

# Über antike Wandputze

Von Dr. F. MÜLLER-SKJOLD

Phys.-Chem. Laboratorium der Staatlichen Hochschule für bildende Künste, Berlin,  
und Laboratorium des Vereins deutscher Kalkwerke e. V. Berlin

Wandmörtel und Fugenmörtel der verschiedensten Zeiten und Kulturkreise sind oft und eingehend untersucht worden. Wenn auch die campanischen Wandmalereien — an der Spitze die pompejanischen — das Interesse der Maler, Maltechniker und Chemiker in Hinsicht auf verwendete Farbpigmente und Bindemittel gefunden haben, so sind doch in der Fülle der Arbeiten<sup>1)</sup> kaum irgendwelche Hinweise auf die Wandputze, als Träger dieser Malereien, enthalten. Einige wenige Analysen finden sich bei Eibner<sup>2)</sup>, jedoch nur Analysen des obersten Putzes. Die weiter unten zu besprechende Schichtung des Materials wird zwar erwähnt<sup>3)</sup>, Untersuchungen der einzelnen Lagen jedoch fehlen, obwohl eine Stelle bei Vitruv<sup>4)</sup> eindeutig zeigt, daß die maltechnische Vollkommenheit der Wandmalerei nicht zuletzt von dem handwerklich richtigen Aufbau der einzelnen Schichten abhängt. Vitruv nennt sieben Schichten; in den vorliegenden Proben sind zumeist vier, seltener fünf Schichten — die Malschicht einbezogen — zu erkennen. Vergleiche mit den Wand- und Fugenmörteln verbieten sich zumeist, da die Wandputze sehr viel sorgfältiger hergestellt sind; z. B. fehlen fast stets die bei den Mörteln häufig vorkommenden „Kalknester“, ein Zeichen für die sorgfältigere Durcharbeitung des Putzmörtels.

Aufgabe der hier beschriebenen Untersuchungen ist, Klarheit über den Gesamtaufbau der antiken Wandmalereien zu gewinnen, Ziel ihre Rekonstruktion, etwa im Sinne einer Anleitung für moderne Wandtechniken.

Die Putze, die hier also allein den Gegenstand der Untersuchungen bilden, sind die Wandbewürfe, die auf den gemauerten Haus- und Zimmerwänden aufgetragen sind und direkt unter der Malschicht liegen. Die Malschicht selbst in ihrem Aufbau und ihrer Zusammensetzung soll einer späteren Betrachtung vorbehalten bleiben. Das Untersuchungsmaterial<sup>5)</sup> ist nicht konserviert, die Fundorte sind jeweils bekannt. Zur Erzielung guter Durchschnittswerte konnten Stücke ausgewählt werden, deren Größe sämtliche Bestimmungen auszuführen erlaubt.

Wie bereits früher gezeigt<sup>6)</sup>, finden sich in Pompeji in der Casa del Larario unvollendete Wandbewürfe, die eine klare Schichtenfolge erkennen lassen. Wird ein Putzstück senkrecht zur Malschicht angeschliffen, so zeigt sich bei allen zur Verfügung stehenden Handstücken mit geringen Abweichungen ein geschichteter Aufbau. Über dem Mauerwerk liegt zunächst ein grauer Putz, der verschiedenartige Zuschlagstoffe enthält. Von diesem Unterputz (U. P.) hebt sich der helle weißlich-gelbe Oberputz (O. P.) scharf ab. Beide werden häufig durch einen dem O. P. sehr ähnlichen Zwischenputz (Z. P.) getrennt. Manchmal ist auf dem O. P. als Übergang zur Malschicht — vielleicht als Ausgleichsschicht — eine dünne Lage fast gleicher Zusammensetzung wie der O. P. aufgetragen. Im folgenden werden die Untersuchungsergebnisse an den einzelnen Putzschichten gesondert gegeben, um dann in einer Zusammenfassung aus den „Mittelwerten“ den Durchschnittswandputz der Antike zu gewinnen.

