

# Eisenzeitliche und frühmittelalterliche Eisenverhüttung im Bereich des Elbingeröder Komplexes – Versuch einer Provenienzanalyse

CORNELIA KRIETE

## Einleitung

Wenn über Montanarchäologie des Harzes und der Archäometallurgie berichtet wird, so stehen die Berichte meist im Zusammenhang mit der Buntmetallverhüttung der Erze des berühmten und schon seit der Römischen Kaiserzeit abgebauten Rammelsberges und der Oberharzer Erzgänge. Über die vielleicht weniger spektakuläre, aber mindestens ebenso bedeutende Eisenverhüttung im Harz gibt es nur wenige Veröffentlichungen und bislang keine systematischen Untersuchungen. Dabei gibt es im Harz eine Vielzahl von unterschiedlichen, meist kleineren Eisenerzvorkommen, die auch schon früh verhüttet wurden. Dabei spielte besonders der Elbingeröder Komplex eine große Rolle. So waren »Büchenberg« und »Braunesumpf« die größten Eisenerzbergwerke der ehemaligen Deutschen Demokratischen Republik (Schilling 2013). Einige Besucherbergwerke (z. B. »Büchenberg«, »Drei Kronen und Ehrte«) rufen die Erinnerung an die Aktivitäten der alten Bergleute wach.

Eisenzeitliche, vorrangig römisch-kaiserzeitliche Eisen-Verhüttungsplätze waren bisher nur aus dem Harz-Umland bekannt. Dazu gehören neben Salzgitter, z. B. Lobmachersen (Stelzer 1959; Osann 1959), auch Düna (Brockner u. a. 1990), südlich des Harzes, wo sowohl Rammelsberger Kupfererze als auch vermutlich Iberger Eisenerze verhüttet wurden. Besonders aus dem nördlichen Vorharz im Bereich Derenburg, Blankenburg und Quedlinburg sind zahlreiche Fundstellen bekannt, aber bisher nicht weiter geochemisch untersucht worden.

In karolingischer Zeit oder sogar ggf. schon früher kam es zu einer Verlagerung der Verhüttungsplätze in den Harz hinein, vor allem auf dessen Hochflächen (Alper 2008, 469). Bis ins hohe Mittelalter wird das Eisenerz ausschließlich in sog. Rennöfen verhüttet. Die Bezeichnung Rennofen stammt vermutlich von »rinnen« und bezieht sich auf die Schlacke. Im Gegensatz zu modernen Hochöfen wird in Rennöfen nicht das Eisen verflüssigt, sondern eine niedrig schmelzende Schlacke, vorwiegend aus Eisensilikat, fließt ab oder wird abgestochen. Das Eisen bleibt als Luppe zurück (Details zum Rennofenprozess siehe z. B. Lychatz/Janke 1999). Einen sehr umfassenden Überblick über die europäische Rennofenverhüttung gibt Pleiner (2000). Gegenüber dem Hochofen hat der Prozess den Vorteil, dass unmittelbar schmiedbares Eisen bzw. Stahl gewonnen wird und kein Gusseisen, das in einem zweiten Schritt gefrischt werden muss.

Mit der Weiterentwicklung der Verhüttungstechnik zum Floßofen unter Ausnutzung der Wasserkraft verlagerte man die Verhüttung ab etwa 1500 wiederum talwärts, vor allem in die größeren Flusstäler (Alper 2008, 480).

Der Harz bietet eine Vielzahl unterschiedlicher Eisenerzlagerstätten mit unterschiedlicher Genese und dementsprechend unterschiedlicher Geochemie an. Die Erze haben eine sehr verschiedenartige Qualität und Eignung für den Rennofenprozess.

Mit dieser Arbeit soll erstmals die frühe Renneisenverhüttung im Bereich des Elbingeröder Komplexes im Mittelharz genauer untersucht werden. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage nach der Provenienz der verwendeten Erze, also der Zuordnung der gefundenen Schlacken oder Rohstoffe zu der zugehörigen Lagerstätte.

Für die Untersuchung standen Proben von insgesamt vier Grabungs- und Fundplätzen, u. a. des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, zur Verfügung: drei kaiserzeitliche Fundstellen aus dem nördlichen Harzvorland (»Fuchsplan« bei Minsleben, Helsingungen und von der B 6n bei Quedlinburg, Zapfenbachtal) und eine Grabung auf der Elbingeröder Hochfläche mit kaiserzeitlich-völkerwanderungszeitlicher und frühmittelalterlicher Zeitstellung. Neben Erzproben von den Fundstellen wurden weitere rezente Erzproben untersucht. Alle Proben wurden einer chemischen Analyse unterzogen, um anhand des geochemischen »Fingerprints« und mit Hilfe von Massenbilanzen die Schlacken zu unterscheiden und, so weit möglich, eine Zuordnung zu Erzlagern vorzunehmen.

## Geologie

Neben dem Elbingeröder Komplex gibt es sowohl im Harz als auch im Umland zahlreiche kleinere Eisenerzvorkommen. Im westlichen Harz ist hier vor allem Bad Grund mit den metasomatischen Eisenerzen (Spateisensteinen) im Riffkalk des Ibergers zu nennen. Diese sind durch die Transformation von Karbonaten im Kontakt mit eisenhaltigen Lösungen entstanden. Im Kontakt mit Grundwasser sind sie häufig zu Limonit alteriert (Deicke 2000, 45). Abbau und Verhüttung des Iberger Spateisensteins in Düna, im südlichen Harzvorland, wird schon für die Römische Kaiserzeit genannt (Brockner u. a. 1990, 39). Geologisch ähnliche, aber kleinere und unbedeutendere Vorkommen von Spateisenstein gibt es am sog. Schweinerücken bei Seesen sowie am Schachtberg bei Bad Lauterberg oder am Andreasberger Gangdreieck.

Im Oberharzer Diabaszug treten Roteisensteine des Lahn-Dill-Typs auf (z. B. bei Lerbach, Osterode am Harz), die bei Bad Harzburg metamorphisch in Magneteisensteine umgewandelt wurden. Bei Bad Harzburg gab es außerdem historischen Bergbau in der Grube Friederike (oolithischer Eisenstein), am Butterberg (Eisenkonglomerate ähnlich dem Peiner Oberkreideerz) und in der Grube Spitzenberg.

Im Südharz kommt Eisenerz bei Ilfeld als Roteisenstein vor. Im nördlichen Harzvorland spielten die großen Lagerstätten bei Salzgitter (Unterkreideerz bei Salzgitter und Oberkreideerz bei Peine) eine Rolle in der industriellen Produktion des 20. Jhs. Daneben ist in den Niederungen des Harzlandes generell mit dem Vorkommen von Raseneisenerz zu rechnen.

Das bedeutendste und bis ins 20. Jh. genutzte Eisenvorkommen im Harz ist jedoch der Elbingeröder Komplex. Die große und stark untergliederte Lagerstätte ist mitteldevoni-

schen Ursprungs und an basaltischen Vulkanismus gebunden. Die typischen Roteisensteine mit Eisengehalten zwischen 35 und 60 % wurden als Kopräzipitate mit  $\text{SiO}_2$  gebildet, wenn saure Eisenlösungen mit Meerwasser in Kontakt kamen (Deicke 2000a). Die Vorkommen liegen im Kontaktbereich zwischen den Schalsteinen/dem Keratophyr und dem Stringocephalenkalk. Durch tektonische Bewegungen während der variszischen Faltung wurde die Lagerstätte in vier Sättel aufgefaltet und in zahlreiche Lager zerrissen. Die beiden bergbauhistorisch wichtigsten Sättel sind der Büchenberg- und der Braunesumpfsattel (Krzywicki 1950). Die bekanntesten Lager mit Pingenzügen aus dem Altbergbau liegen am Büchenberg (Hartenberg), am Großen Hornberg, im Susenburger Revier (Tertiärer Brauneisenstein) und im sog. Großen Graben. Letztere ist eine Pinge mit charakteristischer ringförmiger Struktur, die den so genannten Eisernen Hut (siehe z. B. Hauptmann 2007) der dortigen Buntmetalllagerstätte kennzeichnet.

Roteisenstein ist sehr dicht, daher schwierig abzubauen und im Gegensatz zum poröseren Raseneisenerz auch nicht leicht zu verhütten. Da die chemischen Reaktionen bei der Verhüttung nur an der Oberfläche stattfinden können, erfordert er eine sorgfältige Vorbereitung und vor allem Zerkleinerung. DEN typischen Roteisenstein des Elbingeröder Komplexes gibt es allerdings nicht. Die Zusammensetzung variiert sehr stark je nach Lager und auch innerhalb der einzelnen Lager. Das gilt sowohl für die Hauptbestandteile ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ), aber auch die Nebenbestandteile und Spuren (z. B.  $\text{MnO}$ ,  $\text{Ba}$ ,  $\text{V}$ ). Auch der Mineralbestand schwankt: neben reinem kieseligen Roteisen (= Hämatit, Eisenglanz) kommen Magnetit, Fe-Chlorit, aber auch untergeordnet Eisenkarbonat vor. Ein typisches kalkiges und verhältnismäßig eisenarmes Roteisenerz mit ca. 10–25 %  $\text{CaO}$  wurde als Flusstein bezeichnet (Krzywicki 1950, 2).

Neben den primären Roteisensteinen wurden sekundäre Brauneisensteine (Limonit, Toneisensteine) angereichert, z. T. aus der Verwitterung des Pyrits (Schwefelkies) des Eisernen Hutes. Diese Erze sind generell manganreicher und leichter zu verhütten. Lokal gibt es sogar Manganerzbildungen, z. B. im Schävenholz am Büchenbergsattel.

