

hof und entspricht seiner naturgebundenen und ökonomischen Einheit.

Gerade heute muß unser Land in seiner heiklen geopolitischen Lage auf einen möglichst hohen Grad der Selbstversorgung abzielen. Der Getreidebau im österreichischen Bergland ist deshalb von hoher ernährungswirtschaftlicher Bedeutung, seine Erhaltung und Förderung eine nationale Notwendigkeit.

Anschrift: Klagenfurt, Landhaus.

Der Phasenaufbau einer römischen „Eisenhüttenschlacke“ vom Magdalensberg

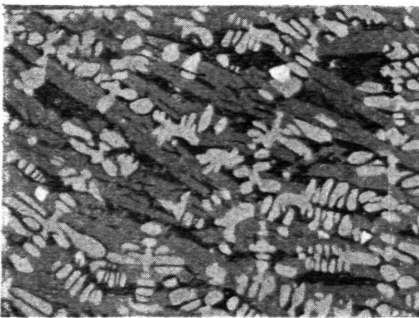
Von Felix Trojer

Auf dem Magdalensberg, nahe Klagenfurt, sind seit 1948 unter Leitung des Geschichtsvereines für Kärnten intensive Ausgrabungen an einer spätkeltisch-römerzeitlichen Siedlung im Gange. Die Anwesenheit einer derartigen Siedlung verriet sich schon im Jahre 1502 durch die Auffindung einer griechischen Statue aus dem fünften Jahrhundert vor Christi, ohne daß diese, ein griechischer Jüngling, der als Kultbild des Keltengottes Mars-Latobius diente, zu weiteren Nachforschungen Anlaß gab. In den Jahren 1867—1869 wurden durch den Kärntner Geschichtsverein zahlreiche römische Gräber freigelegt. Die letzten obenerwähnten Ausgrabungen hingegen erstreckten sich systematisch über vermutlich den ganzen Teil der verborgenen Reste. Hierbei stellte sich heraus, daß die Anwesenheit des Menschen auf dem Magdalensberg seit der frühen Bronzezeit 1700—1500 v. Chr. anzusetzen ist. Zur Zeit der Römerbesetzung übernahm die Besatzungsmacht die in etwa 1000 m Höhe gelegene keltische Siedlung und baute sie zu einem Verwaltungs- und militärischen Zentrum für die neu errichtete Provinz Norikum aus. Norikum umfaßte damals den größten Teil des heutigen Österreichs, reichend bis an Inn, Donau und Wiener Wald. Mit der Errichtung einer verkehrsmäßig viel besser liegenden neuen Hauptstadt Virunum bei Maria-Saal in Kärnten im ersten nachchristlichen Jahrhundert verlor die Siedlung auf dem Magdalensberg, deren Name noch unbekannt ist, an Bedeutung. Sie ging scheinbar dann durch Erdbeben und wiederholte Brände unter. Nähere Details über die Ausgrabungen sind in verschiedenen Aufsätzen der Carinthia I, 1949—51, 139.—142. Jahrgang, enthalten.

Bei den Ausgrabungen wurden auch Schlacken und Eisenluppen gefunden, die dem Verfasser durch die freundliche Ver-

mittlung des Herrn Dr. Fr. v. Kahler, Leiter der geologischen und mineralogischen Abteilung des Kärntner Landesmuseums, zur mikroskopischen Untersuchung überlassen wurden.

Bevor auf diese Schlacken und die Lupe näher eingegangen werden soll, ist es zweckmäßig, einiges über die angewandte Untersuchungsmethodik anzuführen. Schlacken werden häufig mit Vorteil im Anschliff untersucht. Dies vor allem deshalb, weil die meisten Schlacken feinkristallin sind und zum Teil opake Bestandteile enthalten. Auch im vorliegenden Falle wurden Anschliffe verwendet. Die Bilder insbesondere stammen von Anschliffen. Bei der Bestimmung der Phasenbestandteile im Anschliff wurde das Reflexionsvermögen, das Verhalten im polarisierten ortho- und konoskopischen Licht,¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ die Polierhärte, die Ätzbarkeit und die betreffenden



100x

Abb. 1, ungeätzt

Rennteuerschlacke, bestehend aus „weißem“ Ferrit, hellgrauem Wüstit, tafeligem „Fayalit“ und dunkelgrauem Glas.