## Die Unterputze.

Durch die Zuschlagmaterialien haben die U. P. eine bräunlich-graue Farbe. Einzelne größere Komponenten der Zuschläge sind gut zu identifizieren. Der Bindekalk ist weißlich-grau. Einzelne Leucitkristalle in den Zuschlägen aus vulkanischem Gesteinsmaterial zeigen unter der Analysenlampe ein kräftiges rotes Aufleuchten<sup>7)</sup> und verursachen dadurch eine

dunkelrotbraune Gesamtfluoreszenz der Putze. Organische Verbindungen scheinen in den untersuchten U. P. zu fehlen. Während die O. P. schwer von den Z. P. zu trennen sind, kann man die U. P. leichter von den O. P. entfernen.

Zur quantitativen Analyse wird von den einzelnen Probestücken Material von verschiedenen Stellen verwendet, um so brauchbare Durchschnittswerte von jedem Putz zu erhalten. Das Analysengut wird vorsichtig zerkleinert — nicht gemörst — und bei 105° getrocknet. Die Einwaage wird in Wasser aufgeschlämmt und etwas mehr konz. Salzsäure zugesetzt, als zur Auflösung der Probe benötigt wird. Die Lösung erfolgt auf einem mäßig warmen Wasserbad, die einzelnen Bestandteile werden nach dem üblichen Analysengang getrennt und bestimmt. Diese Vorsichtsmaßregeln ergeben sich zwangsläufig daraus, daß der in den meisten U. P. vorliegende Ziegelschlag<sup>8)</sup> und die Zuschläge vulkanischen Materials (Tuffe), zu fein pulverisiert und dem Einfluß zu hoch konzentrierter oder zu heißer HCl ausgesetzt, in nicht zu übersehender Weise angegriffen werden und in Lösung gehen. Der dagegen vorsichtig behandelte HCl-unlösliche Rückstand kann zur Korngrößenbestimmung benutzt werden. Das Mengenverhältnis Ziegelmehl zu den übrigen Zuschlägen wird im Dünnschliff auf dem Integrationstisch ausgemessen<sup>9)</sup>. Zur Feststellung der Korngrößen dienen die Din-Siebe 2,0; 1,2; 0,5; 0,2 und 0,09. (DIN 1171.)

Tabelle 1.  
Die Werte beziehen sich auf die bei 105° getrocknete Substanz.

Nr. und Bez.	Herkunft	Stärke mm	Glühverlust %	HCl-unlös. %	SiO <sub>2</sub> lösl. %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	CaO %	MgO %	SO <sub>3</sub> %
1. R. Z.	Rom	25	14,7	63,1	1,2	2,5	17,8	0,3	0,14
2. Ww.	Pompeji	10	19,3	57,4	1,0	2,2	21,1	0,4	0,08
3. Cr. a.	Pompeji	25	10,9	70,1	1,7	5,1	10,5	0,8	0,09
4. Cr. b.	Pompeji	4–5	13,4	70,7	0,4	2,1	12,3	0,5	0,12
5. Schw.	Pompeji	15	16,2	60,5	0,7	1,0	20,6	0,6	0,35
6. Fl.	Rom	20	15,2	61,4	0,7	1,9	19,6	0,9	0,26
7. Ka.	Pompeji	20	17,9	58,2	1,1	4,1	18,5	0,5	0,01
Mittelwert:			16,7	60,1	0,9	2,3	19,5	0,5	0,15