Für die Verhüttung im Rennofen werden sehr hohe Eisenkonzentrationen im Erz benötigt ( $> 40\%$  Fe bzw.  $> 60\%$   $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), da relativ viel Eisen für die zu verflüssigende Schlacke verbraucht wird, die zum größten Teil aus Fayalit (Eisensilikat,  $2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$ ) und Wüstit (Eisenoxid,  $\text{FeO}$ ) gebildet wird. Die frühen Bergleute haben dementsprechend die reichsten Fundplätze abgebaut, oder wie es Denckmann und Erdmannsdorfer (1912, 8) ausdrücken: »...die Alten haben Raubbau betrieben und nur die edlen Stückerze herausgerissen«. Daraus resultieren für Provenienzanalysen einige Schwierigkeiten: die Reicherze sind ausgebeutet und die frühen Abbaustellen meist noch von jüngerem Bergbau überprägt. Die ursprünglich abgebauten Erze stehen heute in der Regel nicht mehr zur Verfügung. Rezente Erzproben stammen also nicht unbedingt unmittelbar von den damals abgebauten Lokalitäten.

In einigen Grabungen/Verhüttungsplätzen wurden auch unverhüttete Erzstücke gefunden. Diese können einerseits tatsächlich Reste der alten Rohstoffe darstellen oder aber auch minderwertige und daher aussortierte Stücke. Denkbar ist auch, dass es sich um Reste von Zuschlägen handelt. Diese Möglichkeiten müssen bei der Auswertung stets berücksichtigt werden.

Die oben beschriebene hohe Variabilität der Erzzusammensetzung innerhalb des Elbingeröder Komplexes erschwert die Zuordnung von Schlacken und Erzen zusätzlich.

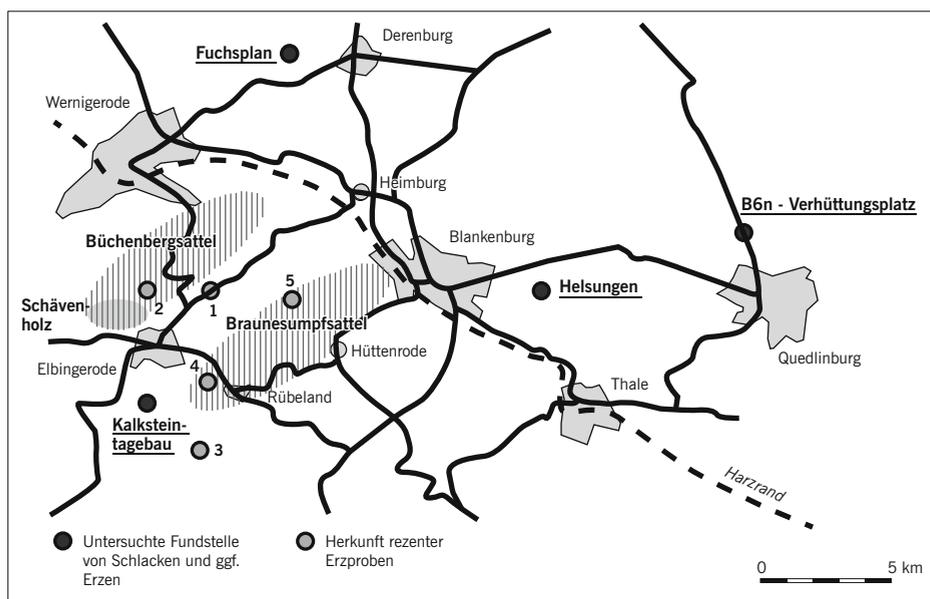


Abb. 1 Karte des Elbingeröder Komplexes mit Fundstellen und Erzvorkommen: 1 Hartenberg; 2 Büchenbergsattel; 3 Susenburger Revier; 4 Großer Graben; 5 Volkmarkskeller.

## Fundstellen

Die Fundstellen, aus denen die untersuchten Schlacken und Erze stammen, sind in Abb. 1 dargestellt.

### *Minsleben/»Fuchsplan«*

Der Fundplatz »Fuchsplan« bei Minsleben liegt nördlich der Linie Wernigerode–Derenburg, 4–5 km nördlich des Harzrandes. Die Entfernung zu den Eisenvorkommen am Büchenbergsattel beträgt etwa 10 km Luftlinie (NNO). Auf einem ca. 6 ha großen Gelände wurden hier große Mengen von Verhüttungsresten aufgelesen und kartiert, insgesamt ca. 4600 Funde, darunter etwa 500 Erz- und 3500 Schlackestücke (siehe Klatt im vorliegenden Band).

Von diesem Fundplatz standen neben einer Roteisensteinprobe und vier Schlackestücken auch zwei Stücke der Ofenwand für die Analyse zur Verfügung. Eines der Schlackestücke fiel durch eine hohe Dichte auf, was auf Teile der Lupe hindeuten kann. Anhand von Keramikfunden konnte der Fundplatz in die Römische Kaiserzeit datiert werden (siehe Klatt im vorliegenden Band).

### *Helsingen*

Der zweite Fundplatz, Helsingen, 2–3 km östlich des Ortskerns von Blankenburg, liegt etwas dichter am Harz: die Entfernung zum Harz beträgt nur 1–2 km und zum Braune-

sumpfsattel etwa 5 km. Von dieser Stelle wurden eine Roteisensteinprobe und eine Schlackenprobe untersucht (Sammlung Behrens). Da diese bei systematischen Begehungen aufgelesenen Funde in der Nähe von kaiserzeitlichen Siedlungen liegen, wird diese zeitliche Einordnung auch für die Verhüttungsplätze angenommen (Alper, pers. Mitteilung).

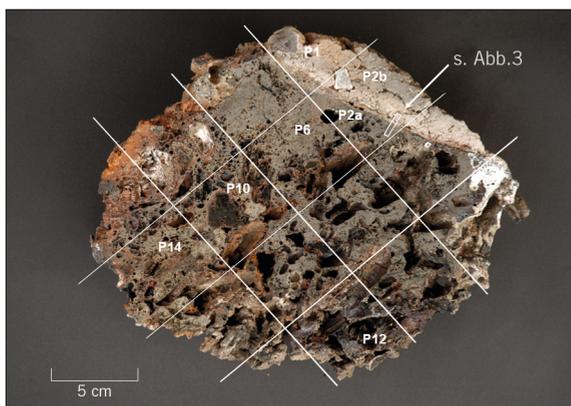
### *B 6n – Ausgrabungen bei Quedlinburg, Zapfenbachtal*

Im Zuge des Ausbaus der B 6n wurden ca. 2 km nördlich von Quedlinburg im Zapfenbachtal 32 Befunde (Öfen bzw. verwandte Befunde) einer Verhüttungsstelle ausgegraben. Anhand von kalibrierten  $^{14}\text{C}$ -Daten an Holzkohlefunden wurde dieser Eisenschmelzplatz in die Zeit um Christi Geburt (zwischen 170 v. Chr. und 90 n. Chr.) eingeordnet. Der Fundplatz und die Grabungsergebnisse sind in Steinmann (2006) ausführlich beschrieben. Die Entfernung dieser Fundstelle zum Harz ist etwas größer: 8–9 km zum Harzrand bei Thale und etwa 13 km zum Braunesumpfsattel. Aus der Grabung gingen drei Erzstücke, ein Ofenwandstück, fünf kleinere Schlackestücke aus verschiedenen Befunden und ein größerer Schlackeklotz mit Wandrest (Lehm) in die archäometrische Untersuchung ein. Aus dem Schlackeklotz wurde u. a. ein Probenprofil aus einer Wandungsprobe und vier Schlackeproben untersucht (s. Abb. 2).

### *Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«*

Neben den drei Fundplätzen aus dem nördlichen Vorharz wurde eine Verhüttungsstelle direkt von der Elbingeröder Hochfläche in die Untersuchung einbezogen. Von der Grabung am Kalksteintagebau Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf« (Alper im vorliegenden Band), stammen eine Roteisensteinprobe und ein Schlackestück aus einem Ofenplatz des 8./9. Jhs. n. Chr. Von einer zweiten Fundstelle auf der Elbingeröder Hochfläche, die nach jüngsten Untersuchungen (s. Alper im vorliegenden Band) der Römischen Kaiserzeit/Völkerwanderungszeit zuzuordnen ist, stammt ein zweites Schlackestück, das ergänzt wird von einer Brauneisensteinprobe aus einer unmittelbar benachbarten Pinge (genauere Angaben s. Tabelle 1). Außerdem wurden zwei Stücke Ofenwand untersucht.

