

to AT 180051

SGAE BER. No. 2838

ST-72/77

NOVEMBER 1977

eingelangt MB
07. FEB. 1978

**Berichte der
Österreichischen Studiengesellschaft
für Atomenergie Ges. m. b. H.**

Forschungszentrum Seibersdorf

ANALYTISCH-CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN AN GLASIRTER ISLAMISCHER KERAMIK

TEIL I: UNTERSUCHUNGEN MIT DER MIKROSONDE

ERICH PERNICKA
HANS MALISSA JUN.
PETER KREJSA

ANALYTISCH-CHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN AN
GLASIRTER ISLAMISCHER KERAMIK
TEIL I:
UNTERSUCHUNGEN MIT DER MIKROSONDE

E. Pernicka
H. Malissa jun. +)
P. Krejsa

Österreichische
Studiengesellschaft für Atomenergie
Ges..m.b.H.
Lenaugasse 10 A-1082 Wien

INSTITUT FÜR STRAHLENSCHUTZ
Forschungszentrum Seibersdorf

+) Institut für analytische Chemie der Universität Linz

ZUSAMMENFASSUNG

Die Zusammensetzung der Glasuren von 14 Fragmenten mittelalterlicher glasierter Keramik aus Sistan im Südwesten Afghanistans wurden mit Hilfe der Elektronenstrahlmikroanalyse quantitativ bestimmt. Die Ergebnisse wurden mit den Materialien und Rezepten verglichen, die in einer persischen Handschrift aus dem Jahre 1300 n.Chr. über die Herstellung glasierter Keramik erwähnt werden. Das bisher nicht gedeutete Mineral "muzarrad", das für die schwarze Unterglasurmalerei verwendet wurde, konnte eindeutig als Chromit identifiziert werden. Der hellblaue Dekor wurde durch Beimengung von Cu erzielt, während für die dunkelblaue Malerei Co verwendet wurde, das mit großer Wahrscheinlichkeit aus Kaschan (Persien) stammt. Nur in zwei Glasuren wurde Pb gefunden, eine davon enthielt auch Sn. Aufgrund der quantitativen Analysen wurde ein Versatz berechnet, der mit der mittelalterlichen Vorschrift übereinstimmt, wenn man für einen bisher ebenfalls noch nicht identifizierten Glasurrohstoff (qamsari) dolomitischen Sandstein einsetzt.

ABSTRACT

The composition of the glazes of 14 fragments of medieval ceramics from Sistan in the south-west of Afghanistan has been determined quantitatively by means of electron probe microanalysis. The results were compared with materials and recipes, which are described in a Persian treatise on the manufacture of glazed ceramic objects dated 1300 A.D. The mineral "muzzarad" which was used for the black underglaze painting, could be identified as chromite. The light blue colouring of the glaze was accomplished by admixture of Cu, while Co was used for the dark blue painting. Most probably the Co pigment originated from Kashan in Persia. Only two glazes Pb was found, one of which contained also Sn. Based on the results of the quantitative analyses, a frit composition was calculated, which agrees with the medieval description if one identifies another so far unknown new material mentioned in the treatise (qamsari) as dolomitic sandstone.

1. EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG

In den letzten Jahren begann sich für die Anwendung naturwissenschaftlicher Methoden in Kunst- und Kulturwissenschaften die Bezeichnung Archäometrie einzubürgern. Der Name impliziert, daß auch in der Altertumforschung Erkenntnisse durch quantitative Messungen gewonnen werden; dies zusätzlich zur geisteswissenschaftlichen Methode, die hauptsächlich mit Literaturstudien, Stilvergleich und Feldforschung arbeitet. Die Archäometrie umfaßt aber nicht nur die Altertumforschung im weitesten Sinn, sondern schließt auch die Forschungsgebiete der Kunstgeschichte, der Geschichte des Kunstgewerbes sowie Probleme der Prospektion und Restaurierung ein.

Die Archäometrie stellt damit als interdisziplinäres Forschungsgebiet eine Brücke zwischen Physik, Chemie, Mineralogie (usw.) einerseits und den Altertumswissenschaften andererseits dar. Häufig angeschnittene Problemkreise stellen Fragen nach

- a) Echtheit, Alter
- b) Herkunft, Technologie, Material
- c) Restaurierung, Konservierung
- d) Prospektion.

Es sei noch bemerkt, daß derartige Anwendungen von naturwissenschaftlichen Methoden durchaus nicht neu sind. Schon Ende des 18. Jahrhunderts wurden archäologische Materialien von Naturwissenschaftlern untersucht. Ende des 19. Jahrhunderts wurde in Berlin das erste Museumslabor eingerichtet. Heute liegt der Schwerpunkt der archäometrischen Forschung allerdings in den angelsächsischen Ländern und sie findet erst in den letzten Jahren auch im deutschsprachigen Raum wieder zunehmende Beachtung.

Für die vorliegende Untersuchung standen Bruchstücke glasierter Keramik, zum größten Teil aus Afghanistan stammend, zur Verfügung (Fig. 1). Sie wurden im Rahmen der Österreichisch-chemischen Asien-

expedition im Jahre 1969 gesammelt, die hauptsächlich der Untersuchung des radioaktiven Fallouts in Trockengebieten gewidmet war. Deshalb wurde auch kein repräsentativer Querschnitt glasierter Keramik von allen besuchten und archäologischen interessanten Gebieten zusammengetragen. Es sollte vielmehr in einer Modelluntersuchung versucht werden, Aussagen über die Herstellungsart und möglicherweise auch über den Herstellungsort mit Hilfe radiochemischer und physikalisch-chemischer Methoden zu treffen.

Da bei Glasuntersuchungen die Probenentnahme häufig ein großes Problem darstellt und außerdem eventuelle Differenzierungen der Zusammensetzung innerhalb der Glasur von Interesse waren, wurde die Elektronenstrahlmikroanalyse als beste Methode für diese Probleme erachtet. Zusätzlich handelt es sich bei den Proben durchwegs um Fragmente, sodaß es nicht notwendig war, eine vollkommen zerstörungsfreie Analysenmethode, wie die Röntgenfluoreszenzanalyse oder die Röntgendurchstrahlung, anzuwenden. Dagegen ermöglicht die Elektronenstrahlmikroanalyse quantitative Analysen der häufig auftretenden leichten Elemente Na, Mg und Al und die Erkennung von Variationen in der Zusammensetzung in kleinsten Bereichen.

Zur Herkunftsbestimmung von Keramik ist schon mehrmals die instrumentelle Neutronenaktivierungsanalyse angewandt worden (1, 2). Deshalb wurde sie zur Untersuchung der Gehalte an Spurenelementen in allen zur Verfügung stehenden Scherben herangezogen. Als Ergänzung wurden die Hauptbestandteile einiger Scherben mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse gemessen und einige Röntgenbeugungsaufnahmen von Farbpigmenten in den Glasuren aufgenommen.

2. PROBENMATERIAL UND HISTORISCHER HINTERGRUND

2.1 Nimruz

Die Mikrosondenuntersuchungen konzentrierten sich auf diese

Proben wegen des im Vergleich zu den anderen Keramikfragmenten außergewöhnlichen Scherbenmaterials. Es besteht aus einer gelblich-grauen, porösen Masse, die sich in kleineren Stücken sehr leicht zu einem groben Pulver reiben läßt. Die Vermutung lag nahe, daß es sich um sogenannte "ägyptische Fayence" handelte (siehe Anhang), deren Herstellung in einem mittelalterlichen Text beschrieben wird (3). Es war interessant, die Ergebnisse der technologischen Untersuchung mit den beschriebenen Materialien und Anweisungen des Textes zu vergleichen.

Nimruz ist die an den Iran grenzende südwestliche Provinz Afghanistans, die heute den östlichen Teil der historischen Kulturprovinz Sistan bildet (Abb. 1). Sie ist sehr dünn besiedelt und besteht zum größten Teil aus Wüsten. Dennoch finden sich Spuren menschlicher Ansiedlungen seit dem 3. Jahrtausend v.Chr. Aus dem Mittelalter sind eine so große Zahl von Gebäuderuinen vorhanden, daß dieses Gebiet sogar als das ruinenreichste Land der Erde genannt wurde. Die Grundlage für das Leben in diesem Raum bildete zu allen Zeiten künstliche Bewässerung, die vor allem vom Hilmend gespeist wurde (4).

So war Sistan schon im Altertum unter der Herrschaft der Achämeniden als fruchtbare Landschaft bekannt. Nach der Arabischen Eroberung und Islamisierung im 7. Jahrhundert n.Chr. bildete diese Provinz ein kulturelles Zentrum des Islams im Osten. Vom 8. Jahrhundert beherrschte die Dynastie der Saffariden selbständig oder als Gouverneure und Vasallen der Ghaznaviden, Ghoriden, Seldschuken, Ilkhane und Timuriden bis zum Ende des 15. Jahrhunderts das Land. Der anschließende Verfall dürfte im wesentlichen auf die Zerstörung der Dämme Ende des 14. und Mitte des 15. Jahrhunderts begründet sein (5). Außerdem scheinen noch andere Faktoren, wie die zunehmende Bodenversalzung und die politische und kulturelle Randlage in der Neuzeit maßgeblich gewesen zu sein.

Nachdem durch englische Beamte die Kunde von den Ruinen in Sistan nach Europa gedrungen war, wurden besonders im iranischen Teil archäologische Forschungen durchgeführt. In Afghanistan-Sistan wurden die ersten systematischen Geländeaufnahmen von der Délégation Archéologique Française en Afghanistan (DAFA) vor dem 2. Weltkrieg durchgeführt (6). Später folgten Amerikaner, Engländer und eine breit angelegte deutsche Untersuchung (4).

Eine Beschreibung der untersuchten Proben ist in Tab. 1 zusammengestellt.

2.2 Bust

Bei der Mündung des Arghandal in den Hilmand, in der südlichen afghanischen Provinz Kandahar, erstreckt sich ein 7 km langes und 2 km breites Ruinenfeld, das im Süden von der Zitadelle von Bust und im Norden vom Palast von Lashkari Bazar begrenzt wird. Dieser stammt aus der Zeit der Ghaznaviden (11. - 12. Jahrhundert) und wurde erst 1948 von der DAFA im Zuge einer Erforschung von Bust entdeckt. Das Reich der Ghaznaviden wurde von türkischen Söldnern, die sich gegen die Herrschaft der Samaniden auflehnten, begründet. Von ihrer Hauptstadt Ghazna aus drangen sie tief nach Indien ein und eroberten das gesamte Indusbecken sowie große Teile der nordindischen Tiefebene. Unter Mahmud von Ghazna (998 - 1030) erlebte der Staat seine Blütezeit sowohl in politischer als auch kultureller Hinsicht. So hat z.B. der berühmte persische Dichter al-Biruni an seinem Hof gelebt. Auch Avicenna und Firdausi hielten sich einige Jahre dort auf. In dieser Zeit wurde auch der Palast von Lashkari Bazar gebaut, der Anfang des 12. Jahrhunderts von den Ghoriden zerstört wurde. Von dort stehen 18 Stück glasierter Keramik - hauptsächlich aus dem 11. und 12. Jahrhundert - zur Verfügung.