Zu den Analysenergebnissen der Tabelle 1 ist folgendes zu bemerken. Die angegebenen Putzstärken sind Mindestwerte, da es unsicher ist, ob der Wandputz glatt von der Mauer entfernt worden ist. Der Glühverlust hat nur den Wert einer Kontrollgröße. Das Material zu seiner Einwaage wird nicht den gleichen Stellen des Putzes entnommen wie das Analysengut. Somit hilft er über die Gleichmäßigkeit der Putzzusammensetzung zu entscheiden. Der Putz 2 (Ww.) z. B. ergibt, entsprechend seiner schon äußerlich auffallenden Uneinheitlichkeit, als Summe der in der Tabelle angeführten Analysenwerte 101,6%. Von einer gesonderten Bestimmung der Kohlensäure und des chemisch gebundenen Wassers wird Abstand genommen, da der Grad der Durchcarbonisierung der Probestücke nicht dem des geschlossenen Wandbewurfes entsprechen kann. Die lösliche Kieselsäure und die Aluminium- und Eisenoxycide stammen zum größten Teil aus dem Zuschlagmaterial. Im Anschliff und im Dünnschliff kann man nämlich an den Grenzen Zuschlag gegen Bindekalk erkennen, daß die Zuschlagsubstanzen, vor allem das Ziegelmehl, angegriffen sind. Aus diesen veränderten Zuschlagsubstanzen stammen wohl auch die größeren Flocken von Kieselsäure, die sich beim Lösen der Probe abscheiden. Im übrigen ist nie ganz zu vermeiden, daß hiervon etwas in Lösung geht. Auf den Gehalt an MgO und SO<sub>3</sub> in Beziehung zu CaO wird bei den O. P. zurückzukommen sein. Ihrer Zusammensetzung nach, vor allem nach dem Gehalt an löslicher Kieselsäure, Al- und Fe-Oxyden, sind diese U. P. nicht mit römischen Mauermörteln in Beziehung zu setzen<sup>10)</sup>.

Tab. 2 verzeichnet die Korngrößen der Zuschläge. Die Zusammensetzung der Zuschläge ist i. allg. gleichartig und beträgt im Mittel 20–25% Ziegelmehl, 15–20% Quarzsand und 55–65% vulkanische Gesteinstrümmer. Diese sind abgerollt, nur der Quarz ist scharfkantig. In den vulkanischen Gesteinstrümmern lassen sich als Einzelkomponenten Olivin, Augit, Plagioklas, Hornblende, Biotit und Erz (Magnetit) feststellen.

<sup>1)</sup> E. Berger: Die Maltechnik des Altertums. München 1904. A. P. Laurie: Greek and Roman Painting. Cambridge 1910. A. Eibner: Entwicklung und Werkstoffe der Wandmalerei. München 1926. Brancini: Pitture murali. Rom. Bardi 1935.

<sup>2)</sup> A. Eibner, a. a. O.

<sup>3)</sup> A. a. O. unter 1), z. B. auch F. Frensdorff: Der römische Gutshof in Köln-Müngersdorf. Berlin 1938.

<sup>4)</sup> Vitruvius, Zehn Bücher über Architektur. Buch VII. Kap. 3. Übersetzung von Reber. Stuttgart 1865. S. Eibner a. a. O.

<sup>5)</sup> Das Untersuchungsmaterial stammt von Prof. K. Wehler, Staatl. Hochschule für bildende Künste. Für die liebenswürdige Überlassung möchte ich auch an dieser Stelle bestens danken.

<sup>6)</sup> E. Baier u. F. Müller-Skjold, diese Ztschr. 52, 533 [1939].

<sup>7)</sup> L. Royer, Bull. Soc. franç. Minéral. 53, 515 [1930].

<sup>8)</sup> Vitruv nennt auch gestoßene Tonscherben.

<sup>9)</sup> Römische Mauermörtel s. z. B. K. Biehl, Tonlad.-Ztg. 51, 139 [1927].