**Abb. 2** Schlackeklotz von der Grabung B 6n, Quedlinburg, Zapfenbachtal, mit Kennzeichnung der untersuchten Proben.



	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Fuchsplan</b>										
Roteisenerz (a)	12,6	0,02	0,8	83,1	0,06	0,2	0,9	0,09	0,83	1,3
Ofenwand (b)	72,0	0,72	9,4	4,2	0,15	1,6	7,3	2,83	0,25	0,3
Ofenwand (c)	71,1	0,70	8,2	3,9	0,07	1,5	8,0	2,62	0,31	2,2
Schlacke (d)	24,2	0,18	3,0	73,0	0,13	0,4	3,6	1,01	0,45	-6,4
Schlacke (e)	27,4	0,27	4,8	68,3	0,12	0,6	2,7	1,13	0,57	-6,3
Schlacke (g)	39,8	0,45	8,6	39,9	0,07	0,5	2,2	4,36	0,50	3,0
Schlacke +Luppe(?) (f)	18,3	0,13	2,3	81,7	0,20	0,3	0,8	0,33	0,42	-4,8
<b>Helsingen</b>										
Roteisenerz	7,6	0,12	2,9	83,6	0,24	0,2	0,7	0,10	0,63	3,7
Schlacke	28,7	0,25	4,7	63,2	0,24	0,6	4,7	1,47	1,16	-5,5
<b>B6n Quedlinburg</b>										
Erz 4052	61,4	0,07	1,2	30,1	0,03	0,1	0,2	0,07	0,92	5,6
Erz 4552	74,6	0,14	3,5	18,1	0,03	0,2	0,5	0,27	0,26	2,2
Erz 4241	64,5	0,16	2,0	31,2	0,03	0,1	0,2	0,10	0,21	1,2
Ofenwand 4779 564 W	71,5	0,58	7,4	4,8	0,19	1,2	6,9	2,21	0,43	3,8
Schlacke 4769 564a	24,3	0,22	4,1	67,7	1,83	1,6	0,7	0,87	0,23	-1,7
Schlacke 4769 564b	18,0	0,21	4,0	72,8	2,13	1,5	1,0	0,93	0,22	-1,0
Schlacke 4779 564s	26,1	0,19	3,8	63,8	3,09	1,6	2,9	0,75	0,08	-2,5
Schlacke 4779 564r	23,7	0,19	3,6	70,7	2,72	1,3	3,1	0,83	0,09	-6,5
Schlacke 4775 564	29,1	0,30	6,2	61,5	2,05	1,6	1,7	1,58	0,29	-4,7
Schlackeklotz 4762										
Ofenwand P1	71,0	0,57	7,2	3,4	0,12	1,3	7,8	2,21	0,40	5,0
Ofenwand P2b	71,5	0,57	7,1	3,2	0,09	1,2	7,6	2,11	0,34	5,4
Schlacke P2a	27,3	0,29	6,0	63,7	1,98	2,1	1,5	1,97	0,25	-5,4
Schlacke P6	27,1	0,26	5,5	61,9	1,96	2,2	1,4	1,80	0,24	-2,8
Schlacke P10	26,5	0,23	5,3	58,3	1,82	2,3	1,3	1,77	0,20	2,0
Schlacke P14	30,0	0,29	6,6	52,5	2,04	2,6	1,9	2,36	0,22	1,3
Schlacke P12	26,3	0,31	6,4	62,9	1,92	1,8	1,9	1,72	0,28	-4,0

Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Rb	Sr	V	Zn	Zr	MnO/Ba
mg/kg										
316	<6	<8	20	<9	7	70	207	59	32	2,0
483	65	84	20	15	92	176	59	45	523	3,2
540	60	34	18	20	85	167	42	48	548	1,4
181	18	<8	<7	<9	38	86	101	<5	139	7,4
151	40	<7	<7	57	23	123	170	5	136	7,7
234	51	39	20	<7	98	100	98	13	196	2,8
106	24	<8	<7	<9	16	21	125	8	72	19,2
175	16	<8	38	158	15	53	59	80	50	13,8
242	23	<7	<6	15	41	107	257	20	125	10,1
205	45	58	<5	276	8	25	233	73	101	1,6
207	10	10	15	20	15	59	127	362	111	1,6
379	43	25	7	59	11	38	163	72	207	0,7
423	50	26	17	76	78	142	46	369	468	4,5
477	38	29	19	<8	46	35	41	16	107	38,4
315	38	8	<7	<8	45	52	41	13	92	67,6
211	40	<7	39	<8	52	38	51	115	82	146,4
219	28	8	74	<8	51	57	36	170	89	124,1
519	39	<7	<6	51	65	78	43	14	147	39,5
547	48	24	17	31	69	151	45	51	448	2,3
572	49	48	14	70	66	143	40	64	443	1,6
758	123	36	48	27	71	53	42	21	116	26,2
833	38	45	10	406	78	50	45	63	110	23,5
879	27	17	8	44	80	49	29	28	97	20,7
822	49	<5	7	6	93	69	43	26	113	24,9
1096	32	42	<6	75	66	67	50	22	123	17,5

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
<b>Elbingerode</b>										
Erz Roteisen - Hartenberg (1)	63,3	0,03	0,4	35,3	0,01	0,1	0,2	0,05	0,12	0,5
Erz Brauneisen - Hartenberg (1)	20,3	2,87	10,5	47,0	0,23	2,4	3,5	0,28	1,34	11,3
Erz Roteisen - Büchenbergstollen (2)	61,9	0,01	0,2	36,8	0,01	0,1	0,2	0,02	0,13	0,6
Erz Brauneisen - Susenburger Revier (3)	9,2	0,03	1,1	72,3	0,50	0,2	0,7	0,26	1,18	14,2
Erz Roteisen Grabung Schn29 Bef101/89	46,7	0,08	1,3	48,8	0,04	0,1	0,3	0,12	0,51	1,8
Erz Brauneisen Grabung Z4 Bef92	9,1	0,08	1,8	60,0	5,76	0,3	5,3	0,53	3,92	12,9
Erz Brauneisen - Großer Graben (4)	2,8	0,22	1,9	85,2	0,05	0,1	0,1	0,22	0,77	8,2
Eisenerz - Volkmarkskeller (5)	19,9	0,02	0,4	61,0	0,04	0,2	10,0	0,02	0,36	7,9
Ofenwand Schn22 Bef5	71,9	0,82	11,4	6,2	0,88	0,8	0,8	3,82	0,32	1,9
Ofenwand Bef103	73,5	0,77	12,2	4,9	0,40	0,7	0,6	3,47	0,17	2,3
Schlacke Schn22 Bef5	19,0	0,28	6,1	47,4	27,2	0,6	2,3	1,17	0,69	-5,1
Schlacke Bef103	23,5	0,34	6,4	43,3	24,7	0,6	2,4	1,03	1,11	-4,1

Tab. 1 Konzentration der Hauptelemente und ausgewählter Spurenelemente.

Daneben wurden insgesamt sechs rezente Erz-Referenzproben herangezogen:

- je eine Brauneisen- und eine Roteisenprobe als Lesestücke vom Hartenberg-Pingenzug (Büchenberg; eigene Lesefunde)
- eine Roteisenprobe vom Stollenmundloch des Büchenbergstollens (Sammlung Alper)
- eine Brauneisenprobe aus dem Susenburger Revier (Sammlung Peters)
- eine Brauneisensteinprobe vom Großen Graben (Sammlung Peters)  
eine kalkige (?) Eisenerzprobe vom Volkmarkskeller (Sammlung Alper).

### Analytik und Ergebnisse

Nach dem Brechen und Mahlen der Proben auf eine Partikelgröße  $\leq 40 \mu\text{m}$  wurden flüchtige Bestandteile durch Glühen bei  $1030^\circ\text{C}$  entfernt. Der auftretende Glühverlust wird als LOI (loss of ignition) angegeben. Die geglühten Proben wurden mit einem Flussmittel aus Lithiummetaborat und Lithiumbromid bei  $1200^\circ\text{C}$  im Platintiegel geschmolzen und zu

Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Rb	Sr	V	Zn	Zr	MnO/Ba
mg/kg										
54	<6	14	<5	29	7	5	15	14	24	1,5
185	<6	16	40	126	16	36	71	212	248	12,3
100	<6	<5	14	30	7	<3	68	13	19	1,3
111	12	12	164	40	23	6	63	855	29	45,3
42	27	9	16	123	8	13	161	8	50	9,0
92	10	23	182	19	33	74	21	229	48	625,7
219	91	<8	31	29	20	6	962	22	91	2,3
<59	<6	<6	12	<6	12	49	101	17	13	
555	75	31	39	27	153	85	68	92	551	15,9
510	55	17	19	17	147	69	57	55	497	7,8
1119	34	42	<7	<8	38	407	310	17	163	243,5
710	96	8	<6	<8	46	347	446	20	195	347,7

einer homogenen Schmelztablette gegossen. Mittels zweier wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenz-Geräte mit Rhodium- bzw. Chrom-Röhre (Philips PW 2400 und Philips PW 1480) wurden in diesen Schmelztabletten zehn Hauptelemente und 31 Spurenelemente bestimmt. Die Kalibrierung erfolgte mittels internationaler Referenzproben, die Auswertung berücksichtigt eine Matrixkorrektur (alpha-Korrektur nach de Jongh).

Die Angabe der Ergebnisse für die Hauptelemente erfolgt traditionell in der Form als Oxide in Gew. % und für die Spurenelemente in elementarer Form als mg/kg. Die oxidische Form wurde gewählt, da die Probenbestandteile nach dem Glühen fast ausschließlich als Oxide vorliegen. Die Auswertung ist an dieser chemischen Form orientiert. Speziell bei Schlacken können die Angaben für den Eisengehalt allerdings zur Verwirrung führen. In diesen eisenreichen silikatischen Schlacken liegt ein Großteil des Eisens als zweiwertiges Eisen vor (Fayalit  $\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$  oder Wüstit  $\text{FeO}$ ). Beim Glühen wird dies teilweise zu dreiwertigem Eisen oxidiert. Das äußert sich in negativen LOI-Werten, d. h. die Probe wird durch die Oxidation schwerer. Der Eisengehalt wird in der Tabelle 1 nicht nach unterschiedlichen Oxidationsstufen differenziert, sondern als Fe-gesamt in der Form als  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  angegeben.

### *Minsleben/»Fuchsplan«*

Die Erzprobe vom »Fuchsplan« weist mit 83 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (entsprechend 58 % Fe) einen sehr hohen Eisengehalt und damit eine gute, für den Rennofen geeignete Qualität auf. Der Silikatgehalt ist mit 12,6 % vergleichsweise gering und das Erz ist praktisch kalkfrei ( $< 1\%$  CaO).

Eine der Schlackenproben fällt durch hohe  $\text{SiO}_2$ -,  $\text{TiO}_2$ - und  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalte auf und enthält daher vermutlich Bestandteile der Ofenwand. Das Schlackestück, in dem Teile der Luppe vermutet wurden, weist tatsächlich ungewöhnlich hohe Eisengehalte auf (81,7 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und untermauert damit die Annahme. Das enthaltene elementare Eisen dürfte aber äußerst fein verteilt in Form von mikroskopisch kleinen Einschlüssen vorliegen. Die Zusammensetzung könnte allerdings auch auf eine Schmiedeschlacke hindeuten.

Die übrigen zwei Schlackestücke haben eine für Fayalitschlacken typische Zusammensetzung.