2.3 Herat

Die ungeheuren Zerstörungen, die Timurs Eroberungszeit (siehe 2.1) hinterließen, gaben dem Nomadentum und den Autonomiebestrebungen turkmenischer Stammesorganisationen so starken Auftrieb, daß nach Timurs Tod (1405) die Macht der Nachfolger bald zerfiel. Dennoch gab es unter den Timuriden eine Wiederbelebung der islamisch-persischen Kultur, in der Herat eine hervorragende Rolle spielte. Schah Ruch (1405 - 1447) und Hussein Baiquara (1470 - 1506) umgaben sich am Hof in Herat mit Künstlern und Schriftstellern und förderten eine rege Bautätigkeit.

Zwei Stück gelbgrün glasierter Keramik wurden aus der Ruine einer um 1500 n.Chr. errichteten Moschee gebrochen.

2.4 Balch

Im Norden des heutigen Afghanistan am Amu-Darja (Oxus) gelegen, spielte Balch schon in der antiken Welt unter dem Namen Baktra eine wichtige Rolle als Handelszentrum und Fürstenresidenz. In verschiedenen Epochen bildete der Amu-Darja die Grenze zwischen rivalisierenden Reichen, sodaß die Geschichte der Stadt Balch sehr wechselhaft verlief und von vielen Eroberungen und Zerstörungen gekennzeichnet war. Heute ist dort nur mehr ein Ruinenfeld zu finden. Die drei Proben stammen von hellblauen bzw. dunkelblauen Wandfliesen aus der Moschee von Balch, die ebenfalls gegen Anfang des 15. Jahrhunderts erbaut wurde.

2.5 Sultaniyeh

Nach dem Tod Dschingis Khans (1227) wurde das riesige eroberte Gebiet von seinen vier Söhnen verwaltet und erweitert. Einer davon, Hulagu, errichtete im Iran das Reich der Ilkhane, das ein knappes Jahrhundert einer der mächtigsten Staaten im Mittleren Osten war. Ihre Herrschaft zeichnete sich durch eine

verhältnismäßig lange Stabilität und eine neue Blütezeit der islamischen Kultur aus.

Die vier Scherben mit hellblauer, dunkelblauer bzw. grüner Glasur stammen vom Mausoleum des Sultans Uldschaitu Khodabende in der Nähe von Tabriz im heutigen Westpersien, das Anfang des 14. Jahrhunderts gebaut wurde.

2.6 Fort Gwalior

Gwalior liegt 200 km südlich von Agra in Nordindien und wird von einer mächtigen Verteidigungsanlage beherrscht, die auf einem nach allen Seiten hin steil abfallenden 50 bis 100 m hohen Hügel von 4 km Länge und 1 km Breite angelegt ist. Berichte über Bauten auf dieser Anhöhe reichen bis in die Herrschaftsperiode der "Weißen Hunnen" (Ende des 5. Jahrhunderts n.Chr.). Danach verfügten verschiedene Hindudynastien, zum Teil als Vasallen des Sultans von Delhi, über Gwalior, bis sie unter Babur von Moghuln abgelöst wurden. Der größte Teil der Grabmäler und Paläste wurde im 14. und 15. Jahrhundert im indo-arischen Stil erbaut. In dieser Zeit entstanden auch die riesigen Felsstatuen, die nur 70 Jahre nach ihrer Fertigstellung auf Baburs Befehl teilweise zerstört wurden. Die beiden Proben stammen aus dem Bereich des Man Singh Palastes (erbaut 1486 - 1516), dessen Mauern mit farbigen Mosaik-kacheln geschmückt sind.

2.7 Datiapalast

Weitere 150 km südlich von Gwalior erhebt sich Datia, die ehemalige Hauptstadt des kleinen Datia-Staates (etwa 2000 km² groß), auf einem felsigen Hügel. Innerhalb der Stadtmauern steht der architektonisch interessante Palast, der unter Bir Singh Deo, dem Begründer der Tomar-Dynastie, Anfang des 15. Jahrhunderts erbaut wurde. Eine Probe eines blauen Wandkachelns wurde aus einem zerfallenen Mauerstück genommen.

3. EXPERIMENTELLES

Kleine Proben der Glasuren wurden mit einer Diamanttrennscheibe senkrecht zur Oberfläche geschnitten, in Kunstharz eingebettet, geschliffen und mit Diamantpasten auf einem harten Poliertuch poliert. Als Bedampfungsmaterial wurde eine Au/Pd Legierung (80:20) gewählt. Diese hat gegenüber der üblichen Bedampfung mit Kohlenstoff den Vorteil, daß die Impulsraten der Alkali-elemente weniger stark abfallen. Außerdem ist sie gegenüber Alterung relativ stabil. Die Analysen wurden mit einer Mikrosonde vom Typ ARL-SEMQ durchgeführt. Die Beschleunigungsspannung betrug 15 kV, der Probenstrom etwa 20 Amp. und der Strahldurchmesser 1 bis 5 μm . Der Abnahmewinkel betrug $52,5^\circ$. Naßchemisch analysierte Mineralstandards und fünf Glasstandards wurden verwendet. Vier dieser Glasstandards wurden von R.H. Brill für einen analytischen Ringversuch hergestellt (7), der fünfte von Herrn F. Kluger, Institut für Analytische Chemie, Universität Wien, naßchemisch analysiert. Für die Bestimmung von Sn und Co wurden Reinelementstandards verwendet. Zur Umwandlung der Röntgenintensitäten in Konzentrationen wurde ein Computerprogramm von Weinke et al. (8) verwendet, das Korrekturen für Drift, Detektorzeit, Hintergrund, Absorptions-, Fluoreszenz- und Atomnummerneffekt berücksichtigt. Die Analysenwerte wurden durch sequentielle Punktanalyse über die ganze Dicke der Glasur erhalten. Um die Alkalidiffusion der Bestrahlung mit Elektronen möglichst gering zu halten, wurde mit einem Strahldurchmesser von 5 μm gearbeitet und die Meßzeit auf einen Punkt der Probenoberfläche auf 10 Sekunden begrenzt. Mehrere solcher Stufenprofile, die aus etwa 20 Meßpunkten bestanden, wurden auf jeder Glasur aufgenommen. Die relative Standardabweichung innerhalb eines Stufenprofils betrug 1 % für SiO_2 und 5 % für CuO und Fe_2O_3 . Die Mittelwerte der Stufenprofile wiesen ebenfalls eine Standardabweichung zwischen 1 % und 5 % auf, sodaß der Gesamtfehler für die Glasuranalysen etwa zwischen 2 % und 7 % lag.

Für die Analyse der Einschlüsse in den Glasuren wurde der kleinstmögliche Strahldurchmesser von etwa $1/\mu\text{m}$ verwendet und ein Abstand von $2/\mu\text{m}$ zwischen den Meßpunkten gewählt. Hier mußte meist ein größerer Fehler in Kauf genommen werden, weil die geringe Ausdehnung der Einschlüsse nicht genügend Meßpunkte zuließ.

4. ERGEBNISSE

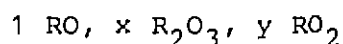
Tab. 2 gibt die durchschnittliche Zusammensetzung, ermittelt mit der Mikrosonde, von 13 Glasuren von Nimruz an.

In den meisten Fällen zeigen die Glasuren eine konstante Zusammensetzung von der Oberfläche bis zur Grenzfläche mit dem Scherben oder dem Beguß. Nur Cu zeigt häufig abnehmende Tendenz mit zunehmender Tiefe, wie in Abb. 2 zu sehen ist. Dies könnte auf einen Verdünnungseffekt zurückzuführen sein, hervorgerufen durch teilweises Aufschmelzen des Begusses, der im wesentlichen aus gepulvertem Quarz besteht. Bei Co scheint es sich umgekehrt zu verhalten, während das Pigment der schwarzen Farbe, Chromit, nicht gelöst wurde.

Es handelt sich hier um typische Weichglasuren, die etwa bei 800°C schmelzen. Zur Abschätzung des Schmelzbereiches wurde ein Phasendiagramm von SiO_2 , Na_2O und CaO nach Morey (9) herangezogen, wobei MgO zu CaO und K_2O zu Na_2O hinzugerechnet wurden. Aufgrund dieses Diagrammes müßte der Schmelzpunkt der Glasuren um 1050°C liegen, wenn sie nur aus den drei erstgenannten Komponenten bestünden. Im allgemeinen bewirken geringe Zusätze anderer Oxide zur Glasurmischung eine Erniedrigung des Schmelzbereiches, sodaß der Erweichungspunkt wahrscheinlich bei etwa 800°C liegen dürfte.

Um die relativen Mengenverhältnisse sichtbar zu machen und die Glasurmischungen besser vergleichen zu können, verwendet man

in der keramischen Rechnung die sogenannte Segerformel



in der RO die Summe der Molprozent der basischen Oxide auf 1 normiert bedeutet und R_2O_3 demnach die Summe der amphoteren und RO_2 der sauren Oxide darstellt. In Tab. 4 und Abb. 3 sind die Segerformeln für alle untersuchten Glasuren zusammengestellt.

Aus den Segerformeln läßt sich der Versatz (siehe Anhang) ungefähr berechnen, wenn man für jedes Oxid in der Glasur bestimmte Ausgangsmaterialien annimmt, die in der Natur häufig angetroffen werden.

Bei der Berechnung geht man allerdings von den reinen Rohstoffen aus. Diese Annahme ist aber selten erfüllt, weil SiO_2 , Fe_2O_3 etc. in fast allen Mineralen als Beimengung vorkommen, wodurch ein gewisser Fehler entsteht. Da jedoch nur ein ungefähres Verhältnis der Ausgangsmaterialien gesucht ist, so wie sie vom Töpfer mit geringer Wägegenauigkeit vermengt werden, fällt dieser Fehler nicht ins Gewicht.

SiO_2 ist sicherlich in der Form von Kieseln oder weißem Sand verwendet worden, könnte aber auch mit Feldspaten oder anderen Silikaten eingebracht worden sein. In den untersuchten Glasuren ist Al_2O_3 jedoch in so geringen Mengen vorhanden, daß man Feldspat als Rohmaterial ausschließen kann.

