



Abb. 1. Mit Calcara, einer blauen Schlacke aus der Kalkbrennerei, verzierter Unterbau eines Barockaltars in der Chiesa del Gesù in Palermo; Calcara war nicht so teuer wie ein natürliches blaues Mineral, etwa Lapislazuli. Foto: Fondo Edifici di Culto del Ministero dell'Interno, Italien

Chemiegeschichte

Goethes Blauer Stein

Farbige Gläser aus Verhüttungsschlacken dienten bis in die Neuzeit in Kunst und Architektur als Ersatz für teurere Edelsteine und mineralische Pigmente. Wie die Farben der Gläser zustande kamen, war lange unklar. Elektronenmikroskopie und Röntgenspektrometrie haben das Rätsel nun entschlüsselt.

Messina, Sonntag, den 13. Mai 1787. [...] Die genaue Kenntniß der einzelnen Theile, woraus dieser Prunk zusammengesetzt war, verhalf mir zur Entdeckung, daß der sogenannte Lapis Lazuli jener Säulen eigentlich nur Calcara sei, aber freilich von so schöner Farbe, als ich sie noch nicht gesehen, und herrlich zusammengefügt.“ (Johann Wolfgang von Goethe, Weimarer Ausgabe WA I, 31, Seite 217)

Calcara ist ein blaues Glas, das beim Kalksteinbrennen entsteht, wenn tonige Verunreinigungen des

Kalksteins mit der Asche von Gräsern zusammenschmelzen. Die Gräser dienten früher als Brennmaterial.

Wie in der Umgebung von Palermo Calcara entstand, beschrieb der Schriftsteller und Naturforscher Michael Johann von der Borch (1753–1810, auch Michael Jan Borch) im Jahr 1778.¹⁾ Als sich Goethe (1749–1832) etwa ein Jahrzehnt später auf seiner Italienreise in Sizilien einschiffte, hatte er Borchs Buch über die Steine Siziliens als geologischen Reiseführer im Gepäck. Daher wusste Goethe, dass diese blaue

und gelegentlich opalglasartige Schlacke bei der Herstellung von Branntkalk als Nebenprodukt anfiel und in geschliffener Form als ein Ersatz für Lapislazuli in Wandverkleidungen sizilianischer Barockkirchen diente (Abbildung 1).

Dass gewöhnlicher und zudem noch ein besonders weißer Kalkstein zu einem Material transmutieren konnte, das farblich dem Lapislazuli gleicht, hat alchemistische Qualität, was Goethe mit seinem Interesse an der Alchemie nicht entgangen sein dürfte. So findet sich in Goethes Nachlass ein Stück Cal-

cara (Abbildung 2). Zusammen mit anderen Gesteinsproben, die er auf Sizilien gesammelt hatte, wurde es Teil seiner geowissenschaftlichen Sammlung, die mehr als 18 000 Stücke umfasste (Kasten S. 20). Das Tagebuch der italienischen Reise und die Probenbeschriftung, die Goethe selbst angebracht hatte, erlaubt es noch heute, seine Probennahme exakt zu rekonstruieren: Er fand die blauen Gläser im Tal des Flusses Oreto bei Palermo am 4. April 1787. Bis in unsere Zeit blieb ungeklärt, was die Calcara einschließlich Goethes Fundstück blau färbt.

Wie die Farbe ins Glas kommt

Glas wird bereits seit dem frühen dritten Jahrtausend vor der Zeitenwende hergestellt. Aus dieser Frühphase sind blaue Gläser aus Mesopotamien und Ägypten erhalten, die Halbedelsteine wie Lapislazuli oder Türkis imitierten. Zu diesem Zweck wurden der Glasschmelze Verbindungen von Kupfer für einen türkisgrünen, Kobalt für einen blauen und ein Gemisch von Kobalt und Mangan für einen lila-violetten Farbeffekt beigefügt.^{2,3)} In diesen Gläsern kommt der Farbeindruck dadurch zustande, dass das von einer Lichtquelle emittierte Spektrum durch Absorption verändert wird. Dabei regt Licht in diskreten Wellenlängenbereichen Elektronen an, die entweder den 3d-Orbitalen von Kationen der Übergangselemente (zum Beispiel Cr^{3+} , Mn^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , Ni^{2+} oder Cu^{2+}) in einer anionischen Koordination entstammen oder zwischen Orbitalen der Metallkationen und deren Liganden transferiert werden (zum Beispiel Fe^{3+} und S^{2-} im Braunglas).