Phasengleichgewichtsbeziehungen zu Hilfe genommen. In solchen Fällen, wo hierbei über eine Phase der Schlacke noch nicht genügend Bestimmungsmerkmale erbracht werden konnten, mußten Durchlichtmerkmale im Pulverpräparat aufgesucht werden. Es waren dies insbesondere Lichtbrechungswerte, die mit Hilfe des neuen Leitzschen Refraktometers nach Jelly bestimmt wurden, ferner die Winkel der optischen Achsen, bestimmt mit dem Universaldrehtisch und schließlich Färbung im durchfallenden Licht. So konnte, dann für jede Schlackenphase eine sichere Diagnose erstellt werden.

Die Abb. 1 gibt einen allgemeinen Überblick über die Anzahl der Phasenbestandteile der Schlacke wieder. Man erkennt darin hell-

¹⁾ Diskussionsbemerkungen von Th. Ernst, „Über die anisotrope Aufhellung zwischen gekreuzten Nicols im Auflicht“ von M. Berek, in *Optik, Zeitschrift ges. wiss. u. angew. Optik einschl. Elektronenoptik*, Stuttgart (1947), siehe *Fortschr. Min.* (1950) 26. S. 54.

²⁾ E. N. Cameron u. L. H. Green, *Economic Geology* 45 (1950) 719–754, 46 (1951) 68–75 und 46 (1951) 337–340.

³⁾ M. Berek, *Fortschr. Min. Krist. und Petrogr.* (1937), 22.

⁴⁾ H. Schneiderhöhn u. P. Ramdohr, *Lehrbuch der Erzmikroskopie* (1934).

graue dendritische Wüstite, mittelgraue tafelige Fayalite, vereinzelt hellweiße Eisenkristalle und eine dunkelgraue Zwischenmasse als Glas. Die Wüstite enthalten außerdem, im Bilde nicht sichtbar, Spinellentmischungen und sofern die Wüstite in Glas eingebettet sind, sind sie von randlichen Silikatreaktionssäumen umgeben.

Wüstit = hauptsächlich FeO . Etwa 25% der Schlacke bestehen aus dieser Phase. Die Kristalle sind dendritisch ausgebildet, die einzelnen Verästelungen zeigen starke Verrundungen.

Bei stärkerer Vergrößerung (über $600\times$) werden in den Wüstiten kleinste (unter $1\ \mu$) und viel härtere Entmischungen sichtbar, die ein bedeutend geringeres Reflexionsvermögen als der Wüstit aufweisen. In der Abb. 2 sind Wüstite mit derartigen Entmischungen insbesondere im rechten Bildteil enthalten. Ihre Wiedergabe ist sehr

600x

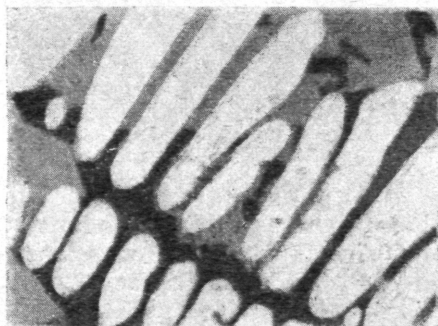


Abb. 2, ungeätzt

Rennfeuerschlacke, große Wüstite mit Spinellentmischungen, dazwischen Fayalit und Glas.

schwierig und daher im Druck kaum sichtbar. Leider war auch infolge der Kleinheit eine Messung des Reflexionsvermögens unmöglich. Ganz analoge Entmischungen enthalten manchmal Periklase aus anderen Industrieprodukten, wobei es sich dort regelmäßig um Spinellentmischungen handelt. Mit großer Wahrscheinlichkeit ist anzunehmen, daß es sich hier um $\text{FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ – also Hercynit-Entmischungen – handelt.

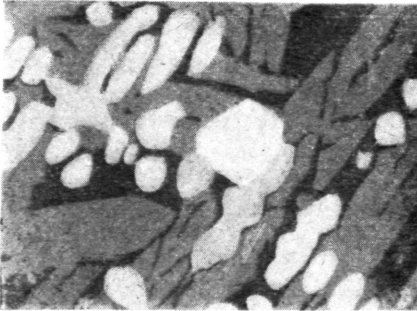
Fayalit. Die Schlacke enthält etwa 50% Fayalit. Die Fayalitkristalle sind meist tafelig ausgebildet, zeigen aber noch Andeutungen skelettförmigen Wachstums, siehe die Abb. 1 und 3.

Auf Grund der optischen Daten handelt es sich um keinen reinen Fayalit = $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$, sondern um einen Mischkristall mit max. 20 Mol-% anderer Orthosilikate. Diese sind in erster Linie $2\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$, möglicherweise auch $\text{FeO}\cdot\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ und schließlich $2\text{MgO}\cdot\text{SiO}_2$.