Die Alkalien könnten wahrscheinlich als Karbonate berechnet werden. Sodaablagerungen sind in Persien bekannt. In diesem Fall müßte von kristalliner Soda $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{ H}_2\text{O}$ ausgegangen werden. Pottasche könnte durch Verbrennung von stark salzhaltigen Pflanzen hergestellt worden sein. Das Molverhältnis $\text{Na}_2\text{O}/$

K_2O variiert beträchtlich (siehe Abb. 4), sodaß verschiedene Ausgangsstoffe angenommen werden müssen.

Ca und Mg kommen in der Natur als Karbonate und Sulfate häufig vergesellschaftet vor. In den Glasuren wurden jedoch, wenn überhaupt, nur sehr geringe Mengen Schwefel gefunden, sodaß die Karbonate als Grundlage der Berechnung herangezogen werden. Das Molverhältnis der Oxide dieser beiden Elemente deutet außerdem auf Dolomit als Ausgangsstoff, siehe Abb. 5.

Fe_2O_3 und Al_2O_3 dürften entweder als Verunreinigung der Rohmaterialien oder durch Zusatz von wenig Ton zur Glasurmilch, um die Glasteilchen in Suspension zu halten, in die Glasur gelangt sein. Auch eine Reaktion mit dem Scherben beim Brennvorgang könnte zum Al-Gehalt beigetragen haben.

Aufgrund dieser Überlegungen wurden die Versätze berechnet, siehe Tab. 5.

Bei den Proben mit Stellen von schwarzem Dekor sind unter dem Lichtmikroskop deutlich Körner von 5 bis 20 μm Durchmesser zu erkennen. Diese Körner liegen hauptsächlich in der Grenzschicht zwischen Glasur und Beguß, stellen also das Pigment der Unterglasurmalerei dar. Die qualitative Analyse wies diese Körner als Chromite aus, einem hochschmelzenden Chrommineral, das von der Glasur beim Brennen nicht aufgelöst wurde. Tab. 3 und Abb. 6 zeigen die Zusammensetzung dieser Chromitkörner in den einzelnen Glasuren.

Überraschend sind die Cu- und Co-Gehalte der Chromite, die in der Natur nicht vorkommen (Abb. 7 und 8). Hier scheint eine chemische Reaktion stattgefunden zu haben, wobei Fe gegen Al und Cu oder Co ausgetauscht wurde (Abb. 9 und 10). Außer den Chromiten wurden Quarz in der Begußschicht und Fe-reiche Kör-

ner, vermutlich Hämatit oder Magnetit, in den schwarzen und dunkelblauen Malschichten (Co) gefunden. Einige Glasuren enthielten auch längliche Kristalle der Diopsid-Hedenbergit-Serie ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ - $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$), die vermutlich ein Devitrifikationsprodukt darstellen, weil sie meist an den Kanten und Ecken nicht geschmolzener Teilchen in der Glasur zu finden sind, die als Kristallisationskeime dienen.

Die Auswertung der Röntgenbeugungsbilder bestätigte den oben genannten Befund. Es konnten Alpha-Quarz, Diopsid und Hämatit mit einiger Sicherheit identifiziert werden. Die Konzentration von Chromit im röntgenamorphen Glas war wahrscheinlich zu gering, um nachgewiesen werden zu können.

5. DISKUSSION

5.1 Pigmente

Die persische Keramik des 12. und 13. Jahrhunderts gehört zu den schönsten Produkten der Töpferkunst überhaupt. Leider gibt es sehr wenige literarische Quellen, die die Herstellung dieser Keramik beschreiben. Eine davon ist die in der Einleitung erwähnte Schrift des Abu'l - Quasim aus Täbris in Nordwestpersien, die in das Jahr 1300 n.Chr. zu datieren ist. Der Autor stammte aus einer berühmten Töpferfamilie, die in Kaschan, einem bekannten Keramikzentrum zu jener Zeit, signierte Kachel herstellte.

Eine der zu verwendenden Substanzen wird im Text folgendermaßen beschrieben:

"Der siebente ist ein Stein von äußerstem Schwarz, dunkel wie Spießglanz, der auch aus dem Feuer schwarz glänzend herauskommt. Seine Fundstätte ist im Lande Chorassan in den Bergen von Gagarm, und man nennt ihn Muzarrad."

Dazu die Anmerkung der Übersetzer: "Das Wort muzarrad kann be-

deuten: mit Panzerringen versehen, in der Art von Panzerringen." An anderer Stelle heißt es im Text: " Zum Malen auf weißem Grund nimmt man für schwarz Muzarrad, für Blau Sulaimani, ... zerkleinert, gepulvert, gesiebt, mischt jedes mit etwas Quarz und malt damit; für grünen Grund malt man mit bloßem Muzarrad."

Aufgrund der vorliegenden Analysen kann Muzarrad mit ziemlicher Sicherheit als Chromit identifiziert werden, auf den die Beschreibung ausgezeichnet paßt. Natürlich vorkommende Chromite sind glänzend schwarz und haben einen muscheligen Bruch. Tatsächlich werden auch heute noch in den "Bergen von Chorassan" (Nordostpersien) Chromite mit etwa 35 bis 45 % Cr_2O_3 gefunden (10, 11). Interessant ist in diesem Zusammenhang eine Veröffentlichung von H. Salge (12), der in olivgrünen Dekors unter einer Bleiglasur an Scherben aus Ostpersien Chromspinelle gefunden hat. Schultze-Frentzel äußerte daraufhin einmal die Vermutung, daß es sich um Muzarrad handeln könnte (13). Möglicherweise bewirkt die Bleiglasur eine Grünfärbung des Chromits.

Für die Blaufärbung wurden Cu und Co verwendet. Cu wurde gemäß dem Text als Hammerschlag beigemischt und war überall leicht erhältlich, während Co ein seltener und begehrter Rohstoff war. Abu'l-Qasim erwähnt zwei Quellen dafür: Kamsar in der Nähe von Kashan, wo Kobaltblüte ($\text{Co}_3\text{As}_2\text{O}_8 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$), Kobaltit (CoAsS) und Erdkobalt (CoS) in einer großen Ader zusammen mit Hämatit und Chalkopyrit vorkommt (10). Da in der Glasur Co tatsächlich mit As und Eisenmineralen gemeinsam vorkommt, stammt das Co mit großer Wahrscheinlichkeit aus Kashan. Dieser Befund war nicht überraschend, weil Co aus dieser berühmten Mine sogar nach China exportiert wurde, wobei Sistan auf dem Weg lag.

Nach Endes des vorigen Jahrhunderts wurde das Kobaltvorkommen von Qamsar in wenig veränderter Form ausgebeutet: "In Persien ist Kaschaner-Blau eine erdige Masse in Form von schwärzlich-grauen Kugeln. Sie werden verfestigt, indem Erz und Gangmasse, welche sich von selbst und beständig von der Mine ablösen, ge-

mischt und mit Wasser zu einem Teig verrührt werden ... Für billige Ware mischt man die Kugeln mit Soda von Qum und mit Quarz." (14)

Diese letzte Angabe könnte eine Begründung dafür abgeben, daß Kobalt häufig in tieferen Schichten der Glasur zu finden ist und, im Gegensatz zum Kupfer, auch den Beguß noch färbt. Ein Sodazusatz würde den Schmelzpunkt der Glasurmischung noch erniedrigen, sodaß beim Brennen die Glasur in diesen begrenzten Bereichen zuerst weich wird und in die Begußschicht einsickern kann.

5.2 Glasuren

Aus den Analysen der Glasuren kann man im Prinzip den Versatz berechnen. Das Problem besteht darin, daß man von verschiedenen Versätzen dieselbe Glasur herstellen kann, je nachdem, von welchen Rohstoffen man ausgeht. In Tab. 5 wurden zuerst die Versätze aus den üblichen Rohstoffen Quarz, Ton, kristalline Soda und Dolomit berechnet. Zur Berechnung wurde reiner Dolomit herangezogen, weil bei den meisten Glasuren das Verhältnis $\text{CaO/MgO} \approx 1$ war, ergibt sich ein ungefähres Verhältnis von Quarz:Alkalien:Dolomit 1:1:1/3 (Abb.11)

Abu'l-Qasim erwähnt zwei Fritten: eine besteht aus 105 Teilen Quarz und 100 Teilen "Pottasche" (damit ist aber wahrscheinlich Soda gemeint), die andere aus gleichen Teilen vom Stein "Qamsari" und Soda.

Zwei Erklärungsmöglichkeiten bieten sich an: Entweder benutzten die Töpfer zur Herstellung der untersuchten Glasuren die Quarz-Soda-Fritte und vermischten sie mit Dolomit, was allerdings nirgends in Abu'l-Qasims Text erwähnt wird, oder sie verwendeten die Qamsari-Soda-Fritte, wodurch Qamsari durch ein geeignetes Material identifiziert werden könnte. Der erste

Weg ist vom technologischen Standpunkt aus nicht zielführend, denn beim Fritten würde CO_2 in der Glasurmasse gebildet werden, das durch Blasenbildung den Arbeitsprozeß sehr erschweren würde.

Bisher wurde als Deutung für Qamsari Borax (3) und Talk (15) vorgeschlagen. Bor wurde bis jetzt noch nicht in islamischen Glasuren gefunden und Talk hat sich bei einer Versetzberechnung nicht bewährt (15). Wenn man dolomitischen Sandstein (Dolomit-Quarz-Arenit) für Qamsari einsetzt, werden die beiden Versätze in Tab. 5 äquivalent und auch folgende, bisher unerklärliche Stelle bei Abu'l-Qasim verständlich:

"Der vierte ist der Stein Qamsari, benannt nach einem Dorfe (dieses Namens); den brennt und zerbricht (zerstößt) man, er wird sandartig wie weißer Kandiszucker."

Ein Dolomit-Quarz-Arenit besteht aus kleinen Quarzkörnern mit 0,06 - 2 mm Durchmesser und Dolomit als Bindemittel (16). Beim Brennen wird er pulverförmig. Wenn man eine dichte Packung von gleich großen Kugeln als Modell heranzieht, würde etwa 30 % des Volumens mit Dolomit gefüllt werden können. Das entspricht etwa dem Verhältnis Quarz/Dolomit im ersten Versatz. Da aber Quamsari gebrannt wurde, verwendeten die Töpfer vermutlich Oxide für den Versatz. Es ist sogar möglich, daß sich etwas Diopsid bildete, aber das Ca/Mg Verhältnis blieb gleich. Wenn man nun gebrannten Qamsari mit Soda nach dem oben genannten Rezept mischt, erhält man eine Zusammensetzung, die den untersuchten Glasuren sehr ähnlich ist (Abb. 12). Auch technologisch gesehen hat das Brennen des Qamsari einen Sinn, denn es kommt dadurch beim Fritten zu keiner lästigen Blasenbildung.