Besonders sticht das tiefblau gefärbte Kobaltglas heraus, das als Smalte zu einem Pigmentpulver zermahlen wurde. Auch von solchen Kobaltschlacken findet sich in Goethes geowissenschaftlicher Sammlung ein Stück (Abbildung 2).

Farben entstehen zudem durch Gefüge im Glas.^{2,3)} Dies gilt für In-

terferenz durch Reflexion an dünnen Schichten wie bei irisierenden Oberflächen von verwitterten, ursprünglich farblosen archaischen Gläsern. Ebenso erzeugt die Streuung von Licht einen Farbeindruck, wie im Himmelsblau zu beobachten: Der kurzwellige Anteil des Sonnenlichts wird an Gasmolekülen in der Atmosphäre stärker gestreut als der langwellige. Wenn man bei Sonnenauf- oder -untergang direkt in die Sonne blickt, fehlt dem Sonnenlicht dagegen dieser kurzwellige Anteil, und das verbleibende Spektrum ist dominiert von der Komplementärfarbe Orange. Diese Rayleigh-Streuung an Partikeln mit einem Durchmesser von weniger als zehn Prozent der Wellenlänge des Lichts hängt stark von der Wellenlänge ab.

Bei zunehmender Partikelgröße nimmt die Wellenlängenabhängigkeit der Streuung ab. Das weiße Aussehen der Wolken entsteht beispielsweise durch diese Mie-Streuung an Wassertropfchen im Mikrometerbereich.

Seit der Antike hat die Glaskunst mehrere Verfahren entwickelt, um mit fein verteilten metallischen Ausscheidungen von Kupfer, Silber und Gold im Glas Farbeffekte zu erzeugen. Dabei spielen die Wechselwirkungen zwischen Leitungselektronen und Photonen eine Rolle.

Phasenseparation durch Schmelzentmischung oder Kristallisation kann, wenn die Partikelgröße nicht über den Nanobereich hinausgeht, ebenfalls Streuung erzeugen. Bei größeren Partikeln erscheint das Glas dagegen undurchsichtig wie bei Milchglas.

Streuung statt Absorption

Als Erklärung für die Farbe der Calcara, wie sie in sizilianischen Barockkirchen zu finden ist, nennt die Literatur die Absorption durch Fe^{2+} . Denn Analysen archaischer Schlacken von Standorten ehemaliger Kalköfen bei Palermo fanden weder Kobalt noch Kupfer, die

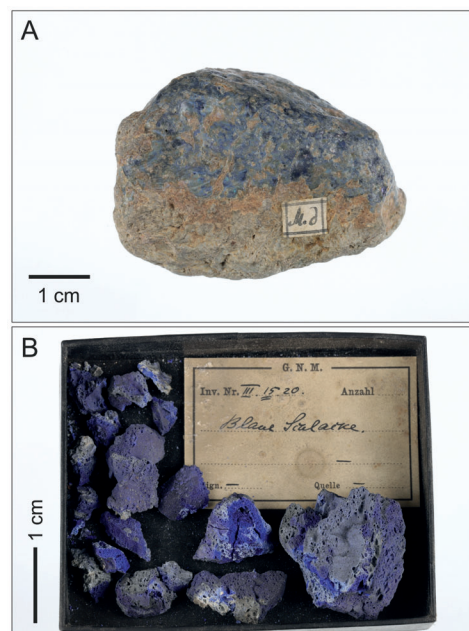


Abb. 2. Calcara (A) und Smalte (B) aus Goethes geowissenschaftlicher Sammlung. In der Beschreibung steht: „Ein Stück schön blau mit aufsitzender Sternförmiger Crystallisation“ sowie „Calcara von Palermo“, in Goethes Katalog D als „Blaue Schlacke“ bezeichnet.¹⁵⁾ Bei der ebenfalls als „Blaue Schlacke, in viele Fragmente zerfallen“ bezeichneten Probe, die zu den „verirrten Stufen“ gehört,¹⁵⁾ handelt es sich nach unseren Analysen mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie um cobalt- und arsenhaltige Smalte. Über den Ursprung dieses Sammlungsstücks ist nichts weiter bekannt; denkbar ist eine Herkunft aus einer Farbmühle im sächsischen Erzgebirge.¹⁶⁾

