

Geophysikalische Untersuchungen zur Erkundung einer hochmittelalterlichen Bergbausiedlung am Treppenhauer in Sachsen

VON HARALD LINDNER UND ROLF KÄPPLER

1. Einleitung

Geophysikalische Untersuchungen zur Erkundung archäologischer Situationen sind seit längerem in Anwendung. Dabei werden im wesentlichen drei unterschiedliche Zielstellungen verfolgt. Auf der einen Seite geht es um eine Prospektion größerer Gebiete durch flächendeckende geophysikalische Messungen. Diese Verfahrensweise soll konkrete Anhaltspunkte für die Zweckmäßigkeit und den gezielten Ansatz archäologischer Untersuchungen erbringen. Es ist vielfach wünschenswert, die geophysikalische Durchmusterung vor der Grabung durchzuführen. In einer nachfolgenden Bearbeitung sind aufgedeckte geophysikalische Anomalien, welche auf archäologische Befunde hinweisen, durch Spezialuntersuchungen mit höherer Punktdichte im Detail zu erkunden. Dieser Schritt strebt eine direkte Umsetzung der geophysikalischen Anomalie in eine stoff- und objektbezogene Aussage an. Die Zweckmäßigkeit einer solchen Spezialuntersuchung ist auch dann gegeben, wenn dies entsprechende Grabungsbefunde rechtfertigen.

Eine dritte Aufgabe besteht in der Altersbestimmung ergrabener Funde. Hier kommen ausschließlich magnetische Laboruntersuchungen an gebrannter Keramik und an Ziegeln zur Anwendung. Die Methode erfordert die Entnahme orientierter Proben und wurde bereits von Folgheraiter im Jahr 1896 praktiziert.

Die Tab. 1 zeigt unterschiedliche Anwendungsgebiete geophysikalischer Untersuchungen in der Archäologie und, stellvertretend für zahlreiche weitere Autoren, einige ausgewählte Publikationen. Die in Tab. 1 genannten Publikationen beziehen sich auf die kursiv gedruckten geophysikalischen Verfahren.

Tabelle 1: Einsatz geophysikalischer Verfahren in der Archäologie

Situation	geophysikalische Verfahren	Autoren
Eisenobjekte	<i>Magnetik</i>	Pleslová et al. 1978
Mauern	<i>Elektrik, Magnetik, Geothermie</i>	Adlung 1987
Hohlräume	<i>Gravimetrie, Radar, Geothermie</i>	Lindner 1983
Öfen, Feuerstellen	<i>Magnetik</i>	Stanley et al. 1976
Eisenschmelzplätze	<i>Magnetik</i>	Göhrsdorf 1983
Kupferschmelzplätze	<i>Magnetik</i>	Presslinger et al. 1980
Altersbestimmung	Paläomagnetik	Thellier 1981

2. Untersuchungsobjekt

Parallel mit archäologischen Grabungen erfolgten geophysikalische Untersuchungen innerhalb einer mittelalterlichen Bergbausiedlung in Sachsen. Diese liegt in der Nähe von Frankenberg als Wüstung auf einer bewaldeten Anhöhe (Treppenhauer). Nach Angaben von Schwabenicky (1988) wird die Siedlung von einem Wall mit Graben umschlossen und enthält auf einer Fläche von etwa 12 ha mehr als 180 Pingen. Es handelt sich um Spuren eines intensiven Bergbaus, der seine Blüte vom 12. bis zum 14. Jahrhundert erlebte. Grabungen und archäologische Forschungen belegen, daß innerhalb der Siedlung neben der Förderung der Erze auch deren Verhüttung stattgefunden hat (Schwabenicky 1988 und in diesem Band S. 321 ff.). Allem Anschein nach ging es um die Gewinnung von Silber, Blei und Kupfer.

Für die Geophysik besteht hier die Aufgabe, Hinweise auf Feuerstellen und auf Schlackenansammlungen zu liefern. Anhand aufgefundener Anomalien soll daran anschließend eine zielgerichtete Grabungstätigkeit erfolgen. Für diese Aufgabe kommen ausschließlich magnetische Messungen in Betracht (vgl. Tab. 1).

Nach den bisherigen Kenntnissen besteht keine Klarheit über den Verlauf der Wallanlage im Nordwest-Teil der Siedlung. Der Wall ist hier eingeebnet und das vorhandene Material im Graben verstürzt worden. Es erschien zweckmäßig, mittels geoelektrischer Messungen zu prüfen, ob sich der ehemals vorhandene Graben trotz intensiver landwirtschaftlicher Überprägung noch nachweisen läßt.

3. Ergebnisse der geomagnetischen Untersuchungen

3.1 Petrophysikalische Grundlagen

Voraussetzung für das Auftreten geomagnetischer Anomalien über archäologischen Befunden ist das Vorhandensein einer ausreichenden Differenz der Magnetisierung M gegenüber dem Nebengestein. Diese setzt sich aus einem induzierten M_{ind} und einem remanenten Anteil M_{rem} zusammen.

$$M = M_{\text{ind}} + M_{\text{rem}} = \kappa H_0 + M_{\text{rem}} \quad (1)$$

κ – magnetische Suszeptibilität des Objektes, H_0 – Feldstärke des magnetischen Erdfeldes.

Bestimmend für das Auftreten geomagnetischer Indikationen bei archäologischen Objekten ist nach Gl. (1) die magnetische Suszeptibilität. Diese hängt zunächst von der Konzentration ferrimagnetischer Minerale (Fe-Ti-Oxide) im Ausgangsgestein für gebranntes Material und für erschmolzene Metalle ab. Die Tab. 2 verdeutlicht die geringen Suszeptibilitätswerte der Ausgangsmaterialien.