Die MnO-Gehalte sowohl des Erzes als auch der Schlacken sind mit  $< 1\%$  als sehr gering einzustufen. Das gleiche gilt für die Ba-Gehalte.

### *Helsungen*

Auch die Erzprobe aus Helsungen zeigt eine reiche Erzqualität mit 83,6 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Diese Probe enthält noch weniger Silikat (7,7 %  $\text{SiO}_2$ ) und ist ebenfalls praktisch kalkfrei ( $< 1\%$  CaO). Zu der Roteisenprobe vom »Fuchsplan« sind keine signifikanten geochemischen Unterschiede festzustellen.

Die Schlackeprobe ist ebenfalls eine typische Rennofenschlacke, nur der CaO-Gehalt ist etwas höher als bei den übrigen Schlacken. Die MnO- und auch Ba-Gehalte sind ähnlich niedrig wie bei den »Fuchsplan«-Proben.

### *B 6n bei Quedlinburg, Zapfenbachtal*

Die Erzproben von der B 6n-Grabung enthalten nur sehr wenig Eisen: ca. 18–31 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , aber hohe Gehalte an Kieselsäure (61–75 %  $\text{SiO}_2$ ). Die MnO-Gehalte sind äußerst niedrig ( $< 0,1\%$  MnO). Insgesamt sind diese Proben eher als eisenhaltiger oder eisenreicher Sandstein anzusprechen und weniger als Eisenerz.

Die Zusammensetzung der Ofenwandproben sowohl vom Schlackeklotz als auch von der Einzelprobe ist den Proben vom »Fuchsplan« sehr ähnlich und geochemisch nicht signifikant zu unterscheiden.

Die Schlacken sind mit meist etwa 25 %  $\text{SiO}_2$  und 60–70 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  typische, fayalitische Rennofenschlacken. Die MnO-Gehalte liegen mit ca. 2–3 % allerdings deutlich (d. h. etwa um eine Größenordnung) über denen der Proben vom Fuchsplan und aus Helsungen.

Die Proben, die einen Schnitt durch den Schlackeklotz darstellen, zeigen für keinen der Bestandteile einen erkennbaren Trend von der Wandung in Richtung zur Ofenmitte, wie es für einen Mischungs- oder Diffusionsprozess von Schlacke und Ofenwand evtl. zu erwarten gewesen wäre. Die Grenzfläche ist makroskopisch deutlich zu erkennen. Um kleinskaligere Mischungsprozesse erkennen zu können, wurde der Grenzbereich zusätzlich mit einem Röntgenmikroskop untersucht. Dieses Verfahren erlaubt nicht unbedingt quantitative Aussagen, aber eine hoch aufgelöste Kartierung von Elementverteilungen.

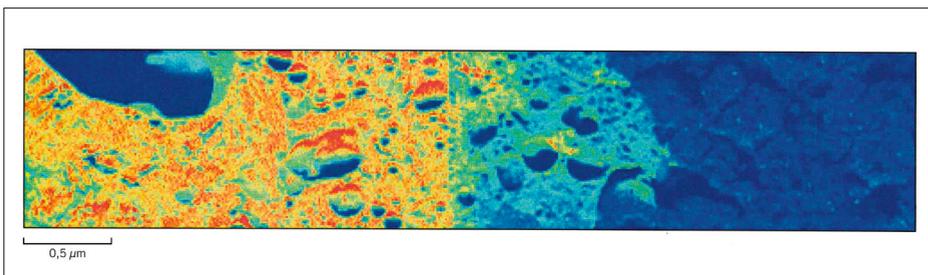
In Abb. 3 ist beispielhaft die Verteilung von Eisen im Grenzflächenbereich dargestellt, dabei kennzeichnen gelbe und rote Farben eine zunehmende Anreicherung des Eisens.

Aus der Messung wird deutlich, dass es einen nur ca. 1  $\mu\text{m}$  dicken Übergangsbereich gibt, in dem offenbar eine Mischung des Wandungsmaterials mit der Schlacke stattgefunden hat. Konzentrationsgradienten, die z. B. auf Diffusionsprozesse hindeuten könnten, sind auch bei anderen Elementen nicht zu erkennen. Da dieser Schlackeklotz aller Wahrscheinlichkeit nach aus der Ofengrube stammt, in welche die dünnflüssige Schlacke abgeflossen ist, ist eine ausgedehntere Reaktionszone nicht zu erwarten. Eine solche ist eher im heißesten Bereich des Ofens oberhalb der Luppe zu erwarten. Die beobachtete Grenzfläche stellt vielmehr den Kontakt der flüssigen Schlacke mit der Grubenwandung bzw. dem anstehendem Boden (Lehm) dar.

### *Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«*

Die beiden Schlackeproben von der Grabung am Kalksteintagebau Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf« (Befunde 5 und 103), fallen durch extrem hohe MnO-Gehalte um 25 % auf. Gleichzeitig sind die Gehalte an  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  vergleichsweise niedrig (43,3–47,4 %). Die Summe dieser beiden Oxide liegt aber bei den für Rennofenschlacken charakteristischen 70 % (67–74 %). Diese konstante Summe resultiert aus der Substitution des Eisens in den Mineralphasen Fayalit und Wüstit durch das Mangan. Bei den Spurenelementen fallen die mit 310 und 450 mg/kg recht hohen V-Gehalte ins Auge. Auch die Sr- und Ga-Gehalte sind vergleichsweise hoch, während die Ba-Konzentration mit 700–1000 mg/kg zwar etwas erhöht, aber z. B. vergleichbar ist mit den Gehalten des Schlackeklotzes von der B 6n, Zapfenbachtal, bei Quedlinburg.

Von den beiden Erzproben aus der Grabung »Kleiner Schmidtskopf« ist der Roteisenstein sehr kieselsäurereich ( $\text{SiO}_2$  47 %) und entsprechend gering konzentriert an Eisen (49 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  bzw. 34 % Fe). Ein solches Erz wäre für die Verhüttung im Rennofen zu eisenarm (Kronz 1997, 12). Die Brauneisensteinprobe dagegen weist einen höheren Fe-Gehalt auf (60 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) und wäre durch Rösten auf etwa 69 % anreicherbar, was für den Rennofenprozess ausreichend wäre. Von allen untersuchten Erzproben weist dieses Stück mit 5,8 % den höchsten MnO-Gehalt auf.



**Abb. 3** Hochauflösender Röntgenmikroskop-Scan der Grenzfläche Schlacke-Lehm (Schlackeklotz B 6n Quedlinburg, Zapfenbachtal). Der Eisengehalt ist farblich dargestellt: blau = geringe Konzentration, rot = hohe Konzentration.

In der rezenten Vergleichsprobe (Brauneisenstein) aus dem Susenburger Revier sind dagegen nur 0,5 % MnO zu finden, wobei das Erz mit 72 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (entsprechend 84 % nach Rösten) noch etwas eisenreicher ist.

Die eisenreichste untersuchte Erzprobe stammt vom Großen Graben. Dieser Brauneisenstein enthält 85 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (nach Rösten sogar 92 %) und dementsprechend fast keine Beimengungen von SiO<sub>2</sub> oder Kalk. Sein Mangengehalt ist mit 0,05 % vernachlässigbar.

Die rezenten Referenzproben vom Hartenberg sind stärker kieselig (auch das Brauneisen) mit nur geringen Eisengehalten.

Die Referenzprobe vom Volkmarskeller weist einen vergleichsweise hohen CaO-Gehalt (10 %) auf. Nach den Ergebnissen für SiO<sub>2</sub> von 20 % und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> von 61 % kann diese Probe als kalkig-kieseliges Eisenerz eingestuft werden.

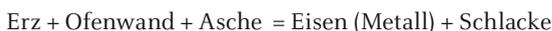
### *Ofenwand*

Die Analysenergebnisse der Ofenwandproben von beiden Lokalitäten aus dem Vorharz (B 6n, Zapfenbachtal, Quedlinburg, und Minsleben) ähneln sich sehr und lassen dementsprechend ähnliche Ausgangsmaterialien vermuten.

Dagegen enthalten die Ofenwandproben aus der Grabung bei Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«, deutlich weniger Kalk (ca. 0,7 % gegenüber 7–8 % CaO), ebenso deutlich weniger MgO (0,7 % gegenüber 1,4 % bei den Vorharz-Proben) und auch Sr, dafür höhere Tongehalte (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und TiO<sub>2</sub>).

### **Diskussion**

Ein Hilfsmittel für die Bewertung der möglichen Erzproben im Hinblick auf die gefundenen Schlackeproben ist die Massenbilanz. Dabei handelt es sich um ein mathematisches Verfahren, das anhand der gemessenen Elementkonzentrationen auf iterativem Weg die Massenverhältnisse der beteiligten Reaktionskomponenten berechnet. Dazu wird der Ofen mit seiner Ausgangsfüllung und seinen Produkten als System in der Form



betrachtet (z. B. Thomas/Young 1999, 157; Kronz/Keesmann 2005, 446). Die eingesetzten Massen für jedes chemische Element müssen den Massen in den Produkten entsprechen. Je besser dabei die Anpassung gelingt, desto plausibler ist die ermittelte Bilanz (Minimierung der Residuen, d. h. Restabweichungen; s. Kriete 2009, 49.)

Dabei sind bestimmte Elemente von besonderem Interesse, die praktisch nur vom Erz beigesteuert werden und die schlackegängig sind. Dazu gehören vor allem das Mangan (als MnO), aber auch die Spurenelemente Ba und V (Kronz 1997, 117).

Die Ofenwand kann, wenn sie im Reaktionsbereich des Ofens teilweise aufschmilzt, vor allem die wichtige Schlackenkomponente SiO<sub>2</sub>, aber auch Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und TiO<sub>2</sub> liefern. Dies ist daran ersichtlich, dass die Konzentrationen der genannten Oxide in den Schlacken deutlich höher sind als in den Erzen. Die Holzkohle (Asche) steuert vorrangig die Elemente K<sub>2</sub>O und CaO/MgO bei, wobei deren Verhältnisse von der eingesetzten Holzart abhängen.