Diesen Beitrag haben Axel K. Schmitt (oben) und Rüdiger Klein verfasst. Schmitt ist Professor für Isotopengeologie und Petrologie an der Universität Heidelberg. Hauptsächlich beschäftigt er sich mit vulkanischen Prozessen und nebenbei mit Geoarchäologie. Klein unterrichtet Chemie an der Wöhlerschule in Frankfurt und im Schülerlabor der Goethe-Universität. Thomas Schmuck, Kustode der naturwissenschaftlichen Sammlungen des Goethe-Nationalmuseums Weimar, hat die Probe zur Verfügung gestellt. Richard Wirth und Vladimir Roddatis haben am Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum GFZ die Messungen am Transmissionselektronenmikroskop durchgeführt; Anja Schreiber hat dafür die Proben präpariert.



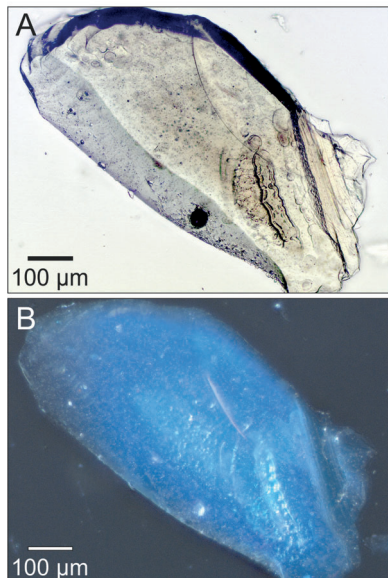


Abb. 3. Mikroskopische Aufnahmen eines Calcara-Bruchstücks in Immersionsflüssigkeit im A) Durch- und B) Streulicht.

Schlacken enthalten aber FeO zwischen einem und zwei Gewichtsprozent.^{3,5)} Wie Mößbauerspektroskopie zeigte, liegt in den Gläsern Fe²⁺ in tetraedrischer und oktaedrischer Koordination vor, wobei nur oktaedrisch koordiniertes Fe²⁺ durch Absorption im langwelligen Spektralbereich eine Blaufärbung erzeugt.³⁾

Mit dieser Interpretation ist allerdings die farbliche Veränderung nicht in Einklang zu bringen, die kleine, durchscheinende Bruchstücke der Calcara zeigen: Im Durchlicht erscheinen sie rot-orange, blau nur im reflektierten Licht (Abbildung 2). Dieses Verhalten ist charakteristisch für Streuung.

Um herauszufinden, welche streuenden Partikel in der Calcara dafür verantwortlich sein könnten, wurden in dieser Studie erstmals nanoanalytische Methoden eingesetzt.

Die chemische Zusammensetzung

Goethes Calcara (Inventarnummer GNM 4853) liegt in Schrank S XV 30 32 im Steinpavillon an der Ackerwand seines Hauses am Frauenplan in Weimar. Dieser Schrank enthält vor allem Gesteine und Minerale, die Goethe während seiner ersten italienischen Reise von 1786 bis 1788 gesammelt hat. Von diesem zirka fünf Zentimeter langen Handstück wurde mit einer Diamanttrennscheibe ein etwa ein Mil-

limeter großes Fragment (Abbildung 3) als Probe genommen.

Die Probe wurde in Epoxidharz eingebettet, angeschliffen und mit energiedispersiver Röntgenspektrometrie an einem Rasterelektronenmikroskop am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg analysiert. Aus derselben Probe wurde am Helmholtz Institut Geoforschungszentrum Potsdam durch einen fokussierten Ionenstrahl eine ungefähr 100 nm dicke Folie mit etwa 15 µm Kantenlänge ausgeschnitten und anschließend im Transmissionsmikroskop untersucht.

Die chemische Zusammensetzung von Goethes Calcara ähnelt den von Artioli und Team³⁾ bearbeiteten archäologischen Fundstücken aus der Umgebung von Palermo (Abbildung 4). Die Hauptbestandteile sind SiO₂ (63 Gew.-%), CaO (16 Gew.-%), MgO und K₂O (jeweils etwa 7 Gew.-%). Es folgen Al₂O₃ (3,7 Gew.-%), P₂O₅ (1,6 Gew.-%) und FeO (1,3 Gew.-%) sowie Spuren von Na₂O, TiO₂ und MnO (alle unter 1 Gew.-%).