Unter dem Einfluß des Brennvorgangs kommt es bei reduzierender Atmosphäre zu einer Umwandlung der Eisenoxide und Hydroxide zu stärker magnetischen Mineralen. Beispielsweise vollzieht sich dabei die Umwandlung

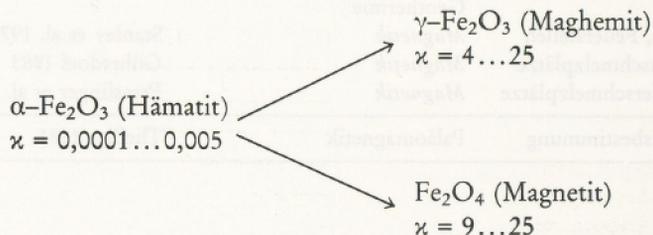


Tabelle 2: Mittlere Suszeptibilitätswerte der Ausgangsgesteine gebrannter Fundmaterialien nach Militzer, Scheibe 1981

Gestein	κ in 10^{-5}
Sandstein	40
Kalkstein	30
Lehm	50
Ton	50
polymetallische Erze	5 bis 1000

Dominierend ist dabei die Entstehung von Magnetit, dessen Konzentration neben dem primären Mineralgehalt von der Dauer der Erwärmung und der erreichten Temperatur abhängt. Erreicht die Temperatur beim Brennen oder Schmelzen den Curie-Punkt des Magnetits bei 578°C bzw. den des Maghemits bei etwa 675°C, verlieren alle Objekte ihre Magnetisierung. Der Grund dafür ist die temperaturbedingte Erhöhung der Ionenbeweglichkeit, welche zu einer statistischen Unordnung der Richtungen des magnetischen Moments der Ionen in den Mineralkörnern führt. Sinkt nach Beendigung des Brennvorgangs des eingebrachten Gutes die Temperatur im Ofen unter die Curie-Temperatur ab, so kommt es zu einer Ausrichtung der magnetischen Momente unter dem Einfluß des magnetischen Erdfeldes und zur Bildung Weiss'scher Bezirke. Bei weiter abnehmender Temperatur erfolgt ein Anwachsen dieser erworbenen Magnetisierung. Diese besitzt eine hohe Koerzitivkraft und damit eine außerordentlich große Stabilität. Bei gebranntem Material ist diese remanente Magnetisierung (vgl. Gl. 1) im allgemeinen größer als die induzierte Magnetisierung. Dieser Effekt begründet das Auftreten deutlicher magnetischer Anomalien über gebranntem Material in der archäologischen Prospektion und erlaubt aus dem Vergleich der Richtung der »eingefrorenen, remanenten Magnetisierung« mit der des heutigen Erdfeldes eine Altersdatierung der Funde (vgl. Schurr et al., 1984).

3.2 Bestimmung der magnetischen Suszeptibilität

Für die Einschätzung der Aussagemöglichkeiten geomagnetischer Messungen zur archäologischen Prospektion in der o.g. Bergbausiedlung wurden an Lesesteinen und an ergrabenem Fundmaterial Suszeptibilitätsmessungen durchgeführt. Diese zeigen das in Abb. 1 ersichtliche Ergebnis. Danach läßt sich deutlich die durch Thermoremanenz erworbene Magnetisierungszunahme gebrannten Materials gegenüber dem Ausgangsmaterial erkennen.

Der dargestellte Wert von $3,8 \times 10^{-4}$ für Keramik ist unsicher und muß durch weitere Messungen präzisiert werden. Die Ergebnisse aus Abb. 1 zeigen, daß durch das anstehende Gesteinsmaterial mit Werten von $0,05 \times 10^{-3}$ keine nennenswerte Störung der magnetischen Messungen zu erwarten ist. Für den Nachweis von Feuerstellen, Schlackenansammlungen

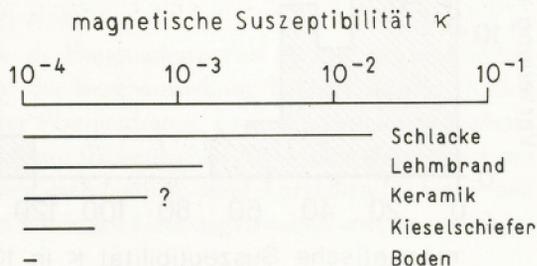


Abb. 1 Mittelwerte der magnetischen Suszeptibilität von Material aus der Bergbausiedlung auf dem Treppenhauer.

Tabelle 3: Mittlere Suszeptibilitätswerte an Schlackenmaterial

Verhüttung	Fundort	κ in 10^{-4}	Autor
Eisenerz	Loitzendorf (Österreich)	400	Cech et al., 1988
polymet. Erze	Treppenhauer (Sachsen)	274	Lindner, Käppler 1990
Kupfererz	Paltental (Österreich)	650	Presslinger et al., 1980

und ferromagnetischen Objekten bestehen daher gute Voraussetzungen. Auffällig ist der hohe Wert der ergrabenen polymetallischen Schlacke (vgl. Tab. 3).

Die Abb. 2 enthält das Histogramm, welches die Streuung der gemessenen Suszeptibilitätswerte der Schlacken vom Treppenhauer verdeutlicht. Es ist erkennbar, daß offenbar unterschiedliche Magnetitmengen in den einzelnen Proben gebunden sind. Möglicherweise können durch Messung der magnetischen Suszeptibilität und weiterer petrophysikalischer Parameter wie Dichte, Porosität, elektrische Leitfähigkeit, Radioaktivität usw. zusätzliche Kriterien für eine stoffliche Bewertung des Materials erschlossen werden. So kann z. B. in sehr vereinfachender Darstellung aus

$$V = \frac{\kappa_G}{\kappa} \frac{1 + \kappa P}{1 + \kappa_G P}$$

- κ_G – Suszeptibilität des Gesteins bzw. der Schlacke
 κ – Suszeptibilität des Magnetits (vgl. Tab. 1)
 P – Entmagnetisierungsfaktor (empirisch bestimmbar)

der Volumenanteil (V) des magnetisch wirksamen Materials bestimmt werden. Dieser Zusammenhang läßt sich möglicherweise für die Beurteilung archäometallurgischer Prozesse nutzen.