Tabelle 2.  
Von den Zuschlägen haben Korngrößen größer als (in %):

Nr.	1,2 mm	0,5 mm	0,2 mm	0,09 mm	Rest
1.	3,4	32,1	57,5	5,3	1,7
2.	3,7	26,3	56,2	10,7	3,1
3.	9,4	77,5	6,3	3,5	3,3
4.	18,9	71,9	7,2	1,1	0,9
5.	8,1	39,8	46,0	4,4	1,7
6.	10,8	32,1	48,8	6,6	1,7
7.	11,0	33,1	49,1	5,5	1,3
Mittelwert:	7,4	32,7	51,5	6,5	1,9

Der Wandputz Cr. fällt aus der Reihe der anderen heraus. Er setzt sich aus zwei — hier mit 3. Cr. a. und 4. Cr. b. bezeichneten — den U. P. entsprechenden Schichten zusammen; bei ihnen weichen die Werte für Zusammensetzung und Korngrößenverteilung der Zuschläge von denen der anderen Putze ab. Diese beiden Putzschichten sind auch beträchtlich weicher und bröckeliger als alle anderen. Schließen wir sie aus, so gewinnen wir aus den übrigen „Mittelwerte“, die in beiden Tabellen angegeben sind.

### Die Oberputze.

Diese Putzschichten, deren Zuschlag aus Marnormehl — in den hier gegebenen Proben nur bei Nr. 1 — oder Calcitkristallen besteht, werden von Eibner „Marnorsandputze“ genannt. Sie zeichnen sich durch außerordentliche Härte aus.

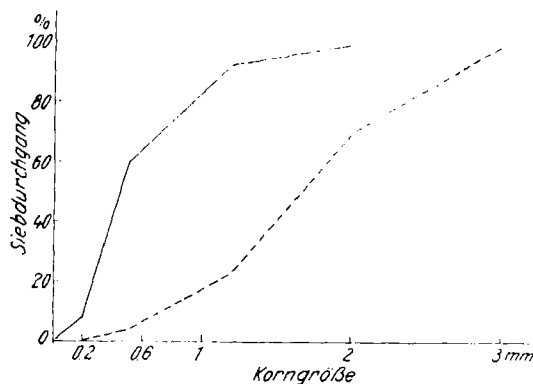
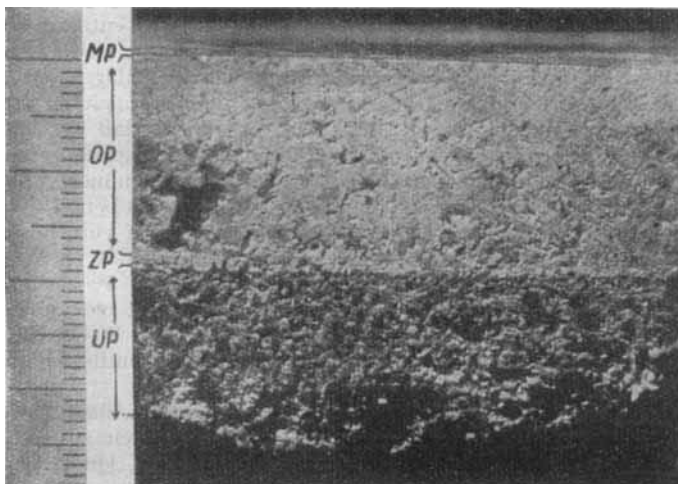


Abb. 1.

Calcit- und Marnorsandputze wurden auch in Mörteln anderer Fundorte festgestellt, z. B. von Rathgen<sup>10)</sup> an Mörteln der Pyramide des Chefred. Weiterhin haben Biehl<sup>11)</sup> u. Grün<sup>12)</sup> Kalksteinsplint in Mörteln der römischen Wasserleitung in der Eifel gefunden.