Die Zusammensetzung der Calcara fällt dabei innerhalb des pseudoternären Dreiecksdiagramms für

INFO: Fundstücke und Farbenlehre – Goethes geologische Sammlung

Die Objekte in Goethes geowissenschaftlicher Sammlung gehen weit über das hinaus, was heute in einer solchen zu erwarten wäre: Sie enthält Mineralien, Gesteine, Fossilien, Bergbauprodukte und Porzellanerden, daneben Kunstwerke wie ein Bruchstück des Kölner Doms, Ruinenbilder in Goldrahmen, Antiquitäten – etwa ein angebliches Bruchstück des Memnonkolosses aus Ägypten –, bemalte Gipsabgüsse von Fossilien, geschliffene Steine sowie technische Produkte, darunter Schlacken. Der Katalog¹⁵⁾ verzeichnet Gläser, 26 Schlacken, eine Eisenschlacke und einen Smalt. Dazu gehört auch die „Calcara von Palermo“;

deren Herstellungsprozess Goethe kannte. Denn im April 1787 vermerkt er in Palermo: „Der Weg nach San Martin geht das ältere Kalkgebirg hinauf. Man zertrümmert die Felsen und brennt Kalk daraus, der sehr weiß wird. Zum Brennen brauchen sie eine starke, lange Grasart, in Bündeln getrocknet. Hier entsteht nun die Calcara.“ Über die Steinschleifer schreibt Goethe: „Doch wissen sie sich noch viel mit einem Material, einem Feuererzeugnis ihrer Kalköfen. In diesen findet sich nach dem Brande eine Art Glasfluß, welcher von der hellsten blauen Farbe zur dunkelsten, ja zur schwärzesten übergeht. Diese Klumpen werden, wie anderes Ge-

stein, in dünne Tafeln geschnitten, nach der Höhe ihrer Farbe und Reinheit geschätzt und anstatt Lapislazuli beim Furnieren von Altären, Grabmälern und andern kirchlichen Verzierungen mit Glück angewendet.“

In den Blättern zur Farbenlehre aus seinem Nachlass erwähnt Goethe die Calcara als „Blaue Verglasung“ bei Überlegungen zu Grün und Blau, außerdem in den Notizen zu einem Farbschema als „Calcara Blau“. Zum ersten Mal nennt er sie in einem Vortrag im Mai 1806, in dem er sich mit der Herstellung der physikalischen Farben Grün, Gelb und Blau beschäftigt.

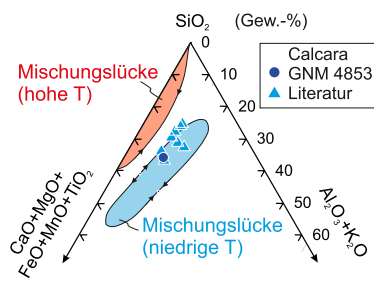


Abb. 4. Chemische Zusammensetzung der Calcara (GNM 4853) im Vergleich zu Literaturdaten.³⁾ Mischungslücken in der Schmelzphase für hohe und niedrige Temperaturen sind in einem pseudoternären Phasendiagramm⁶⁾ dargestellt.

SiO₂-reiche Gläser⁶⁾ in eine Mischungslücke bei einer Temperatur um 1000°C, in der zwei entmischte Schmelzen koexistieren (Abbildung 4). Die Zusammensetzung spiegelt auch die Herkunft der beim Kalkbrennen verwendeten Komponenten wider: Silikatische Verunreinigungen aus dem Kalkstein verbinden sich mit diesem sowie mit Alkalien und Phosphor aus der Pflanzenasche während des Brennprozesses zwischen 900 und 1000°C zu einer Schmelze.³⁾ Diese bildet, wie in Borchs „Lythologie Sicilienne“ beschrieben, „eine Art Kruste unter den gebrannten Kalksteinen und um sie herum“.¹⁾

Nanostruktur schmelz-entmischter Gläser

Untersuchungen mit dem Transmissionselektronenmikroskop zeigen eine submikroskopische Heterogenität der Schlacke, die sich aus unregelmäßigen amorphen Bereichen mit Dimensionen von wenigen zehn Nanometern zusammensetzt (Abbildung 5). Dabei liegen etwa gleiche Volumina einer calciumreicheren amorphen Phase in einer siliciumreicheren amorphen Matrix vor (Abbildung 5). Die Zusammensetzung der entmischten Endglieder war aufgrund der geringen Tröpfchengröße relativ zur Dicke der Folie nicht eindeutig bestimm-

bar. Dennoch entspricht die Koexistenz beider Phasen qualitativ der Lage der experimentell bestimmten Konoden, das sind die Verbindungslinien zwischen koexistierenden Glaszusammensetzungen, die in etwa parallel zur SiO₂-CaO+FeO+MgO+MnO-Seite des ternären Diagramms verlaufen (Abbildung 4).

