http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/mattem/techniques/edx.jpg&imgrefurl=http://www.uniulm.de/elektronenmikroskopie/mattem/techniques/spectroscopy.html&h=408&w=323&sz=19&hl=de&start=5&um=1&tbnid=XdHZebriFjwpdM:&tbnh=125&tbnw=99&prev=/images%3Fq%3Dedx%2B%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26channel%3Ds%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DN>
8. [http://www.chemielehrer.ch/lm\\_skript%20in%20pdf/9.5\\_infrarot\\_spektroskopie.pdf](http://www.chemielehrer.ch/lm_skript%20in%20pdf/9.5_infrarot_spektroskopie.pdf)
9. [http://www.icbm.de/~gmb/download/Skript\\_VP\\_REM\\_2007.pdf](http://www.icbm.de/~gmb/download/Skript_VP_REM_2007.pdf)
10. <http://www.icp-ms.de/wasist.html>
11. <http://www.physnet.uni-hamburg.de/hp/kettemann/tpa/Rohde.pdf>
12. <http://www.rzuser.uni-heidelberg.de/~i02/jfrank/Wie%20funktioniert%20eigentlich%20ein%20ICP-MS.pdf>
13. <http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/REMHerbst2001.html>

Mündliche Quellen:

1. Prof. Berberich, Garching
2. Dr. Gimbel Manfred, LKA München
3. Gonda Kerstin, LKA München
4. Dr. Haas-Gebhard Brigitte, Archäologische Staatssammlung München
5. Dipl. Biol. Lösch Sandra, Institut für Pathologie, Städt. Klinikum München

**12. Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mir bei meiner Facharbeit zur Seite standen.

Besonderer Dank geht an:

**Herrn Dr. Andreas Kratzer**, der mir die Mitarbeit an der Moorleiche vermittelte und mich immer unterstützte. Er hat alle Kontakte hergestellt und mir somit die Arbeit am praktischen Teil ermöglicht.

**Frau Dr. Brigitte Haas-Gebhard**, die mich von Anfang an in die Untersuchungen involvierte, mich auf dem Laufenden hielt und mit grosser Hilfsbereitschaft sämtliche Fragen beantwortete.

**Frau Dipl.-Biol. Sandra Lösch**, die mir freundlicherweise ihre Materialien zur Verfügung stellte und mir alle Fragen beantwortete.

**13. Selbständigkeitserklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die Facharbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

....., den .....

Ort

Datum

.....