Dolomitischer Sandstein ist besonders häufig in Sedimentationsbecken wie Sistan zu finden. Auch das Gestein in der Gegend von Kashan besteht aus Dolomit, durchzogen von Serpentin. Somit könnten auch die Ergebnisse von Allan et al. (15) neu interpretiert

tiert werden. Zwar wurde hier das Scherbenmaterial analysiert, in dem die Fritte nur 8,3 % Anteil hat, aber trotzdem würde eine Identifizierung von Qamsari als dolomitischer Sandstein die Resultate gut erklären. Die Autoren setzen Talk ($Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$) für Qamsari in ihre Rechnung ein und kommen aufgrund des zu niedrigen Magnesiumgehaltes zu dem Schluß, daß die Soda-Quarz-Fritte verwendet wurde. Dolomitischer Sandstein würde das hohe Ca/Mg Verhältnis zwanglos erklären, weil eine lückenlose Mischungsreihe zwischen Kalkstein und Dolomit besteht.

Die Glasuren N11 und N12 enthalten neben Na_2O und K_2O auch PbO als Flußmittel. Auch dafür gibt es in Abu'l-Qasims Schrift eine Parallele: drei Teilen einer Qamsari-Soda-Fritte wird ein Teil einer Mischung aus PbO und SnO_2 mit 60 - 80 % PbO hinzugefügt. Ein Zusatz von SnO_2 allein hätte wahrscheinlich ein "Erblinden" (Mattwerden durch starke Devitrifikation) der Glasur zur Folge, während die PbO/ SnO_2 -Mischung eine glänzende undurchsichtige Glasur erzeugt. Die Glasur N11 entspricht diesem Rezept nur ungefähr. In Tab. 6 ist ein Vergleich der Glasur N11 mit einer errechneten Zusammensetzung einer Glasur gezogen, die entstehen würde, wenn den Alkali-glasuren N1-N10 ein Drittel ihres Gewichtes PbO/ SnO_2 (81,6 % PbO) zugemischt worden wäre.

Die Glasur N12 enthält PbO nur in geringer Konzentration und signifikant mehr CaO als die anderen Glasuren. Technologisch gesehen, ist der PbO-Zusatz durchaus sinnvoll, um eine mögliche Devitrifikation wegen des hohen Co-Gehaltes zu verhindern. Es findet sich bei Abu'l-Qasim nirgends ein entsprechender Hinweis, ob diese Funktion des PbO bekannt war. Es scheint sich hier eher um eine Verunreinigung, möglicherweise beim Fritten verursacht, zu handeln.

DANKSAGUNG

Wir danken Herrn Prof.Dr. F. Hecht für die Unterstützung dieser Arbeit. Den Herrn F. Kluger und Dr. H.M. Weinke vom Institut für Analytische Chemie der Universität Wien danken wir für wertvolle Diskussionen und Hilfe bei der Korrektur der Mikrosonden-
daten, sowie dem Österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Projektes Nr. 1777.

Adressen der Autoren:

Dr. Ernst PERNICKA	Institut für Analytische Chemie der Univ. Wien, Währingerstr. 38, 1090 Wien
Dr. Hans MALISSA jun.	Institut für Analytische Chemie der Univ. Linz, 4020 Linz-Auhof
Dr. Peter KREJSA	Österreichische Studiengesellschaft für Atomenergie Ges.m.b.H. Forschungszentrum Seibersdorf Lenaugasse 10, 1080 Wien

ANHANG

Glasierte Keramik wird hergestellt, indem feuchter, eventuell speziell aufbereiteter Ton (als Masse bezeichnet) bei Zimmertemperatur geformt und durch Erhitzen in einem Brennofen gehärtet wird. Die gebrannte Masse nennt man Scherben. Die Glasuren sind leichtflüssige Gläser, die in Pulverform auf die getrocknete oder gebrannte Form aufgetragen werden. Sie dienen dazu, dem Scherben eine glatte, glänzende, dichte und unter Umständen farbige Oberfläche zu verleihen.

Fayence wird im allgemeinen ein Scherben mit undurchsichtiger, die Scherbenfarbe überdeckender Glasur genannt. Als Trübungsmittel verwendet man Zinn-, Cer- und Zirkonoxid, die in Form von feinverteilten Kristallausscheidungen die Glasur trüben. Die Fayencetechnik besteht im Bemalen einer rohen (lediglich getrockneten), weißen, deckenden Glasur mit Farben, die beim Glattbrennen in die Glasur einsinken.

Der Scherben der Ägyptischen Fayence besteht nach Lucas (12) im wesentlichen aus gepulvertem Quarz. Die Formbarkeit wird durch Zusatz von Natriumcarbonat oder -chloridlösungen erreicht, die dem Scherben nach dem Brennen auch mechanische Festigkeit verleiht, indem die losen Quarzkörner durch Natriumsilikat verbunden werden. Solch ein Scherben, bedeckt mit einer meist blauen, bleifreien Alkaliglasur wird Ägyptische Fayence genannt und war in Ägypten seit 4000 v.Chr. in Gebrauch.

Die Glasuren werden nach der Schmelzbarkeit in leichtflüssige oder weiche (bis 1200°C) und in schwerflüssige oder harte Glasuren, nach der Art der Herstellung in Roh-, Fritte- und Schmelzglasuren und nach der chemischen Zusammensetzung in Blei-, Bor-, Feldspat-, Alkaliglasuren usw. eingeteilt.

Rohglasuren sind nur aus wasserunlöslichen Stoffen zusammengesetzt. Die Mischung der Rohstoffe nennt man den Versatz. Für wasserlösliche Bestandteile werden Fritten verwendet. Die Fritte ist ein gebranntes, ungeformtes Gemenge aus Quarz, Alkalien, Bleioxid usw., dessen Teilchen entweder nur locker aneinander kleben oder zu einem Glas zusammengeschmolzen sind, das nach dem Abkühlen fein vermahlen wird. Mit Wasser und etwas Ton (um die Teilchen in Suspension zu halten und eine bessere Haftung auf dem Scherben zu erreichen) wird die Fritte zusammen mit den anderen Zusätzen zu einer Glasurmilch verarbeitet, die auf den Scherben aufgetragen wird. Wenn die gesamte Glasurmischung zuerst aufgeschmolzen und gepulvert wird, spricht man von einer Schmelzglasur.

Ein Beguß (engl. slip, franz. engobe) ist eine Schicht zwischen Glasur und Scherben, die entweder die Farbe des Scherbens überdecken oder der Glasur eine bessere Haftung geben soll. Er besteht meist aus einem hellen oder färbigen Ton, wenn ein dunkler Scherben die Farbe der Glasur beeinträchtigt oder aus Ton mit Quarz vermischt, wenn die Glasur eine zu große Oberflächenspannung hat und am Scherben nicht haften würde.

Bei den Farben unterscheidet man zwischen Unterglasurfarben, Fayencefarben und Aufglasurfarben. Eine Zwischenstellung zwischen letzteren nehmen die Scharffeverfarben ein. Sie werden auf die fertige Glasur aufgetragen und sinken beim zweiten Brand ein wenig ein. Die Farben selbst bestehen entweder aus Lösungen von Metalloxiden in Glasflüssen, die gepulvert und wie die Glasur selbst aufbereitet werden, oder aus Farbkörpern, die als unlösliche Teilchen in der Glasur suspendiert sind. Diese sind Verbindungen des Farboxids mit anderen Oxiden, die nicht mit dem Glasfluß reagieren.

LITERATUR

- 1) Sayre E.V. und Chan L.-H.
High Resolution Gamma Ray Spectroscopic Analysis of
Fine Orange Pottery
Proc.Amer.Chem.Soc., Symposium on Archaeological Chemistry,
Atlantic City, 1968
- 2) Perlman I. und Asaso F.
Pottery Analysis by Neutron Activation
Archaeometry 11, 21 (1969)
- 3) Ritter H., Ruska J. und Winderlich R.
Orientalische Steinbücher und persische Fayencetechnik
Istanbuler Mitteilungen 3, 16 (1935)
- 4) Fischer K., Morgenstern D. und Thewalt V. (Hrsg.)
Nimruz. Geländebegehungen in Sistan 1955-1973 und die Auf-
nahme von Dewal-i Khodaydađ 1970
Rudolf Habelt Verlag GmbH, Bonn 1976
- 5) Radermacher H.
Wasserwirtschaft und Kulturwesen in Sistan in historischer
und aktueller Sicht
in: Nimruz, op.cit.
- 6) Hackin J., Carl J. und Meunié J.
Recherches Archéologique dans la Parte Afghane du Sistan
(1933 - 1940)
M.D.A.F.A. VIII, 24 (1959)
- 7) Brill R.H.
A Chemical-Analytical Round-Robin
Proc. 9. Intern.Congr. Glass, Versailles 1971

- 8) Weinke H.H., Malissa P. jun., Kluger F. und Kiesel W.
Korrekturprogramm für quantitative Elektronenstrahl-
mikroanalyse
Mikrochim.Acta (Wien, Suppl. 5, 233 (1974))
- 9) Morey G.W.
The Properties of Glass
Amer.Chem.Soc. Monograph Series
Reinhold Publishing Corp., New York 1938
- 10) Diehl E.
Beitrag zur Kenntnis der Erzfundstellen Irans
Schweiz.mineralog.petrogr. Mitt. 24, 333 (1944)
- 11) Ladame G.
Les ressources métallifères de l'Iran
Schweiz.mineralog.petrogr. Mitt. 25, 165 (1945)
- 12) Salge H.
Untersuchungen an Farbdekors islamischer Scherben
Keramos 64, 55 (1974)
- 13) Schultze-Frentzel K.
Persönliche Mitteilung
- 14) Schlimmer C.
Terminologie médico-pharmaceutique française - persane
Teheran 1874
zitiert in:
Tietze E.
Die Mineralreichtümer Persiens
Jb. der k.k. Geolog. Reichsanstalt XXIX (1879)

- 15) Allan J.W., Llewellyn L.R. und Schweizer F,
The History of so-called Egyptian Faience in Islamic Persia:
Investigations into Abu'l-Qasim's Treatise
Archaeometry 15(2), 165 (1973)
- 16) Wieseneder H.
Klassifikation und Entstehung terrigener und
karbonatischer Sedimentgesteine
Mitt.Geol.Gesellsch. Wien, 64, 219 (1974)