Experimentell kalibrierte Phasendiagramme bestätigen die beobachteten und für spinodale Entmischung charakteristischen Nanogefüge⁷⁾ für die Zusammensetzung der Calcara. Lichtstreuung an entmischten Glaskügelchen, deren Brechungsindex sich von dem der Matrix unterscheidet, bewirkt, dass sich die spektralen Maxima im weißen Licht verschieben. Dadurch wird im Streulicht die blaue Farbe betont, und im Durchlicht erscheint ein komplementäres rötliches Orange.

Lichtstreuung und historische Schlacken

Bereits zu Goethes Zeiten schienen Architekten und Künstler kaum noch Calcara zu nutzen. Mit dem Verschwinden grasbefuerter Kalköfen nahm das Interesse ab, für die spektakuläre Farbe des Glases eine Erklärung zu finden. Durch Schmelzentmischung entstandene Nanogefüge in Gläsern sind aller-

dings nicht auf die Calcara beschränkt (Abbildung 6, S. 22).

Sie finden sich auch in Schlacken aus der historischen Eisenverhüttung. Beim Aufheizen von Stück- oder Floßöfen, die mit Holzkohle befeuert wurden, entstanden vor allem Blauschlacken sowie die verwandte, opalartig weiße Schlackenmilch.^{8,9)} Wie Knauf recherchiert hat, spekulierte eine Generation von Chemikern und Mineralogen, unter ihnen Leopold Gmelin (1788–1853), Johann Friedrich Hausmann (1782–1859) und Sven Rinman (1720–1792), über die Blaufärbung dieser Schlacken, allerdings ohne die damals noch unbekannt physikalische Ursache zu erkennen.

Die um das Jahr 1850 eingeführten kontinuierlich arbeitenden Koks- hochöfen erzeugten keine blauen

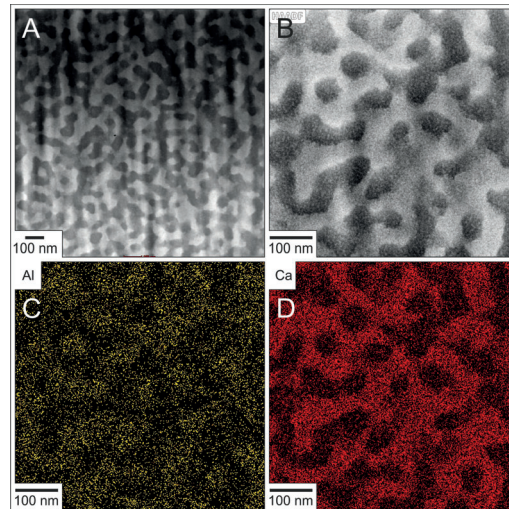


Abb. 5. Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahmen der Calcara-Probe im Dunkelfeldmodus (High-angle annular dark field; HAADF, A, B), wobei die Helligkeit mit höherer durchschnittlicher Ordnungszahl zunimmt. Energiedispersive röntgenspektrale Kartierung des Bereichs in B mit Intensitäten für Al K_α (C) und Ca K_α (D); gelbe beziehungsweise rote Pixel zeigen erhöhte Intensitäten des jeweiligen Elements. Helle Bereiche in (B) korrelieren mit erhöhten Ca-Gehalten, während Al und Si (nicht gezeigt) relativ dazu in den dunklen Bereichen angereichert sind.

AUF EINEN BLICK

Bei vorindustriellen Verhüttungs- und Brennprozessen entstanden farbige Schlacken.

Ursache für die blaue Farbe in den Schlacken der Kalkbrennerei auf Sizilien oder der Eisenverhüttung in der Eifel ist Lichtstreuung an nanometergroßen Glasdomänen, die durch Schmelzentmischung entstanden sind.

Diese Nanostrukturen wurden hier erstmals mit dem Transmissionselektronenmikroskop nachgewiesen.