Unterschrift der Schülerin

## 14. Anhang

### Bilderverzeichnis:

Titelbild: Archäologische Staatssammlung München, Fotograf M. Eberlein

**Abb.1, S.3** Frisur der „Moorleiche“:

Archäologische Staatssammlung, Fotograf: M. Eberlein

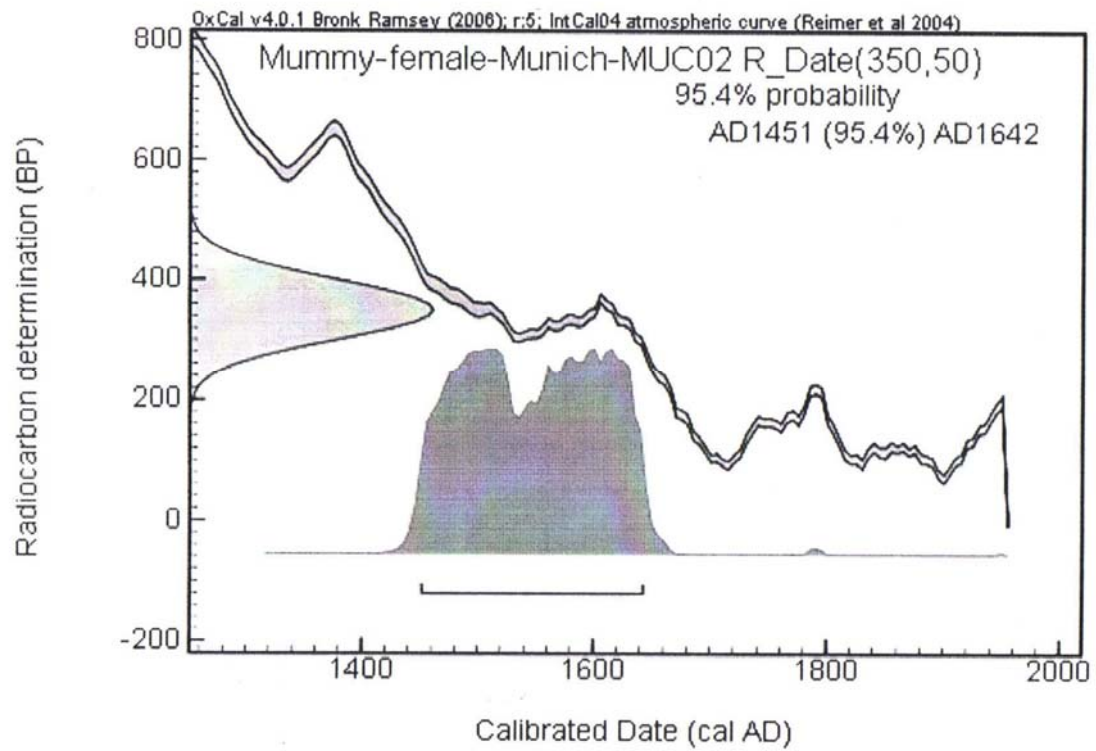


**Abb.2, S.3** Moorleiche Frontansicht:

Archäologische Staatssammlung, Fotograf: M. Eberlein

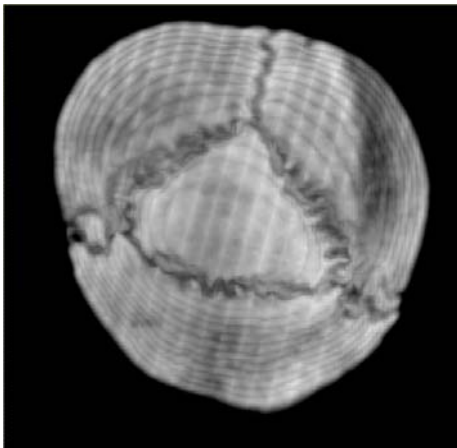


**Abb.3, S.7** Auswertung der Radiokarbonmethode:  
Archäologische Staatssammlung, B. Haas-Gebhard



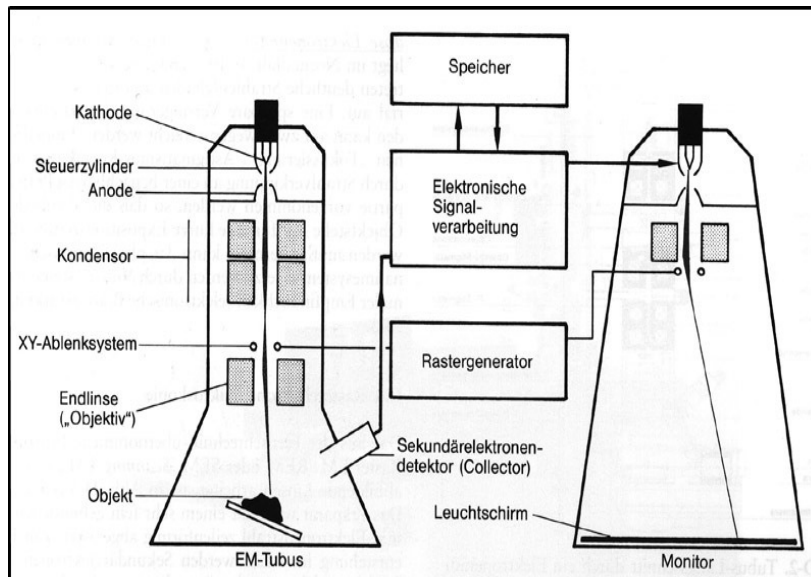
**Abb.4, S.8** Inkabein

Mit freundlicher Genehmigung von S. Lösch



**Abb.5, S.8** REM- Apparatur

<http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/REMHerbst2001.html>

**Abb.6, S.10** schematische Darstellung eines IR- Spektrometers

[http://www.chemielehrer.ch/lm\\_skript%20in%20pdf/9.5\\_infrarot\\_spektroskopie.pdf](http://www.chemielehrer.ch/lm_skript%20in%20pdf/9.5_infrarot_spektroskopie.pdf)