Tab. 1 Beschreibung der analysierten Proben

Proben- nummer	Beschreibung
N-1 bis N-7	durchsichtige, farblose Glasur, schwarze geometrische Malerei unter der Glasur mit hellblauen und dunkelblauen Streifen parallel zum schwarzen Dekor, weißer Beguß auf einem gelblich-grauen, porösen Scherben, mit großer Wahrscheinlichkeit Sultanabad-Stil
N-8	durchsichtige, hellblaue Glasur, schwarze Malerei unter der Glasur, Beguß und Scherben ähnlich N1 bis N7, jedoch etwas dünner
N-9	wie N-8, Randstücke einer Schüssel oder eines Tellers
N-10	dicke (1mm), durchsichtige grünlich erscheinende Glasur, schwarze Malerei unter der Glasur, Beguß und Scherben wie N-1 bis N-7, etwas größer
N-11	undurchsichtige, hellblaue Glasur, ohne Dekor und Beguß, Scherben hellbraun und sehr feinporig
N-12	durchsichtige, grünblaue Glasur, Dekor graviert, ohne Beguß mit einem weißen, sehr dünnen (3mm) und brüchigen Scherben
N-13	durchsichtige, hellblaue Glasur mit einem breiten (1cm) schwarzen Streifen, dicker Beguß auf einem groben Scherben, Eckstück eines Wandkachels

Tab. 2 Zusammensetzung der Glasuren

	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6	N-7
SiO ₂ ⁺	67,9	71,1	68,1	66,8	68,7	67,7	69,7
Al ₂ O ₃	1,60	1,75	1,50	1,45	1,90	1,55	2,65
Fe ₂ O ₃	0,80	1,25	0,80	0,80	0,45	0,85	1,30
MgO	5,10	3,60	5,35	5,25	4,65	5,15	4,25
CaO	7,45	5,30	7,45	7,50	7,10	7,25	6,35
Na ₂ O	14,8	14,8	16,2	16,7	14,6	16,2	14,5
K ₂ O	1,45	2,20	1,50	1,55	2,15	1,55	2,00
CuO ⁺⁺	-	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	-
SnO ₂	-	-	-	-	-	-	-
Summe	99,1	100,0	100,9	100,1	99,6	100,3	100,7
n ⁺⁺⁺	4	2	4	3	7	3	2

Anmerkungen: + Sauerstoff wurde stöchiometrisch zugeordnet
 ++ CuO und CoO wurden bei nur teilweise gefärbten Glasuren nicht berücksichtigt
 +++ n gibt die Anzahl der Stellen an, auf denen ein Schrittprofil aufgenommen wurde. Die Zusammensetzung entspricht dem Mittelwert dieser Messungen.

Tab. 3 Zusammensetzung der Chromspinelle

	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CuO	CoO	CaO	Summe
N 1-1	38,8	34,0	5,6	22,7	0,20	0	0,10	101,4
N 1-2	38,9	34,2	6,4	22,2	0,30	0	0,05	102,05
N 1-3	38,5	34,4	6,1	22,3	0,35	0	0,05	101,7
N 2-5	37,4	33,9	5,9	20,8	3,6	0,10	0,15	101,85
N 2-7	37,9	33,9	5,7	21,0	1,4	1,7	0,05	101,65
N 2-8	18,3	29,5	22,0	2,65	2,4	11,6	0,05	86,6
N 2-9	37,9	32,8	5,9	15,9	1,7	7,1	0,10	101,4
N 3-1	38,6	33,8	7,4	20,6	1,3	0	0,3	100,3
N 3-2	38,0	32,3	6,7	20,6	1,7	0	0,3	99,6
N 3-3	37,3	33,0	4,2	19,1	7,2	0	0,3	101,1
N 3-4	38,5	33,0	7,9	18,6	2,7	0	0,3	101,0
N 3-5	38,2	33,6	6,7	21,4	0,3	0,3	0,3	100,8
N 3-6	38,5	32,7	9,8	20,0	0,2	0	0,3	101,5

Fortsetzung von Tab. 3

	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CuO	CoO	CaO	Summe
N 4-1	38,0	33,9	5,8	22,0	0,4	0	0,3	100,4
N 4-2	39,3	31,1	7,2	21,1	0,8	0	0,3	99,8
N 5-1	35,9	34,0	6,8	21,6	0	0	0,3	98,6
N 5-2	35,1	34,0	7,7	22,4	0	0	0,3	99,5
N 5-3	35,5	33,2	6,9	21,4	0	0	0,3	98,3
N 6-2	40,6	28,4	6,3	23,6	0,50	0	0,3	99,7
N 6-3	37,9	33,0	6,6	20,9	0,35	0	0,3	99,05
N 6-4	38,0	33,5	8,0	20,5	0,5	0	0,3	100,7
N 6-5	38,3	34,0	8,1	20,6	0,2	0	0,3	101,5
N 7-3	38,2	27,5	12,8	10,4	1,0	10,1	0,3	100,3
N 7-4	34,1	28,7	10,2	19,4	0,7	4,9	0,3	98,3
N 8-1	38,9	31,4	7,0	18,5	4,0	0	0,3	100,1
N 8-2	37,9	32,7	6,8	19,1	4,0	0	0,3	100,8
N 8-3	38,0	32,1	4,6	19,1	5,7	0	0,3	100,3

Fortsetzung von Tab. 3

	Cr_2O_3	Al_2O_3	FeO	MgO	CuO	CoO	CaO	Summe
N 9-1	55,8	13,9	6,6	17,6	6,2	0	0,3	100,4
N 9-2	56,1	14,2	5,8	16,6	6,5	0	0,3	99,5
N 9-3	56,2	13,1	5,7	18,3	5,4	0	0,3	100,0
N 10-1	37,3	33,8	7,3	21,4	0	0	0,3	100,1
N 10-2	38,0	33,7	7,1	21,8	0	0	0,3	100,9
N 10-3	38,6	33,1	7,8	21,7	0	0	0,3	101,5
N 13-1	34,0	28,2	5,3	18,9	7,2	0	0,3	93,9
N 13-2	34,4	29,3	5,9	20,0	10,6	0	0,3	100,5
N 13-3	35,0	30,3	5,4	20,7	6,1	0	0,3	97,8

Fortsetzung von Tab. 2

	N-8	N-9	N-10	N-11	N-12	N-13
SiO ₂	66,1	67,7	70,4	47,0	66,0	66,1
Al ₂ O ₃	1,20	1,30	2,40	0,55	0,85	1,60
Fe ₂ O ₃	0,95	0,85	0,80	0,80	0,85	1,35
MgO	5,25	3,55	4,00	2,40	3,45	3,25
CaO	7,80	5,05	6,05	3,85	8,00	5,25
Na ₂ O	15,7	15,2	13,9	6,55	13,3	14,9
K ₂ O	1,85	4,40	2,05	4,00	2,60	4,00
CuO	1,50	1,25	-	1,90	2,10	3,50
PbO	-	-	-	29,8	3,10	-
SnO ₂	-	-	-	2,10	-	-
Summe	100,35	99,35	99,60	98,90	100,25	99,95
n	3	2	3	3	3	2

Tab. 4 Segerformeln der Glasuren und die
Molverhältnisse CaO/MgO und Na₂O/K₂O

	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	$\frac{\text{CaO}}{\text{MgO}}$	$\frac{\text{Na}_2\text{O}}{\text{K}_2\text{O}}$
N 1	1	0,04	2,20	1,05	15,9
N 2	1	0,06	2,65	1,06	10,4
N 3	1	0,04	2,09	1,00	16,4
N 4	1	0,03	2,02	1,02	16,8
N 5	1	0,04	2,28	1,10	10,3
N 6	1	0,04	2,10	1,02	15,4
N 7	1	0,07	2,45	1,08	11,1
N 8	1	0,03	2,03	1,07	12,7
N 9	1	0,04	2,33	1,02	5,3
N 10	1	0,06	2,58	1,09	10,2
N 11	1	0,02	1,83	1,15	2,5
N 12	1	0,03	2,14	1,68	7,7
N 13	1	0,05	2,20	1,15	5,7

Tab. 5 Aus den Segerformeln errechnete Versätze der Glasuren

	Quarz + Ton	Alkalien	Dolomit	Quarz + Diopsid + Ton	Alkalien
N 1	1	1,0	0,34	1	0,85
N 2	1	1,0	0,24	1	0,87
N 3	1	1,1	0,35	1	0,96
N 4	1	1,1	0,36	1	0,97
N 5	1	1,0	0,31	1	0,87
N 6	1	1,1	0,35	1	0,93
N 7	1	1,0	0,28	1	0,86
N 8	1	1,1	0,35	1	0,91
N 9	1	1,1	0,24	1	1,01
N 10	1	1,0	0,29	1	0,82
N 12	1	1,0	0,32	1	0,81
N 14	1	1,1	0,23	1	0,93