Für die Technik der Analyse gilt das oben bei den Unterputzen Gesagte. Tab. 3 gibt die Zusammensetzung dieser Putze; die in der Spalte „Calcitzuschlag“ gegebenen Werte sind aus



1 Skalenteil = 1 mm    MP = Malputz    OP = Oberputz  
ZP = Zwischenputz    UP = Unterputz

Abb. 2. Wandputz 7. Ka.

den Dünnschliffen der einzelnen Proben auf dem Integrations-tisch gewonnen. Der O. P. des Handstückes 3 (Cr.) wird hier nicht angeführt, da er seinem ganzen Aufbau nach schon zu den Malschichten zu rechnen ist. Aus dem „Mittelwert“ der Tab. 3 ist ersichtlich, daß unter Nichtberücksichtigung des Calcitwertes von 64,4% beim Putz Nr. 2, der durch ungewöhnlich große Calcitkristalle verursacht ist (es wurde z. B. ein Rhomboeder von 5 × 5 × 6 mm Kantenlänge herauspräpariert), ein Durchschnitt von rd. 50% Calcitzuschlag herauskommt. Diese etwas gewalttätig erscheinende Mittelbildung rechtfertigt sich, da es sich ja schließlich um technisches Material handelt. Zur Korngrößenbestimmung werden auf den angeschliffenen Putzen auf einer Fläche von mehreren Quadratcentimetern die Kristalle ungefähr gleicher Größe ausgezählt. Es ergeben sich daraus Korngrößengruppen, und jeder dieser Gruppen wird eine den Durchschnittskantenlängen der jeweiligen Kristalle entsprechende Dicke zugeordnet. Unter Berücksichtigung einer Dichte des Calcits von 2,6 wird eine Korngrößenverteilung gewonnen, die Abb. 1 in der gestrichelten Kurve zeigt.

Tabelle 3.  
Analysensubstanz bei 105° getrocknet.

Nr.	Stärke mm	Glüh- verlust	HCl- unlös.	SiO <sub>2</sub> lös.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	„Calcit- zuschlag“
1.	7	42,8	1,3	0,2	0,5	55,3	0,2	0,04	47,2
2.	6	43,5	0,3	Spur	0,1	55,7	0,3	0,03	64,4
5.	11	43,2	0,8	0,1	0,4	56,4	0,6	0,04	53,0
6.	3	43,3	1,2	0,2	0,7	55,7	0,6	0,05	45,2
7.	15	43,8	0,6	0,1	0,3	55,4	0,2	0,07	55,5
Mittelwert:		43,3	0,8	0,1	0,4	55,3	0,2	0,05	50,0
„Kalk“ geb.: —			1,4	0,2	0,7	97,2	0,4	0,1	

Der Untersuchung der O. P. kommt noch eine weitere Bedeutung zu. Man kann nämlich zwanglos annehmen, daß der gebrochene Kalkstein, der den kristallisierten Calcit als Zuschlag liefert, zugleich das Rohmaterial zum Erhitzen des Kalkes für alle Putze darstellt. Der aus den Daten des Mittelwertes der Tab. 3 errechnete „Kalk“ hat die in der untersten Reihe dieser Tabelle gegebene Zusammensetzung. Da er auch als Kalk für die U. P. benutzt worden sein dürfte, geht für diese hervor, daß beträchtliche Mengen des MgO und der Sulfate dem Zuschlag entstammen.

### Die Zwischenputze.

Die Z. P. entsprechen in ihrem Aufbau weitgehend den O. P. Die größeren Mengen von Unlöslichem stammen, wie man an ihrer Art erkennen kann, aus dem Zuschlag des jeweiligen U. P. Die teilweise sehr geringe Stärke dieser Schichten begünstigt beim Auftragen die Vermischung von U. P. und Z. P. Die technische Bedeutung dieses Z. P. ist unklar. Von der Bestimmung des Calcitzuschlages wurde abgesehen.

Tabelle 4.  
Analysensubstanz bei 105° getrocknet.

Nr.	Stärke mm	Glüh- verlust	HCl- unlös.	SiO <sub>2</sub> lös.	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
2.	2—3	43,0	0,4	Spur	0,1	55,9	0,5	Spur
5.	3	41,8	4,2	0,4	0,5	53,8	0,7	0,3
7.	1—2	41,2	6,3	0,6	0,9	50,7	0,1	0,2

Die mitunter zwischen Malschicht und O. P. auftretende Ausgleichsschicht soll erst bei der Untersuchung der eigentlichen Malschicht behandelt werden.