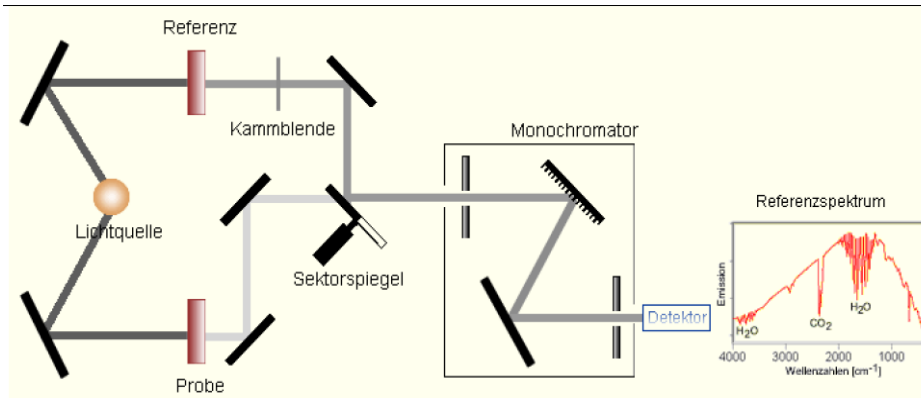


Abb.7, S.12 Aufbau eines ICP-MS

<http://www.icp-ms.de/wasist.html>

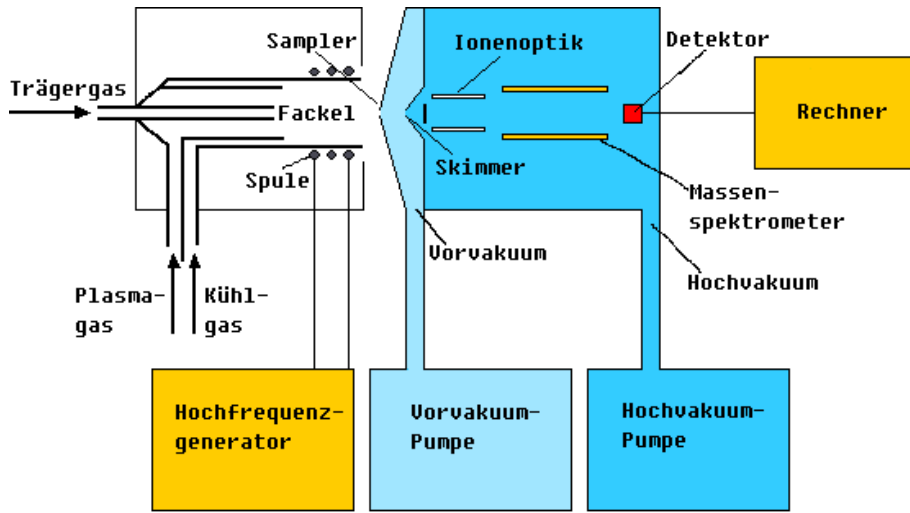
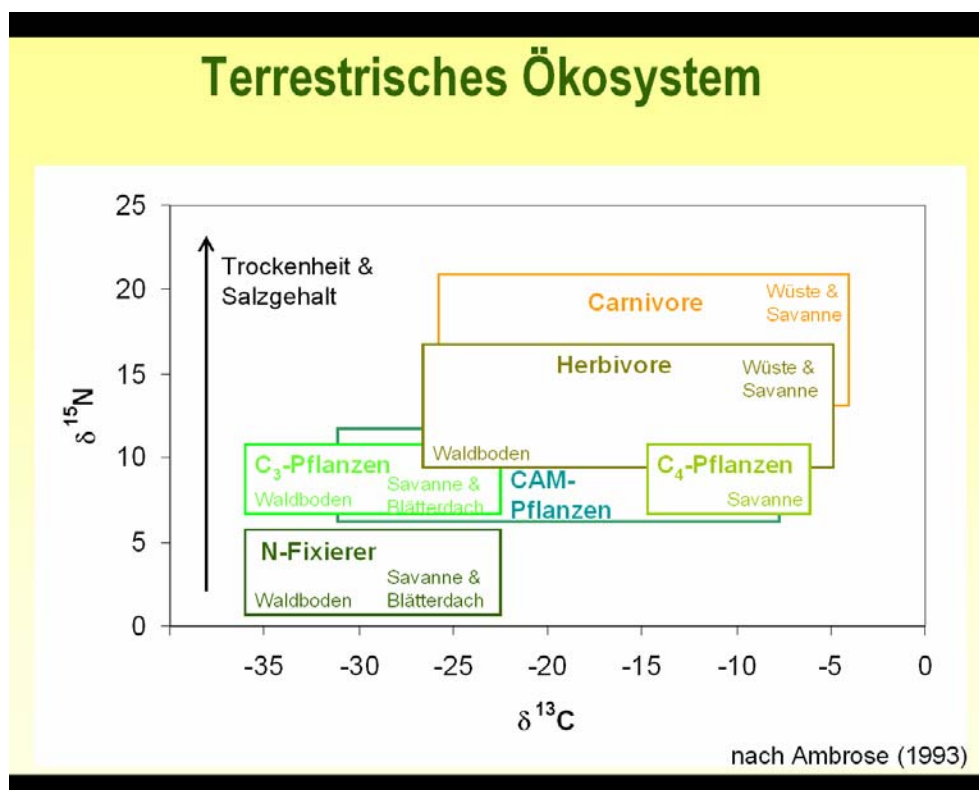