Auch für die Elemente, die nicht von Ofenwand oder Asche eingetragen werden und die in der Schlacke verbleiben (wie MnO, Ba), ist in der Regel eine höhere Konzentration in den Schlacken als in den Erzen zu erwarten, da durch das Eisenausbringen gewissermaßen eine Anreicherung der verbleibenden Bestandteile erfolgt.

Grundsätzlich ist auch die Verwendung von weiteren Zuschlägen nicht auszuschließen und wird häufig diskutiert (z. B. Pleiner 2000, 136). Allerdings fehlen für deren Einsatz bislang eindeutige Nachweise. Auch ungewöhnlichere Schlackenzusammensetzungen lassen sich häufig aus den oben genannten Ausgangsmaterialien erklären. Denkbar ist aber auch eine gezielte Mischung von verschiedenen Erzsorten.

Generell ist aber bei allen Konzentrationsbetrachtungen immer zu berücksichtigen, dass weder die Erze noch die Schlacken eines Ofens homogen sind und eine gewisse Streubreite ganz natürlich ist (s. Kriete 2009, 40). Daher sind nur signifikante Unterschiede, die außerhalb dieser natürlichen Schwankungsbreiten liegen, zu berücksichtigen.

Anhand dieser Überlegungen besteht die Möglichkeit, die Verwendung von verschiedenen Erzen für bestimmte Schlackezusammensetzungen einzugrenzen.

### »Fuchsplan« und Helsingungen

Die Roteisensteinproben von diesen beiden Lokalitäten ähneln sich stark und sind geochemisch nicht sehr unterschiedlich. Die Unterschiede z. B. in den MnO-, Ba- oder V-Gehalten sind nicht signifikant.

Bei beiden Proben handelt es sich um ein sehr reiches und damit für den Rennofenprozess sehr gut geeignetes Erz. Beim Aufstellen der Massenbilanzen (für Helsingungen unter Verwendung einer mittleren Ofenwandzusammensetzung für den Vorharz) ergibt sich jedoch das zunächst überraschende Ergebnis, dass nur Schlacke produziert und kein Eisen ausgebracht wird. Dieses Resultat steht jedoch in Übereinstimmung mit den ausführlichen Berechnungen von Kronz und Keesmann (2003, 268). Deren Modellrechnungen zeigen, dass ab einer Ofenwandbeteiligung von ca. 20–25 % das Eisenausbringen auf null sinkt, ein solcher Prozess also unrealistisch ist.

Die berechneten Massenbilanzen ergeben Ofenwandanteile von 23 bzw. 29 % und sind dementsprechend zu hoch, um noch eine Metallgewinnung zu ermöglichen.

#### Massenbilanzen Helsingungen:

	Erz	Ofenwand	Asche	Schlacke	Metall
»Fuchsplan« Mittel	0,77	0,23	0,00	1,00	0,00
Helsingungen	0,71	0,29	0,00	1,00	0,00

Dieses Ergebnis belegt, dass die Erze zwar sehr hochwertig sind, aber nicht selbstgängig. Der Silikatgehalt des Erzes ist zu gering, um die Bildung einer Fayalitischen (silikatischen) Schlacke zu ermöglichen. Dies lässt den Einsatz von Zuschlägen, z. B. in Form von Sand (Quarz) oder einer Erzmischung, wahrscheinlich bzw. sogar notwendig erscheinen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, ob und inwieweit die untersuchten Erzproben repräsentativ für die gesamten Fundplätze sind. Nach der Beschreibung von Klatt (im vorliegenden Band) über die Funde am »Fuchsplan« ist anhand der Dichteverteilung anzunehmen, dass ein Großteil der Erzstücke vermutlich weniger eisenreich und damit

reicher an Silikat und/oder Kalk war (Dichte reiner Roteisenstein  $5,2 \text{ g/cm}^3$ , mittlere festgestellte Dichte bei etwas über  $3 \text{ g/cm}^3$ ). Dann wären u. U. Zuschläge nicht notwendig.

Insbesondere die MnO-Gehalte, aber auch die Ba-Konzentrationen der Erze im Verhältnis zu den Schlacken, lassen die untersuchten Roteisensteine als Ausgangsstoffe plausibel erscheinen.

Der Roteisenstein ist wegen seiner Härte und Dichte nur schwer zu bearbeiten und gilt als schwierig zu verhütten (Yalcin/Hauptmann 2003, 134). Daher muss die hohe Qualität des Erzes, d. h. der hohe Eisengehalt den Ausschlag gegeben haben, dieses Material aus dem Harz zur Verhüttung zu verwenden. Ein weiterer Vorteil war sicherlich, dass dieser Rohstoff für damalige Verhältnisse in großer Menge zur Verfügung stand.

### *B 6n bei Quedlinburg, Zapfenbachtal*

Die bei der Grabung gefundenen Erzproben können nicht das vorwiegend verhüttete Erz repräsentieren, da deren Eisengehalt für den Rennofenprozess zu gering ist (max. 31 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Da der Eisengehalt der Fayalitischen Schlacken bei 60–70 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  liegt, muss die Konzentration im Erz deutlich höher sein, um ein nennenswertes Eisenausbringen überhaupt möglich zu machen (Schürmann 1958, 1307). Die untersuchten Proben sind jedoch höchstens als Eisenkiesel oder eisenhaltiger Sandstein zu bezeichnen. Das Vorkommen von solchen Sandsteinen in einiger Entfernung der Grabung wird von Alper (pers. Mitteilung) erwähnt.

Die Mangangehalte der Schlacken sind mit 2 % MnO deutlich höher gegenüber denen (ca. 0,06 bis 0,24 % MnO) von Helsingungen/»Fuchsplan«. Dieser Unterschied von einer Zehnerpotenz kann eindeutig als signifikant eingestuft werden.

Dagegen betragen die MnO-Konzentrationen der eisenhaltigen Sandsteine einheitlich weniger als 0,035 % und sind damit vernachlässigbar. Dies steht in keinem Verhältnis zu den MnO-Gehalten der Schlacken und bestätigt, dass diese Proben nicht das vorherrschende Material für die Verhüttung gewesen sein können. Ein weiteres Indiz sind die hohen V-Gehalte der eisenhaltigen Sandsteine, die in den Schlacken nicht wieder zu finden sind.

Wenn auch anhand dieser Daten die Verwendung als Haupt-Rohstoff weitestgehend auszuschließen ist, so ist doch denkbar, dass das Material als Zuschlagstoff diente, um z. B. den Silikatgehalt der Ofencharge einzustellen.

Hinsichtlich des Ba-Gehaltes unterscheidet sich der untersuchte Schlackeklotz von den anderen Proben, da dessen Ba-Konzentrationen etwa doppelt so hoch sind. Außerdem sind in den Proben des Klotzes die MgO-Gehalte deutlich höher. Für diesen Ofen lag offenbar eine leicht veränderte Erz-Charge vor, aber nicht unbedingt ein völlig anderes Erz.

Da die vorgefundenen eisenhaltigen Sandsteine ganz offenbar als vorrangiger Rohstoff auszuschließen sind, stellt sich die Frage nach dem verwendeten Erz. Roteisenstein, wie er in Helsingungen und »Fuchsplan« verarbeitet wurde, erscheint aufgrund des MnO-Gehaltes ebenfalls unwahrscheinlich, da alle untersuchten Roteisensteine MnO-Gehalte  $< 0,1 \%$  aufweisen.

Ins Auge zu fassen ist die mögliche Verwendung von lokal anstehendem Raseneisenerz. Veröffentlichte Daten zur Geochemie von Raseneisenerzen (z. B. Graupner 1982, 51 ff.; Buchwald/Wivel 1998, 79) stehen in plausiblen Verhältnissen zu den beobachteten Gehal-

ten der Schlacken von der B 6n. Die geochemischen Voraussetzungen (z. B. eisenhaltiges Grundwasser) dürften an dem Grabungsplatz gegeben sein. Nach Steinmann (pers. Mitteilung) gibt es von lokalen Denkmalpflegern Hinweise auf das Vorkommen von Raseneisenerz in nur ca. 100 m Entfernung von der Grabungsstelle. Auch wenn diese Hinweise bislang nicht verifiziert wurden, so unterstützen sie doch die geochemischen Ergebnisse und lassen die Verwendung von lokalem Raseneisenerz wahrscheinlich erscheinen.

Es bleibt die Frage offen, was den Ausschlag gegeben hat, hier ein anderes Erz zu verarbeiten. Die leichtere Verhüttbarkeit von Raseneisenerz (Brauneisenstein) kann ein Grund gewesen sein. Die Erfahrungen von »rezenten« experimentellen Rennofen-Hüttenleuten zeigen, dass viel Erfahrung notwendig ist, um einen Rennofen zu steuern (Beschickung, Wind, Dauer etc.) und diese Faktoren stark von den verwendeten Materialien und besonders vom Erz abhängen (Leineweber pers. Mitteilung). Es ist daher auch nicht abwegig anzunehmen, dass die frühen Hüttenleute sich ebenfalls auf eine Erzsorte »eingefahren« haben.

Mit den vorhandenen Daten lassen sich für das vorwiegend verwendete Erz an der B 6n-Verhüttungsstelle sowohl die vorgefundenen »Erzproben« als auch das für die benachbarten Fundstellen ziemlich sicher nachgewiesene Roteisenerz ausschließen. Wahrscheinlich wurde hier lokal anstehendes Raseneisenerz verhüttet.

### *Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«*

Die Schlacken aus der Grabung vom Kalksteintagebau in Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«, fallen durch die sehr hohen MnO-Gehalte von etwa 25 % aus dem Rahmen und heben sich dadurch sehr deutlich von den Vorharz-Schlacken ab. Solch hohe MnO-Gehalte in Rennfeuerschlacken sind auch überregional vergleichsweise selten.