Ferrit = metallisches Eisen. Die Schlacke enthält geringe Mengen (1–5%) metal. Eisens in Form kleiner ($20\ \mu$ und darunter) idiomorpher, hellweiß reflektierender Kriställchen, meist offenbar von Würfelgestalt. Die Kriställchen fallen durch ihr hohes Reflexions-

vermögen und ihre reinweiße Farbe sofort auf, siehe die Abb. 3. Entsprechend der Kristallgestalt kristallisierten diese aus der Schlackenschmelze. Silikatschmelzen besitzen geringe Löslichkeit für Metallphasen.

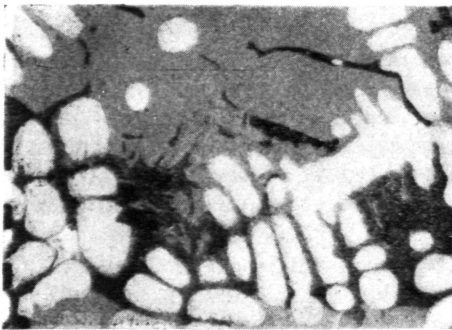
Die Ferrit-Kristalle enthalten keinen Kohlenstoff, sei es als Graphit oder als Zementit. Die unmittelbare Nachbarschaft des Wüstites würde keinen C-Gehalt zulassen.



500x

Abb. 3, ungeätzt
Rennfeuerschlacke mit großem Ferritkristall.

Glas. Etwa 10–15% der Schlacke bestehen aus Glas. Glasphasen treten in Schlacken immer auf, wenn diese arm an CaO und MgO sind und gleichzeitig rasch erstarren. Die Glasphase erscheint im Auflicht als dunkelgraue Zwischenmasse; siehe die Abb. 1, 2, 3



400x

Abb. 4, geätzt mit HF
Die Glasphase ist durch die Ätzung im Bilde schwarz gefärbt.

und 4. Bisweilen enthält sie auch zahlreiche Entglasungserscheinungen. Ob diese im Laufe der Jahrtausende erst entstanden oder sich im letzten Moment der Schlackenabkühlung bildeten, bleibt offen.

Kristallphase X. Häufig sind die Wüstite, die in Glas eingebettet sind, nicht jene, die von Fayalit eingeschlossen werden, von einem Reaktionssaum umgeben, wie diesen die Abb. 2 und 4 wiedergeben. Es scheint, als ob die Restschmelze der Schlacke, im

Schliff als Glas vorliegend, sehr sauren Charakter besaß und sich wenigstens stellenweise mit Wüstit nicht im Gleichgewicht befand. Es war leider nicht möglich, die Phase X, die zweifellos kristallisiert ist, näher zu prüfen, die Kristalle waren zu klein. Jedenfalls handelt es sich um eine Ferroverbindung, möglicherweise um eine Silikatphase.

Auf Grund der Gefügeverhältnisse muß nun folgende Kristallisationsfolge angenommen werden: Erstausscheidung Ferrit = met. Fe, sodann der Reihe nach Wüstit, Fayalit, Kristallphase X und schließlich Glas als letztes Erstarrungsprodukt. Unabhängig davon ist während der Abkühlung im Wüstit Spinell entmisch. Auf Grund

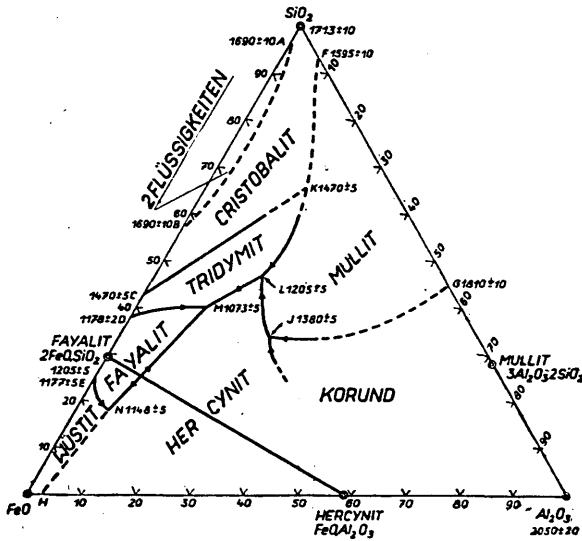


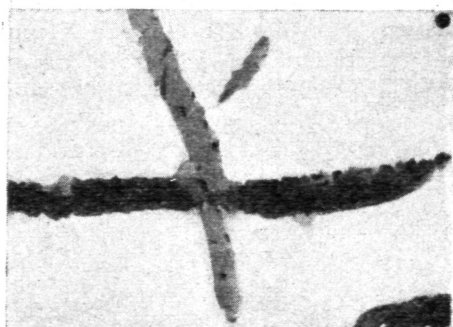
Abb. 5, System $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