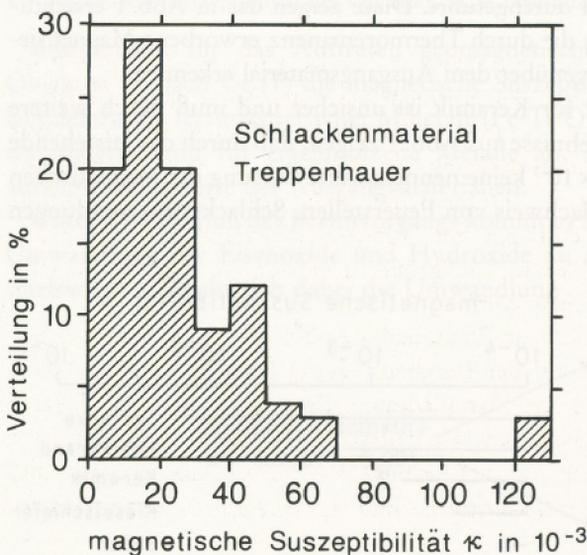


Abb. 2 Verteilung der magnetischen Suszeptibilität an polymetallischen Schlacken.

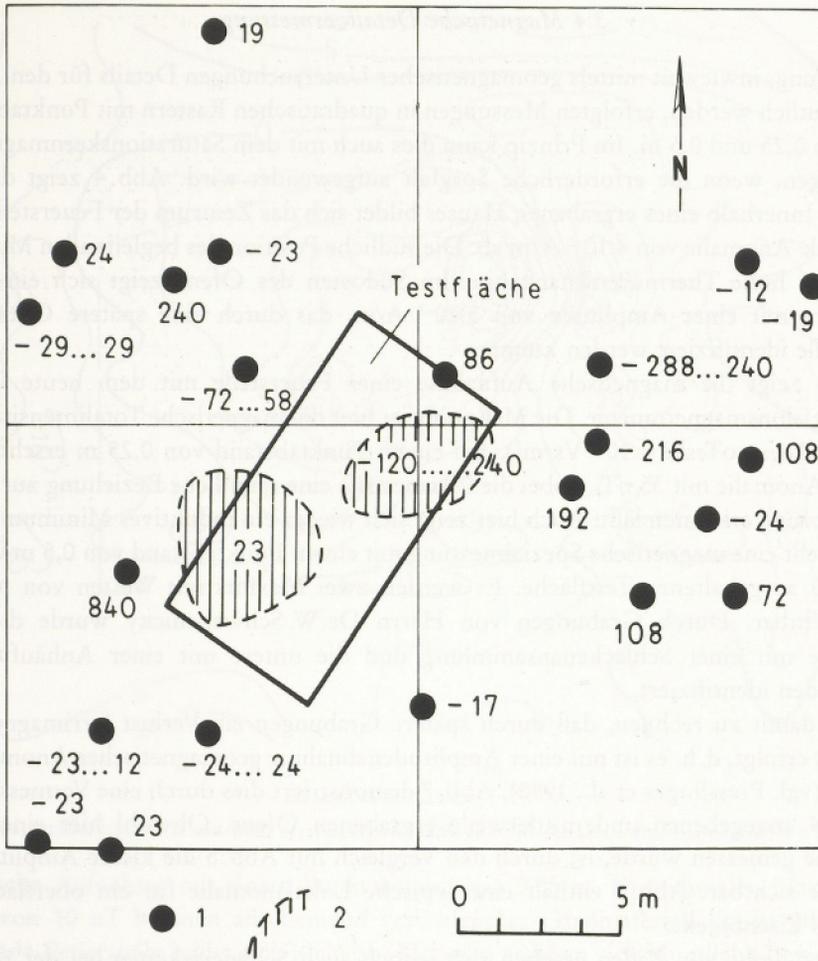


Abb.3 Anomaliensuche mit dem Saturationskernmagnetometer (Meßwerte in 10^{-2} A/m). 1 lokale Anomalie, 2 flächenhafte Anomalie.

3.3 Magnetische Übersichtsvermessung

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand innerhalb der Bergbausiedlung die Prospektion auf ferro- und ferrimagnetische Objekte. Es erschien daher im Sinne einer rentablen Arbeitsmethodik zweckmäßig, zunächst ein rasch arbeitendes Verfahren mit verminderter Meßgenauigkeit einzusetzen, welche die Entdeckung von magnetischen Anomalien sichert und damit eine räumliche Bewertung des Untersuchungsobjektes gestattet. Für diese Zwecke kam ein Saturationskernmagnetometer mit Doppelsondenanordnung zur Erhöhung des Auflösungsvermögens zum Einsatz. Meßgröße ist hier die Vertikalkomponente der magnetischen Feldstärke in der Einheit A/m.

Die Aufteilung der Meßfläche erfolgte in Planquadrate von 10×10 m. Inzwischen konnten mit dieser Technik etwa 4000 m^2 der Bergbausiedlung kartiert werden. Abb.3 zeigt das Ergebnis der Vermessung von vier Planquadraten. Es sind sowohl eine Vielzahl lokaler Einzelanomalien als auch ein Bereich mit flächenhaften Anomalien (bezeichnet mit »Testfläche«) ersichtlich. Daneben erscheinen auch Gebiete ohne Anzeichen für ferro- und ferrimagnetische Objekte. Diese sollten bei künftigen Grabungsarbeiten vorerst zurückgestellt werden.

3.4 Magnetische Detailvermessung

Zur Klärung, inwieweit mittels geomagnetischer Untersuchungen Details für den Archäologen deutlich werden, erfolgten Messungen in quadratischen Rastern mit Punktabständen zwischen 0,25 und 0,5 m. Im Prinzip kann dies auch mit dem Saturationskernmagnetometer erfolgen, wenn die erforderliche Sorgfalt aufgewendet wird. Abb. 4 zeigt dafür ein Beispiel. Innerhalb eines ergrabenen Hauses bildet sich das Zentrum der Feuerstelle durch eine lokale Anomalie von $4 \cdot 10^{-2}$ A/m ab. Die südliche Position des begleitenden Minimums deutet auf hohe Thermoremanenz hin. Im Südosten des Ofens zeigt sich ein zweites Maximum mit einer Amplitude von $5 \cdot 10^{-2}$ A/m, das durch eine spätere Grabung als Feuerstelle identifiziert werden konnte.