In der Regel liegen die Konzentrationen bei < 1 oder um die 2–3 %, wie es auch an den Vorharzschlacken zu beobachten ist (siehe z. B. Zusammenstellung in Kriete 2009, 45). Bekannte Ausnahmen sind die Schlacken im Siegerland (z. B. Neumann 1954, 36 f.), die aus der Verhüttung von manganreichen (8–9 % MnO; Kronz 1997, 19) Spateisensteinen stammen. Auch Kronz und Keesmann (2005, 452) berichten von einzelnen »manganhaltigen« Schlacken aus dem Lahn-Dill-Gebiet, deren Erzquelle ebenfalls im Siegerland zu suchen ist. Nur ganz selten aber übersteigen die MnO-Gehalte der Schlacken die 20 %-Marke.

Im Umkreis des Harzes sind manganreiche Schlacken aus Düna (Brockner u. a. 1990, 148) und Salzgitter-Lobmachersen (Osann 1959, 1209; Kriete 2009, 40) sowie vom Iberg (Linke u. a. 2012) bekannt. Bei diesen Fundplätzen liegen die MnO-Konzentrationen durchschnittlich knapp unter 20 %. Für diese Verhüttungsplätze werden der Iberger Spateisenstein bzw. die sekundären Höhlenlimonite als Rohstoff diskutiert (Brockner u. a. 1990, 139; Kriete 2009, 53; Linke u. a. 2012). Für die Verhüttung von manganhaltigen Spateisensteinen sind Erzgehalte von ca. 10 % MnO und Schlackekonzentrationen von 15–20 % MnO offensichtlich charakteristisch.

Auch wenn das Mangan bei der Verhüttung nicht reduziert wird und in der Schlacke verbleibt (Gilles 1957, 182), so hat die Konzentration dieses Elements in der Schmelze einen unmittelbaren Einfluss auf den Kohlenstoffgehalt des entstehenden Eisens bzw. Stahls. Aus einer manganreichen Schmelze lässt sich ein kohlenstoffreicher und damit

harter Stahl gewinnen (Kronz 1997, 201). Es ist mehr als unwahrscheinlich, dass den frühen Hüttenleuten dieser Umstand fremd war, wenn auch auf einer empirischen Basis. So ist gerade über das berühmte norische Eisen bekannt, dass der Mangangehalt gezielt zur Beeinflussung der Eisen- bzw. Stahleigenschaften eingesetzt wurde (z. B. Soukup 2007, 46). Auch die auffällige Mischung von manganreichen (ca. 20 %) und manganarmen (< 2 %) Schlacken sowohl aus Düna als auch aus Lobmachersen macht einen Zufall unwahrscheinlich.

Bisher stehen nur die zwei Schlackenanalysen aus den Befunden 5 und 103 von der Grabung am Kalksteintagebau »Kleiner Schmidtskopf« zur Verfügung, entsprechende Literaturdaten sind nicht bekannt. Die Proben scheinen jedoch keine Ausnahme zu sein. Der Manganreichtum der Schlacken auf der Elbingeröder Hochfläche muss schon im vorigen Jahrhundert bekannt gewesen sein, denn Dahlgrün u. a. (1925, 57) berichten, dass die Schlackenhalde vom Großen Graben und vom Bodfeld unweit der Grabungsstelle zu Anfang des 19. Jhs. wieder aufgewältigt wurden und in der Stahlindustrie als Rohstoff bzw. wegen ihres Mangangehaltes als Zuschlag verwendet wurden. Auch Bode (1928, 161) gibt für die Schlackenhalde am Papenbachtal (in Grabungsnähe) einen Gehalt von 20 % MnO an. Diese Aussagen untermauern, dass die gemessenen Mangangehalte vermutlich repräsentativ für den Standort sind.

Auffällig ist, dass sich die Schlacken aus den unterschiedlichen Zeitstellungen kaum unterscheiden.

Hochmanganhaltige Schlacken stammen in der Regel von manganhaltigen Spateisensteinen, z. B. aus dem Siegerland, aus der Steiermark in Österreich (sog. Norisches Eisen: Neumann 1954, 36 f.) oder aus Düna (Brockner u. a. 1990, 148) bzw. vom Iberg bei Bad Grund, Oberharz (Linke u. a. 2012, 242). Ein größeres Vorkommen eines solchen karbonatischen Erzes ist im Bereich Elbingerode nicht bekannt. Es stellt sich daher die Frage nach den möglichen Rohstoffen für diese besonderen Schlacken.

Dazu sollen zunächst die Mangangehalte im Erz abgeschätzt werden, die notwendig sind, um die beobachteten MnO-Konzentrationen in der Schlacke zu erzeugen.

Zu diesem Zweck wurden erneut die Massenbilanzen herangezogen und zunächst die Erzproben aus den Grabungen sowie die am besten vergleichbaren und vom Eisengehalt geeigneten rezenten Referenzproben (aus der Sammlung von Peters) vom Großen Graben und vom Susenburger Revier verwendet. Dabei zeigt sich, dass keine vernünftige Modellierung möglich ist (Residuen sehr hoch), da die Mangangehalte in den potenziellen Ausgangserzen viel zu gering sind. Um trotzdem eine Abschätzung zu ermöglichen, wurden die Mangankonzentrationen für die Massenbilanzen zunächst nicht berücksichtigt. Damit ist eine sehr gute und realistische Bilanz möglich (Tab. 2).

Die beste Anpassung (geringster Rest, der nicht anpassbar ist) ergab sich für die rezente Referenzprobe vom Großen Graben mit der Schlacke aus Befund 103. Diese Bilanz ähnelt stark den Ergebnissen, die z. B. Thomas und Young (1999, 163) gefunden haben und soll daher für eine Abschätzung der fehlenden Manganmenge herangezogen werden.

Bei einer Konzentration von 24,7 % MnO in der resultierenden Schlackenmenge (0,6 kg) ergibt sich eine MnO-Masse von 0,148 kg und daraus eine notwendige Konzentration von 18,3 % MnO im Erz (unter Vernachlässigung der Konzentrationen in der Ofenwand, Asche und im Metall). Zum Vergleich wurde die entsprechende Berechnung für die Kombination Erzprobe von Susenburger Revier/Schlacke vom »Kleinen Schmidts-

Erz/Schlacke	Erz	Ofenwand	Asche	Schlacke	Metall	Rest
»Kl. Schmidtskopf« F. 18/ »Kl. Schmidtskopf«, Bef. 5 Ref. Gr. Graben/	0,79	0,21	0,00	0,93	0,07	13,8
»Kl. Schmidtskopf«, Bef. 5 Ref. Gr. Graben/	0,86	0,12	0,02	0,59	0,41	0,6
»Kl. Schmidtskopf«, Bef. 103 Ref. Susenb. R./	0,81	0,17	0,02	0,60	0,40	0,5
»Kl. Schmidtskopf«, Bef. 5 Ref. Susenb. R./	0,92	0,07	0,02	0,69	0,31	6,7
»Kl. Schmidtskopf«, Bef. 103	0,86	0,13	0,02	0,71	0,29	5,1

Tab. 2 Ausgewählte Massenbilanzen (Elbingeröder Komplex).

kopf«, Befund 5, wiederholt. Dies führt zu einem Ergebnis von 20,5 % MnO. Dass die beiden Ergebnisse dicht beieinander und im Rahmen der natürlichen Streubreite liegen, belegt, dass bei der Abschätzung kleine Schwankungen in den Konzentrationen oder auch in der Bilanz keine wesentliche Rolle spielen. Anhand dieser Abschätzung können wir also festhalten, dass für die Verhüttung Eisenerze mit einem MnO-Gehalt von knapp 20 % zum Einsatz gekommen sein müssten, um die Mangangehalte in den Schlacken erklären zu können. Keine der untersuchten Proben erreicht nur annähernd solche Konzentrationen an MnO, der höchste gefundene Gehalt liegt bei 5,8 % in einer Brauneisenprobe, während Roteisensteine meist sogar unter 0,1 % liegen. Die vorliegenden Proben erfüllen also die Voraussetzung nicht und kommen damit als Ausgangserz nicht in Frage.

Eisen-Mangan-Erze aus der Umgebung mit einer solchen Zusammensetzung sind bisher auch aus der Literatur nicht bekannt.

Für Iberger Eisenerze geben Simon und Stoppel (2003, 82) 8–10 % MnO an, was durch eigene Analysen bestätigt wurde (Linke u. a. 2012, 242). Allerdings zeichnen sich Iberger Erze auch durch sehr hohe Bariumgehalte (>10 000 mg/kg) aus, die hier nicht nachzuweisen sind. Für den Elbingeröder Komplex werden lokale Anreicherungen von maximal 13 % (Großer Graben) bis 17 % MnO (Büchenbergsattel) berichtet (Erdmannsdörffer 1926, 37). Ob diese lokalen Maximalkonzentrationen ausreichen, um die offenkundig großräumig manganreichen Schlackenhalde zu erklären, bleibt zweifelhaft.

Da bisher kein Erzlager auszumachen ist, das realistischerweise als Rohstofflieferant in Frage kommt, bleibt die Möglichkeit zu diskutieren, ob das Vorkommen völlig erschöpft und in Vergessenheit geraten ist oder ob Manganminerale oder -erze als Zuschlag verwendet wurden. Neben dem Effekt auf die Stahlqualität hätte ein Zuschlag von Mangan zur Schmelze den großen Vorteil, das Eisenausbringen zu erhöhen. Da das Mangan das Eisen in der Schlacke substituiert und damit der in der Schlacke verbleibende Eisenanteil sinkt, steigt zugleich der als Metall gewinnbare Anteil an Eisen.