der Phasegehalte ergibt sich eine ungefähre Analyse zu 68% ($\text{FeO} + \text{MnO} + \text{CaO}$), 24% SiO_2 , 8% Rest, bestehend aus ($\text{Fe} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Alk}$). Vergleicht man diesen Befund mit dem System $\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$,⁵⁾ dann paßt die Schlacke nur annäherungsweise in dieses System. Insbesondere scheinen die Fremdgehalte an CaO , MnO , TiO_2 und Alkalien, die zum Teil nachweislich, zum Teil wahrscheinlich enthalten sind, die Ursache hierfür zu sein. In großen Zügen liegt jedoch der darstellende Punkt noch im Wüstitfeld, in der Nähe der Feldergrenze Wüstit-Fayalit; siehe die Abb. 5. Den Abschluß der Kristallisationsfolge bildet jedoch nicht das Wüstit-Fayalit-Spinell-Eutektikum, jedenfalls aus den obigen Grün-

⁵⁾ J. F. Schairer, J. Am. Ceram. Soc., 25 (1942) 245

den. Die Schlacke mußte bei 1200° C vollkommen flüssig gewesen bzw. bei 1150° zum erheblichen Teil geschmolzen sein. Was weiter auffällt, ist der enorm hohe Eisengehalt der Schlacke, der mindestens 60% ($\text{FeO} + \text{Fe} + \text{Fe}_2\text{O}_3$) \sim 47% Fe beträgt.

Recht interessant ist auch die Eisenluppe derselben Fundstelle. Im Anschliff war sofort zu erkennen, daß es sich um ein eutektisches



250x

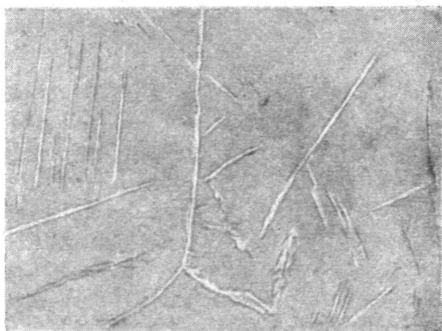
Abb. 6, ungeätzt

Eisenluppe mit Graphit im polarisierten Auflicht.

graues „Roheisen“ handelte, wobei als Bestandteile Graphit, sekundärer Zementit und Perlit gefunden wurden.

Graphit = C. Der Graphit besitzt groblamellare Gestalt; siehe die Abb. 6. Die Lamellen sind häufig verbogen und zeigen zum Teil lagigen Bau. Eine zentrale Lamelle wird meist von einer angelagerten Randzone umgeben. Es scheint, als ob dieser randliche Graphit erst später kristallisierte, es sich daher um einen sekundären Graphit handelt.

Sekundärzementit = Fe_3C . Einen der „metallischen“ Bestandteile bilden Zementitmischungen, die sich während der



1000x

Abb. 7, ungeätzt

Eisenluppe: ehemalige Austenite mit Zementitmischungen.

Abkühlung der Luppe in intermediär beständig gewesenem Austenit bildeten. Die Zementitmischungen sind lamellar und in der

Abb. 7 in ungeätzttem Zustande abgebildet. Die Abbildung enthält außerdem noch sekundäre Zementitumsäumungen um die ehemaligen Austenitkristalle.

Perlit. Die „Wirtkristalle“ der Abb. 7, ehemalige Austenitkristalle, sind zu Perlit, einer innigen lamellaren Verwachsung zwischen Ferrit = α -Fe und tertiärem Zementit, umgestanden. Hiervon ist in der Abb. 7 im ungeätzten Zustande nichts zu bemerken. Erst nach Ätzung mit alkoholischer HNO_3 wird ein sehr feinlamellarer Perlit sichtbar, wie dies die Abb. 8 bei tausendfacher Vergrößerung veranschaulicht.

Die Fundstelle ergab also zwei Eisensorten, und zwar Ferrit in der Schlacke, graues eutektisches Roheisen in der Luppe. Daß das Eisen in der Schlacke kohlenstofffrei ist, verwundert bei dem hohen Eisenoxydgehalt der Schlacke nicht. Die Eisenluppe hingegen weist

1000x



Abb. 8, geätzt

Eisenluppe: perlitischer ehemaliger Austenit mit Zementit-entmischungen.

eine andere Zusammensetzung auf. Entsprechend dem C-Gehalt, etwa 4%, mußte das Eisen ebenfalls bei 1200° C flüssig gewesen sein. Die Kristallisation des Eisens ist nach dem Fe-C-Diagramm⁶⁾ wie folgt anzunehmen: eutektische Erstarrung bei 1152° unter Bildung der Phasen Austenit E' und Graphit. Mit weiterer Abkühlung teilweise Entmischung des Austenites längs E'S bzw. ES unter Bildung von sekundären Zementitlamellen und Umsäumungen und schließlich eutektoider Zerfall des Austenits im Punkte S zu Perlit.