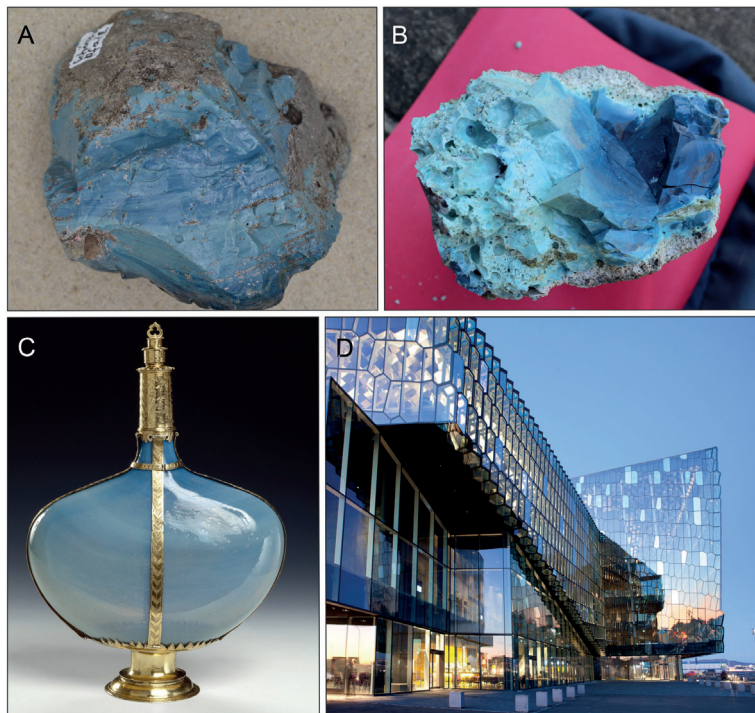


Abb. 6. Beispiele anthropogener und natürlicher schmelzentmischter Gläser und anderer Farbeffektgläser: A) Blauschlacke der frühneuzeitlichen Eisenverhüttung aus Halden des Gienanth'schen Hüttenwerks, Schönau, Südpfalz. Bildbreite zirka 7,5 cm. B) Fulgurit, also durch Blitzschlag entstandenes Glas, aus Michigan, USA; Bildbreite zirka 12,5 cm. C) Venezianische Flasche aus Opalglas, verziert mit einer vergoldeten Silberfassung (etwa von 1580 bis 1585). Das Objekt befindet sich im Grünen Gewölbe in Dresden und ist 34,6 cm hoch. (Inventarnummer IV 205). D) Fassade des Konzerthauses Harpa in Reykjavik, Island. Fotos: Matthew Pasek (B), Staatliche Kunstsammlungen Dresden, Jürgen Karpinski (C), Prinz Optics, Peter Röhlen (D)

Schlacken mehr, die damit weitgehend aus dem Blickfeld der Forschung gerieten.⁸⁾ Heute kann man blaue Schlacken noch an vielen Standorten der vorindustriellen Eisenerzeugung auflesen, so in der Eifel, im Hunsrück, im Lahn-Dill-Gebiet, in Oberfranken, in der Oberlausitz, im Sauer- und im Siegerland sowie in der Südpfalz. Die in der Ahr auffindbaren Mariensteine, blaue zu Kiesel abgerundete Schlackenbruchstücke, waren beliebte Sammelobjekte, die lokal zu Schmucksteinen verarbeitet wurden.

Natürlich entstandene blaue Gläser sind dagegen sehr selten. Durch Blitzschlag aufgeschmolzene Böden und Sedimente, Fulgurite genannt, sind in seltenen Fällen blau gefärbt (Abbildung 6B).¹⁰⁾ Im Schamanschyng-Krater in Kasachstan wurden blaue Tektite gefunden, die durch Meteoriteneinschläge entstanden sind.¹¹⁾ In beiden Fällen hat Transmissionselektronenmikroskopie entmischte Glasphasen im Nanometerbereich nachgewiesen.