### Zusammenfassung.

Nimmt man den in Tabelle 3 angeführten gebrannten Kalk als Bindekalk für alle untersuchten Putze an, so läßt sich das Mischungsverhältnis Kalkteig zu Zuschlag von U. P., Z. P. und O. P. berechnen. Zur Gewinnung eines handwerklich üblichen Kalkteiges löscht man gebrannten Kalk ab und läßt ihn mit einem Überschuß an Wasser „sumpfen“. Der gebrauchsfertige Kalkteig enthält dann an Wasser ungefähr 50% seines Gesamtgewichtes<sup>13)</sup>. Auf glühverlustfreie Substanz bezogen erhält man bei richtiger Verteilung der einzelnen Daten des Analyseergebnisses des U. P.-Mittelwertes auf Kalk und Zuschlag des Verhältnis 24% zu 76%. Umgerechnet auf Kalk-

<sup>10)</sup> P. Rathgen, *Tonind.-Ztg.* **35**, 586 [1911].<sup>11)</sup> K. Biehl, ebenda **52**, 346 [1928].<sup>12)</sup> R. Grün, diese Ztschr. **48**, 124 [1935].<sup>13)</sup> Diese Angabe und die Zahlenwerte der spezifischen Gewichte sind der Arbeit von K. Biehl, a. a. O., entnommen.

teig ist das Gewichtsmischungsverhältnis Kalkteig zu Zuschlag 1:1,6. Unter Benutzung der spezifischen Gewichte von 1,3 für Kalkteig, 1,6 für Quarzsand, 1,0 für Ziegelmehl und 1,6 für den lockeren vulkanischen Gesteinssand ergibt sich das Mischungsverhältnis für den U. P. in Raumteilen zu rd.

1:1,5.

Es werden Raumteile angegeben, da in der Praxis niemals nach Gewichtsteilen gemischt wurde. Dieses Mischungsverhältnis ist also fetter als die von Biehl gegebenen Mauer- und Mörtel der Hadriansburg und des Forums zu Rom (1:2,6 bzw. 1:2,7), aber erinnert an die Ergebnisse des gleichen Forschers bei Mauer- und Mörteln der Saalburg. Die Korngrößenverteilung des Zuschlages vom U. P. ist der ausgezogenen Kurve der Abb. 1 zu entnehmen. Für den O. P. ergibt sich bei gleicher Berechnung und unter Benutzung des spezifischen Gewichtes von 1,6 für den lockeren Calcitzuschlag das Mischungsverhältnis in Raumteilen zu rd.

1:1.

Die Korngrößenverteilung des Calcitzuschlages gibt die gestrichelte Kurve der Abb. 1.

Dem Z. P. ist das gleiche Mischungsverhältnis wie dem O. P. zuzuordnen, nur daß der Calcitzuschlag feiner im Korn ist.

Es handelt sich hier also um ausgesprochen fette Putze, die mit einem hochwertigen Weißkalk angemacht sind. Während es heute zur Gewohnheit geworden ist, die Zuschlagskörnung in den einzelnen Lagen von der Wand bis zur Malschicht kontinuierlich feiner werden zu lassen, war im Gegenteil dazu die Reihenfolge im alten Rom: Mittel (U. P.) — Fein (Z. P.) — Grob (O. P.) — Fein (Malschicht). Auch verdienen die Marmorsandputze, ihrer großen Härte und Reißfreiheit wegen, größeres Interesse von seiten der modernen Wandmalerei.

Für die Möglichkeit, am Polarisationsmikroskop und Integrationstisch die Messungen auszuführen, bin ich dem Direktor des Mineralogischen Instituts der T. H. Berlin, Prof. Dr. W. Schmidt, zu bestem Dank verpflichtet.

Prof. M. Kutschmann, dem Direktor der Staatlichen Hochschule für die bildenden Künste, Berlin, danke ich für sein stetes Interesse an dieser Untersuchung und für die Bereitstellung der erforderlichen Mittel.