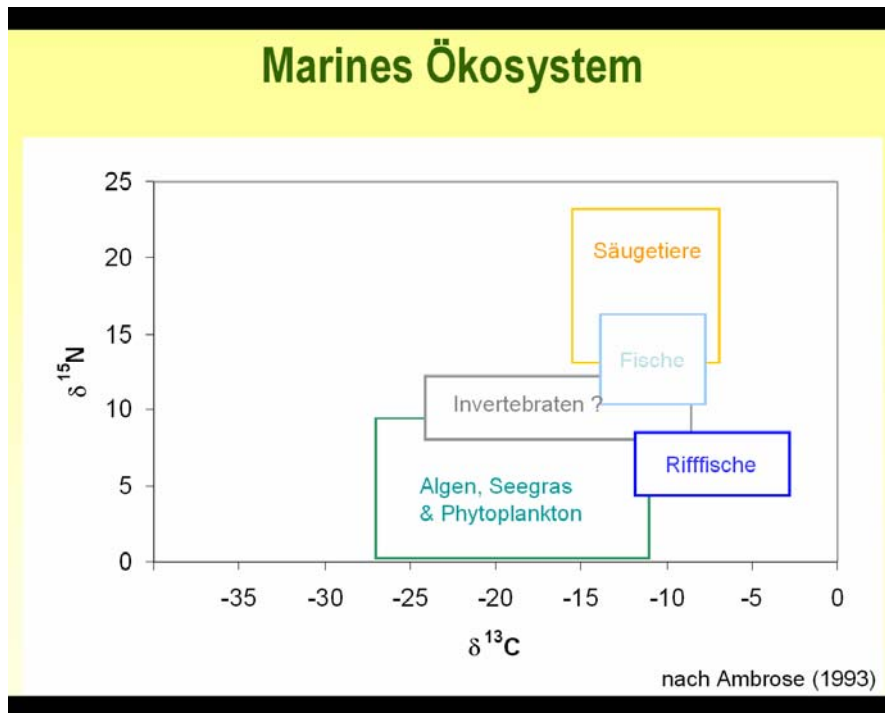
Abb.8, S.14 Terrestrisches Ökosystem

Mit freundlicher Unterstützung von S. Lösch



**Abb. 9, S.14** Marines Ökosystem

Mit freundlicher Unterstützung von S. Lösch

**Abb.10, S.15** Dunkelreaktion der C<sub>3</sub>-Pflanzen,