Wie oben erwähnt, kommen im Bereich von Elbingerode, nämlich am Schävenholz, Manganerze vor (Strutz 2003), die in späteren Jahrhunderten bergbaulich gewonnen wurden. Haage (1959, 65) berichtet von Manganerzen mit Gehalten von 25,9–45 % Mn sowie

2,4–21 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Er beschreibt auch das Vorkommen von reineren erdigen Manganoxiden in Linsen, Nestern und Taschen, die mit Spuren alten Bergbaus verknüpft sind. Solche Vorkommen wären leicht zu gewinnen und sind höher angereichert an Mangan.

Die notwendigen Zuschlagsmengen lassen sich aus den Konzentrationen abschätzen: bei einem reinen Manganoxid müssten etwa 20 % dieses Minerals der Erzmengung zugeschlagen werden, bei 70%igem Erz immerhin rund 25 %. Wenn das verwendete Eisenerz selbst gewisse Manganmengen enthält, so verringert sich die Zuschlagsmenge entsprechend. Die zuzuschlagenden Mengen sind nicht unerheblich, sodass man eher von einer Erzmischung sprechen kann.

Die beschriebene Hypothese der Verwendung von Manganzuschlägen bedarf dringend einer genaueren Untersuchung.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Analysen der Schlacken und Erze und die Auswertung von Massenbilanzen, bes. im Hinblick auf das Element Mangan, aber auch auf die Spurenelemente Barium und Vanadium, ermöglichen für die untersuchten Fundstellen den Nachweis oder den Ausschluss von bestimmten Erzen.

Die Schlacken und Erze von den Fundstellen »Fuchsplan« und Helsingungen ähneln sich stark und deren chemisch analytischen Ergebnisse untermauern die These, dass der an diesen Verhüttungsplätzen vorgefundene Roteisenstein hier auch vorrangig zur Verhüttung gelangt ist. Es gibt allerdings keine geologischen Vorkommen dieses Erztyps in unmittelbarer Nähe, vielmehr ist die vermutliche Herkunft des Erzes der Elbingeröder Komplex. Unter der Voraussetzung, dass die untersuchten Erzproben repräsentativ für die Ofenchargen sind, wären für die Verhüttung allerdings Zuschläge in Form von Kieselsäure/Quarz für die Schlackenbildung notwendig.

Die Verhüttung von Elbingeröder Roteisenstein im Vorharz bestätigt den Transport des Erzes aus dem Harz heraus über eine Distanz von vermutlich etwa 10 km in der Römischen Kaiserzeit.

Dagegen ist für die zeitgleiche Grabungsstelle an der B 6n, Zapfenbachtal, Quedlinburg, die Verwendung von Roteisenstein, aber auch die vorrangige Verhüttung der gefundenen und vermutlich in der Nähe anstehenden eisenhaltigen Sandsteine weitestgehend auszuschließen. Letztere kommen ggf. als Zuschlagmittel in Betracht. Als wahrscheinliche Erzquelle ist hier lokales Raseneisenerz zu nennen.

Die Schlacken von der Grabung am Kalksteintagebau Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«, fallen durch extrem hohe Mangangehalte aus dem Rahmen. Anhand von Literaturhinweisen ist anzunehmen, dass diese weiter verbreitet sind als bisher durch Analysen nachgewiesen. Keine der untersuchten Referenzproben erreicht die empirisch abgeschätzte  $\text{MnO}$ -Konzentration von 18–20 %. Damit kommen sie nicht als Ausgangserz in Betracht. Es bleibt fraglich, ob die in der Literatur genannten lokalen Maximalgehalte von Mangan in Eisenerzen (17 %  $\text{MnO}$ ) ausreichen, um eine solche großräumig-vorkommende Schlackenzusammensetzung zu erklären. Daher ist Zuschlag von Manganmineralen in Betracht zu ziehen. Ein solcher würde zum einen das Eisenausbringen verbessern und die Härte des produzierten Renneisens bzw. -stahles deutlich erhöhen.

Die vorgestellte Untersuchung beleuchtet bislang eine kleine Auswahl von Fundstellen rund um den Elbingeröder Komplex und damit nur einen Ausschnitt, der etliche Fragen offen lässt:

- Verifizierung der Herkunft des Erzes von der B 6n, Quedlinburg, Zapfenbachtal,
- Ausdehnung des Vorkommens von hoch-manganhaltigen Schlacken im Mittelharz,
- Herkunft eines sehr manganreichen Erzes bzw. die
- Verwendung von Manganmineralen/-erzen als Zuschlag
- und ggf. Herkunft dieser Manganerze.

Dahinter stehen zentrale Fragestellungen, z. B. nach den Transportwegen von Erz und Holzkohle, nach den Gründen für die räumliche Verlagerung der Verhüttung vom Vorharz in den Harz zwischen der Römischen Kaiserzeit und dem Frühmittelalter, aber auch generell nach der technologischen Entwicklung der Eisenverhüttung: Es stellt sich z. B. die Frage, ob im Mittelharz Mangan-Zuschläge gezielt eingesetzt wurden, um vielleicht an die Qualität des aus manganreichem Spateisenerz hergestellten Norischen Eisens anzuknüpfen.

Für die Beantwortung dieser Fragen wäre eine fortgesetzte Erfassung und – soweit wie möglich – Datierung von Eisenschmelzplätzen im Bereich des Elbingeröder Komplexes notwendig, ebenso eine umfangreichere Datenbasis an Analysen von Schlacken und der in Frage kommenden Erze.

### Danksagung

Ich möchte mich bei Frau A. Deffner, Herrn G. Klatt, Herrn H. A. Behrens, Herrn Peters und vor allem Herrn Dr. G. Alper für die zur Verfügung gestellten Schlacken- und Erzproben bedanken. Herrn Alper verdanke ich außerdem hilfreiche Diskussionen und Kommentare zu diesem Manuskript. Weiterhin danke ich meinen Kollegen Herrn F. Korte und Frau Dr. A. Wittenberg für die Durchführung der Analysen.

### Summary

#### *Iron Age and early medieval iron smelting in the area of the Elbingeröder complex – an attempt of analysing provenance*

Analysis of the slag and ores and the evaluation of mass balances, in particular regarding the element manganese, but also regarding the trace elements barium and vanadium, allowed the identification or exclusion of certain ores being processed at the investigated find spots. The slag and ores of the find spots of «Fuchsplan» and Helsingungen are very similar, and results of their chemical analyses support the theory that the red haematite found on site was also primarily used for the smelting. There are, however, no geological occurrences of this ore type in the immediate vicinity; the likely origin of the ore is to be found at the Elbingeröder complex. Assuming that the analysed ore samples are representative of the general furnace content, the smelting processes would still have relied on additives in the form of silica/quartz to produce these slags.

The smelting of Elbingeröder red haematite in the Vorharz (foothills of the Harz) confirms the transport of ores from the Harz over a likely distance of about 10 km during the Roman Iron Age. In contrast, red haematite seems not to have been utilised at the contemporary site on the line of the B 6n, Quedlinburg, Zapfenbachtal. Similarly, the iron-rich sandstones discovered on site and available in the vicinity were seemingly also not primarily used for smelting. The latter may have played a role as additives. The most likely ore source at this site seems to have been bog ore.

The slag yielded from the excavation at the limestone quarry of Elbingerode, »Kleiner Schmidtskopf«, stand out for their high manganese component. Literary sources suggest that this type of slag is more wide-spread than analyses were able to demonstrate so far. None of the analysed reference samples reached the empirically estimated MnO concentration of 18–20%. Therefore, the reference samples cannot represent the ores used. It remains questionable whether the local maximum manganese content in the iron ore (17% MnO) as mentioned in the literature would be sufficient to explain the wide distribution of this slag composition. One therefore has to consider the possibility of manganese minerals as additives. An additive like this would on one hand improve the iron yield and on the other increase the hardness of the iron or steel bloomery.

The presented investigation as undertaken so far only considers a small number of selected find spots around the Elbingeröder Komplex and can therefore only discuss a small sector which results in many questions being left unanswered:

- verification of the provenance of the ore from the B 6n site, Quedlinburg, Zapfenbachtal,
- extent of the occurrence of slag with high manganese content in the central Harz area (Mittelharz),
- origin of a highly manganese-rich ore or, vice versa,
- the use of manganese minerals/manganese ores as additives
- and regarding the latter case, the origin of these manganese ores.

Underlying these questions are wider aspects regarding e.g. the transport routes of ores and charcoal, the reasons behind the relocation of smelting sites from the foothill area into the Harz itself between the Roman Iron Age and the early medieval period. Furthermore, aspects regarding the technological development of iron smelting need to be addressed more widely: For example, the question remains whether manganese additives were deliberately utilised in the central Harz area, possibly in order to approach the quality of iron from the Noricum, produced from a manganese-rich sparry iron ore.