Abb. 5 zeigt die magnetische Aufnahme einer Feuerstelle mit dem heute üblichen Kernpräzisionsmagnetometer. Die Meßgröße ist hier die magnetische Totalintensität in der Einheit nT (nanoTesla = 10^{-9} Vs/m²). Bei einem Punktabstand von 0,25 m erscheint eine kräftige Anomalie mit 35 nT, wobei die 0-Isanomale eine räumliche Beziehung zur Kontur der Mauerung erkennen läßt. Auch hier zeigt sich wieder ein induktives Minimum. Abb. 6 verdeutlicht eine magnetische Spezialmessung mit einem Punktabstand von 0,5 m über der in Abb. 3 ausgehaltenen Testfläche. Es werden zwei Maxima mit Werten von mehr als 50 nT sichtbar. Durch Grabungen von Herrn Dr. W. Schwabenicky wurde die obere Anomalie mit einer Schlackenansammlung und die untere mit einer Anhäufung von Eisenfunden identifiziert.

Es ist damit zu rechnen, daß durch spätere Grabungen ein Verlust ferrimagnetischen Materials erfolgt, d. h. es ist mit einer Amplitudenabnahme geomagnetischer Anomalien zu rechnen (vgl. Presslinger et al., 1980). Abb. 7 demonstriert dies durch eine Vermessung des in Abb. 4 angegebenen und mittlerweile ergrabenen Ofens. Obwohl hier eine andere Feldgröße gemessen wurde, ist durch den Vergleich mit Abb. 5 die kleine Amplitude der Anomalie sichtbar. Abb. 8 enthält eine typische Lokalanomalie für ein oberflächennah gelegenes Eisenobjekt.

In einer Reihe von Fällen ergeben sich jedoch auch Schwierigkeiten bei der richtigen Zuordnung der gemessenen Anomalien zur archäologischen Situation. Abb. 9 enthält eine

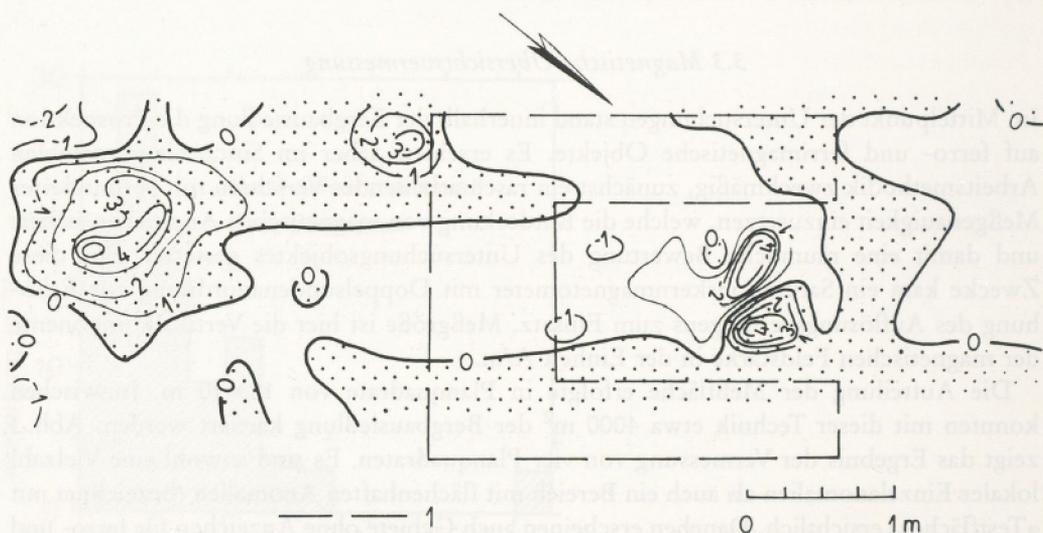


Abb. 4 Feuerstellennachweis mit dem Saturationskernmagnetometer, Isanomalenabstand: $1 \cdot 10^{-2}$ A/m. 1 Ummauerung.

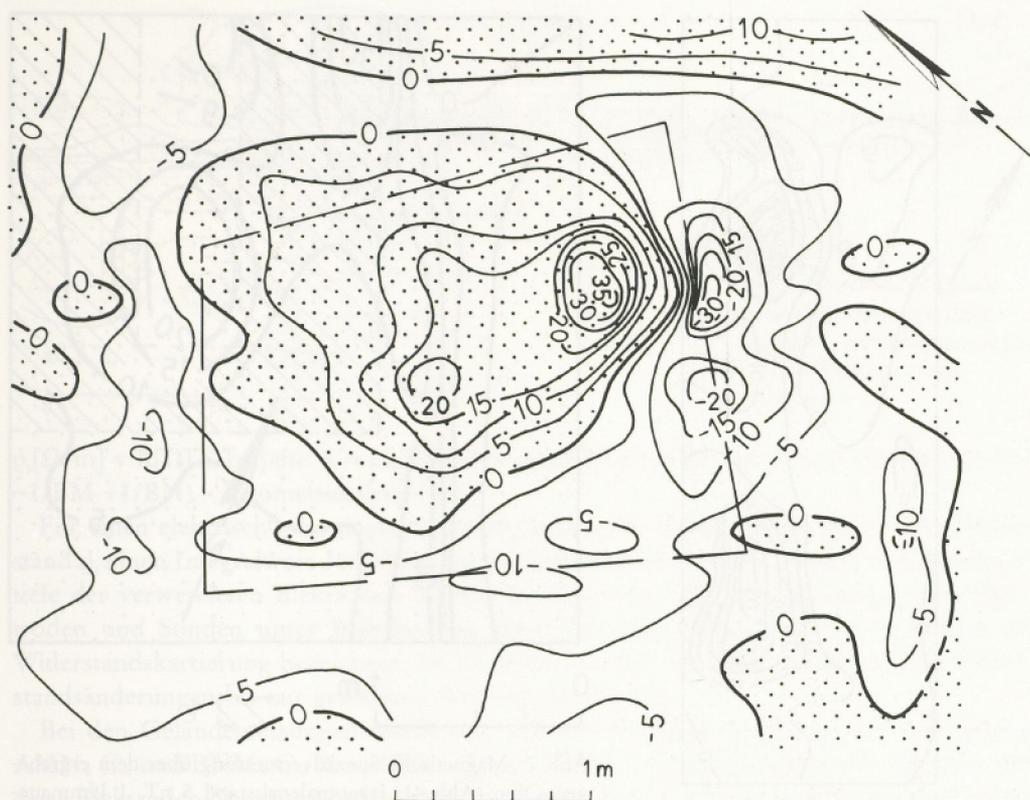


Abb. 5 Feuerstellennachweis mit dem Kernpräzessionsmagnetometer, Isanomalienabstand: 5 nT.

magnetische Aufnahme mit einem Punktabstand von 0,25 m. Die schmalen Maxima mit Werten von 10 nT betonen anscheinend verschlepptes Ofenmaterial; die bereits länger freiliegende Feuerstelle bildet sich nicht ab. Dagegen ergeben sich räumliche Beziehungen zwischen der -20 nT-Isanomale und dem Verlauf einer ergrabenen Mauer. Weitere archäologische Befunde stehen hier noch aus.