K. Gallenberger: Skript zum LK Chemie - Stoffwechselprozesse

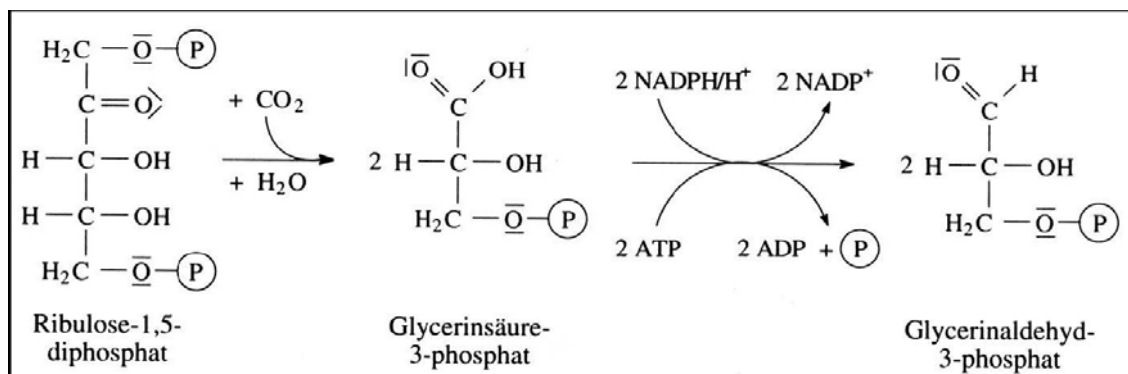


Abb.11, S.18 Terrestrisches Ökosystem mit Daten

Mit freundlicher Unterstützung von S. Lösch

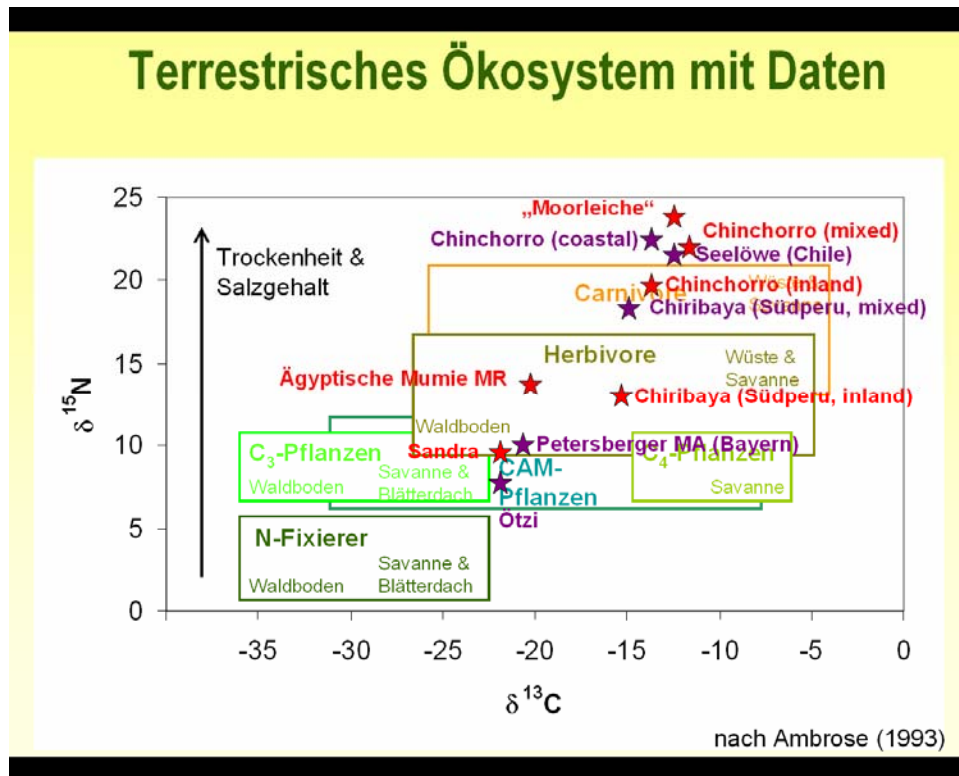
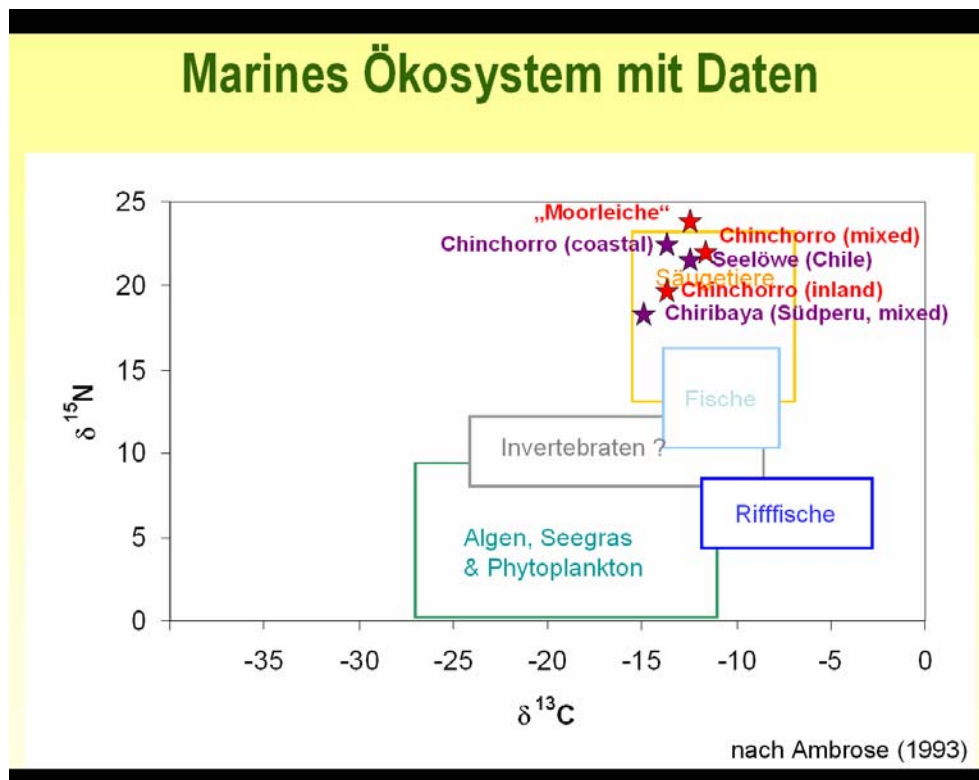