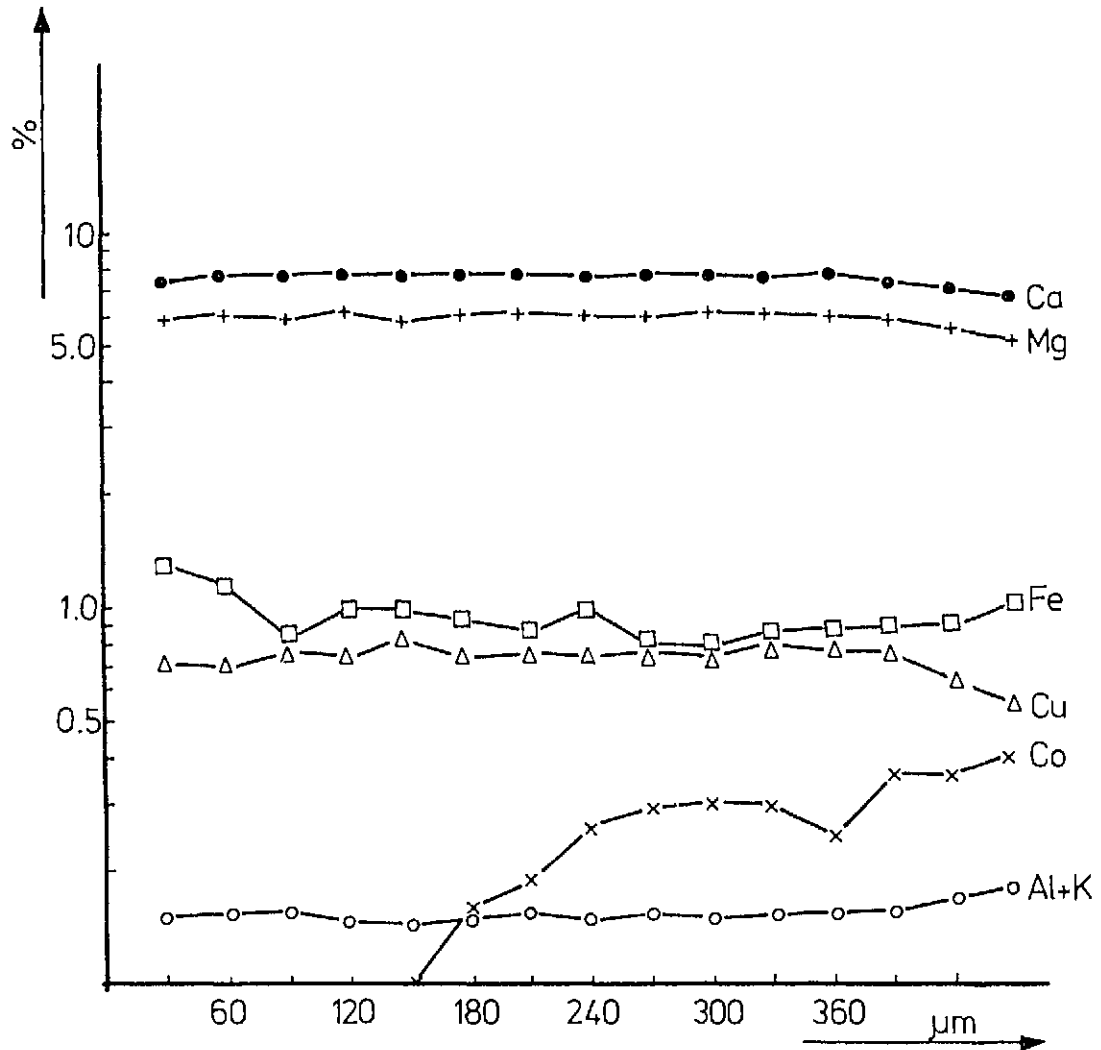
Tab. 6 Vergleich von N 11 mit einer berechneten Glasur
nach Abu'l-Qasims Rezept

	N 11	errechnete Glasur
SiO ₂	47,0	51,8
Al ₂ O ₃	0,5	1,1
Fe ₂ O ₃	0,8	0,7
MgO	2,4	3,75
CaO	3,9	5,25
Na ₂ O	6,5	11,3
K ₂ O	4,0	1,1
PbO	29,8	20,4
SnO ₂	2,1	4,6
CuO	1,9	-
	<u>98,9</u>	<u>100,0</u>

Abb. 1 Fundorte der Keramikfragmente



Abb. 2 Konzentrationsverlauf einiger Elemente



Typischer Konzentrationsverlauf einiger Elemente in der Glasur N 5

Abb. 11 Zusammensetzung der Flusate

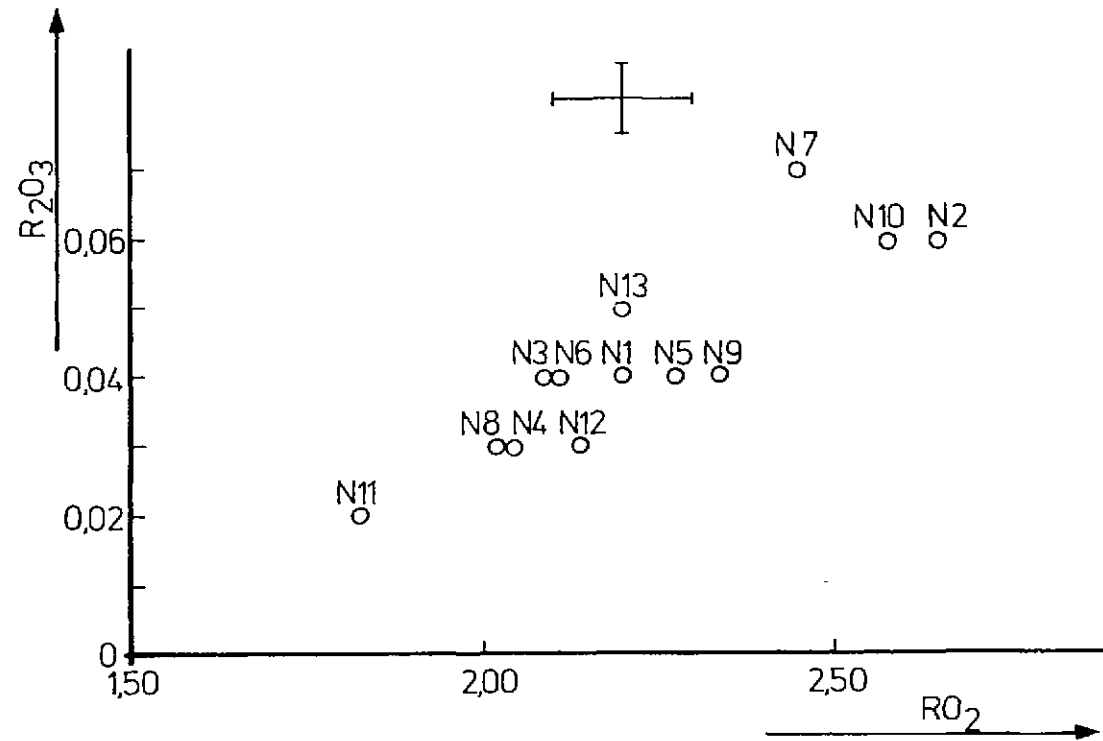
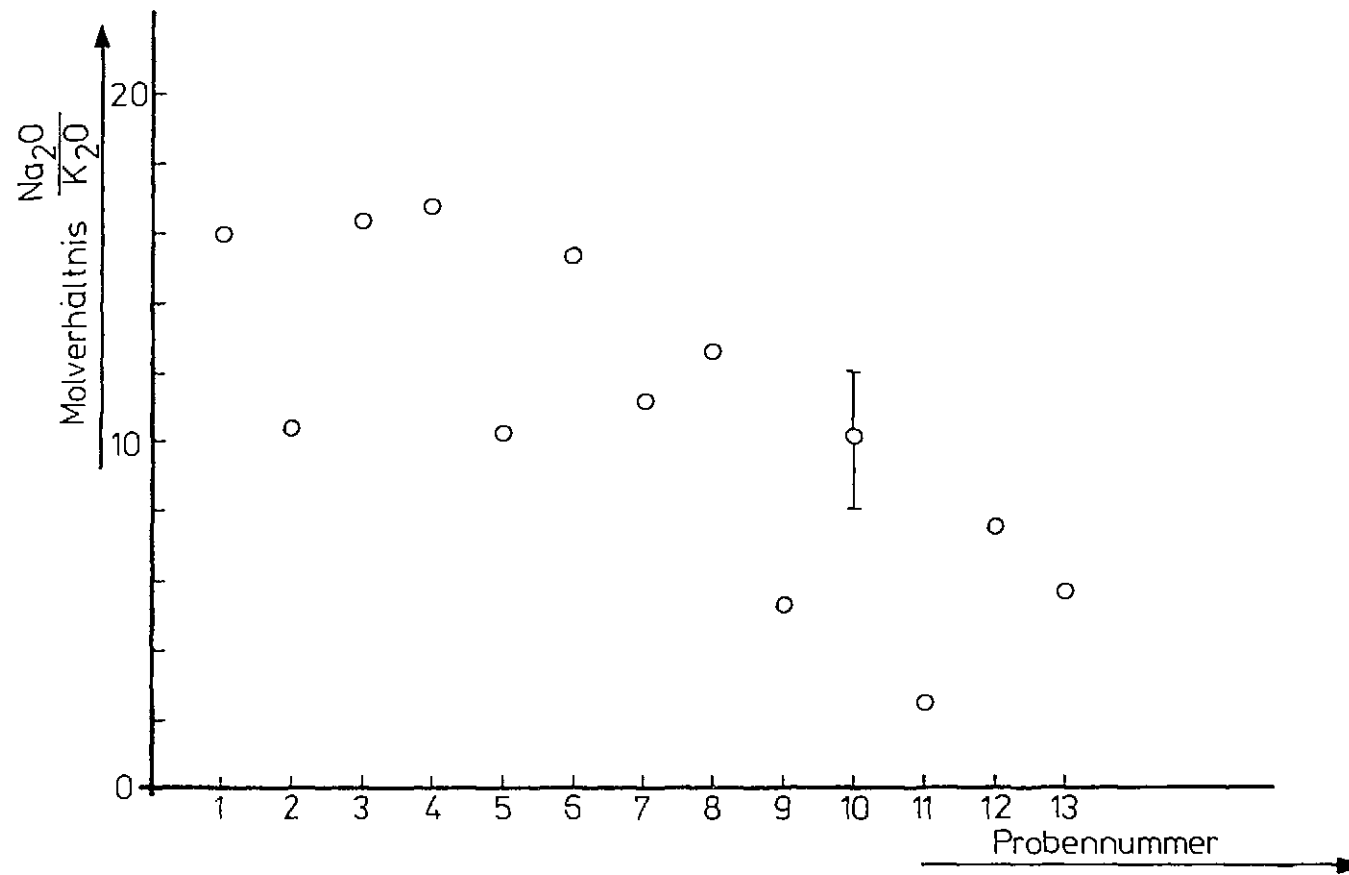