4. Ergebnisse der geoelektrischen Untersuchungen

Geoelektrische Widerstandskartierungen wurden zur Erkundung des verfüllten Wallgrabens auf einer Wiesenfläche im NW-Teil des ehemaligen Siedlungsgebietes eingesetzt. Die Einebnung des Grabens erfolgte vor ca. 150 Jahren. Im Waldbereich des Untersuchungsobjektes sind Wall und Graben teilweise noch erhalten; der Graben ist hier V-förmig, etwa 2 m tief und 4 m breit. Magnetische und elektrische Testmessungen über einer bekannten Grabenstruktur (Schurfgraben) im Waldgebiet sollten die Deutung der Anomalien in den Meßkurven unterstützen.

4.1 Methodische und petrophysikalische Grundlagen

Bei geoelektrischen Widerstandsmessungen wird dem Untergrund über zwei Elektroden (A und B) ein niederfrequenter Wechselstrom I eingespeist. Mit zwei Sonden (M und N) erfolgt die Messung der sich auf Grund der Widerstandsverhältnisse einstellenden Spannungsdifferenz ΔU . Der scheinbare spezifische elektrische Widerstand ρ_s ergibt sich nach

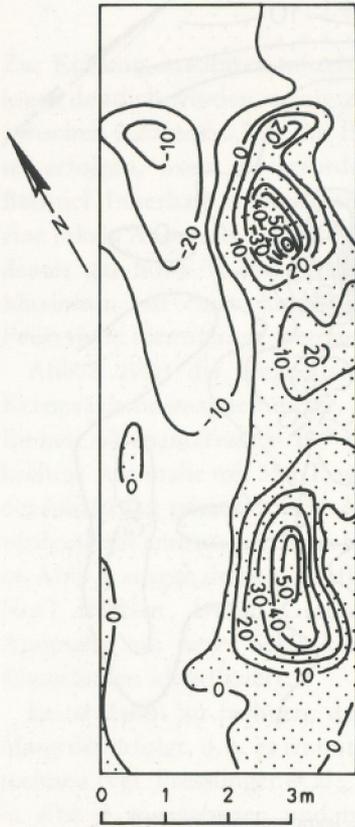


Abb. 6 Magnetische Spezialvermessung über der »Testfläche« (Abb. 3); Isanomalienabstand 10 nT.

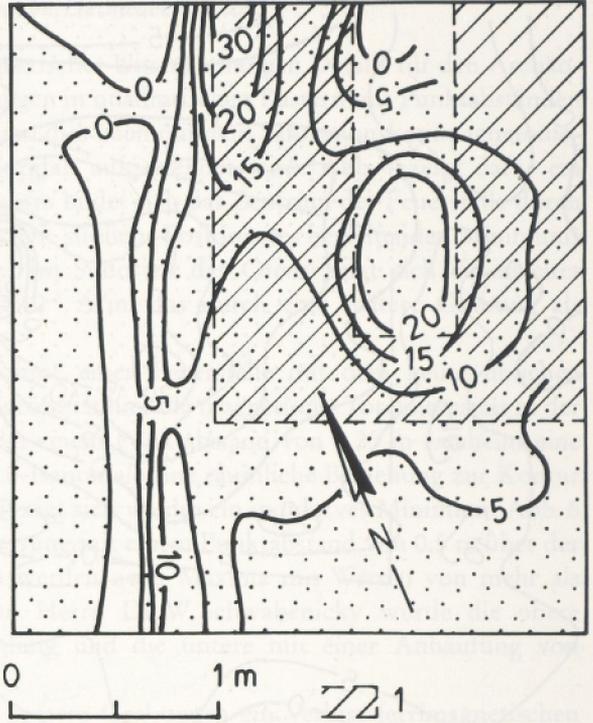


Abb. 7 Magnetische Spezialvermessung über dem ergrabenen Ofen (Abb. 4); Isanomalienabstand 5 nT. 1 Ummauerung.

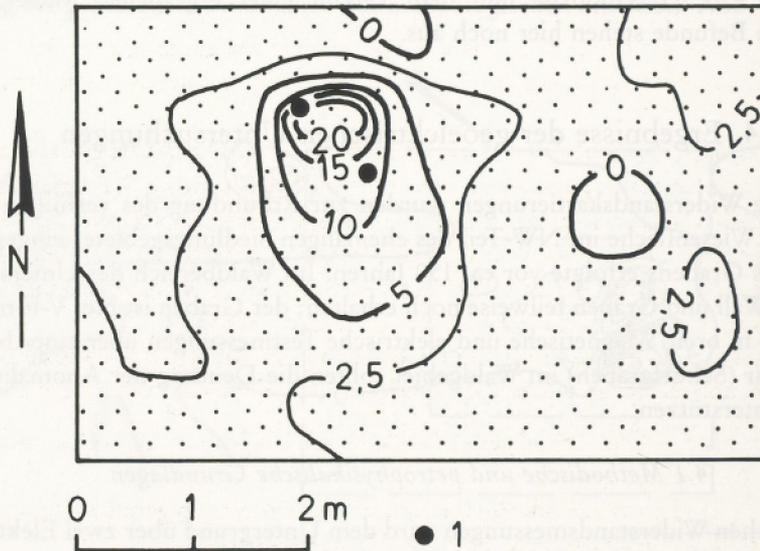


Abb. 8 Detailerkundung einer mit dem Saturationskernmagnetometer aufgefundenen Lokalanomalie, Isanomalienabstand 2,5 ... 5 nT. 1 Meßpunkt mit dem Saturationskernmagnetometer.