Historische Glaskunst hat – teils beabsichtigt, teils unbeabsichtigt – Objekte hervorgebracht, bei denen schmelzentmischte Gläser oder Glasuren Licht streuen. Das für Rayleigh-Streuung charakteristische Changieren zwischen Blau und Gelb, je nach Anteil von indirekt und direkt einfallendem Licht, findet sich beispielsweise in klassischen chinesischen Glasuren und im Ausschuss frühindustrieller Glashütten in England, bei denen Flaschenglas mit hohem Calciumgehalt durch Herstellungsfehler zu einem bläulich-opalartigen Glas abkühlte.¹²⁾

Ob dagegen der dichroitische Effekt in reich dekorierten Pilgerflaschen, wie sie im 16. Jahrhundert hergestellt wurden (Abbildung 6C), auf Schmelzentmischung beruht oder auf andere Verfahren der Trübung von Gläsern zurückzuführen ist, wie sie in Venedig zu dieser Zeit entdeckt und perfektioniert wurden,¹³⁾ wurde unseres Wissens noch nicht genauer untersucht.

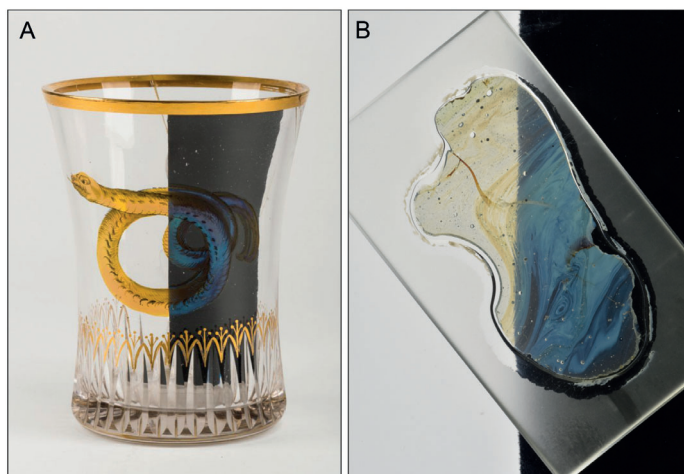


Abb. 7. A) Karlsbader Glas aus Goethes Besitz. Er verwendete solche mit Silberbeize bemalten Gläser, um ein Urphänomen, wie Goethe es nannte, zu veranschaulichen: Nach diesem entstehen die Farben Gelb und Blau durch Modifikation des Lichts durch äußere Umstände, zum Beispiel Trübung. Hier verdeckt ein schwarzes Tuch teilweise den hellen Hintergrund, sodass Durch- und Streulicht sichtbar werden. B) Dünnschliff (etwa 300 μm) einer Blauschlacke aus dem Bode-tal, Harz, vor hellem und dunklen Hintergrund. Länge des Objektträgers 4,5 cm. Foto: Klassik Stiftung Weimar Bestand Museen, Alexander Burzik (A)

Metallische Nanopartikel in Gläsern können ebenfalls Streuung erzeugen und damit einen dichroitischen Effekt bewirken. Goethe selbst hat dies in gelbem Glas von Kirchenfenstern beobachtet. Er versuchte, solche Gläser herstellen zu lassen, um Farbentstehung durch Trübung zu demonstrieren (Abbildung 7). Fein verteiltes Silber, das während des Aufheizens von gewöhnlichem Glas aus einer aufgetragenen silberhaltigen Verbindung (Silberbeize) in die obersten zehn Mikrometer dicken Glasschichten diffundiert, bildet dabei bei anschließendem Tempern metallische Nanokügelchen, die den gewünschten Effekt erzeugen.¹⁴⁾ Goethes Nachlass enthält derartige Gläser, als Flachglas zur wissenschaftlichen Demonstration und als reich dekorierte Trinkgefäße (Abbildung 7). Goethe hat mit diesem Farbenspiel scheinbar häufiger Besucher unterhalten, was mancher allerdings als „Hokuspokus“ abtat, so der Staatskanzler des Großherzogtums Sachsen-Weimar-Eisenach, Friedrich von Müller (1779–1849), in einem Tagebucheintrag.¹⁴⁾ Dass Goethe mit Calcara ein Material zur Hand hatte, das dünn geschliffen den gleichen Effekt gezeigt hätte wie die aufwendig durch Silberbeize getriebenen Gläser, war ihm allerdings nicht bewusst.

Optische Effekte in Glas heute

Farbeffektgläser spielen heute in Wissenschaft, Technik, Kunst und Architektur eine Rolle. Dichroitische Gläser sind Hightech-Produkte, die durch gleichmäßiges Aufbringen dünner Schichten mit unterschiedlicher Lichtbrechung hergestellt werden. Dabei hängen die spektralen Eigenschaften von Dicke, Zahl, Feinstruktur und Zusammensetzung der Schichten ab. Vor allem Architekten nutzen heute die Wirkung von Farbeffektgläsern (Abbildung 6D). Basierend auf Ausgangsmaterialien wie Fensterglas, Metalloxiden wie TiO_2 oder ZrO_2 und SiO_2 erzeugen nanotechnische Verfahren dabei optische Effekte wie Farbüberlagerungen oder mit der Beleuchtung variierende Farbeindrücke.