Eingeg. 21. August 1939. [A. 76.]

## Die Assimilation atmosphärischen Stickstoffs durch Bodenbakterien

Von Dr. RUDOLF HÜTTEL, Chem. Universitätslaboratorium München.

Wenn man die Wege überblickt, auf denen der Stickstoff im Stoffwechselgeschehen der belebten Natur auf- und abgebaut wird, so kann man diese zu einem Kreislauf ordnen, dessen wichtigste Angelpunkte das Eiweiß einerseits, Salpetersäure, salpetrige Säure und Ammoniak andererseits sind. Hinzu kommt als wichtige Ergänzung die Vermehrung des Gesamt-vorrats der Natur an gebundenem, allgemein verwertbarem Stickstoff durch Assimilation des molekularen Stickstoffs der Luft. Zu dieser Leistung sind nach dem heutigen Stand unserer Kenntnisse nur einige wenige Mikroorganismen befähigt. Von ihnen sind drei Arten genauer untersucht worden. Die eine, *Azotobacter chroococcum*, lebt aerob frei im Boden. Die andere, *Clostridium pasteurianum*, lebt ebenfalls frei, ist aber anaerob und erzeugt ihre Lebensenergie im wesentlichen durch Buttersäuregärung. Da der Chemismus dieses Bakteriums noch wenig untersucht ist, wird es im folgenden uns nicht mehr beschäftigen. Die dritte stickstoffbindende Bakterienart sind die bekannten Knöllchenbakterien, deren zahlreiche, morphologisch nicht oder nur sehr schwer zu unterscheidende Rassen unter dem Namen *Bacterium radicicola* (in der angelsächsischen Literatur *Rhizobium*) zusammengefaßt sind. Sie leben mit Leguminosen in Symbiose und bilden an deren Wurzeln völlig mit Bakterien angefüllte Knöllchen.

Auch bei Nichtleguminosen, z. B. an den Wurzeln von *Alnus* und *Elaeagnus* und auf den Blättern einiger tropischer *Rubiaceen* kommen solche Knöllchen vor, für die von einigen Beobachtern Stickstofffixation nachgewiesen wurde. Die in ihnen lebenden Mikroorganismen sind noch wenig charakterisiert, ebenso wie auch über das Stickstoffbindungsvermögen einiger niederer Pilze noch keine völlige Klarheit herrscht.

Die Bedeutung der Stickstoffsammler für die Landwirtschaft soll durch einige Zahlen gekennzeichnet werden. Am leichtesten und einwandfreiesten läßt sich der Stickstoffzuwachs bei den symbiotischen Leguminosenbakterien messen. Kultiviert man eine Leguminose auf einem Felde 1, auf dem vorher eine andere Pflanze gewachsen war, so bleibt ihre Entwicklung hinter der auf einem Vergleichsfelde 2, auf dem schon bisher die gleiche Hülsenfrucht kultiviert worden war, zurück. Dies rührt davon her, daß im Boden des Feldes 2 bereits die spezifischen Knöllchenbakterien, die die Leguminose braucht, vorhanden sind, während das Feld 1 anfänglich davon praktisch frei ist. Bei sonst gleichen äußeren Bedingungen gibt die Differenz der beiden Erträge also ein Maß für das Wirken der Bakterien. Das Ergebnis solcher Versuche bringt Tabelle 1<sup>1)</sup>.

Tabelle 1.

Kilogramm Stickstoff je Jahr und Hektar in ober- und unterirdischer Pflanzenmasse	
1. Serradella nach Serradella .....	216,9 kg
Serradella nach Senf .....	51,8 kg
Stickstoffgewinn der Bakterien .....	165,1 kg
2. Lupinen nach Serradella .....	225,9 kg
Lupinen nach Erbsen .....	75,3 kg
Stickstoffgewinn der Bakterien .....	150,6 kg

<sup>1)</sup> Schneiderwind: Die Ernährung der landwirtschaftlichen Nutzpflanzen, 6. Aufl., Berlin 1928.