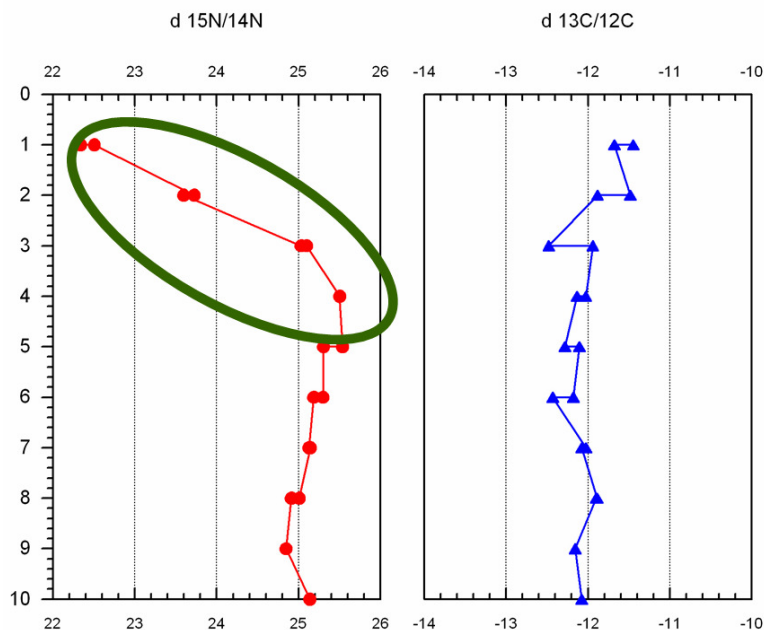
Abb.12, S.18 Marines Ökosystem mit Daten