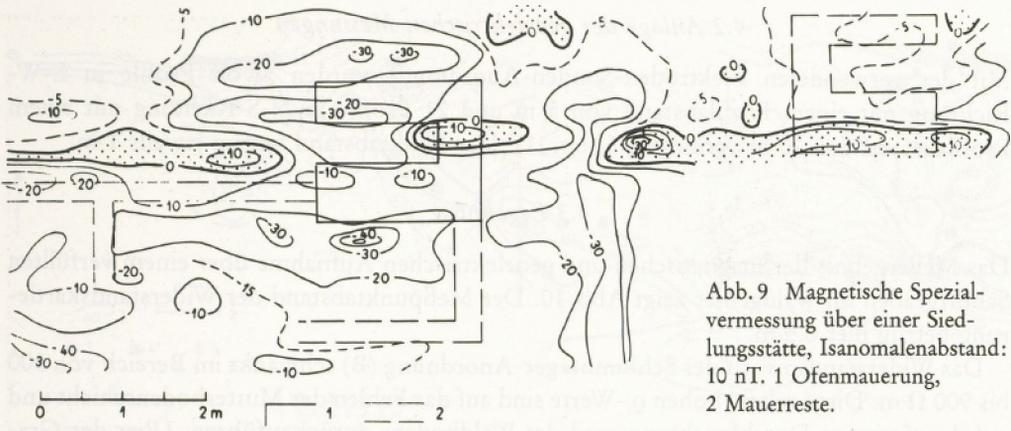


Abb.9 Magnetische Spezialvermessung über einer Siedlungsstätte, Isanomalienabstand: 10 nT. 1 Ofenmauerung, 2 Mauerreste.

$\rho_s[\Omega \cdot m] = R[\Omega] K [m]$ mit $R = \Delta U/I$ – Ohmscher Widerstand und $K = 2\pi / (1/AM - 1/AN - 1/BM + 1/BN)$ – Geometriefaktor.

Für einen elektrisch inhomogenen Untergrund stellt der scheinbare spezifische Widerstand ρ_s einen Integralwert der Widerstandsverhältnisse des Halbraumes bis zur Wirkungstiefe der verwendeten Elektroden-Sonden-Konfiguration dar. Die Versetzung von Elektroden und Sonden unter Beibehaltung ihrer Abstände entlang von Profilen wird als Widerstandskartierung bezeichnet. Im Ergebnis von Kartierungen werden laterale Widerstandsänderungen bis zur gewählten Wirkungstiefe erfaßt.

Bei den Geländemessungen wurde mit einer zweiseitigen Dreielektroden-Aufstellung AMN; C_∞ und BNM; C_∞ ($L = AB/2 = 2,5 \text{ m}$; $MN/2 = 0,5 \text{ m}$) kartiert. Im Prinzip besteht diese Elektroden-Sonden-Konfiguration aus zwei halben Schlumberger-Anordnungen und durch Mittelung von ρ_s (AMN, C_∞) und ρ_s (BNM, C_∞) kann an jedem Meßpunkt der scheinbare spezifische Widerstand für die konventionelle Schlumberger-Vierpunktanordnung berechnet werden.

Nach analytischen Berechnungen (Telford et al., 1976) ergeben sich für die halbe Schlumberger-Anordnung über einem vertikalen, hochohmigen Gang geringer Mächtigkeit ($b/L = 0,5$; $b = \text{Breite des Ganges}$; $\rho_1/\rho_2 = 5,67$) hinsichtlich der Kurvenform und der Störampplitude die deutlichsten Ergebnisse. Das Zentrum der eingelagerten Inhomogenität wird durch den Kreuzungspunkt der beiden ρ_s -Graphiken festgelegt (Militzer, Weber, 1985).

Für den erfolgreichen Einsatz von geoelektrischen Widerstandsmessungen ist ein ausreichend großer Kontrast im spezifischen elektrischen Widerstand ρ der unterschiedlichen Gesteinsmaterialien Voraussetzung. Er wird von der Gesteinsart, der Porosität, dem Poreninhalt, dem Sättigungsgrad und den Lagerungsparametern Druck und Temperatur bestimmt. Die spezifischen Widerstände der einzelnen Gesteinsarten besitzen eine sehr große Streubreite über mehrere Zehnerpotenzen (Schön, 1983).

In der Kontaktzone zwischen verfülltem Graben und gewachsenem Boden ist mit sehr geringen Widerstandsunterschieden zu rechnen. Widerstandsindikatoren sind zu erwarten, wenn

- die Lagerungsdichte des gewachsenen Bodens im Grabenbereich noch nicht wieder erreicht ist (Auflockerungszone),
- die Verfüllung eine abweichende Materialzusammensetzung gegenüber dem gewachsenen Boden besitzt (grobkörnigere Füllung, Haldenmaterial).

Beide Situationen bzw. ihre Überlagerung würden bei trockenen Bodenmaterialien zu relativ hochohmigen Bereichen in der Meßfläche führen.

4.2 Anlage der geoelektrischen Messungen

Mit der verwendeten Elektroden-Sonden-Anordnung wurden zwölf Profile in E-W-Richtung mit einem Profilabstand von 5 m und 21 Profile in N-S-Richtung mit einem Profilabstand von 10 m vermessen (Abb. 11). Der Punktabstand betrug jeweils 1 m.

4.3 Ergebnisse

Das Meßergebnis der magnetischen und geoelektrischen Aufnahme über einem verfüllten Schurfgraben im Waldgebiet zeigt Abb. 10. Der Meßpunktabstand der Widerstandskartierung betrug hier 0,5 m.