Das Alter der Fundstücke liegt durch die Ausgrabungen an der spätkeltisch - römischen Siedlung auf dem Magdalensberg mit ungefähr 1800 bis 2000 Jahren fest. Bekanntlich schmolzen die Alten ihr Eisen nach der Rennfeuermethode, die in Europa bis in das Mittelalter gebräuchlich war.⁷⁾ R. Herwig führt Analysen von Rennfeuerschlacken an, die ganz gleich der oben kalkulierten Analyse sind bzw. um diese streuen. Auch er fand an Analysen von Rennfeuerisen zum Teil starke Streuungen im C-Gehalt, wodurch

⁶⁾ Stahl und Eisen, Werkstoffbericht 180.

⁷⁾ R. Herwig, Arch. Eisenh. (1951) 11/12, 343-354.

H. zum Schluß kommt, daß das erzielte Eisen sehr verschieden ausfiel. Dies müssen wir auch hier annehmen, wobei wir den Anteil an C-reichem Eisen leider nicht kennen. Eine neuere Untersuchung über den Gefügeaufbau von Rennfeuerschlacken⁸⁾ beschreibt nahe-

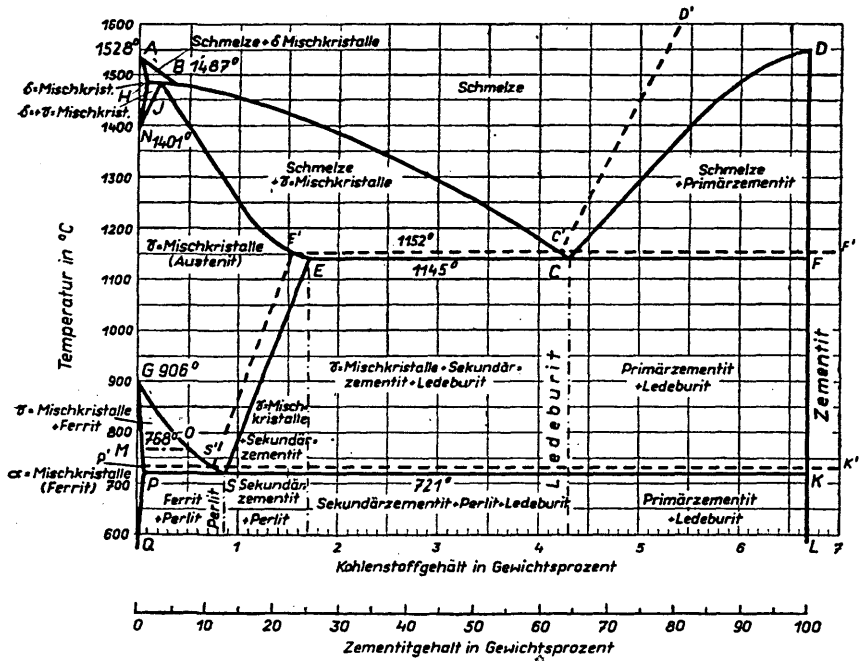


Abb. 9, Das System Eisen-Kohlenstoff

zu dieselben Bestandteile. Die vielen Parallelen lassen in der Zuordnung der Schlacke keinen Zweifel aufkommen. Hier handelt es sich um eine Schlacke und Eisenluppe aus einem Rennofen. Unter der Annahme, daß als Ausgangsstoff Rösterz mit $\sim 65\%$ Fe diene, was optimal der Fall sein könnte, errechnet sich ganz grob, ohne Berücksichtigung des Sauerstoffes, der durch CO dem System entweicht, ein ungefähres Ausbringen des vorhandenen Fe zu 54%. Also etwa die Hälfte des Eisens verblieb in der Schlacke, was bei Betrachtung der Schlackenkomponenten sehr leicht einzusehen ist. Ob das Erz aus der unmittelbaren Umgebung oder von weiter herkam, ließ sich aus dem Untersuchungsmaterial nicht ableiten.

Österreichisch-amerikanische Magnesit AG., Radenthein.

⁸⁾ B. Neumann und H. Klemm, Arch. Metallkunde (1949) H. 1, 7–11.