Mit freundlicher Unterstützung von S. Lösch

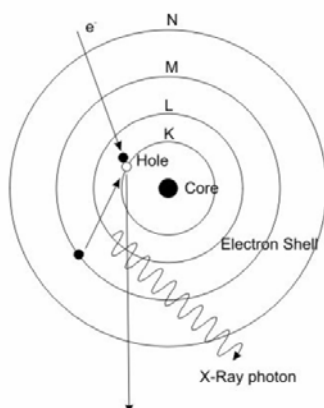


**Abb.13, S.19** Änderung der Isotopenwerte

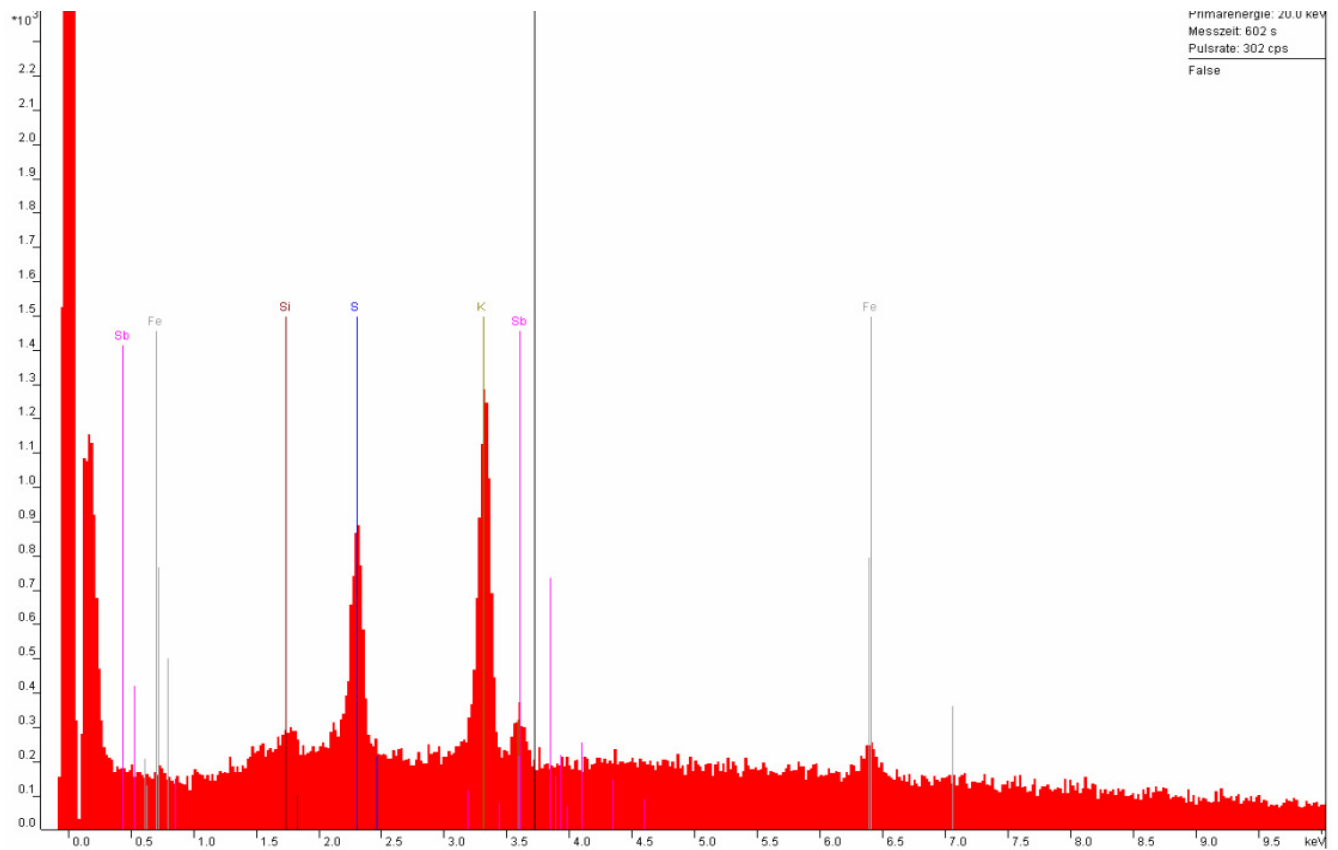
Mit freundlicher Unterstützung von S. Lösch