Das Widerstandsniveau der Schlumberger-Anordnung (B) schwankt im Bereich von 300 bis 900 $\Omega \cdot m$. Diese relativ hohen ρ_s -Werte sind auf das Fehlen der Mutterbodenschicht und auf den geringen Durchfeuchtungsgrad des Waldbodens zurückzuführen. Über der Grabenstruktur tritt ein Maximum in den gemessenen Widerstandswerten bei 8 m auf. Die

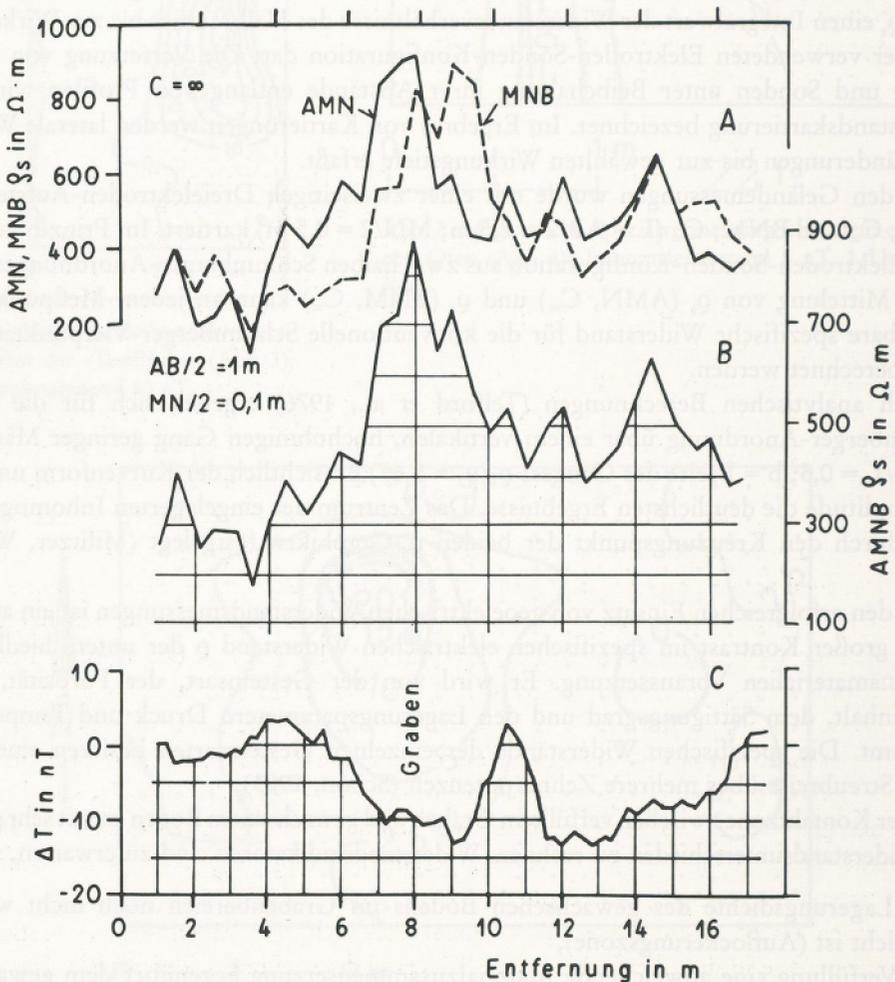


Abb. 10 Geoelektrische und magnetische Messungen über einem bekannten Schurfgraben.
 A: zweiseitige Dreielektroden-Anordnung
 B: errechnete Schlumberger-Vierpunktanordnung
 C: Verlauf der magnetischen Totalintensität ΔT

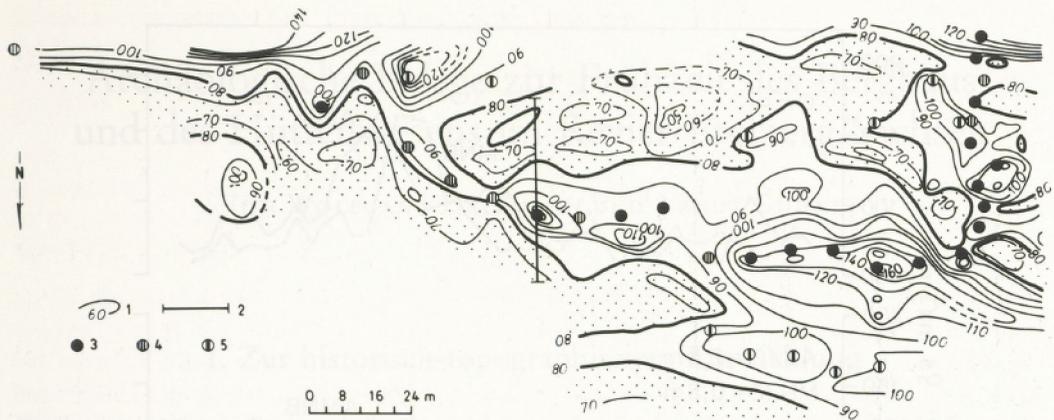


Abb. 11 Flächenhafte Darstellung der Widerstandsverhältnisse im Bereich der Bergbausiedlung.

- 1 Isoohmen
- 2 geoelektrisches Profil (Abb. 12)
- 3 Indikation der Dreielektroden-Anordnung – sicher
- 4 Indikation der Dreielektroden-Anordnung – gut
- 5 Indikation der Dreielektroden-Anordnung – unsicher

Anomalie besitzt eine Amplitude von etwa $300 \Omega \cdot m$. Der Kreuzungspunkt im Verlauf der zweiseitigen Dreielektroden-Anordnung (A) legt das Zentrum des Grabens bei $8,5 \text{ m}$ fest. Das Verhältnis von Anomalienbreite zu Grabenbreite beträgt für die verwendete Aufstellung etwa $1,5$. Unter Berücksichtigung des markanten Minimums im Verlauf der magnetischen Totalintensität ΔT (C) muß im Grabenbereich mit einer Auflockerungszone gerechnet werden. Der vor etwa $30\text{--}40$ Jahren verfüllte Schurfgraben zeigt somit noch eine abweichende Lagerungsdichte gegenüber dem gewachsenen Boden.

In Abb. 11 sind die Isolinien des scheinbaren spezifischen Widerstandes (Isoohmen) auf der Meßfläche dargestellt. Die Variationsbreite der ρ_s -Werte ist gering und liegt im Bereich von etwa 50 bis $160 \Omega \cdot m$. Das niedrige Widerstandsniveau wird hier durch die anstehende niederohmige Mutterbodenbedeckung wesentlich beeinflusst. Die zu verfolgende Grabenstruktur wurde im Isolinienbild als Bereich mit erhöhten ρ_s -Werten interpretiert. Rückschlüsse auf den wahrscheinlichen Verlauf des Wallgrabens vermitteln die in der Isoohmenkarte markierten Indikationen der Dreielektroden-Anordnung in den hochohmigen Bereichen.