Versuch 2 zeigt außerdem, daß die „Serradellarasse“ der Knöllchenbakterien vertretbar ist durch die „Lupinenrasse“.

Auch bei Impfversuchen hat man mit Knöllchenbakterien, nicht aber anscheinend mit den frei lebenden Stickstoffsammlern, Erfolge gehabt, besonders bei Fruchtwechsel und auf jungfräulichen Böden. Auf einem frisch kultivierten Hochmoorboden wurden geerntet<sup>2)</sup>:

Tabelle 2.

	Frischsubstanz je Hektar
Ohne Impfung .....	1475 kg
Nach Impfung mit dem Impfpräparat „Azotogen“ .....	17900 kg
Nach Impfung mit Impferle .....	19100 kg

Die chemische Bearbeitung des wissenschaftlich und wirtschaftlich gleich wichtigen Problems der Stickstofffixation hat im Gegensatz zur biologischen und agrikulturchemischen erst verhältnismäßig spät zu einwandfreien Ergebnissen geführt. Die Schwierigkeiten der Aufgabe sind außerordentlich groß, nicht nur infolge der innerhalb der Versuchszeiten minimalen Stoffumsätze, sondern vor allem, weil die Stickstoffbindung einen Vorgang darstellt, der mit energieliefernden Prozessen eng gekoppelt und an die intakte Zelle gebunden ist.

Mit Hilfe der Warburg-Technik kamen Meyerhof u. Burk<sup>3)</sup> 1928 zu den ersten genauen und reproduzierbaren Erkenntnissen über die Kinetik von Atmung, Stickstoffbindung und Wachstum bei *Azotobacter*. Auffallend ist besonders die große Atmungsintensität. Als deren Maß hat man die Atmungsgröße  $Q_{O_2}$  eingeführt, die den stündlichen Sauerstoffverbrauch der Zelle pro mg Trockengewicht in  $mm^3$  angibt. Sie kann bei jungen, 1 bis 2 Tage alten *Azotobacter*-kulturen bis zu 2000 betragen, während die betreffenden Zahlen für Essigsäurebakterien 200, für Milchsäurebakterien 20 sind. Mit zunehmendem Alter aber sinkt die Atmungsgröße rasch ab und beträgt nach 5 Tagen nur noch 550. Wachstum und Stickstoffbindung gehen unter allen untersuchten Bedingungen parallel. Dies bedeutet, daß in der *Azotobacter*-zelle der fixierte Stickstoff unmittelbar zum Aufbau der Leibessubstanz verwendet wird. Eine zweite merkwürdige Erscheinung findet man in der Abhängigkeit der *Azotobacter*-atmung vom Sauerstoffdruck der Atmosphäre, was bisher bei streng aeroben Bakterien noch nicht beobachtet worden ist. Das Maximum des Sauerstoffverbrauchs liegt bei 15–20%  $O_2$  und sinkt nach beiden Seiten stark ab. Mit abnehmendem Sauerstoffdruck fällt die Atmung umso stärker ab, je höher der  $Q_{O_2}$ -Wert der Kultur ist. Man kann dies am besten mit der Annahme erklären, daß das Atmungsferment je nach der absoluten Größe der Atmung bei niedrigerem Sauerstoffdruck mehr oder weniger ungesättigt an Sauerstoff ist. Die Sauerstoffkonzentration hat auch Einfluß auf die Stickstofffixation derart, daß das Maximum

<sup>2)</sup> v. Feilitzen, Z. Bakteriologie II, 29, 198 [1911].

<sup>3)</sup> Z. physik. Chem. Abt. A 139, 117 [1928]; Meyerhof u. Schulz, Biochem. Z. 250, 35 [1934]; Burk, J. physik. Chem. 34, 1174, 1195 [1930].