**Abb.14, S.20** Entstehung von Röntgenquanten

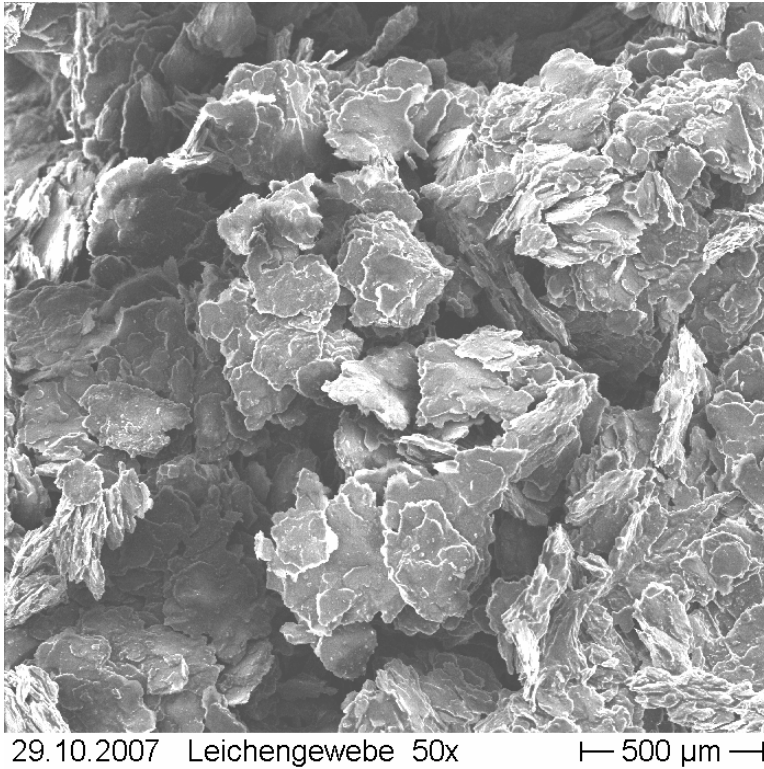
<http://images.google.de/imgres?imgurl=http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/mattem/techniques/edx.jpg&imgrefurl=http://www.uni-ulm.de/elektronenmikroskopie/mattem/techniques/spectroscopy.html&h=408&w=323&sz=19&hl=de&start=5&um=1&tbnid=XdHZebriFjwpdM:&tbnh=125&tbnw=99&prev=/images%3Fq%3Dedx%2B%26svnum%3D10%26um%3D1%26hl%3Dde%26client%3Dfirefox-a%26channel%3Ds%26rls%3Dorg.mozilla:de:official%26sa%3DN>



**Abb.15,** S.21 REM Ergebnisse von der Mumienhaut  
von Miriam Meyer



**Abb.16**, S.21 EDX Ergebnisse der Mumienhaut  
von Miriam Meyer



**Abb. 17**, S.21 EDX Ergebnisse der Mumienhaut  
von Miriam Meyer

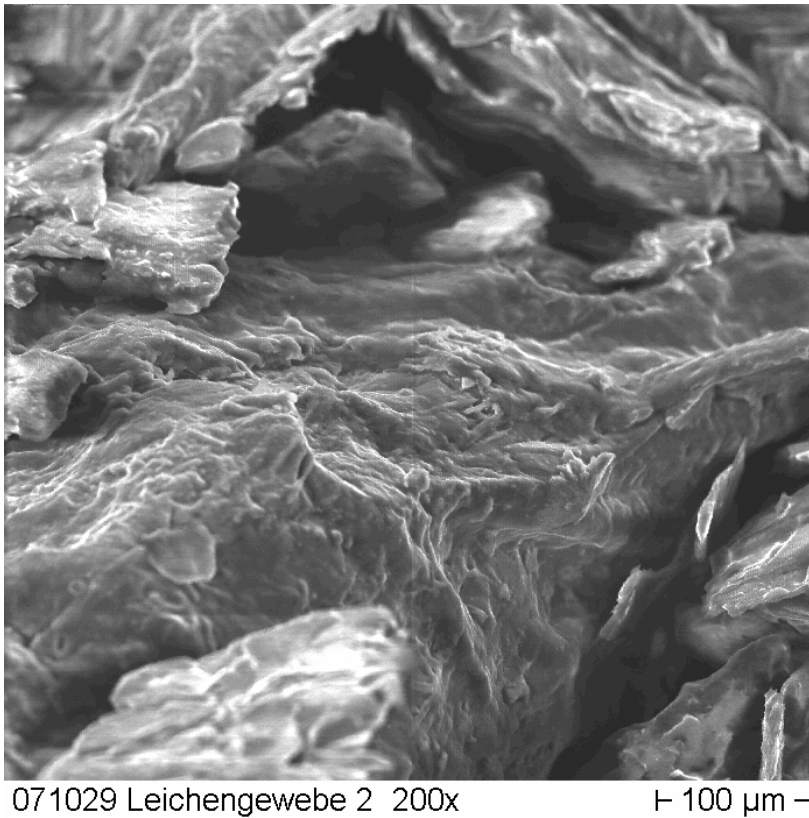


Abb.18, S.22 Landkarte Südamerika

Diercke Weltatlas



**Abb. 19, S.23** Sammlungsstücke Prinzessin Therese in Leuchtenberg-Palais  
Mit freundlicher Genehmigung der Archäologischen Staatssammlung



**Abb.20, S.23** Therese, Dr. Gaffron; zwei verpackte Mumien mit Grabbeilagen  
Mit freundlicher Genehmigung der Archäologischen Staatssammlung