## Literaturverzeichnis

- Alper 2008**  
G. Alper, The Eastern Harz Mountains during the Middle Ages – the Impact of Mining and Metal Production. In: C. Bartels/C. Küpper-Eichas (eds.), Cultural Heritage and Landscapes in Europe. Landschaften: Kulturelles Erbe in Europa. Proc. Internat. Conference Bochum, June 8–10, 2007. Veröff. Dt. Bergbau-Mus. Bochum 16 (Bochum 2008) 467–488.
- Alper (im vorliegenden Band)**  
G. Alper, Archäologische Untersuchungen zur Eisengewinnung am »Kleinen Schmidtskopf« bei Elbingerode, Lkr. Harz. Jahresschr. Mitteldt. Vorgesch. 95, 2016, 201–242.
- Bode 1928**  
A. Bode, Alte Hüttenstätten im West- und Mittelharz. Ein Beitrag zur Siedlungs- und Wirtschaftsgeschichte des Harzes. Jahrb. Geogr. Ges. Hannover 1928, 141–197.
- Brockner u. a. 1990**  
W. Brockner/G. Heimbruch/S. Koerfer, Archäometrische Untersuchungen an Erz- und Schlackefunden des Grabenschnittes GS 1 der Grabung Düna. In: L. Klappauf/F. A. Linke, Düna I. Das Bachbett vor Errichtung des repräsentativen Steingebäudes. Materialh. Ur- u. Frühgesch. Niedersachsen 22 (Hildesheim 1990) 137–152.
- Buchwald/Wivel 1998**  
V. F. Buchwald/H. Wivel, Slag analysis as a method for the characterization and provenancing of ancient iron objects. Materials Characterization 40, 1998, 73–96.
- Dahlgrün u. a. 1925**  
F. Dahlgrün/O. H. Erdmannsdörffer/W. Schriel, Geologischer Führer durch den Harz. Teil 2: Unterharz und Kyffhäuser (Berlin 1925).
- Deicke 2000**  
M. Deicke, Geologie und Erzlagerstätten des Harzes. In: C. Zegers-Glocke (Hrsg.), Auf den Spuren einer frühen Industrielandschaft. Arbeitsh. Denkmalpfl. Niedersachsen 21, 2000, 42–46.
- Deicke 2000a**  
M. Deicke, Findings concerning the environmental history of the Harz mountains and the utilization of mineral resources. In: C. Zegers-Glocke/H. Witthöft (eds.), Aspects of mining and smelting in the Upper Harz Mountains up to the 13<sup>th</sup>/14<sup>th</sup> century. Arbeitsh. Denkmalpfl. Niedersachsen 22, 2000, 66–78.
- Denckmann/Erdmannsdörffer 1912**  
A. Denckmann/O. Erdmannsdörffer, Über Eisenerz-Vorkommnisse in der Gegend von Elbingerode, Bericht Elbingerode. Montanarchiv Preuss. Geol. Landesanstalt, 1912.
- Erdmannsdörffer 1926**  
O. H. Erdmannsdörffer, Erläuterungen zur Geologischen Karte von Preußen und benachbarten deutschen Ländern, Blatt Elbingerode, Nr. 2379 (Berlin 1926).
- Gilles 1957**  
J. W. Gilles, 25 Jahre Siegerländer Vorgeschichtsforschung durch Grabung auf alten Eisenhüttenplätzen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 28 (4), 1957, 179–185.
- Graupner 1982**  
A. Graupner, Raseneisenstein in Niedersachsen. Entstehung, Vorkommen, Zusammensetzung und Verwendung. Forsch. Niedersächs. Landeskunde 118 (Göttingen 1982).
- Haage 1959**  
R. Haage, Bericht über die geologischen und wirtschaftlichen Ergebnisse der Manganerkundung im Gebiet Elbingerode für die Zeit vom 28.3.1958–28.2.1959. Geol. Dienst – unveröffentlichter Bericht 1959.
- Hauptmann 2007**  
A. Hauptmann, Alten Berg- und Hüttenleuten auf die Finger geschaut: Zur Entschlüsselung berg- und hüttenmännischer Techniken. In: G. Wagner (Hrsg.), Einführung in die Archäometrie (Berlin, Heidelberg 2007) 115–137.
- Klatt (im vorliegenden Band)**  
G. Klatt, Frühe Roteisensteinverhüttung im Nordharzvorland bei Derenburg, Lkr. Harz. Jahresschr. Mitteldt. Vorgesch. 95, 2016, 183–200.
- Kriete 2009**  
C. Kriete, Geochemische Untersuchungen der Rennfeuerschlacken aus dem Siedlungsgebiet der vorrömischen Eisenzeit und älteren römischen Kaiserzeit von Salzgitter-Fredenberg im Hinblick auf die Herkunft der verwendeten Erze. Nachr. Niedersachsen Urgesch. 78, 2009, 37–56.
- Kronz 1997**  
A. Kronz, Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen – Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken (Diss. Mainz 1997).
- Kronz 1998**  
A. Kronz, Phasenbeziehungen und Kristallisationsmechanismen in fayalitischen Schmelzsystemen: Untersuchungen an Eisen- und Buntmetallschlacken (Bielefeld 1998).
- Kronz/Keesmann 2003**  
A. Kronz/I. Keesmann, Fayalitische Schmelzen und Effektivität des metallurgischen Verfahrens. In: Abbau und Verhüttung von Eisenerzen im Vorland der mittleren Schwäbischen Alb. Mit einem Anhang: Die Eisenproduktion im frühen und hohen Mittelalter. Archäologie, Metallurgie, Landesgeschichte. Internat. Koll. am 4.–5. November 1994 in Schwäbisch Gmünd. Forsch. u. Ber. Vor- u. Frühgesch. Baden-Württemberg 86 (Stuttgart 2003) 259–274.

**Kronz/Keesmann 2005**

A. Kronz/I. Keesmann, Fayalitische Schmelzsysteme – Ein Beitrag zur vornezeitlichen Eisen- und Buntmetalltechnologie im Dietzhöhlztal (Lahn-Dill-Gebiet, Hessen). In: A. Jockenhövel/C. Willms (Hrsg.), Das Dietzhöhlztalprojekt. Archäometallurgische Untersuchungen zur Geschichte und Struktur der mittelalterlichen Eisengewinnung im Lahn-Dill-Gebiet (Hessen). Münstersche Beitr. ur- u. frühgesch. Arch. 1 (Rahden/Westf. 2005) 403–499.

**Krzywicki 1950**

E. Krzywicki, Kurze geologische Beschreibung der Eisenerzgruben im Mittelharz. Bericht Geologische Landesanstalt (Berlin 1950).

**Linke u. a. 2012**

F. A. Linke/C. Kriete/L. Klappauf, Karolingische Eisenverhüttung am Iberg bei Bad Grund, Ldkr. Osterode a. Harz. Nachr. Niedersachsen Urgesch. 81, 2012, 231–246.

**Lychatz/Janke 1999**

B. Lychatz/F. Janke, Technologie der Eisenerzeugung im Rennofen. Braunkohle/Surface Mining 51(3), 1999, 377–381.

**Neumann 1954**

B. Neumann, Die ältesten Verfahren der Erzeugung technischen Eisens. Freiburger Forschungsh. D6 (Berlin 1954).

**Osann 1959**

B. Osann, Eisenhüttenmännische Aussagen der Rennofen-, Rennstahl- und Rennschlackenfunde von Salzgitter-Lobmachersen. Stahl und Eisen 79(17), 1959, 1206–1211.

**Pleiner 2000**

R. Pleiner, Iron in Archaeology. The European Bloomery Smelters. Archeologický Ústav AV CR (Prag 2000).

**Schilling 2013**

W. Schilling (Hrsg.), Grube Büchenberg – Eiserner Schatz im Harz (Calbe 2013).

**Schürmann 1958**

E. Schürmann, Die Reduktion des Eisens im Rennofen. Stahl und Eisen 78 (19), 1958, 1297–1308.

**Simon/Stoppel 2003**

P. Simon/D. Stoppel (Hrsg.), Sammelwerk Deutsche Eisenerzlagertstätten II. Eisenerze im Deckgebirge (Postvaristikum), 4. Verdrängungs- und Verwit-

terungslagerstätten in Nord-, West- und Süddeutschland. Mit Beiträgen von Joachim Bartz†, Heinz Bottke, Jürgen Eichler, Helmut Gudden, Thomas Kirnbauer, Peter Simon† u. Dieter Stoppel. Schriftenreihe Dt. Ges. Geowiss. (vormals: Dt. Geol. Ges.) 16 (Hannover 2003).

**Soukup 2007**

R. W. Soukup, Chemie in Österreich. Bergbau, Alchemie und frühe Chemie: Von den Anfängen bis zum Ende des 18. Jahrhunderts. Geschichte der frühen chemischen Technologie und Alchemie des ostalpinen Raumes unter Berücksichtigung von Entwicklungen in angrenzenden Regionen. Beitr. zur Wissenschaftsgeschichte und Wissenschaftsforschung 7 (Wien, Köln, Weimar 2007).

**Steinmann 2006**

C. V. Steinmann, Eine Rennofenanlage aus der Zeit um Christi Geburt. In: H. Meller (Hrsg.), Archäologie XXL. Archäologie an der B 6n im Landkreis Quedlinburg. Arch. Sachsen-Anhalt, Sonderbd. 4 (Halle [Saale] 2006) 157–162.

**Stelzer 1959**

G. Stelzer, Germanische Siedlung mit Rennofenbetrieb und Schmiede bei Salzgitter-Lobmachersen. Stahl und Eisen 79 (17), 1959, 1201–1206.

**Strutz 2003**

R. Strutz, Der Manganerzbergbau im Schävenholz bei Elbingerode. Unterm Brocken: Werningeröder Heimatblätter 6, 2003, 42–46.

**Thomas/Young 1999**

G. R. Thomas/T. P. Young, The determination of bloomery furnace mass balance and efficiency. Geoarchaeology: exploration, environments, resources. A. M. Pollard (ed.). Geological Society of London, Special Publication 165, 1999, 155–164.

**Yalcin/Hauptmann 2003**

Ü. Yalcin/A. Hauptmann, Archäometallurgie der früh- und mittelalterlichen Eisenverhüttung im Vorland der Schwäbischen Alb. In: Abbau und Verhüttung von Eisenerzen im Vorland der mittleren Schwäbischen Alb. Mit einem Anhang: Die Eisenproduktion im frühen und hohen Mittelalter. Archäologie, Metallurgie, Landesgeschichte. Internat. Koll. am 4.–5. November 1994 in Schwäbisch Gmünd. Forsch. u. Ber. Vor- u. Frühgesch. Baden-Württemberg 86 (Stuttgart 2003) 127–158.

---

**Abbildungsnachweis**

- 1 Verf.
- 2 Foto: A. Deffner
- 3 A. Wittenberg

Tab. 1–2 Verf.

---

## **Anschrift**

Cornelia Kriete  
B1.2 Geologie der Mineralischen Rohstoffe  
Bundesanstalten für Geowissenschaften  
und Rohstoffe  
Stilleweg 2  
30655 Hannover  
cornelia.kriete@bgr.de