Die Meßkurve eines ausgewählten Profils (Abb. 11) zeigt Abb. 12. Die Störampplitude des Grabens im berechneten Widerstandsverlauf der Schlumberger-Anordnung bei 31 m liegt in der Größenordnung von etwa $70 \Omega \cdot m$. Die niederohmige Bedeckung auf der Wiesenfläche führt somit zu einer deutlichen Verringerung der Widerstandsindikation um den Faktor 4 gegenüber dem Schurfgraben im Wald. Die Dreielektroden-Kurven besitzen einen analogen Verlauf zur Messung über dem Schurfgraben mit einer deutlichen Indikation (Kreuzungspunkt) bei 31 m . Eine Übereinstimmung liegt auch beim ermittelten Verhältnis von Grabenbreite zu Anomalienbreite von etwa $1,5$ vor.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß sich der Wallgraben vermutlich als hochohmige Zone in der oberflächennahen Widerstandsverteilung widerspiegelt. Der wahrscheinliche Grabenverlauf konnte durch die Indikationen der Dreielektroden-Anordnung rekonstruiert werden. Die Ursachen für die Widerstandserhöhungen werden in einer Materialumlagerung des ehemaligen Grabenbereichs gegenüber dem gewachsenen Bodenmaterial bzw. in einer abweichenden, grobkörnigen Materialfüllung des Wallgrabens gesehen.

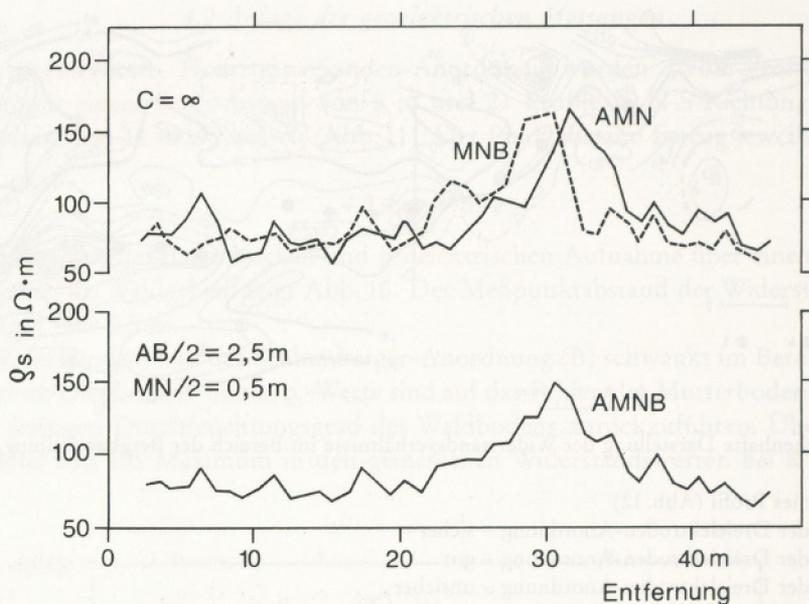


Abb. 12 Meßkurven auf einem ausgewählten geoelektrischen Profil. Oben: Dreielektroden-Anordnung, unten: errechneter q_s -Verlauf für die Schlumberger-Anordnung.

Literatur

- ADLUNG 1987 = A. ADLUNG, Archäologie und Geophysik. Kleine Schriften des Landmuseums für Vorgeschichte Dresden 6 (Dresden).
- CECH et al. 1988 = B. CECH, G. WALACH, H. PRESSLINGER, G. SPERL, Eine La Tène-zeitliche Eisenverhüttungsanlage in Loitzendorf am Jauerling, Niederösterreich. *Archaeologia Austriaca* 72, 143–152.
- GÖHRSDORF 1983 = J. GÖHRSDORF, Erfahrungen bei der magnetischen Erkundung archäologischer Objekte. *Geofyzika a Archeologie* 1983, 201–208.
- LINDNER 1983 = H. LINDNER, Ergebnis und Deutung mikrogravimetrischer Messungen an der Burgruine Tharandt. *Ausgrabungen und Funde* 28, 50–54.
- MILITZER, SCHEIBE 1981 = H. MILITZER, R. SCHEIBE, Grundlagen der angewandten Geomagnetik. Freiburger Forschungshefte C 352 (Leipzig).
- MILITZER, WEBER 1985 = H. MILITZER, E. WEBER (Hrsg.), *Angewandte Geophysik. Band II* (Wien, New York und Berlin).
- PLESLOVÁ et al. 1978 = E. PLESLOVÁ, F. MAREK, J. WALDHAUSER, J. CHOCHOL, Keltský hrob bojovníka objevený geofyzikální prospekci u Makotras (O. Kladno). *Archeologické rozhledy* 30, 133–149.
- PRESSLINGER et al. 1980 = H. PRESSLINGER, C. EIBNER, G. WALACH, G. SPERL, Ergebnis der Erforschung urnenzeitlicher Kupfermetallurgie im Paltental. *Berg- und Hüttenmännisches Monatsheft* 125, 131–142.
- SCHÖN 1983 = J. SCHÖN, *Petrophysik* (Berlin).
- SCHURR et al. 1984 = K. SCHURR, H. BECHER, H. C. SOFFEL, Archaeomagnetic studies of medieval fireplaces at Mannheim-Wallstedt and ovens from Herrenchiemsee and the problem of magnetic refraction. *Zeitschrift für Geophysik* 56, 1–8.
- SCHWABENICKY 1988 = W. SCHWABENICKY, Die mittelalterliche Bergbausiedlung auf dem Treppenhauer bei Sachsenburg, Kr. Hainichen. In: *Archäologische Feldforschung in Sachsen* (Berlin) 470–473.
- TELFORD et al. 1976 = W. M. TELFORD, L. P. GELDART, R. E. SHERIFF, D. A. KEYS, *Applied Geophysics*. (London, New York, Melbourne).
- THELLIER 1981 = E. THELLIER, Sur la direction du champ magnétique terrestre, en France, durant les deux derniers millénaires. *Phys. Earth Planet. Inter.* 24, 89–132.