Die Alchemie der Calcara ist ein frühes Beispiel dafür, wie gewöhnliche Materialien durch Transformation in eine bestimmte Nanostruktur neuartige Eigenschaften erhalten und so mit ihren Farben den Alltag beleben. ■

Die Autoren danken Ilona Fin und Oliver Wienand für die Probenpräparation und Alexander Varychev für die Durchführung der Untersuchungen am Rasterelektronenmikroskop. Der Europäische Fonds für regionale Entwicklung und das Land Brandenburg unterstützen das Themis TEM als Teil der „Potsdam Imaging and Spectral Analysis Facility“ (PISA) am Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches Geoforschungszentrum GFZ.

- 1) M. v. d. Borch, *Lythologie Sicilienne, ou Connaissance de la Nature des Pierres de la Sicile; suivie d'un Discours sur la Calcara de Palerme. Benoit Francesi, Rom 1778*
- 2) I. Biron, M. H. Chopinet in: K. Janssens (Hrsg.), *Modern methods for analysing archaeological and historical glass*, Wiley, Chichester, 2013, 49–65
- 3) G. Artioli, C. Nicola, G. Montana, I. Angelini, L. Nodari, U. Russo, *Archaeometry* 2009, 51(2), 197–213
- 4) D. De Ligny, D. Möncke in: J. D. Musgraves, J. Hu, L. Calvez L. (Hrsg.) *Springer Handbook of Glass Springer, Cham 2019*, 297–342
- 5) M. Di Bella, G. Sabatino, A. Giuliano et al., *Mediterranean Archaeology and Archaeometry*, 2020, 20(2), 97–111
- 6) E. Roedder in: H. S. Yoder, (Hrsg.) *Evolution of the igneous rocks. Princeton University Press, 1979*, 15–58
- 7) Y. M. Chiang, W. D. Kingery, *J. Am. Ceram. Soc.* 1983, 66(9), c171–c172
- 8) N. Knauf in: *Eifeljahrbuch 2020*, 162–174
- 9) A. K. Schmitt, R. Wirth, R. Klein, J. Harvey, *Der Aufschluss* 2021(2), 9–57
- 10) T. Feng, C. Lang, M. A. Pasek, *Lithos* 2019, 342, 288–294
- 11) M. E. Zolensky, C. Koeberl, *Geochim. Cosmochim. Acta* 1991, 55(5), 1483–1486
- 12) D. Dungworth, S. Paynter, *Proceedings of the 37th International Symposium on Archaeometry, 13th–16th May 2008, Siena, Italy. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011*, 371–375
- 13) W. P. McCray, Z. A. Osborne, W. D. Kingery, *MRS Proceedings* 1995, 352, 201, doi: 10.1557/PROC-352-201
- 14) T. Nickol, K.-J. Berg, G. Berg, *Goethe-Jahrbuch* 2008, 125, 204–218
- 15) H. Prescher, *Goethes Sammlungen zur Mineralogie, Geologie und Paläontologie. Katalog. Akademie-Verlag, Berlin 1978*
- 16) P. Hammer, *Scripta Geologica* 2004, (Special Issue), 4, 108–177

Keine halben Sachen.

Die Welt ist voll von Halbwissen. Besonders im sensiblen Umfeld der Chemie ist dies jedoch fehl am Platz. Deshalb arbeiten wir seit 1947 mit Leidenschaft und Liebe zum Detail daran, dass evaluierte Daten und Fakten rund um das Themenfeld Chemie zur Verfügung stehen. Immer. Und ohne Ausnahme. So wurde „Der RÖMPP“ Synonym für inzwischen über 65 000 Stichwörter und über 240 000 Querverweise, auf die man sich verlassen kann. Das sollten Sie sich am besten selbst anschauen.

Sonderpreis
für GDCh-Mitglieder **139,- €**
für stud. Mitglieder **69,- €** www.gdch.de

GDCh



Nur 100% sind 100%.
www.roempp.com

 Thieme