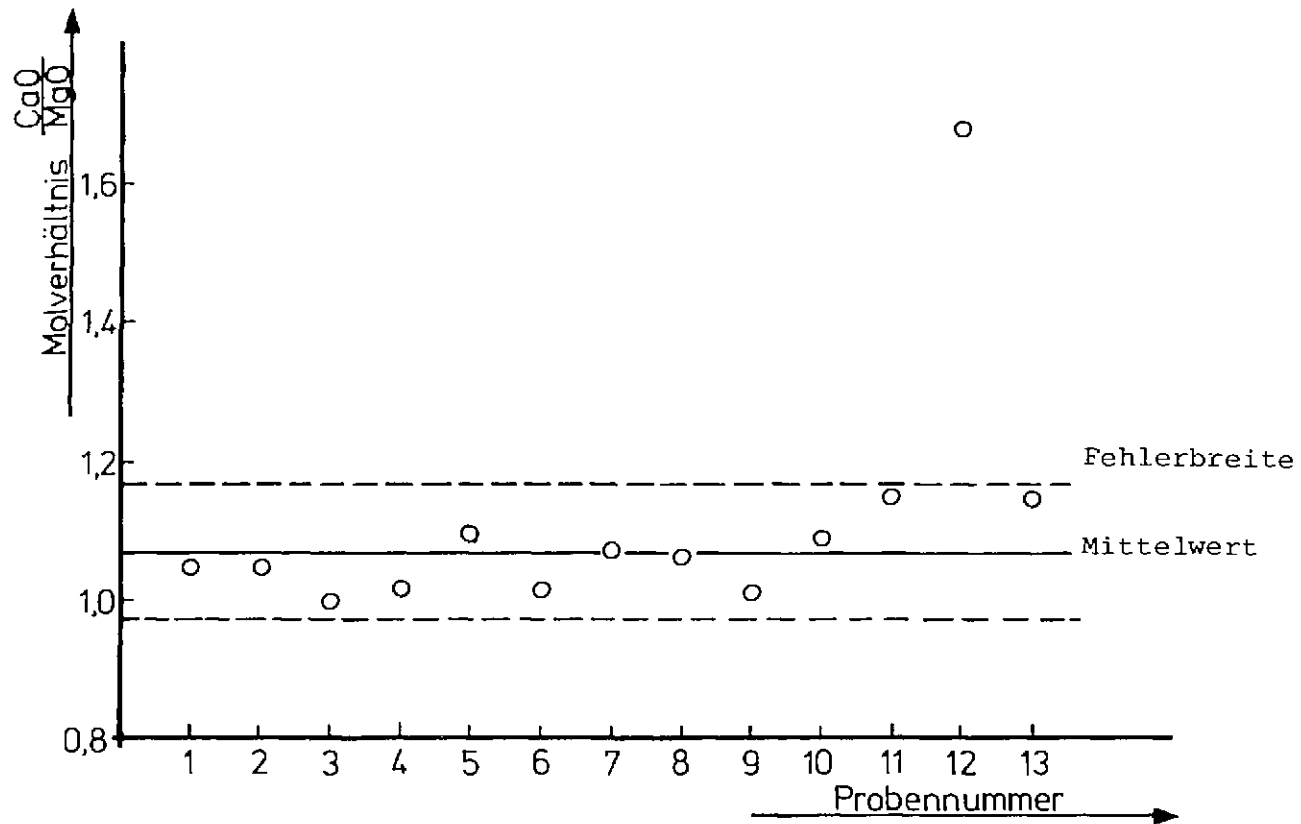
Diagramm der amphoteren und sauren Oxide normiert nach der Segerformel.
Die Zusammensetzung der alkalischen Oxide ist in allen Proben außer N 11
ähnlich.

Abb. 4 Molverhältnis der Alkalioxide



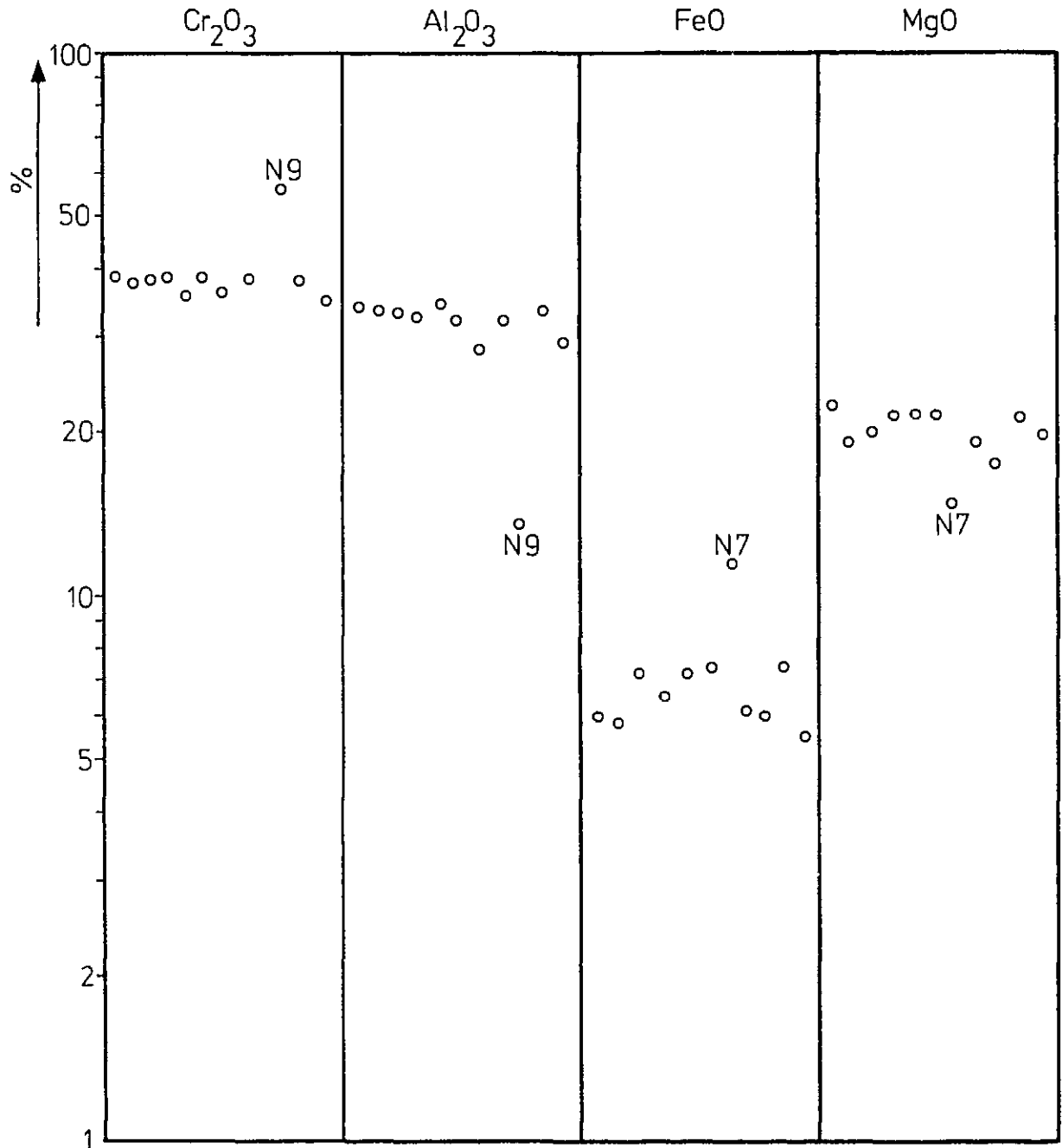
Molverhältnis der Alkalioxide in den Glasuren. Die Balken geben die Standardabweichung (1 Sigma) der Messung an.

Abb. 5 Molverhältnis der Erdalkalioxide



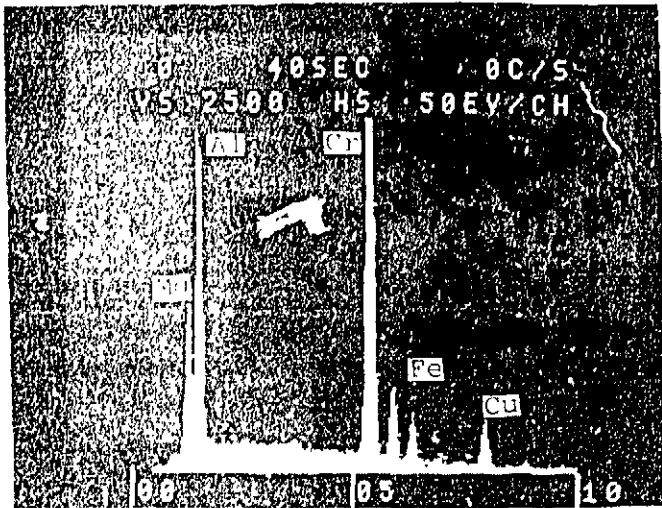
Molverhältnis der Erdalkalioxide in den Glasuren. Die ausgezogene Linie zeigt den Mittelwert der Molverhältnisse ohne N 12, die gestrichelten Linien die Standardabweichung (1 Sigma) der Messung.

Abb. 6 Zusammensetzung der Chromite



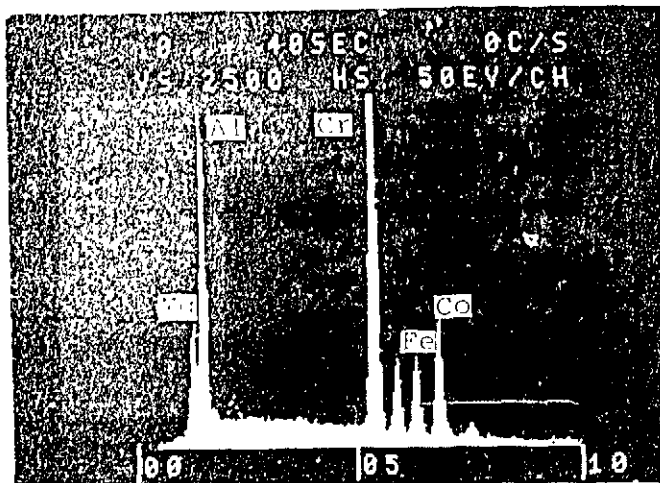
Zusammensetzung der Chromite des Pigmentes der Unterqlasurmalerei

Abb. 7 Zusammensetzung eines Chromitkorns
in hellblauer Glasur



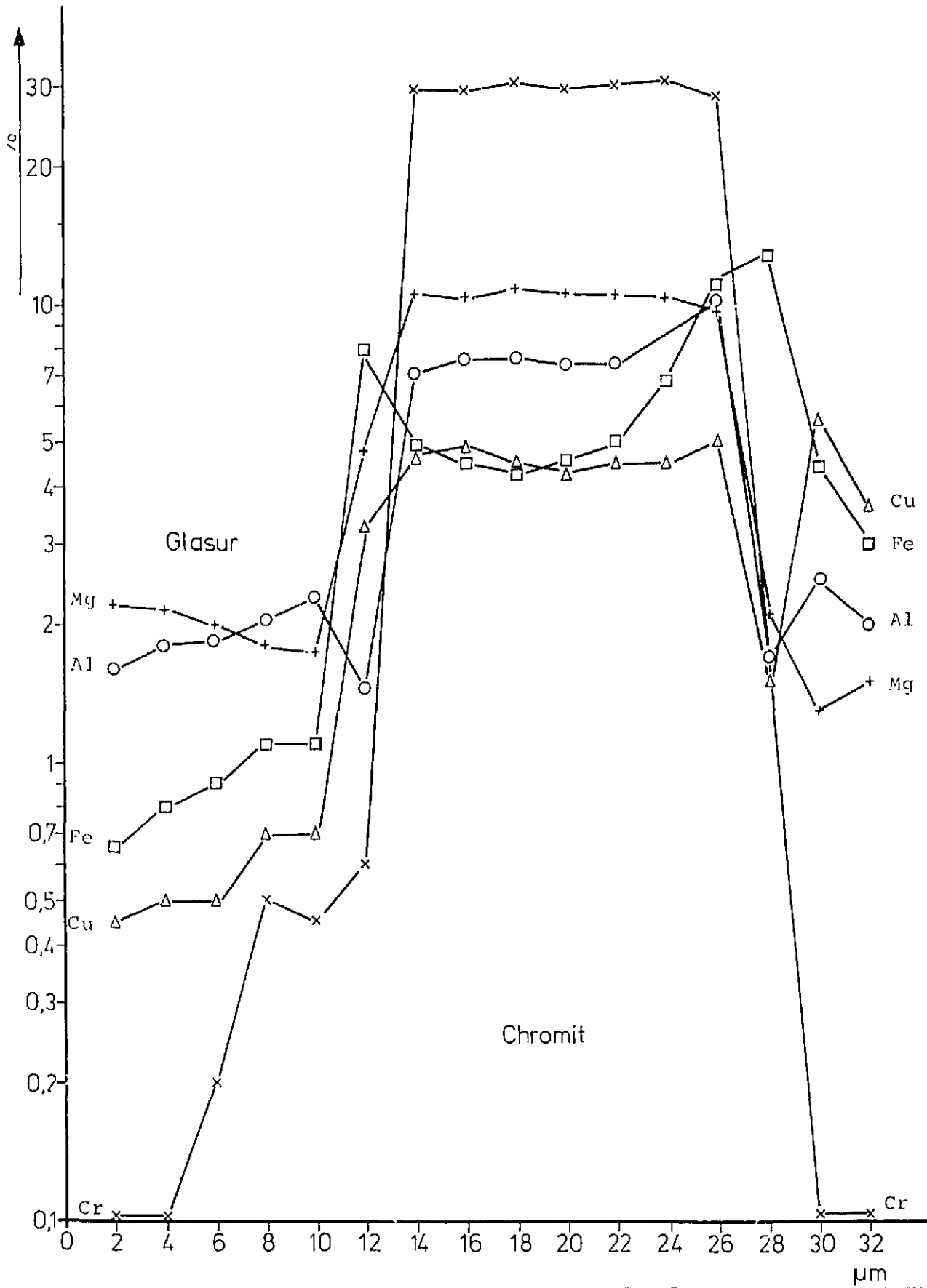
Enerquedispersive Analyse eines Chromit-
korns im hellblauen Teil der Glasur N 3

Abb. 8 Zusammensetzung eines Chromitkorns
in dunkelblauer Glasur



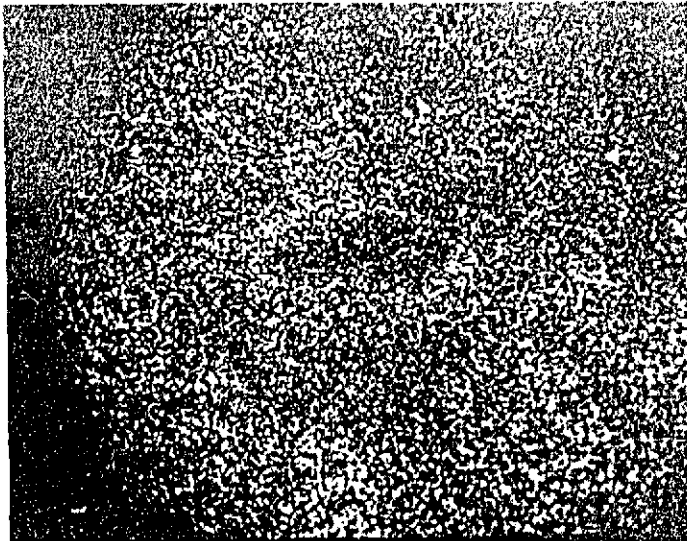
Enerquedispersive Analyse eines Chromit-
korns im dunkelblauen Teil der Glasur N 3

Abb. 9 Konzentrationsprofil in einem Chromitkorn



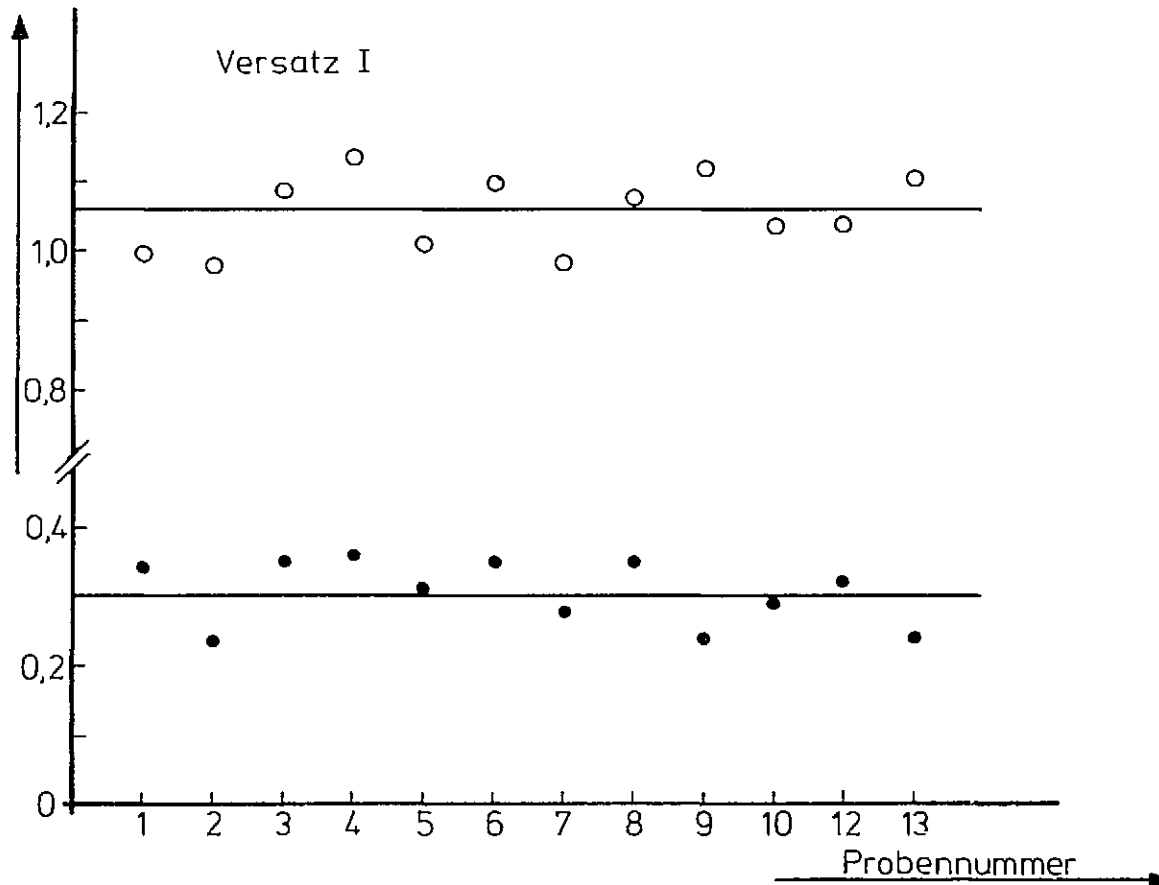
Konzentrationsprofil einiger Elemente in einem Chromitkorn im hellblauen

Abb. 10 Elementspezifische Rasteraufnahmen



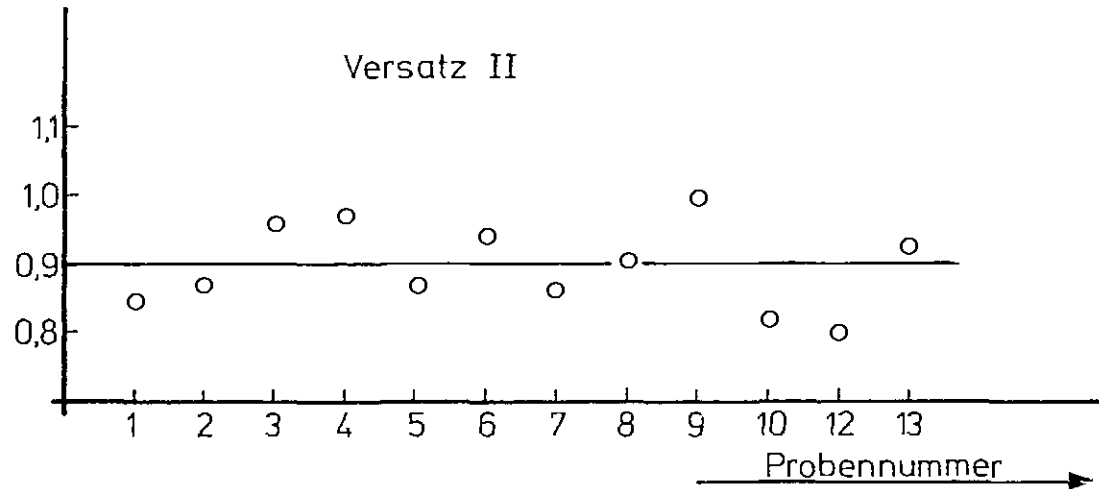
Elementspezifische Rasteraufnahmen des Chromitkorns in Abbildung 9

Abb. 11 Versatzberechnungen der Glasuren (Quarz, Dolomit und Alkalikarbonate als Rohstoffe)



Versatzberechnungen der Glasuren unter der Annahme, daß Quarz, Dolomit und Alkalikarbonate als Rohstoffe verwendet wurden. Die Gewichtsmenge von Quarz wurde als Bezugseinheit gewählt. Die ausgezogenen Linien stellen die jeweiligen Mittelwerte dar.

Abb. 12 Versatzberechnungen der Glasuren (dolomitischer Sandstein und Alkalikarbonate als Rohstoffe)



Versatzberechnungen der Glasuren unter der Annahme, daß ein gebrannter dolomitischer Sandstein und Alkalikarbonate verwendet wurden. Die Gewichtsmenge des gebrannten Sandsteins (Oxide) ist Bezugseinheit.

SGAE-Berichte

Eigentümer, Herausgeber, Verleger und Druck:

Österreichische Studiengesellschaft für Atomenergie Ges.m.b.H.

Nach dem Pressegesetz verantwortlich: Prof. Dr. Hans GRÜMM,
alle Lenaugasse 10, 1082 Wien, Tel. (0222) 42 75 11, Telex 7-5400.

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor.