

Abschlußbericht zum Pilotprojekt

# Precision Farming mit Hochauflösender Bodensensorik AZ 25315-34

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt  
Themenschwerpunkt: Umweltgerechte Landnutzung

Berichtszeitraum: 01.05.2008 – 30.04.2010



**Universität Potsdam**  
**Institut für Erd- und**  
**Umweltwissenschaften** Dr. Erika Lück  
(Projektleiter)  
Dipl.-Geophys. Ute Spangenberg  
Marko Dubnitzki



**Leibniz-Institut für Gemüse- und**  
**Zierpflanzenforschung**  
Dr. agr. Jörg Rühlmann  
Jörg Bigus  
Ingo Hauschild

**Institute of Vegetable**  
**and Ornamental Crops**  
Großbeeren/Erfurt e.V.  
Scientific Association  
Gottfried Wilhelm Leibniz



**agt Agrar-GmbH Trebbin**  
Uwe Mertin



**Sächsische Landesanstalt für**  
**Landwirtschaft - Lehr- und**  
**Versuchsgut Köllitsch**  
Heike Weiß (Versuchsstellenleiter)





# Bodenkartierung mit dem **Geophilus electricus**



Gefördert durch





## Zusammenfassung – Abstract

Beratungsfirmen setzen zunehmend geophysikalische Methoden zur Flächendifferenzierung und als Datengrundlage für die Festlegung von Managementzonen in Precision Farming ein. Dabei spielt die Leitfähigkeitskartierung eine wichtige Rolle. Diverse Tagungen und Workshops lassen den zunehmenden Bedarf an digitalen Bodeninformationen erkennen. Derzeit laufende EU-Projekte – iSoil (UFZ – Deutschland) und DIGISOIL (BRGM – Frankreich) zur Entwicklung und Bewertung von (geophysikalischen) Verfahren für die Bodenkartierung basieren auf Multiparameteransätzen und zeigen, dass neben der Leitfähigkeitskartierung weitere Verfahren Erfolg versprechend sind. In der Geophysik sind Multisensorplattformen (z.B. Universität Sydney, UFZ Leipzig, Geophysik Uni Kiel) nicht selten und auch in der Bodenkartierung für die Landwirtschaft wird seit längerer Zeit ein Trend in diese Richtung beobachtet. Im Vordergrund steht die Kopplung von Gamma-Messungen und Leitfähigkeitskartierungen.

Das Ziel des Projektes war die Erprobung und die Demonstration der Möglichkeiten des GEOPHILUS ELECTRICUS zur Kartierung der elektrischen Parameter landwirtschaftlicher Nutzflächen mit den Zielen:

1. eine Flächendifferenzierung vorzunehmen
2. Aussagen zur Schichtungsverhältnissen abzuleiten
3. die Datengrundlage zur Festlegung von Managementzonen zu schaffen.

Das Messsystem ist eine Entwicklung der Universität Potsdam gemeinsam mit dem IGZ Großbeeren unter Einbeziehung des Geräteentwicklers Tino Radic (Radic-Research, Berlin) und stellt bisher ein Unikat dar. In seiner jetzigen Form wurde der GEOPHILUS ELECTRICUS 2007 fertig gestellt. Das System zeichnet sich durch einige Neuerungen gegenüber den auf dem Markt existierenden Lösungen aus:

1. Kartierung der elektrischen Leitfähigkeit in fünf Tiefenstufen
2. gleichzeitige Erfassung von elektrischer Leitfähigkeit und Phasenwinkel
3. simultane Einspeisung von vier Signalfrequenzen zur Erfassung des spektralen Verhaltens von Leitfähigkeit und Phasenwinkel

Damit ergeben sich mehr Möglichkeiten als bisher, große Flächen in ihrer Heterogenität zu beschreiben, was ebenfalls einem Multiparameteransatz entspricht.

Seit dem Frühjahr 2010 gibt es eine zweite, verbesserte Version des Systems, in welche die Erfahrungen aus diesem Projekt teilweise eingeflossen sind. Neben einer Erweiterung der Kanalzahl auf sechs Kanäle sind in einem neuen Industriemessgerät der Firma delphin die elektrotechnischen Parameter verbessert:

- Erweiterung der Spannung an den Messkanälen auf +/- 5 V
- Sicherheitsvorkehrungen zur automatischen Abschaltung im Stand
- Standortangepasste Einspeisung mit automatischer Nachreglung der Einspeisespannung

Inzwischen liegen Erfahrungen mit dem GEOPHILUS-System auf mehr als 1000 km Fahrstrecke vor. Dies entspricht einer kartierten Fläche von etwa 1500 ha. Die Hauptuntersuchungsflächen liegen in den Betrieben Köllitsch und Trebbin. Um die Ergebnisse verallgemeinern zu können, wurden zusätzliche Testgebiete aufgenommen, die sich in ihren Bodenverhältnissen deutlich von den beiden Hauptuntersuchungsregionen unterscheiden. Dazu zählen Torfflächen, Salzböden, Tonböden und sehr hochohmige trockene Sandflächen. Das erfasste Leitfähigkeitsspektrum überdeckt einen Bereich von 0.3 bis 100 mS/m. Dies entspricht Widerstandswerten zwischen 12 Ohm\*m und 3000 Ohm\*m. Neben dem Einsatz in

der Teilflächenspezifischen Landwirtschaft ist angedacht, das System auch für andere Aspekte der umweltgerechten Landnutzung wie z.B. zur Nutzungsoptimierung von Bergbaufolgelandschaften einzusetzen. Erste Tests verliefen erfolgreich.

Die Ergebnisse einer Leitfähigkeitskartierung mit galvanisch angekoppelten Elektroden sind u.a. stark von der Ankopplung der Elektroden an Untergrund abhängig. Versuche zu unterschiedlichen Jahreszeiten und damit unterschiedlichen Feuchtebedingungen haben gezeigt, dass in extremen Trockenperioden die Messungen nicht möglich sind, sonst aber zu allen Zeitpunkten durchgeführt werden können. Der Zeitraum der Messkampagnen wird maßgeblich durch die Befahrbarkeit des Bodens vorgegeben (Bestellung und Bewuchs der Flächen, Befahrbarkeit der Flächen infolge der Witterung und erfolgter Bodenbearbeitung). Eine Befahrung ist auch im April im Wintergetreide noch möglich, ohne dass nennenswerten Schäden auftreten.

Will man die erzielten Ergebnisse beurteilen, so ist zwischen den beiden Messgrößen elektrische Leitfähigkeit und Phasenwinkel zu unterscheiden. Während Leitfähigkeitskarten bereits seit längerem zur Erfassung von Bodenheterogenitäten eingesetzt werden, sind flächenhafte Phasenwinkelmessungen etwas völlig neues. Weitere Arbeiten werden notwendig sein, um die hier getroffenen Aussagen zu Phasenwinkelmessungen zu untermauern und zu verallgemeinern. Für alle Feldkampagnen konnten brauchbare bis sehr gute Leitfähigkeitskarten erstellt werden. Die Qualität hängt von der Beschaffenheit des Oberbodens und von den tatsächlichen Leitfähigkeitswerten ab. Die Phasenwinkelkarten zeigen unterschiedlich gute Ergebnisse. Mit Hilfe des Phasenwinkels konnten verdichtete Gebiete oder Salzregionen abgebildet werden. Weiterhin ist in mehreren Fällen die Abbildung von Leitungen im Untergrund gelungen. Phasenwinkelkarten scheinen dagegen weniger geeignet zur Kartierung geringer Texturunterschiede. Diese Aussagen werden durch entsprechende Laboruntersuchungen untermauert.

In einem Vergleich mit den auf dem Markt existierenden Systemen (EM38, VERIS3100 und ARP) hat sich der GEOPHILUS bewährt. Die Vorteile des Systems konnten herausgearbeitet werden und werden u.a. auf der AgEng2010 einem breiten Publikum zugänglich gemacht:

- Erstellung von Datensätzen, die neben der lateralen auch die vertikalen Leitfähigkeitsvariationen erfasst.
- simultane Einspeisung von vier (frei wählbaren) Frequenzen in einem Frequenzband zwischen 1 mHz und 1kHz, was sich u.a. positiv auf die Signal-Rausch-Verhältnisse auswirkt
- gleichzeitige Kartierung von Leitfähigkeit und Phasenwinkel

Das Projekt diente hauptsächlich der Erprobung des Sensors unter Praxisbedingungen. Die ausgewählten Betriebe Köllitsch und Trebbin haben dabei unterschiedliche Interessen. Während in Köllitsch eher wissenschaftliche Aspekte des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie zu einer Projektpartnerschaft geführt haben, stehen in Trebbin rein praktische Aspekte im Vordergrund. Der Betrieb beginnt mit der teilflächenspezifischen Düngung auf der Grundlage von Leitfähigkeitskarten und Daten der Reichsbodenschätzung und zeigt ein sehr großes Interesse an dem Projekt. Daraus hat sich eine Zusammenarbeit mit landwirtschaftlichen Beratungsunternehmen entwickelt. Diese wollen zur Erstellung der Düngeapplikationsdateien für die Betriebe auf die mit dem GEOPHILUS erzeugten Daten zurückgreifen. Hierzu sind entsprechende Pilotprojekte in der Beantragungsphase.



- Großbeeren auf einer Referenzstrecke nach Einbau bekannter Testobjekte – zeitweise im wöchentlichen Rhythmus zur Erfassung der zeitlichen Variabilität von Widerstand und Phasenwinkel
- Test-Kartierung archäologischer Strukturen zur Feststellung des Bedarfs für eine Systemoptimierung zur Erweiterung des Einsatzspektrums für den GEOPHILUS
- Kartierung einer Fläche auf einer Bergbaufolgelandschaft (spätere landwirtschaftliche Nutzung) zur Erprobung der Eignung
- Sommer und Herbst 2009 – Aufnahme von Einzelspektren sowohl auf sandigen als auch auf lehmigen Böden zum Studium der Frequenzeffekte und zur Optimierung der Geräteeinstellungen

## **Ergänzende Feldarbeiten**

Auch wenn das Hauptaugenmerk auf einem Sensortest lag, so wurden ergänzende Feldarbeiten durchgeführt, um zum einen die Datenqualität des Sensors zu beurteilen und zum anderen um landwirtschaftlich relevante Zielgrößen gegenüberstellen zu können. Auch hier lag der Schwerpunkt auf den Betrieben Köllitsch und Trebbin.

- Ausgewählte Widerstands-Tiefen-Sektionen in Köllitsch, Trebbin, Großbeeren, Bornim und Paulinenaue zur Evaluierung der GEOPHILUS-Messwerte
- TDR-Messungen in Köllitsch, Trebbin, Großbeeren, Paulinenaue und auf der Kippenlandschaft zur Bestimmung des aktuellen Bodenwassergehaltes
- Feldarbeit in Trebbin im Juni 2009: Referenzmessung mit fixen Elektroden in der GEOPHILUS-Anordnung auf allen Feldern (am Feldrand – an ausgewählten Lokationen), Ziel: Vergleichbarkeit der Bedingungen für alle Messungen verteilt über den Betrieb, gleichzeitig: Bodenfeuchtemessung über TDR und über Bohrstockbeprobung, Bohrstockansprachen für alle Felder, Bodenprobennahme für Labormessungen
- Herbst 2009: intensive Bohrstockbeprobung (50 m Raster) auf zwei Feldern (~30ha) in Trebbin und anschließende Laboranalysen der Proben zur Beurteilung der Datenqualität des GEOPHILUS-Systems
- Herbst 2009 - Anwendung geophysikalischer Standardmessmethoden in Köllitsch zur Evaluierung der GEOPHILUS-Daten
- Herbst 2009 und Frühjahr 2010 – Intensivbeprobung eines Feldes in Köllitsch (24ha) zur Beurteilung der Datenqualität des GEOPHILUS-Systems
- Bodenprobennahme für Laboruntersuchungen

## **Laborarbeit**

Die Laboruntersuchungen lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Einerseits wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, um Bodenkennwerte zu bestimmen und zum anderen wurden Labormessreihen erstellt, um das spektrale Verhalten von Widerstand und Phase für verschiedene Bodenproben zu untersuchen.

- Erfassung der spektralen induzierten Polarisierung an verschiedenen Bodenproben aus den Testregionen Köllitsch und Trebbin
- Variation von Bodenwassergehalt und –dichte und Messung der IP-Spektren
- SIP- Labormessungen an einem Testnetzwerk aus Widerstands- und Kondensatorbrücken mit der Messapparatur (Rabbit) des GEOPHILUS ELECTRICUS
- SIP-Labormessungen an Vergleichsnetzwerken der BAM

- Siebanalysen zu Bestimmung der Korngrößenverteilung von 480 Bodenproben (128 Lokationen mit jeweils 3-4 Tiefenstufen)
- Bestimmung der aktuellen Bodenfeuchte von mehr als 600 Bodenproben im Labor

## **Datenauswertung**

Um die GEOPHILUS-Daten auszuwerten, waren verschiedene Processing-Schritte zur Aufarbeitung der Daten notwendig (Zusammenführen von Ortsangaben und Messwerten, Trennen der Datensätze nach Kanälen und Frequenzen). Erst im zweiten Schritt erfolgte die Auswertung zur Beurteilung der Datenqualität, zur Erstellung der Heterogenitätskarten der Felder, zur Korrelationsanalyse mit Labordaten und zur Ableitung der Schichtungsinformationen.

- Erstellung von Leitfähigkeitskarten für die beiden Betriebe Köllitsch und Trebbin, Transformation in die jeweiligen im Betrieb genutzten geografischen Koordinatensysteme
- Ableitung von Informationen der vertikalen Leitfähigkeitsänderungen für die beiden Pilotbetriebe
- Sammeln und Inventarisieren vorhandener Informationen zu dem Betrieb Trebbin, Beschaffung und Aufarbeitung der Informationen der Reichsbodenschätzung, Aufnahme aller Informationen in ArcGis
- Zusammenführen aller vorhandenen Leitfähigkeitskarten für den Betrieb Köllitsch und Gegenüberstellung mit vorhandenen Bodenkarten und Luftbildaufnahmen, Aufnahme aller Informationen in ArcGis
- Vergleich der GEOPHILUS-Daten mit Leitfähigkeitsinformationen von EM38-, Veris3100- und ARP-Messungen in Köllitsch und Ableitung von Schlussfolgerungen
- Dateninversion entlang ausgewählter Transekte und Vergleich mit konventioneller Messtechnik

# Öffentlichkeitsarbeit und Publikationen

## Vorträge und Poster:

- aktive Beteiligung auf den DLG-Feldtagen in Buttelstätt bei Weimar 2008
- Posterbeteiligung auf dem TechnologieTransferTag Brandenburg 2008
- Präsentation in Form von Postern und Vorträgen auf nationalen und internationalen Fachtagungen:
  - 1) 14<sup>th</sup> European Meeting of Environmental and Engineering, EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers) – Krakow, Sept. 2009 – 1 Poster
  - 2) DGG (Deutsche Geophysikalische Gesellschaft) – Kiel, März 2009 – 1 Poster und Bochum, März 2010 – 1 Vortrag
  - 3) Fachvorträge im Rahmen einer Forschungsanbahnungsreise in Chile (Valdivia und Talca) – Frühjahr 2009
  - 4) JIAC (Joint International Agricultural Conference) – Precision agriculture '09, Wageningen, Juni 2009 – 1 Vortrag, 2 Poster (große Resonanz, viele Fragen, Anbahnung neuer Kooperationen u.a. mit dem EU-Projekt iSoil)
  - 5) Workshop zur spektralen induzierten Polarisation, SIP 2010 Bonn – 1 Poster
- Weitere angemeldete und eingereichte Beiträge:
  - 1) AgEng 2010 - International Conference on Agricultural Engineering, France, Sept. 2010 – 1 Vortrag
  - 2) Aquametry 2010 – erste Europäische Konferenz für Feuchtemessungen, in Weimar – 1 Vortrag
  - 3) GeoDarmstadt 2010 – 1 Poster

## Publikationen:

- Lück, E.; Rühlmann, J. 2008. Electrical conductivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS. Extended Abstract. 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, 15-17 September 2008, Krakow, P43.
- Lück, E.; Gebbers, R.; Rühlmann, J.; Spangenberg, U. 2009. Electrical conductivity mapping for precision farming. Near Surface Geophysics, 15-25.
- Hoefler, G.; Lück, E.; Gundelach, V.; Rühlmann, J.; Bachmann, J. 2009. The capability of non-destructive geophysical methods in precision agriculture to capture subsoil mechanical strength. In: E.J. van Henten, D. Goense and C. Lokhorst (eds.) Precision agriculture '09, 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen, Netherlands, 439-444.
- Lück, E. Spangenberg, U.; Rühlmann, J. 2009. Comparison of different EC-mapping sensors. In: E.J. van Henten, D. Goense and C. Lokhorst (eds.) Precision agriculture '09, 7th European Conference on Precision Agriculture, Wageningen, Netherlands, 445-452.
- Lück, E.; Rühlmann, J.; Kirchmann, H. (2010): Properties of the Swedish long-term soil fertility experiments. VI. Effect of soil texture on apparent electrical conductivity determined with geophysical methods. Acta Scand. Submitted.
- Lück, E., Rühlmann, J. (2010): GEOPHILUS ELECTRICUS – a new soil mapping system (eingereicht) – AgEng 2010
- Simpson, D., Van Meirvenne, M., Lück, E., Bourgeois J and Rühlmann, J. (2010). Prospection of two circular Bronze age ditches with multi-receiver electrical conductivity sensors (North Belgium), Journal of Archaeological Science, in press

# Fachlicher Bericht

## Gliederung

1. Beschreibung des Messsystems und seiner Komponenten	13
1.1. Rollendes Elektrodensystem	14
1.2. SIP-Messgerät Rabbit der Firma Radic Research	17
1.3. Georeferenzierung der Messwerte	21
2. Testmessungen zur Optimierung der Geräteparameter	24
2.1. Frequenzspektren	24
2.2. Kontrollparameter	25
3. Messungen im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch (Sachsen)	26
3.1. Bodenkarten, Bodeninformationen für Köllitsch	26
3.2. Luftbildaufnahmen	30
3.3. Vorhandene Leitfähigkeitsdaten	31
3.4. Aktivitäten mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS	34
3.5. Evaluierung der GEOPHILUS-Daten	39
4. Messungen in der agt Trebbin	41
4.1. Schlagkarte und Luftbild	41
4.2. Bodenkarten – Daten der Reichsbodenschätzung	44
4.3. Aktivitäten mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS	50
4.3.1 Heterogenität in der Fläche	50
4.3.2 Schichtungsinformationen	55
4.4. Geländemodell	56
5. Ergebnisse auf weiteren Testflächen	57
5.1. Flächen in Ohrleben – Tonböden	57
5.2. Verdichtungsexperiment in Ruthe/Hannover	60
5.3. Hochohmige Sandflächen in Horstwalde	62
5.4. Torfböden in Paulinenaue	64
5.5. Rekultivierungsflächen	65
5.6. Testfläche ‚Gutsfeld‘ in Bornim	66
5.7. Referenztrasse in Großbeeren	68
5.8. Messung auf einer archäologischen Fundstelle in Kalbe/Milde	69
6. Labormessungen	70
6.1. Bodenanalysen zur Bestimmung von Bodenwassergehalt und Textur	70
6.2. SIP-Messungen an Bodenproben	72
6.3. SIP-Messungen an Testnetzwerken	74
7. Schlussfolgerungen	76
Literatur und Anhang	



# 1. Beschreibung des Messsystems und seiner Komponenten

Das System setzt sich aus den drei bzw. vier folgenden Bausteinen zusammen:

- rollendes Elektrodensystem, welches im IGZ Großbeeren (Rühlmann, Bigus, Hauschild) entwickelt und gebaut wurde
- Apparatur zur Einspeisung eines elektrischen Signals und zur Aufnahme resultierender Spannungen an fünf Elektrodenpaaren (5-Kanal-Apparatur – SIP Rabbit von Radic research, Berlin)
- Positionierung des Messwerte über GPS, dGPS oder Tachymeter
- Computer zur Steuerung und Erfassung der Messwerte.

Die Abb. 2 zeigt links das rollende Elektrodensystem, welches von einem Zugfahrzeug (Geländewagen, Multicar oder Schlepper) über die Flächen bewegt wird und rechts das ‚Herzstück‘ des Systems – die Apparatur Rabbit, die entsprechend unserer Vorgaben von Dr. T. Radic (Radic Research, Berlin) entwickelt wurde.



Abb. 2 Komponenten des Messsystems GEOPHILUS ELECTRICUS

Die technischen Daten des Gesamtsystems lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Modulare Elektrodenanordnung, derzeit eine äquatoriale Dipol-Dipol-Anordnung mit 1 m Dipolweite
- 1 Dipol für die Stromeinspeisung
- 5 Spannungsdipole im Abstand von 0.5 bis 2.5 m → 5 Tiefenstufen oder in der neueren Variante 6 Spannungsdipole im Abstand von 0.5 bis 4 m → 6 Tiefenstufen
- Messung der elektrischen Leitfähigkeit und des Phasenwinkels
- Leistung: 50 W, maximale Einspeisung von +/- 400 V und +/- 125 mA
- Frequenzbereich: 1 mHz bis 1 kHz
- Gleichzeitige Messung von vier Frequenzen
- → Spektralverhalten elektrischer Bodenparameter
- derzeit standardmäßig genutzte Frequenzen: 62.5 Hz, 125 Hz, 187.5 Hz und 562.5 Hz
- → 40 Messwerte pro Messpunkt
- Kombination mit (d)GPS oder Tachymeter zur Georeferenzierung

## 1.1. Rollendes Elektrodensystem

Das modular aufgebaute Elektrodensystem ordnet die Elektroden in Form eines äquatorialen Dipols mit einer Dipolweite von 1m an. Elektrodenanordnungen, die Elektroden in einer so genannten colinearen Anordnung aufreihen, werden genutzt, erfordern aber in der Datenauswertung etwas mehr Aufmerksamkeit (Habberjam and Watkins, 1967). Die 5 Spannungskanäle realisieren Dipolabstände zwischen 0.5 und 2.5 m bzw. die 6 Spannungskanäle in Variante b) der Abb. 3 arbeiten mit Dipolabständen zwischen 0.5 und 4m. Die Fahrgeschwindigkeiten liegen (je nach gewünschter Messpunktdichte) zwischen 5 und 15 (max. 20) km/h. Eine noch höhere Geschwindigkeit beeinträchtigt die mechanische Stabilität der Elektroden in der Bewegung.

Das über vorherige Modellrechnungen optimierte System ist so angelegt, dass der für die Landwirtschaft relevante Tiefenbereich zwischen 0 und 1.5 m in fünf (sechs) Tiefenstufen erfasst wird. Die Abb. 3 zeigt den schematischen Aufbau. Der Position des Messwertes ergibt sich jeweils aus dem Mittelpunkt zwischen Einspeisedipol (hinter dem Zugfahrzeug) und dem zugeordneten Spannungsdipol. Je größer der Elektrodenabstand ist, desto größer ist die Eindringtiefe der Messwerte. Daraus ergibt sich die unterschiedliche Tiefenlage der einzelnen Punkte.

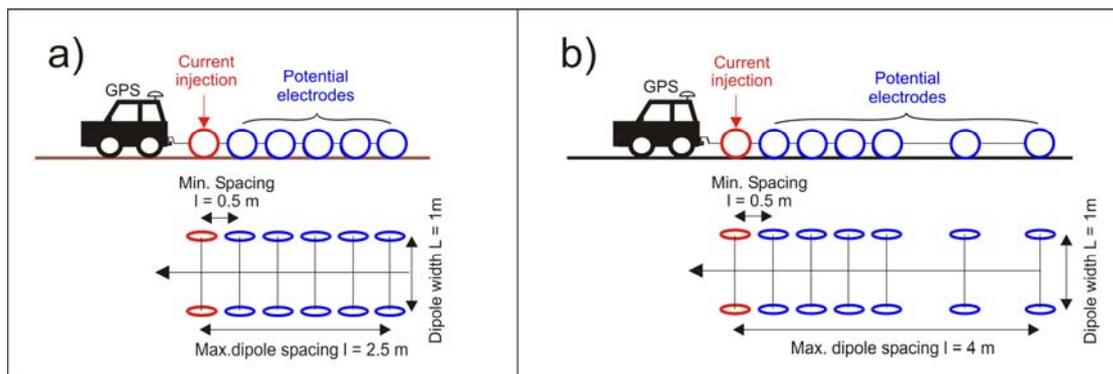


Abb. 3 Schematischer Aufbau des rollenden Elektrodensystems  
a) als 5-Kanal-Variante und b) als 6-Kanal-Variante

In der Abb. 4 ist der Verlauf der Sensitivitäten für beide Varianten dargestellt. Jeder Messwert enthält Informationen aus unterschiedlichen Tiefenbereichen, wobei die einzelnen Tiefen das Signal unterschiedlich stark beeinflussen. Dies ist durch den Sensitivitätsverlauf charakterisiert. Die Formeln zur Berechnung der Sensitivitätsverteilung in Abhängigkeit von Dipolabstand und Dipolweite findet man bei Roy and Apparao, 1971. Die für die gewählte Messgeometrie errechneten Geometriefaktoren sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Die Berechnung erfolgte auf Grund der Annahme, dass sich alle Elektroden in der Zielposition befinden. Bei Kurvenfahrten ändern sich die Abstände zwischen den Elektroden und damit die Geometriefaktoren. In Modellrechnungen wurde nachgewiesen, dass die Abweichung der Faktoren in den Kurven nur gering ist. Die größten Abweichungen treten auf, wenn die Einspeiseachse stark verdreht ist zu den restlichen Elektroden, d.h. beim Einfahren in die Kurve. Beispielrechnungen findet man im Anhang.

Tabelle 1: Geometriefaktoren für den GEOPHILUS ELECTRICUS mit 1m- Dipolweite

Dipolabstand	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	4.0 m
Geometriefaktor	2.8	10.7	28	59.5	109.8	183.6	420.8

Die Relationen zwischen den Geometriefaktoren sind ein Maß für die Verhältnisse zwischen den Spannungen an den einzelnen Kanälen. Die maximal mögliche Spannung am Kanal 1 liegt derzeit bei +/- 2V. Dies hat zur Folge, dass in der 5-Kanal-Variante maximal +/-50 mV am letzten Kanal anliegen. Da während der mobilen Messung eine Auslastung des maximalen Wertebereiches nur selten zu realisieren ist, liegen die tatsächlichen Werte eher noch darunter. Je kleiner die Spannungswerte sind, desto größer werden die Anforderungen an die Genauigkeit des Messgerätes.

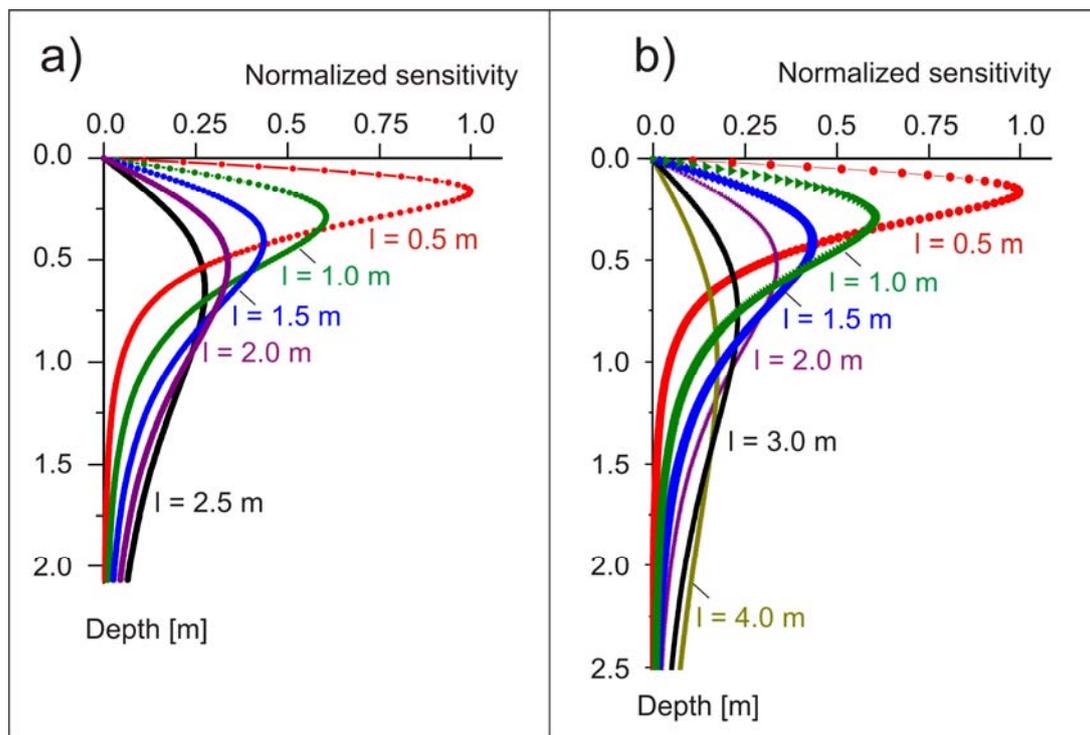


Abb. 4 Sensitivitätsverteilung für den GEOPHILUS ELECTRICUS  
a) für 5 Spannungskanäle und b) für 6 Spannungskanäle

Neben dem Messgerät und der Elektrodengeometrie bestimmt die Bauart der Elektroden die Signalqualität durch:

1. Ankopplung
2. Übertragung des Signals
3. Isolation

Die relativ gute Ankopplung wird durch die Elektrodenform (siehe Abb. 5 unten) und das Eigengewicht erzeugt. Die Übertragung der Spannungen von der Elektrode zum Kabel erfolgt in der 5-Kanal-Variante über Kugellager. In der 6-Kanal-Variante ist die Übertragung des Einspeisestroms über Kohlebürsten und die der Spannung über Schleifringkontakte realisiert. Die Isolation wird in der ersten Version über Plastikstücken zwischen den rollenden Elektroden und dem Geräterahmen hergestellt. Es hat sich gezeigt, dass sich während der Befahrung Bodenbrücken zwischen den Rädern und den Metallträgerteilen bilden können. Die Beseitigung der Brücken

während der Feldarbeiten hat allerdings die gemessenen Widerstandswerte kaum beeinflusst, so dass dieser Einfluss als sehr gering eingeschätzt werden kann. Der Einfluss einer mangelnden Isolation wird größer, wenn in nassem Bewuchs gefahren wird (Köllitsch, 06.11.08). Die entstehenden Feuchtebrücken zwischen den Elektroden können dazu führen, dass insbesondere für die höheren Kanäle die Signale deutlich stärker verrauschen. Während für die Kanäle 1-3 diese Effekte nicht zu erkennen waren, wirkt sich eine solche Störung auf Kanal 4 und 5 auf Grund der ohnehin geringen Signale stärker aus. Diese Tatsachen wurden bei der Weiterentwicklung des Elektrodensystems berücksichtigt. So sind die Elektroden von dem Gestell zwar weiterhin über entsprechende Kunststoffstücke isoliert, die Isolation wird aber durch einen großflächig angebrachten Kunststoffüberzug verstärkt.

Der Transport des Elektrodensystems erfolgt über einen Spezialautoanhänger, wobei das Auf- und Abladen entweder per Hand oder unterstützt über eine Seilzugwinde erfolgt (siehe Abb. 5). Der Transport zwischen den Feldern erfolgt in der Regel auch mittels Hänger, da das Elektrodensystem selbst nicht straßentauglich ist. Für den Auf- und Abbau sind 20 – 30 min erforderlich. Die Konstruktion des Spezialanhängers (Abb. 5 rechts) beschleunigt die Umsetzung erheblich, so dass sich diese Zeitangaben noch verkürzen dürften.



Abb. 5 Transport des Elektrodensystems mittels Autoanhänger

## 1.2. SIP-Messgerät Rabbit der Firma Radic Research

Das derzeit eingesetzte Messgerät stellt eine Spezialentwicklung der Firma Radic Research (Berlin) dar. Bisher sind weltweit nur wenige Geräte bekannt, die sowohl Leitfähigkeiten als auch Phasenwinkel kontinuierlich im Frequenzbereich und damit in der Bewegung erfassen können. Welche Effekte insbesondere bei den Phasenwinkelmessungen auftreten und zu berücksichtigen sind, sollen u.a. die durchgeführten Untersuchungen zeigen. Der große Unterschied zu Labormessungen liegt in den sich ständig ändernden Ankopplungsbedingungen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass nicht alle im Labor gewonnenen Erkenntnisse ins Gelände zu übertragen sind. Es werden Messreihen von Spektren vorgestellt, die belegen, dass die Phasenwinkeleffekte weniger durch Polarisierungseffekte (wie ursprünglich angenommen), sondern vielmehr durch elektromagnetische Effekte hervorgerufen werden.

Das eingesetzte Messsystem Rabbit hat ein Leistungsteil, welches maximal +/- 400 V an den Einspeisedipol anlegen kann, wobei maximal ein Strom von +/- 125 mA fließen darf. Gleichzeitig darf aber die Spannung an den Spannungsdipolen nicht größer als +/- 2 V werden, was dazu führt, dass bei der derzeitigen Elektrodenkonfiguration das Leistungsteil nie voll ausgefahren wird. Je nach Leitfähigkeitsbedingungen liegen die angelegten Spannungen bei Werten zwischen 5 V (für sehr gut leitfähige Böden oder für sehr hochohmige) und etwa 50 V für lehmig-sandige Böden. Für gutleitfähige Böden ist die maximal erlaubte Stromstärke der begrenzende Faktor und für sehr hochohmige Böden ist die maximal zulässige Potentialdifferenz limitierend. Bei schlechter Elektrodenankopplung z.B: auf sehr harten Böden müssen außergewöhnlich hohe Spannungen angelegt werden. Teilweise lagen 100 V an dem Einspeisedipol an, die Stromstärke lag im Bereich der möglichen Werte (kleiner 100 mA) und die an dem ersten Spannungsdipol überschritt nicht die 2V. Eine schlechte Elektrodenankopplung erfordert eine große Einspeisespannung.

Für den Start des Programms ist eine Initialisierungs-Datei notwendig, in welcher die serielle Schnittstelle für die Datenübernahme (hier PortNumber 12), der Shuntwiderstand 7.8 Ohm für die Feldmessung und 157.8 Ohm für die Labormessung, die maximale Spannung (400 V für die Feldmessung) und der maximale Strom 125 mA festgelegt werden. Außerdem enthält diese Datei die Zahl und die Konfiguration der Remote Units (Kanäle), die Geometriefaktoren zur Umrechnung von Spannung und Stromstärke in scheinbare Widerstände, die Frequenzen und wenn vorhanden eine gerätespezifische Kalibrierung, welche im Labor mit Hilfe einer Kalibrierbox erzeugt wurde.

Das Messgerät ist sehr komplex und in der jetzigen Form eher für Forschungszwecke als für einen Routinebetrieb durch Dienstleister geeignet. Es enthält weit mehr Optionen, als von Landwirten genutzt werden würden. In der derzeitigen Form wären Fehlbedienungen nicht auszuschließen. Für die Erprobungsphase und die Optimierung der Frequenzbereiche etc. ist dies allerdings wünschenswert und sinnvoll. Die folgenden Ausführungen sollen einerseits die Komplexität des Gerätes erläutern und andererseits Hinweise auf eine richtige Gerätebedienung geben. Das Messgerät wird über einen PC – in unserem Fall einen felddauglichen PC der Firma Panasonic gesteuert. Die folgende Abb. 6 zeigt die grafische Bedienoberfläche. Während der

Messung werden sowohl die Einspeise- als auch die Spannungssignale grafisch dargestellt. Eine erste visuelle Kontrolle der Datenqualität kann mit Hilfe des Fensters der Spannungskanäle erfolgen.

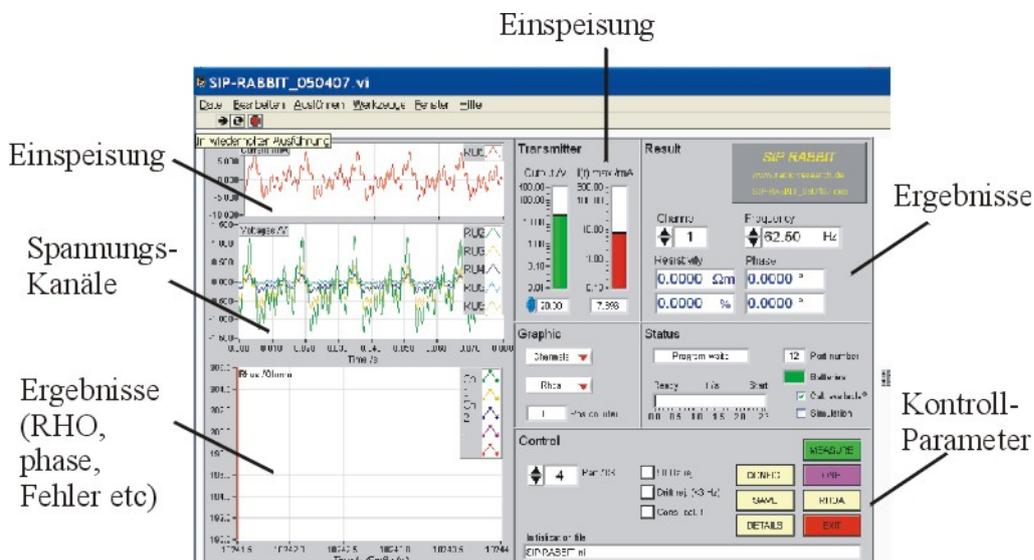


Abb. 6 Bildschirmoberfläche der Rabbit unmittelbar nach Einschalten des Gerätes

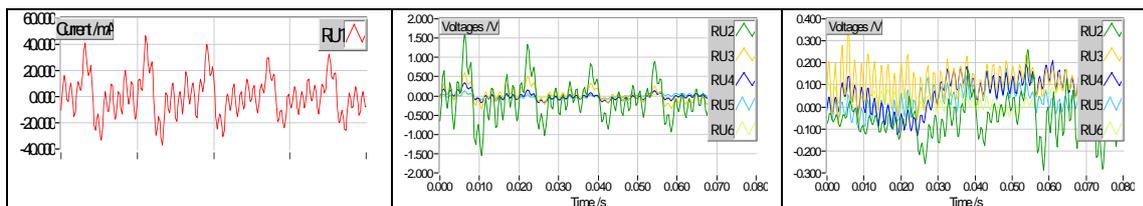


Abb. 7 Momentaufnahmen von Eingangssignal (links) und resultierenden Spannungen

Die Überlagerung von vier verschiedenen Frequenzen führt zu dem typischen Schwingungsbild in der Einspeisung, wie es in Abb. 6 und Abb. 7 (links) zu sehen ist. Wird ausreichend Energie eingespeist, dann zeigen auch die Spannungsmessungen die Überlagerung der vier Schwingungen (Abb. 7 mitte). Bei einer unzureichenden Datenqualität sind die Signale entsprechend verrauscht (Abb. 7 rechts).

Die Einspeisung ist zusätzlich über das mittig angeordnete Balkendiagramm (Abb. 6) im Steuerprogramm zu verfolgen. An dieser Stelle kann während der Messung die angelegte Spannung variiert werden. Übersteigt die Stromstärke den zulässigen Maximalwert von 125 mA, dann leuchtet der Balken dieser Anzeige gelb auf. Dies sollte als Warnung dienen, die angelegte Spannung zu reduzieren. Die Ergebnisse können links unten grafisch dargestellt werden oder rechts oben digital abgefragt werden. Während der Messung kann die Anzeige zwischen den einzelnen Kanälen und Frequenzen umgeschaltet werden. Auch die grafische Darstellung der Ergebnisse kann je nach Wunsch verändert werden. Es können sowohl die Widerstände als auch die Phasenwinkel bzw. die jeweiligen Fehlerwerte der beiden Größen für einzelne Kanäle oder für die vier gewählten Frequenzen angezeigt werden. Das rechte untere Kästchen enthält Kontrollparameter, die sowohl Filtereinstellungen als auch die Länge der aufgezeichneten Zeitreihenabschnitte steuern. Frei wählbar sind Filter, die die 50Hz-

Frequenz eliminieren und ein Drift-Filter, der die zeitliche Variation des Eigenpotential korrigiert.

Die folgende Abb. 8 zeigt stellvertretend zwei Bildschirmdarstellungen während des Betriebes. Im unten linken Fenster ist der Verlauf der Widerstandswerte für alle fünf Kanäle dargestellt. Im rechten oberen Fenster ist zu erkennen, dass die berechneten Fehler mit 2 % für den Kanal 1 wesentlich geringer ausfallen als für den Kanal 5 (48%). Es ist zu bedenken, dass auf Grund der Messgeometrie die Signale am letzten Spannungsdipol wesentlich geringer sind. Die Geometriefaktoren, die für die gewählte Anordnung zwischen 2 und 100 liegen, weisen auf die Signalunterschiede zwischen Kanal 1 und Kanal 5 hin. Ist für Kanal 1 die Randbedingung erfüllt, dass kein Spannungsdipol mehr als 2 V misst, dann liegen am Kanal 5 nur noch maximal 50 mV an. Häufig werden für den Kanal 1 Spannungen um die 0.5 V und demzufolge für den Kanal 5 Spannungen im Bereich weniger mV registriert. Damit wird das Signal-Rausch-Verhältnis mit zunehmendem Abstand schlechter. Dies wäre möglicherweise zu umgehen, wenn die einzelnen Spannungskanäle unterschiedliche Vorwiderstände bzw. Verstärkerstufen vorgeschaltet bekämen.

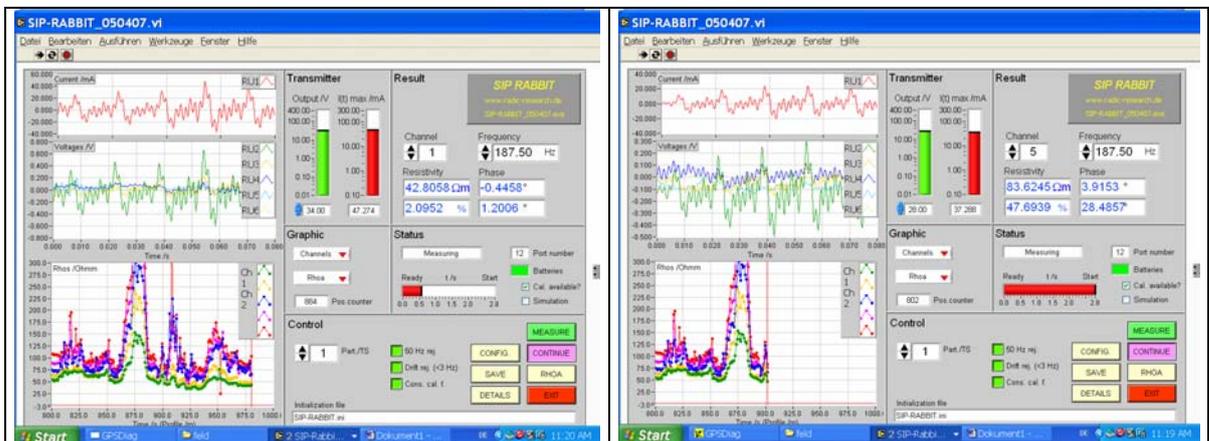


Abb. 8 Bildschirmdarstellung während des Gerätebetriebes

Die Beschränkung auf 2 V Spitzenwert an den Messkanälen führt dazu, dass in der Praxis eher geringere Werte realisiert werden. Eine Optimierung der Einspeisespannung auf ein möglichst großes Signal an den Spannungsdipolen führt bei der Messung in der Bewegung und infolge lateraler Variabilität in der Fläche öfter zu Übersteuerungen. Eine Übersteuerung bedeutet, dass der Spannungswert bei 2 V abgeschnitten wird und obwohl eine größere Spannung anliegt, mit diesen 2 V ein zu niedriger Widerstand bestimmt wird. Aus diesem Grund wäre es wünschenswert, auch die Messspannung zu speichern. Damit wäre eine Kontrolle der Übersteuerung möglich.

Die Messwerte werden aus Einzelwerten über eine Zeitreihe einer bestimmten Länge, mit einer bestimmten Samplezahl bestimmt. Die Einstellung der Kontrollparameter beeinflusst u.a. die Zahl der Messwerte pro Zeiteinheit. Nicht jede Einstellung der Kontrollparameter ist sinnvoll. Die Abb. 9 zeigt die Bildschirmlinien der Kontrollparameter. Im linken Teil sind die Einstellungen für die Quelle zu finden. Je nachdem, ob das Gerät im Feld oder im Labor eingesetzt wird, variieren der Vorwiderstand und die maximal mögliche Spannung. Im Mittelfeld sind die Parameter

für die Zeitreihen- und Frequenzanalyse zu finden, rechts wird der Batteriestatus angezeigt.

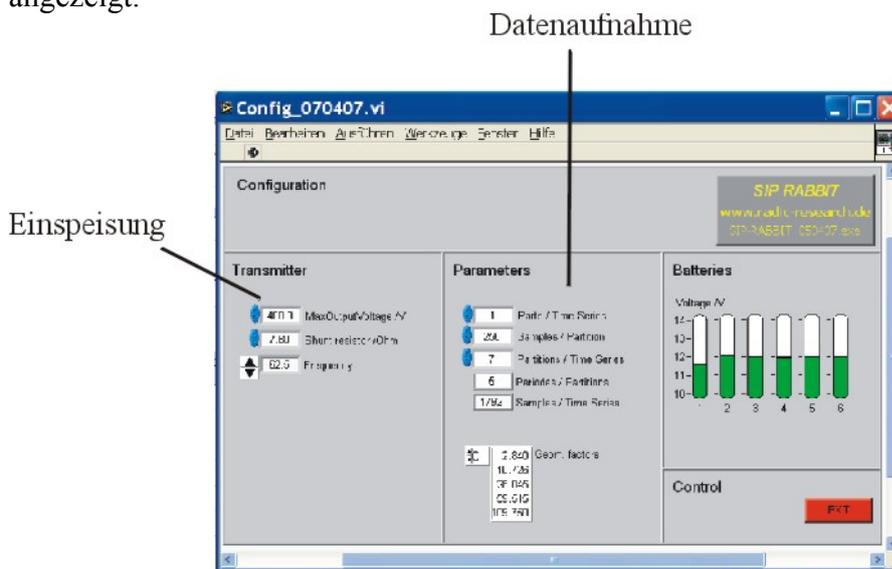


Abb. 9 Kontrollparameter für eine Rabbit-Aufzeichnung

Für die Konfiguration der Parameter sind nur Einstellungen erlaubt, bei denen eine Partition ein ganzzahliges Vielfaches der Periodenanzahl darstellt und eine ganze Zahl an Samples enthält. Eine Periode muss nicht zwingend ein ganzzahliges Vielfaches der Sampleanzahl sein. Die Datenrate liegt bei 3200 Hz. Die Zahl der Samples pro Zeitreihe (TS – time series) ergibt sich zu:

$$\text{Samples / TS} = (\text{Samples / Partitions}) * \text{Partitions}$$

Fallbeispiel:

$$\text{Anzahl der Perioden} = \frac{8192(\text{Samples / TS}) * 187.5 \text{ Hz}}{3200 \text{ Hz Datenrate}} = \frac{\text{Samples / TS} * \text{Frequenz}}{\text{Datenrate}} = 480 \text{ Perioden}$$

$$\frac{\text{Samples}}{\text{Periode}} = \text{Datenrate} * \text{Periodendauer} = \frac{\text{Datenrate}}{\text{Frequenz}} = \frac{3200}{187.5} = 17.06$$

Während die Standardeinstellung, die beim Starten des Programms geladen wird (Tab. 2 links) Lücken während der Aufzeichnung erzeugt, hat sich die rechte Einstellung als sehr stabil erwiesen und wird bei den meisten Kartierungen unter Verwendung der Standardfrequenzen 62.5, 125, 187.5 und 525.5 Hz verwendet. Es werden Messwerte in einem Zeittakt von etwa 0.9 s erzeugt (vgl. auch Tabelle 3). Je länger die Aufzeichnung läuft, umso größer wird der Abstand zwischen den Einzelmessungen. Innerhalb einer Stunde Messzeit erhöht sich der zeitliche Abstand von 0.8 auf 1.2 s. Deshalb sollte nach etwa 1 Stunde zwischengespeichert werden und die Ergebnisdatei (result.dat) neu angelegt werden.

Tabelle 2: Ausgewählte Kontrollparametereinstellungen der Rabbit

4 parts/time series	1 parts/time series
256 samples/partition	256 samples/partition
32 partitions/time series	7 partitions/time series
5 periodes/partitions	5 periodes/partitions
1792 samples/time series	1792 samples/time series

Werden die oben genannten Bedingungen nicht eingehalten, dann kann es passieren, dass eine Einstellung gewählt wird, die keine Analyse der Zeitreihen ermöglicht und somit keine Fehlerkontrolle durchgeführt werden kann. Außerdem kann es beim Speichern der Werte zu einem Zeitverzug von mehreren Sekunden kommen. Da nicht die Zeit der Messwerterfassung sondern die Zeit des Speicherns weg geschrieben wird, ist dies beim anschließenden Georeferenzieren der Daten zu berücksichtigen. Für die linke Einstellung in Tab. 2 wurde beispielsweise ein beträchtlicher Zeitversatz von 8 s beobachtet.

Die entwicklungsbedingte Unterteilung der Rabbit in die ersten drei und weitere zwei Kanäle liefert Fehlermöglichkeiten hinsichtlich des Vertauschens von Kanälen. Für Nachbauten der Apparatur sollte dies berücksichtigt werden.

Im Verlauf des Projektes erfolgte eine Nachrüstung der Software durch die Firma Radic, indem in der neuen Version der Datenstrom des GPS-Empfängers integriert ist und somit die Messwerte georeferenziert gespeichert werden können. Die Praxis hat gezeigt, dass je nach Verfügung und Anforderung unterschiedliche Geräte zur Positionsbestimmungen zum Einsatz kommen, die sich nicht nur hinsichtlich der Genauigkeit, sondern auch hinsichtlich der ‚Baude‘rate, des Datenformats etc. unterscheiden. Das nachgerüstete Programm ist allerdings in diesen Parametern auf ein bestimmtes GPS-Modell festgelegt. Die Parameter können nicht vom Nutzer ohne Eingriff in die Software abgeändert werden. Deshalb wurde häufig der bewährte Weg beschritten: Die Georeferenzierung erfolgt im Postprocessing an Hand der Zeitangaben.

### **1.3. Georeferenzierung der Messwerte**

Die Aufnahme der Positionen erfolgt über GPS, DPGS oder über ein Tachymeter. Die Datenaufzeichnung wird entweder über das Programm GPS-diagnostics (frei verfügbare Software) oder über ein in LABVIEW geschriebenes Programm realisiert. Die Positionierung der Messwerte wird über die Messzeit durchgeführt. Die Koordinaten und die Messwerte werden einer Computerzeit zugeordnet und später über diese Zeit zusammengeführt. Das Zusammenführen der beiden Datenfiles erfolgt über selbst entwickelte Software. Derzeit existieren zwei Lösungen – basierend auf PASCAL und auf LABVIEW.

Die Positionierung für Anwendungen in der Landwirtschaft erfolgt mit GPS-Systemen, die entweder im m- oder im dm-Bereich liegen. Es besteht zunehmend der Bedarf, einerseits eine genaue Positionierung im Gelände zu realisieren und andererseits Karten der elektrischen Bodenleitfähigkeit mit den Informationen eines digitalen Geländemodells (Attribute aus dem Höhenmodell) zu kombinieren; dies trägt wesentlich zur Objektivierung der Interpretation der Leitfähigkeitsmessdaten bei. Wenn jedoch die Genauigkeit eines einfachen GPS-Empfängers in der Horizontalen (x-y-Achse) bereits im Meterbereich liegt, ist die Genauigkeit in der Höhen- (z-) Achse annähernd im 10 m Bereich anzusetzen. Für derartige Untersuchungen ist die Nutzung eines GPS mindestens im dm-Bereich zwingend erforderlich. Aus diesem Grund wurde im Rahmen des Projektes ein Trimble-GPS-System im dm-Genauigkeitsbereich angeschafft (EZ-Guide 500 – Vertrieb durch AgriCon). Es hat

sich als sehr hilfreich erwiesen, die Positionierung mit Hilfe eines Trimble-Parallelfahrersystems vorzunehmen, wie es für die Landwirtschaft angeboten wird. Das System arbeitet mit einem EGNOS-Korrektursignal und erreicht damit in der Horizontalen Genauigkeiten von etwa 30-40 cm. Darüber hinaus erleichtert die mitgelieferte Software das Einhalten paralleler Fahrgassen, was für die Feldarbeit hilfreich und für eine regelmäßige Messpunktverteilung im Gelände sinnvoll ist. Für landwirtschaftliche Nutzflächen wird in der Regel diese GPS-Genauigkeit ausreichen. Die Positionsgenauigkeit von GPS-Systemen unterscheidet sich für Standmessungen und Messungen in der Bewegung. Während bei der Messung entlang von Fahrgassen zusätzliche Filter wirken, schwanken Standmessungen um eine Ortskoordinate ohne Vorzugsrichtung. Um die Genauigkeit des neuen Systems zu überprüfen, wurden wiederholt ortsfeste Aufzeichnungen des GPS-Signals über längere Zeiträume durchgeführt. Die Abb. 10 zeigt ein Beispiel. Es ist ersichtlich, dass die Positionsbestimmungen um einen Mittelwert schwanken und es kann eine mittlere Abweichung von etwa  $\pm 0.5$  m abgelesen werden.

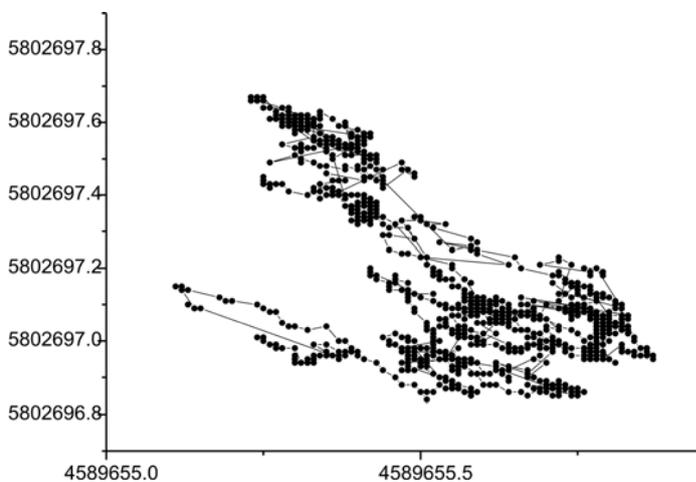


Abb. 10 Aufzeichnung des GPS-Signals in Gauss-Krüger-Koordinaten aufgenommen mit dem Parallelfahrersystem von Trimble (dGPS mit EGNOS-Korrektursignal)

Da das System möglicherweise auch für andere Disziplinen wie etwa eine archäologische Prospektion eingesetzt werden soll, ist eine mögliche Positionierung auch im cm-Bereich anzustreben. Dies kann entweder über ein hochgenaues DGPS-System oder über ein Tachymeter mit Prismenverfolgung realisiert werden. Auf den archäologischen Testflächen (Kalbe, Lossow und Paretz) wurde ein Tachymeter eingesetzt. Das Tachymeter verfolgt das Prisma auf dem Messfahrzeug, bestimmt dessen Koordinaten und übergibt über ein Funkmodem die berechneten Relativkoordinaten an den Computer des Messfahrzeuges. Verwendet wird ein GPS-ähnliches Format, so dass alle weiteren Bearbeitungsschritte analog zur GPS-Aufzeichnung realisiert werden können. Die Abb. 11 veranschaulicht das Prinzip. Näheres zu dieser Art der Positionierung findet man bei Böniger und Tronicke, 2009.



Abb. 11 Messwertpositionierung über Tachymeter

Die Erfahrungen haben gelehrt, dass der Anschluss unterschiedlicher GPS-Empfänger an die USB- bzw. serielle Schnittstelle dazu führen kann, dass während des Betriebes der Computer die GPS-Maus falsch bzw. nicht erkennt und keine oder falsche Daten aufzeichnet. Vor der Befahrung ist sicherzustellen, dass die Zeitbasis für die Leitfähigkeitsdaten mit der Zeitbasis der Positionsdaten übereinstimmt. Wenn erforderlich, ist der Abgleich von Computer- und Absolutzeit durchzuführen. Für die Synchronisation der Zeitbasis mehrere PCs wurde eine entsprechende Soft- und Hardware angeschafft, die die Computeruhren auf die Absolutzeit des Zeitzeichensenders in Frankfurt/Main abstimmt (DCF-Signal).

Auch wenn Messwerte und Positionen zeitgleich erfasst und gespeichert werden, so sind im Postprocessing mindestens zwei Korrekturen vorzunehmen:

1. kanalabhängige Korrektur des Versatzes zwischen dem Positionsempfänger und den Elektrodenpositionen
2. Korrektur eines möglichen Zeitversatzes beim Speichern der Werte

Letztere sind u.a. abhängig von der gewählten Gerätekonfiguration und der eingesetzten Rechentechnik, d.h. sie müssen im Ernstfall für jede neue Konfiguration bestimmt und getestet werden. Aus diesem Grund ist es sehr sinnvoll, während der Feldarbeit mindestens eine Fahrgasse in zwei entgegengesetzten Richtungen zu messen, um daraus die notwendigen Shiftparameter berechnen zu können.

## 2. Testmessungen zur Optimierung der Geräteparameter

### 2.1. Frequenzspektren

Zur Optimierung der vier Vorzugsfrequenzen wurden an verschiedenen Standorten Spektren im möglichen Frequenzbereich aufgenommen. Dazu erfolgten sowohl ortsfeste Messungen als auch Wiederholungsmessungen entlang von Profilen. Die ortsfesten Messungen sind eher geeignet, Aussagen zur Datenqualität in Abhängigkeit von der Frequenz zu liefern, da Einspeise- und Messbedingungen über den Zeitraum der Messung als konstant angekommen werden können. Alle ortsfest aufgenommen Spektren zeigen einen ähnlichen Grundverlauf: Für Frequenzen kleiner als 100 Hz sind die Messwerte für Widerstand  $\rho$  und Phase  $\varphi$  nahezu konstant. Je nach Übergangswiderständen werden für die höheren Frequenzen deutliche Änderungen in beiden Werten beobachtet. In der Abb. 12 sind je ein Widerstands- und ein Phasenspektrum für a) einen niederohmigen Lehm- und b) einen hochohmigen Sandboden als Boxplot gezeigt. Beide Beispiele stammen aus Trebbin. Neben dem spektralen Verlauf sind die Messungenauigkeiten abzulesen. Jeder Wert ist aus etwa 100 Einzelwerten bestimmt. Es zeigt sich, dass für die sandigen Böden mit zunehmender Frequenz sowohl die RC-Effekte als auch die Ungenauigkeiten größer werden. Für die gutleitfähigen Böden sind sowohl frequenzabhängige Messwert-Änderungen als auch die Messfehler relativ gering.

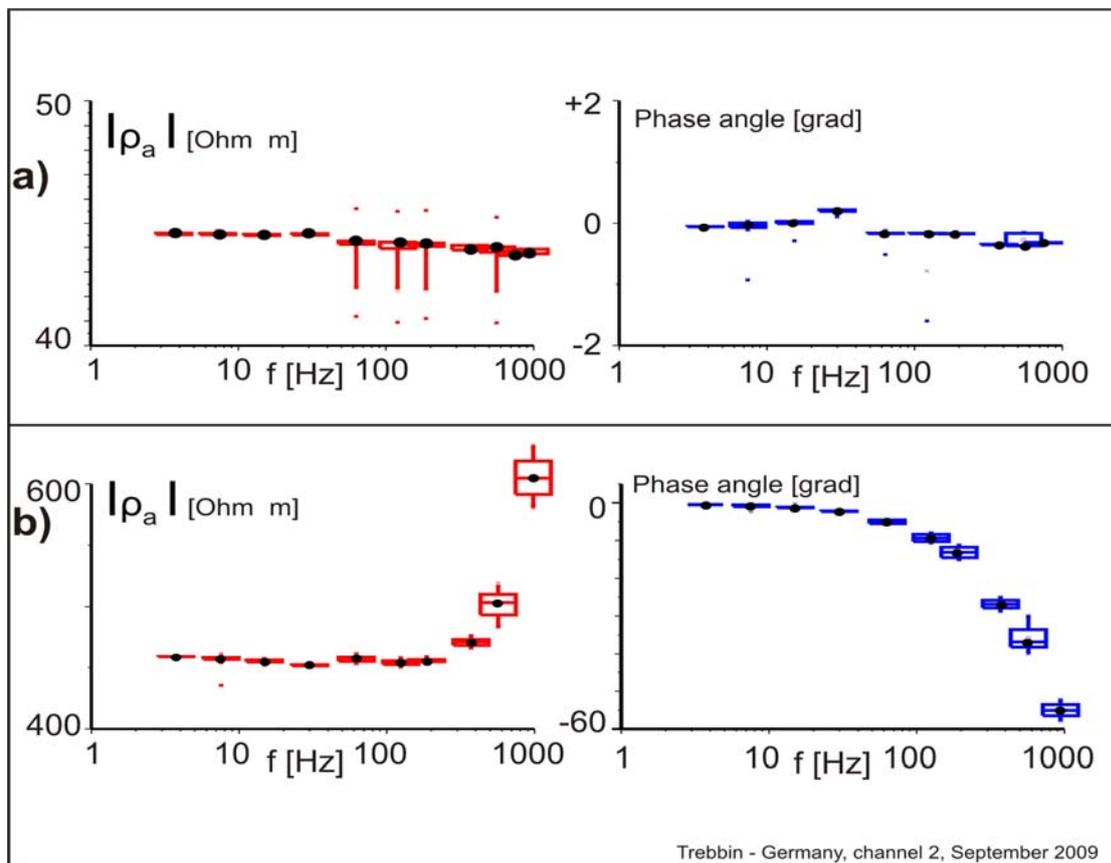


Abb. 12 Widerstands- und Phasenspektrum a) für einen Lehm Boden und b) für einen Sandboden

Auch wenn für hohe Frequenzen im sandigen Boden deutliche Änderungen in den Phasenwinkeln beobachtet werden, so zeigen sich in den Widerstandswerten für Frequenzen bis ~ 600 Hz kaum Unterschiede, d.h. es können alle Frequenzen zwischen 1 und 600 Hz betrachtet werden, ohne zwangsläufig elektromagnetische Effekte berücksichtigen zu müssen. Ähnliche Aussagen sind aus dem Vergleich aller Leitfähigkeitskarten abzuleiten.

Die Messungen in der Bewegung haben gezeigt, dass die einzelnen Frequenzen Daten mit einem unterschiedlichen Rauschen erzeugen. Die Optimierung aller Informationen hat zu den in der Standardkartierung ausgewählten Frequenzen von 62.5, 125, 187.5 und 562.5 Hz geführt.

## 2.2. Kontrollparameter

Im Abschnitt 1.2. wurde bereits auf die Kontrollparameter der Rabbit-Apparatur hingewiesen. Die Optimierung der Messungen hatte zum Ziel:

- möglichst kleines Zeitintervall zwischen den Einzelmessungen,
- Statistische Fehlerberechnung innerhalb der Zeitreihenfenster
- Verwendung der vier optimierten Signalfrequenzen
- zeitnahe Speichern der Daten
- stabile Messwerte

In Tabelle 3 sind Kombinationen von Kontrollparametern und resultierende Messwerterfassungsraten gegenübergestellt. Die Ergebnisse stammen aus Tests im Labor unter Verwendung der Kalibrierbox und aus Geländemessungen. Aus diesen Tests resultieren die Standardeinstellungen, die als Einstellung 4 in der Tabelle enthalten sind.

Tabelle 3: Optimierung der Parametereinstellungen für die Rabbit-Apparatur

	<b>Einstellung</b>	<b>Messwertrate</b>
<b>1</b>	4 Parts/Time Serie, 256 Samples/Partition 32 Partition/TS, 5 Periods/Partition, 8192 Samples/TS	2.8 s
<b>2</b>	4 Parts/Time Serie, 256 Samples/Partition 1 Partition/TS, 5 Periods/Partition, 256 Samples/TS	0.08s Kein Messwert
<b>3</b>	1 Parts/Time Serie, 256 Samples/Partition 1Partition/TS, 5 Periods/Partition, 256 Samples/TS	0.45 s Sprünge 12-13 s
<b>4</b>	1 Parts/Time Serie, 256 Samples/Partition 7 Partition/TS, 5 Periods/Partition, 1792 Samples/TS	0.88s
<b>5</b>	1 Parts/Time Serie, 256 Samples/Partition 16 Partition/TS, 5 Periods/Partition, 4096 Samples/TS	1.59 s
<b>6</b>	1 Parts/Time Serie, 256 Samples/Partition 7 Partition/TS, 5 Periods/Partition, 1792 Samples/TS + parallele GPS-Aufzeichnung über GPS-Diagnostic	0.9 s

### 3. Messungen im Lehr- und Versuchsgut Köllitsch (Sachsen)

#### 3.1. Bodenkarten, Bodeninformationen für Köllitsch

Die Abb. 13 zeigt einen Übersichtsplan über die Schläge des Lehr- und Versuchsgutes. Die Schlagkarte wurde von der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft übernommen.

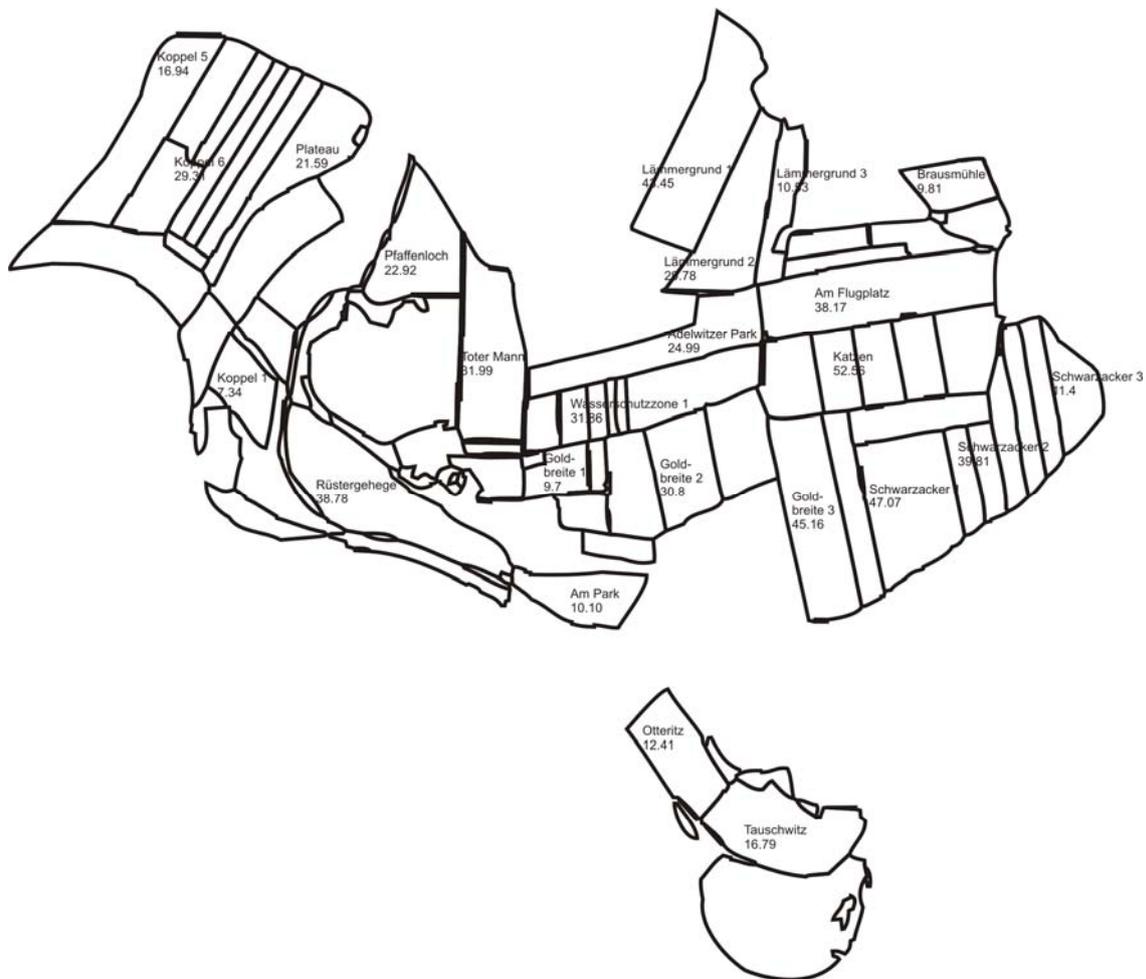


Abb. 13 Schlagkarte des Lehr- und Versuchsgutes Köllitsch

Die Datenlage hinsichtlich Bodenkarten, digitalisierter Reichsbodenschätzung etc. ist von Bundesland zu Bundesland sehr unterschiedlich. Auch aus diesem Grund hat es sich als sehr sinnvoll erwiesen, Betriebe aus zwei unterschiedlichen Bundesländern im Projekt zu haben. Für Sachsen ist die Reichsbodenschätzung bisher nur für erosionsgefährdete Gebiete aufgearbeitet worden. Dazu zählt Köllitsch nicht. Aus diesem Grund ist es schwer, entsprechende Daten für Köllitsch zu besorgen. Für ausgewählte Schläge, die im Fokus früherer Untersuchungen der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft standen, liegen die Informationen der Reichsbodenschätzung vor. Ponitka und Pöbneck geben 2006 einen Überblick über vorhandene Bodeninformationen für ausgewählte Schläge:

„ Das sächsische Einzugsgebiet der Elbe beträgt 4 030 km<sup>2</sup>. Das Holozän (Postglazial) zeigt sich im Elbegebiet durch Auenlehm, Auenkies und -sand. So sind im Untersuchungsgebiet durchweg fluviatile Ablagerungen zu finden.

Ein schneller Wechsel der Transportkraft in Flusstälern lässt Wechselagerungen zwischen Tonen, Schluffen, Sanden und Kiesen entstehen. Die mäandrierende Elbe bildet häufig Altwässer, die durch tonreiche Auensedimente verfüllt sind oder noch als Restgewässer/Altarme die Auenlehmebene untergliedern. Hier und da ragen im Auenlehm Sandrücken als flache Schwellen aus dem Untergrund auf, die durch Laufverlegungen des Stromes entstanden sind. Der Schlag „Am Flugplatz“, eine der näher untersuchten Flächen wird deutlich von einer durch Auenlehm verlandeten Altarmstruktur geprägt.

Wir finden in Köllitsch fruchtbare Böden vor. Die mittleren Ackerzahlen für drei ausgewählte Schläge belegen dies:

Am Park – 13.7 ha – mittlere Ackerzahl 62

Am Flugplatz – 39.6 ha – mittlere Ackerzahl 67

Schwarzacker 34.1 ha – mittlere Ackerzahlen zwischen 68 und 77

Bisherige Untersuchungen in Köllitsch widmen sich häufig dem Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und variablen Nährstoffverteilungen und Erträgen. Es sind kaum Bodenanalysen hinsichtlich der stabileren Korngrößenverteilung verfügbar. Die bei Schliephake (2005) zu findenden Analysen für die Schläge Lämmergrund 2 und Am Park sind hier in Tabelle 4 zusammengefasst: Die Tongehalte liegen zwischen 15 und 30 %. Auffällig ist der mit zunehmender Tiefe steigende Sandgehalt. Die Tongehalte nehmen mit der Tiefe ab.

Tabelle 4 Bodenanalysen für die Schläge „Lämmergrund“ und „Am Park“ nach Schliephake (2005)

<b>„Lämmergrund 2“</b>				
<b>Bodentiefe</b>	<b>Sand %</b>	<b>Schluff %</b>	<b>Ton %</b>	<b>Humus %</b>
0 – 30 cm	22,6	46,5	30,9	2,1
	22,7	46,8	30,5	2,1
	54,8	28,4	16,8	2,0
30 – 60 cm	19,7	45,8	34,5	1,4
	20,0	42,5	27,5	1,5
	76,6	13,4	10,0	0,9
60 – 100 cm	12,5	50,6	36,9	0,8
	30,8	34,5	34,9	0,7
	91,6	6,1	2,3	0,4
<b>„Am Park“</b>				
<b>Bodentiefe</b>	<b>Sand %</b>	<b>Schluff %</b>	<b>Ton %</b>	<b>Humus %</b>
0-30 cm	23,9	54,1	22,0	2,0
	31,7	44,1	24,2	1,6
	36,8	43,6	19,6	2,0
30 – 60 cm	12,5	64,7	22,8	1,2
	28,4	49,5	22,1	1,5
	34,1	42,4	23,5	1,0
60 – 100 cm	20,9	61,2	17,9	0,7
	59,7	23,4	16,9	0,7
	65,8	21,9	12,3	0,7

Für die Schläge wurden jeweils 3 Zonen gewählt, wobei die Unterteilung entsprechend der Leitfähigkeitswerte vorgenommen wurde.



Brandenburg werden viele amtliche Karten in Sachsen im Gauß-Krüger-Koordinatensystem verwaltet, so dass für den Betrieb Köllitsch die Daten entweder im WGS-84-System (originales Messsystem des GPS-Empfängers) oder im GK-System angegeben werden.

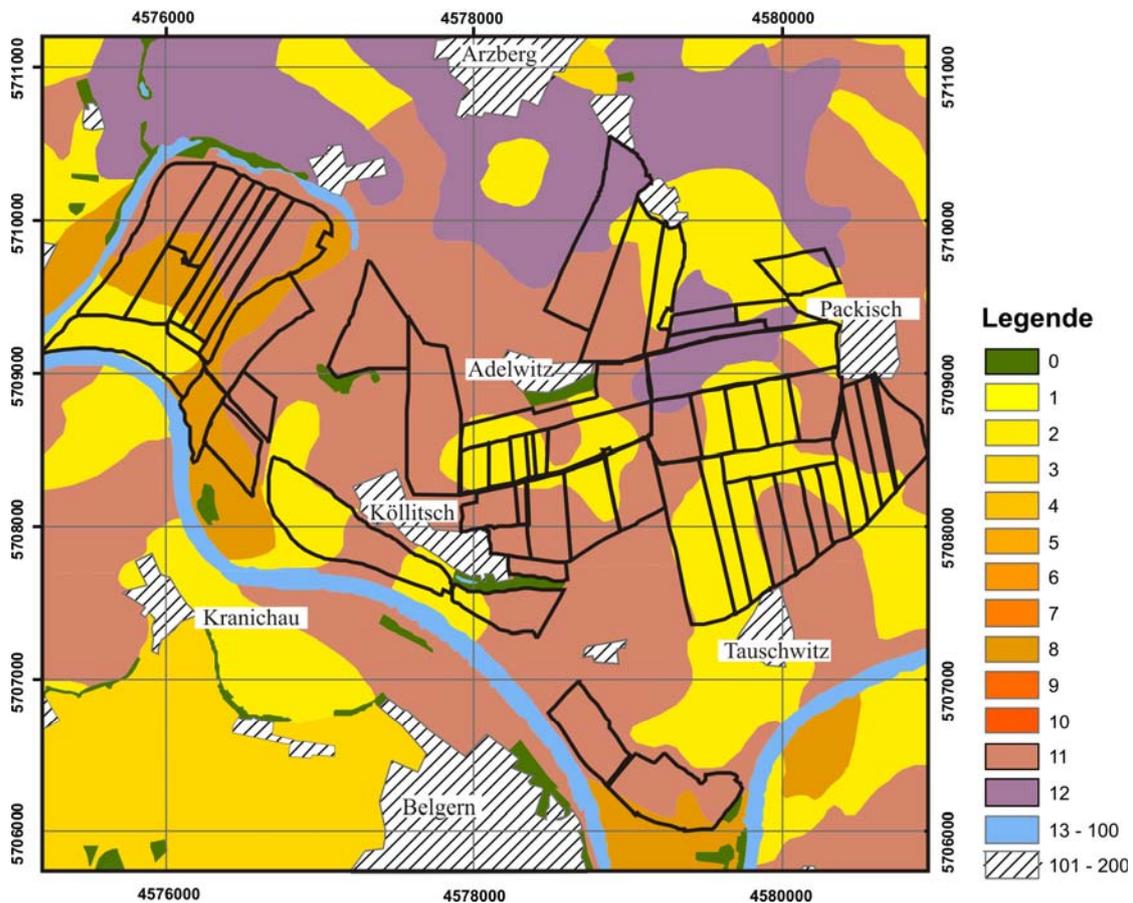


Abb. 16 Auszug aus der Konzeptbodenkarte für die Region Köllitsch mit überlagerter Schlagkarte des Lehr- und Versuchsgutes Köllitsch (Darstellung auf der Grundlage von Daten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.)

Tabelle 5: Farbabstufung in der bearbeiteten Konzeptbodenkarte in Abb. 16

Bodenart	Klasse
ss	1
ls,6dm/ss;ls,5dm/ss(G)2	2
ls(G)1,4dm/ss(G)1; ss(G)1;	3
ls(G)2,4dm/sl(G)2; ls(G)1,4dm/ls(G)2; ls(G)2,4dm/ss(G)2	4
ls(G)2,5dm/sl(G)2; ls(G)1,5dm/ls(G)2; us(G)2,5dm/sl(G)2	5
ls(G)2,5dm/ss(G)2; us(G)2,5dm/ss(G)2	6
ls(G)2,4dm/ss(G)2; us(G)2,4dm/ss(G)2	7
ls; ls(G)2	8
ll; ll,6dm/ss; tu;	9
ls,5dm/lt; us,5dm/lt	10
ll; tu	11
lt;	12
Gewässer	13-100
Ortschaften	101-200

### 3.2. Luftbildaufnahmen

Neben den frei verfügbaren Luftbildaufnahmen aus Google-Earth standen Luftbildaufnahmen des Landes-Vermessungs-Amtes Sachsen zur Verfügung. Eine Gegenüberstellung zweier Ausschnitte soll die in Abhängigkeit vom Aufnahmezeitpunkt unterschiedliche Aussagekraft der Luftbilder untermauern. Je nach Witterung, Pflanzenart und Jahreszeit sind Bewuchsmerkmale unterschiedlich ausgebildet, so dass Strukturen nur zeitweise deutlich zu erkennen sind. Dieses Zeitfenster ist teilweise nur sehr klein, so dass Luftbildaufnahmen eher geeignet sind, den momentanen Pflanzenstand abzubilden sich aber weniger für die Abbildung der Bodenstrukturen eignen.



Abb. 17 Gegenüberstellung zweier Luftbildaufnahmen für einen Kartenausschnitt für den Betrieb Köllitsch (links: Aufnahme aus Google-Earth, Rechts: Aufnahme des Sächsischen Landes-Vermessungs-Amtes)

Der Schlag Flugplatz in der Bildmitte nimmt auf Grund seiner vielfältig vorhandenen Datenebenen eine zentrale Stellung ein. Man erkennt im rechten Luftbild sehr gut die halbkreisförmige Struktur, die einem mit tonigem Material verfüllten Altarm der Elbe entspricht, und die in sehr vielen Untersuchungen zu Tage tritt.

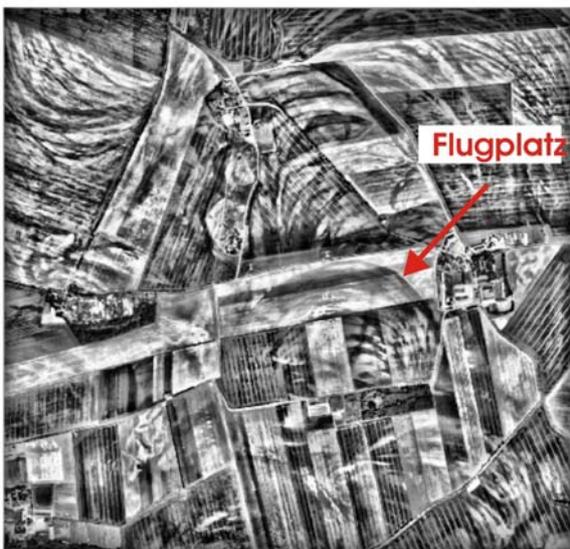


Abb. 18 bearbeiteter Luftbildausschnitt aus Abb. 17 (rechts)

Um die in den Luftbildern vorhandenen Strukturen sichtbar zu machen und zu betonen, wurden die Luftaufnahmen mit einer Bildbearbeitungssoftware in ihren Kontrasten verstärkt. Das Ergebnis für den obigen Kartenausschnitt ist in Abb. 18 gezeigt.

### 3.3. Vorhandene Leitfähigkeitsdaten

Für den Betrieb in Köllitsch liegen umfangreiche Leitfähigkeitskartierungen aus früheren Jahren vor. Ein Vergleich mit den vorhandenen Daten macht den Betrieb u.a. sehr interessant. Die Daten aus diesen bereits existierenden Arbeiten wurden zusammengetragen und sind in Tab. 6 aufgelistet. Die Feldarbeiten wurden einerseits mit dem rollenden Elektrodensystem VERIS-3100 (Veris technologies, USA) und andererseits mit dem elektromagnetisch arbeitenden EM38 (Geonics, Canada) realisiert. Ein Teil der Untersuchungen wurde 2006 von Ponitka und Pöbneck beschrieben. Schliephake und Albert (2005) zeigen Ergebnisse einer teilflächenspezifischen Düngung, die u.a. auf Leitfähigkeitskarten aufbauen.

Tabelle 6: Bereits existierende Leitfähigkeitsdaten für den Betrieb Köllitsch

VERIS-3100		EM38	
Schlag	Fläche [ha]	Schlag	Fläche [ha]
Koppel 1	7.3		
		Koppel 5	17
Koppel 6	~7	Koppel 6	29
Toter Mann	32		
Adelwitzer Park	25	Adelwitzer Park	25
Am Flugplatz	38	Am Flugplatz	28
Katzen	~ 10	Katzen	53
Goldbreite 3	~ 30	Goldbreite 3	45
Goldbreite 2	30	Goldbreite 2	> 31
Am Park	10	Am Park	10
Pfaffenloch	23		
Lämmergrund	41	Lämmergrund 1	43
		Plateau	22
		Rüstergehege	~39
		Schwarzacker 1	47
		Schwarzacker 2	~30
		Schwarzacker 3	11
Summe: ~ 245 ha		Summe: ~ 430 ha	

In den Abb. 19 und 20 sind einige Ergebnisse dieser früheren Leitfähigkeitskartierungen gezeigt. Abb. 19 zeigt die Ergebnisse der EM38-Kartierungen. Mit diesem Gerät wird im vertikalen Dipolmodus integral ein Tiefenbereich von etwa 1.5 m erfasst, wobei jede Tiefe mit einem eigenen Gewicht in den Gesamtwert eingeht. Die Daten sind teilweise im Auftrag der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (vermutlich durch die Firma Agricon) ermittelt

worden und stammen teilweise aus eigenen Arbeiten im Jahr 2002. Auf Grund der unterschiedlichen Leitfähigkeitsniveaus wurde keine einheitliche Farbskala gewählt, sondern die Werte wurden für jeden Einzelschlag entsprechend skaliert.

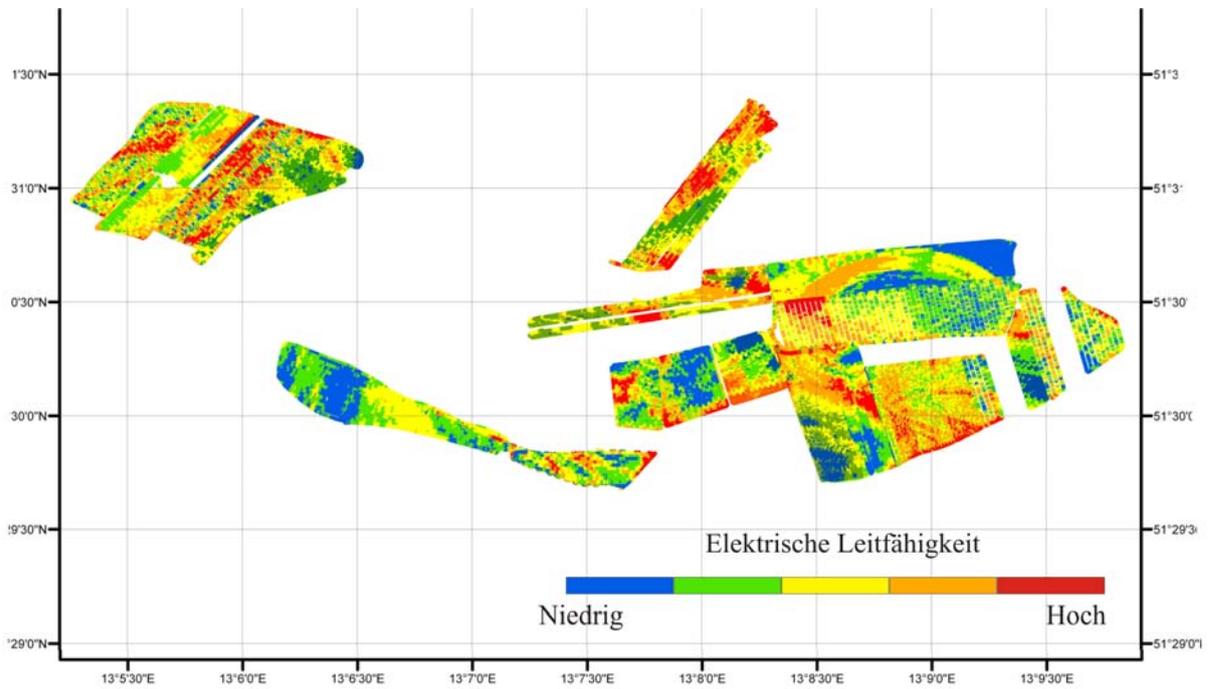


Abb. 19 Leitfähigkeitskarten ermittelt mit dem EM38

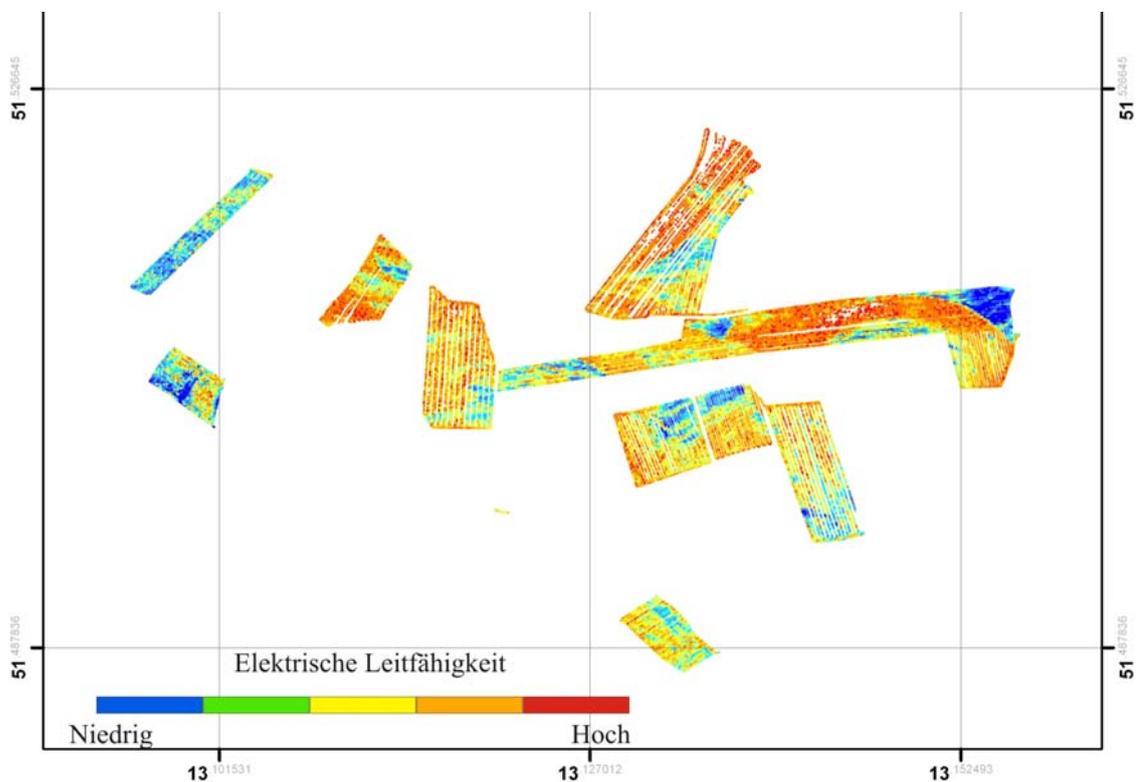


Abb. 20 Leitfähigkeitskarten ermittelt mit dem VERIS-3100

Mit dem VERIS-3100 kann man Leitfähigkeitsdaten für zwei Tiefenbereiche ermitteln. Stellvertretend sind in Abb. 20 die Ergebnisse für den insgesamt erfassten Tiefenbereich von max. 90 cm dargestellt. Ein Großteil der Daten wurde durch die Kollegen Schmieder und Greifenhagen während ihrer Tätigkeit an der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (teilweise in Zusammenarbeit mit der Universität Potsdam) eingesammelt

Auch das aus Frankreich kommende rollende Elektrodensystem ARP03 wurde auf einem Schlag in Köllitsch eingesetzt. 2003 erfolgte die Kartierung des Schlages ‚Am Park‘ im Auftrag der Universität Potsdam durch die Firma Geocarta (M. Dabas, Frankreich). Dieses Gerät kartiert in drei Tiefenstufen. Aus der Abb. 21 wird ersichtlich, dass die Leitfähigkeit mit der Tiefe abnimmt, was auf eine Sandunterlage schließen lässt. Dies wurde u.a. durch einen elektrischen Tiefenschnitt und ergänzende Bohrungen bestätigt.

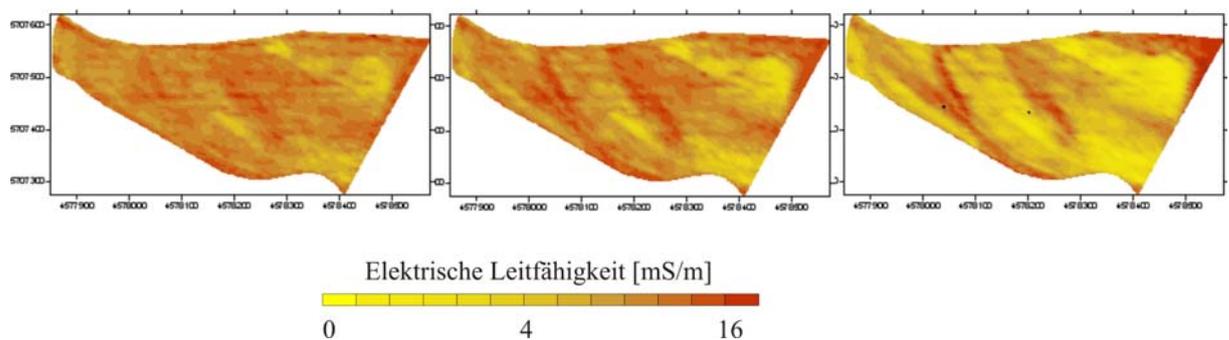


Abb. 21 Leitfähigkeitskarten für den Schlag ‚Am Park‘ ermittelt mit dem System ARP03

### 3.4. Aktivitäten mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS

Es können im Folgenden nicht jeweils alle 40 Parameter der einzelnen Flächen (aufgelistet in Tabelle 7) vorgestellt und diskutiert werden. Vielmehr wird ein Überblick über die erfolgten Arbeiten gegeben, es werden ausgewählte Flächen vorgestellt und deren Ergebnisse diskutiert.

Tabelle 7: Flächenkartierungen in Köllitsch mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS  
(Angabe der Flächengröße in ha)

<b>Frühjahr 2008</b>		<b>Herbst 2008</b>	
Schlag	Fläche	Schlag	Fläche
Am Park	10	Plateau	22
Koppel 1	7	Koppel 6	~ 10
		Pfaffenloch	23
		Rüstergehege	39
		Koppel 6	~10
		Am Flugplatz	~25
		Adelwitzer Park	25
		Toter Mann	32
		Goldbreite 3	~ 30
<b>Frühjahr 2009</b>		<b>Herbst 2009</b>	
Schlag	Fläche	Schlag	Fläche
Am Flugplatz	38	F19 Katzen 1	9
Pfaffenloch	23	F20 Katzen 2	8.8
Plateau	22	F21 Katzen 3	8.3
Wiese	~20	F22 Katzen 4	12.6
Am Park	10	F23 Katzen 5	11.8
Goldbreite	~ 50	Intensivbeprobung Pfaffenloch	23

Die Tabelle 7 enthält eine Übersicht über die während des Projektes kartierten Flächen bzw. Wiederholungskartierungen in Köllitsch. Es hat sich als verhältnismäßig schwer herausgestellt, die Arbeiten in den Betriebsablauf in Köllitsch zu integrieren. Auf Grund der räumlichen Entfernung, ungünstiger Witterungsbedingungen und der vielen in Köllitsch stattfindenden Feldversuche war das für Feldarbeiten zur Verfügung stehende Zeitfenster relativ klein. Köllitsch hat sehr lehmige Böden, die nach Niederschlägen schwer befahrbar sind (sogenannte Minutenböden).

Die Abb. 22 zeigt einen Überblick der mit dem GEOPHILUS kartierten Schläge in Köllitsch. Die in den originalen Felddaten (Abb. 22) ersichtlichen sog. Fischgrätenstrukturen resultieren aus einem Versatz zwischen der GPS-Antenne und der wirklichen Lage der Messungen (Elektrodenmittelpunkt). Das Anbringen der notwendigen Korrekturen erfordert eine vorherige Transformation in ein rechtwinkliges, metrisches Koordinatensystem – z.B: Gauß-Krüger. Für die Darstellung der Rohdaten ist eine einheitliche Farbskala für alle Felder gewählt worden. Es zeigt sich, dass sich die zu unterschiedlichen Zeitpunkten gemessenen Schläge auf einem ungleichen Widerstandsniveau befinden, was überwiegend auf

einen unterschiedlichen Feuchtezustand des Bodens zurückzuführen ist. Sowohl eigene Feld- als auch Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass die Bodenfeuchte einen entscheidenden Einfluss auf das Niveau der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens besitzt. Folglich ergibt sich die Notwendigkeit, für eine optimierte Darstellung des Gesamtbetriebes Karten der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens auf einen Referenzfeuchtwert zu normieren. Dazu ist jedoch eine effiziente Erfassung der flächenhaften Verteilung Bodenfeuchte erforderlich – z.B. mittels eines mobilen, GPS-gekoppelten TDR-Messsystems.

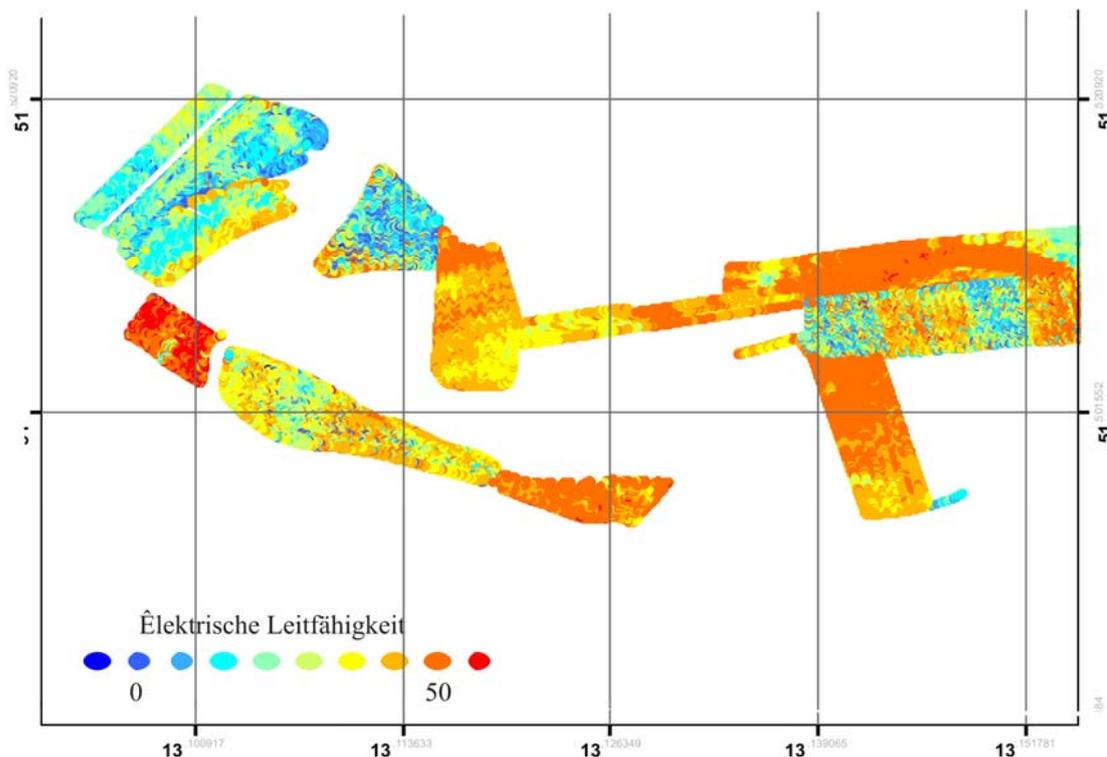


Abb. 22 Leitfähigkeitskarten für Köllitsch – gewonnen mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS

Wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, existieren für verschiedene Schläge Wiederholungskartierungen mit den Zielen:

1. Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Daten
2. Untersuchungen zur Datenqualität in Abhängigkeit von der Bodenbeschaffenheit
3. Untersuchungen zur Abhängigkeit von der Bodenfeuchte

Im Folgenden werden zwei Extrembeispiele für derartige Betrachtungen herausgepickt. Zum einen handelt es sich um eine wiederholte Kartierung des Schlages Goldbreite (Abb.23) und zum anderen werden Wiederholungskartierungen für den Schlag Pfaffenloch (Abb. 24) gezeigt. Gezeigt sind hier jeweils die Leitfähigkeitsverteilungen für den Kanal 1 gemessen mit einer Frequenz von 6.25 Hz. Während die Messungen für den Schlag Goldbreite mit einer einheitlichen Farbskala gezeigt werden können, sind die Daten für den Schlag Pfaffenloch mit unterschiedlichen Farbskalen dargestellt. Für den Schlag Goldbreite kommen die Strukturen in allen Kartierungen unabhängig vom Leitfähigkeitsniveau zum Ausdruck, die Absolutwerte können sich auf Grund der Bodenfeuchte unterscheiden. Die Datenqualität ist in jedem Fall sehr gut.

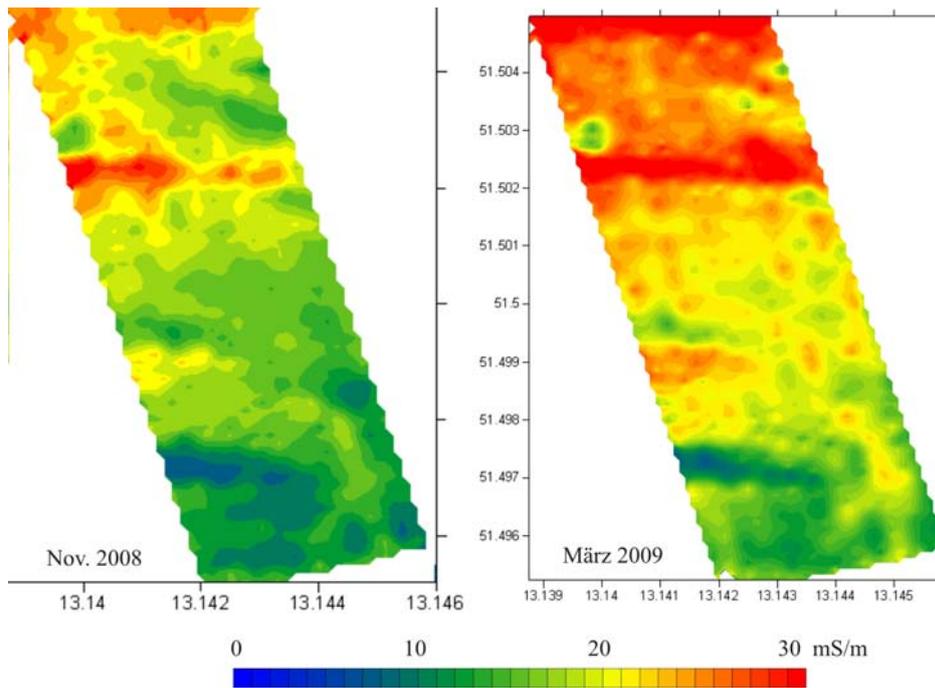


Abb. 23 Wiederholungskartierung für den Schlag Goldbreite  
a) Herbst 2008 und b) Frühjahr 2009

Die Kartierung auf Schlag Pfaffenloch im Sommer 2008 hätte eigentlich auf Grund des trockenen, harten Bodens abgebrochen werden müssen. Die unzureichende Datenqualität wird in Abb. 24A demonstriert. Zwar sind die Grundstrukturen auch hier zu erkennen: (niedrige Widerstände in der SW-Ecke des Schlages) und höhere Widerstände im übrigen Feld, jedoch fällt auf, dass das Feld mit zahlreichen Lücken und kleinräumigen Anomalien (hier nur Rauschen) charakterisiert werden muß. Bereits während der Messung ist aufgefallen, dass immer wieder auf Grund einer mangelnden Ankopplung negative Widerstandswerte gemessen werden. Dies ist ein sicheres Abbruchkriterium. Es hat sich hier deutlich gezeigt, dass die ein gewisses Grundverständnis für die Datenaufnahme nötig ist, anderenfalls derartig verrauschte Daten produziert werden.

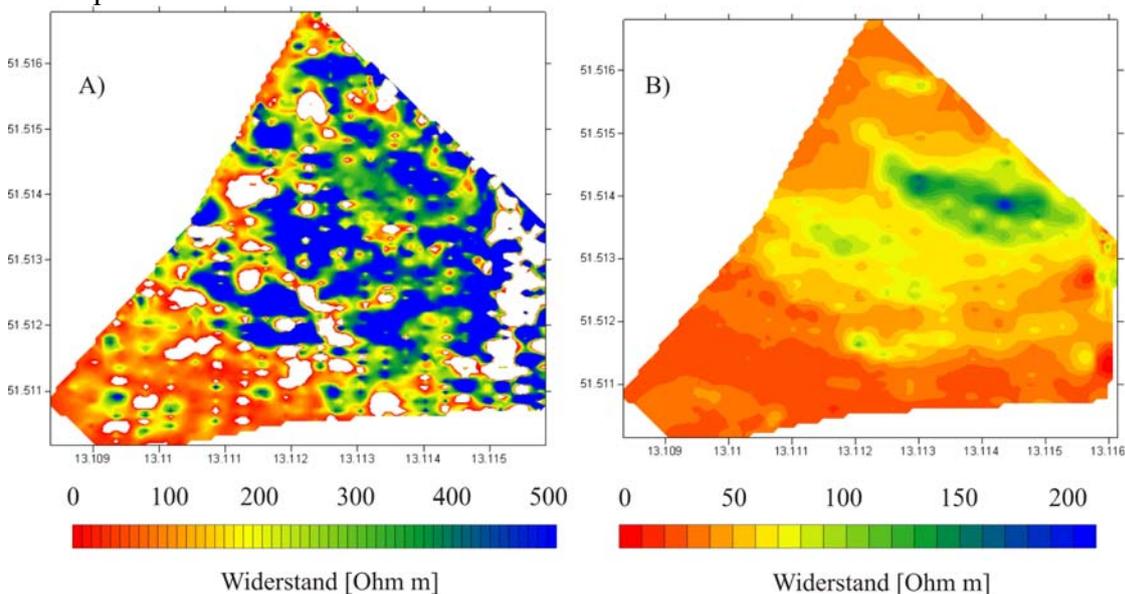


Abb. 24 Wiederholungskartierung für den Schlag Pfaffenloch  
a) Sommer 2008 und b) Frühjahr 2009

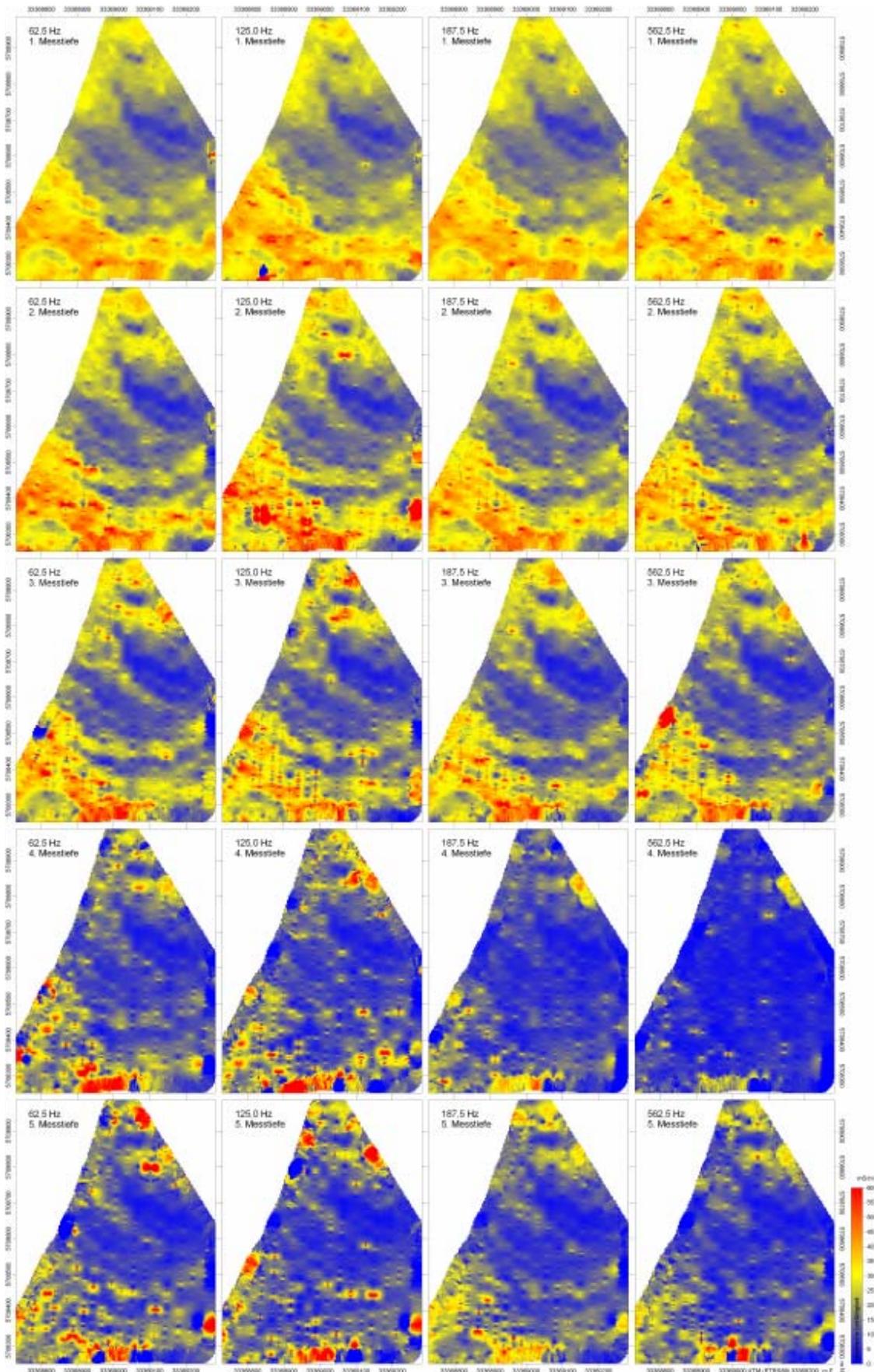


Abb. 25 Leitfähigkeitsverteilung für den Schlag Pfaffenloch – Frühjahr 2009  
Für die Kanäle 1-5 (von oben nach unten) sind von links nach rechts alle vier Frequenzen dargestellt (Diplomarbeit T. Meschzan, 2010).

Um die Möglichkeiten der Schichterkennung zu demonstrieren, sind die Leitfähigkeitskarten aller fünf Kanäle für drei Schläge (Pfaffenloch in der Abb. 25, Toter Mann in der Abb. 26 und Flugplatz in der Abb. 27) gegenübergestellt. Alle fünf Tiefenstufen sind mit einer einheitlichen Farbskala versehen. Während für den Schlag Toter Mann die originalen Messwertverteilungen zu erkennen sind, sind die Daten für den Schlag Flugplatz interpoliert. Für das Pfaffenloch sind alle Frequenzen einbezogen. Es zeigen sich nur geringfügige Unterschiede in den Strukturen. Das Signal-Rausch-Verhältnis ist für die Frequenz von 187.5 Hz für alle Kanäle optimal.

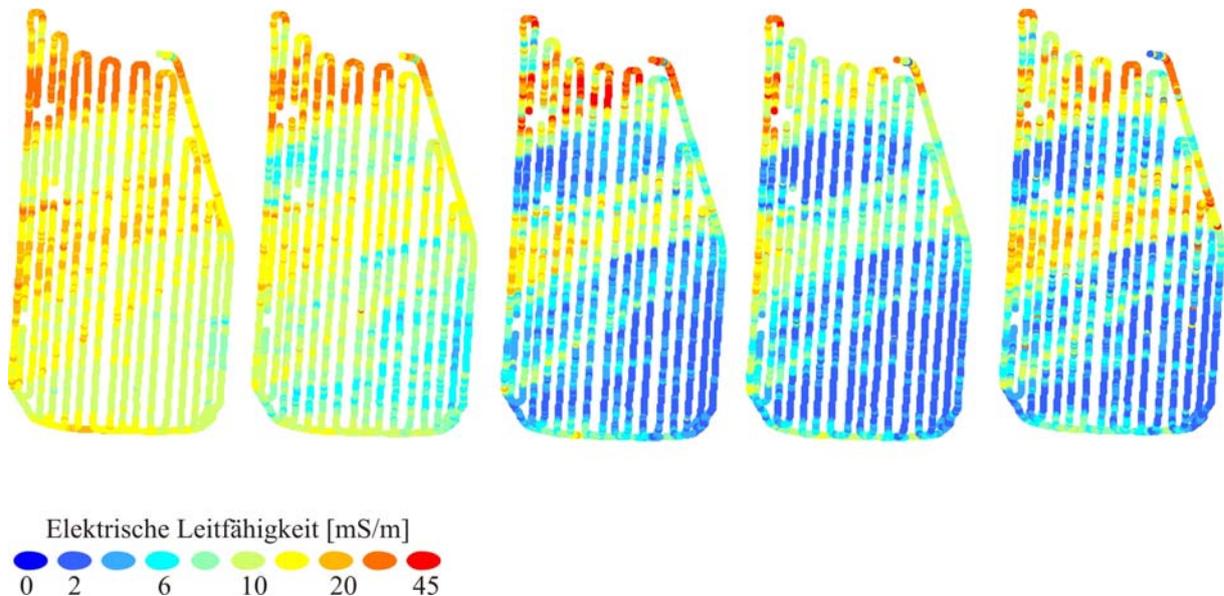


Abb. 26 Leitfähigkeitsverteilung für den Schlag Toter Mann – Herbst 2008

Es ist leicht erkennbar, dass die Leitfähigkeit mit der Tiefe abnimmt, was auf eine Sandunterlage hindeutet. Die Daten für den Schlag Flugplatz (Abb. 27) sind den VERIS-Karten gegenübergestellt, um die Möglichkeiten zu demonstrieren, die sich aus der Kartierung in 5 Tiefenstufen ergibt. Während die VERIS-Daten nur den Oberboden erfassen, kann man aus den GEOPHILUS-daten über die 5 Tiefen ein Schichtenmodell bis etwa 1.5 m Tiefe ableiten. Stellt man die VERIS-Daten mit einer einheitlichen Farbskala dar, dann erhält man nicht das erwartete Bild einer Widerstandszunahme mit der Tiefe, wie es einerseits aus der Geologie zu erwarten ist und andererseits aus allen anderen geophysikalischen Messungen herauskommt. Mit dem VERIS-3100 wird ein sehr geringer Tiefenbereich erfasst, in dem die vertikalen Änderungen eher durch aktuelle Feuchtwerte als durch Materialänderungen hervorgerufen werden. Um die Widerstands-Tiefen-Abhängigkeit an ausgewählten Profilen mit konventioneller Messtechnik zu vergleichen, wurden u.a. auf dem Schlag Flugplatz zwei Trassen (in Abb. 27 als I und II markiert) angelegt, entlang derer Geoelektrik mit fixen Elektroden in konventioneller Weise gemessen wurde. Die Ergebnisse werden in Kap. 3.5. vorgestellt.

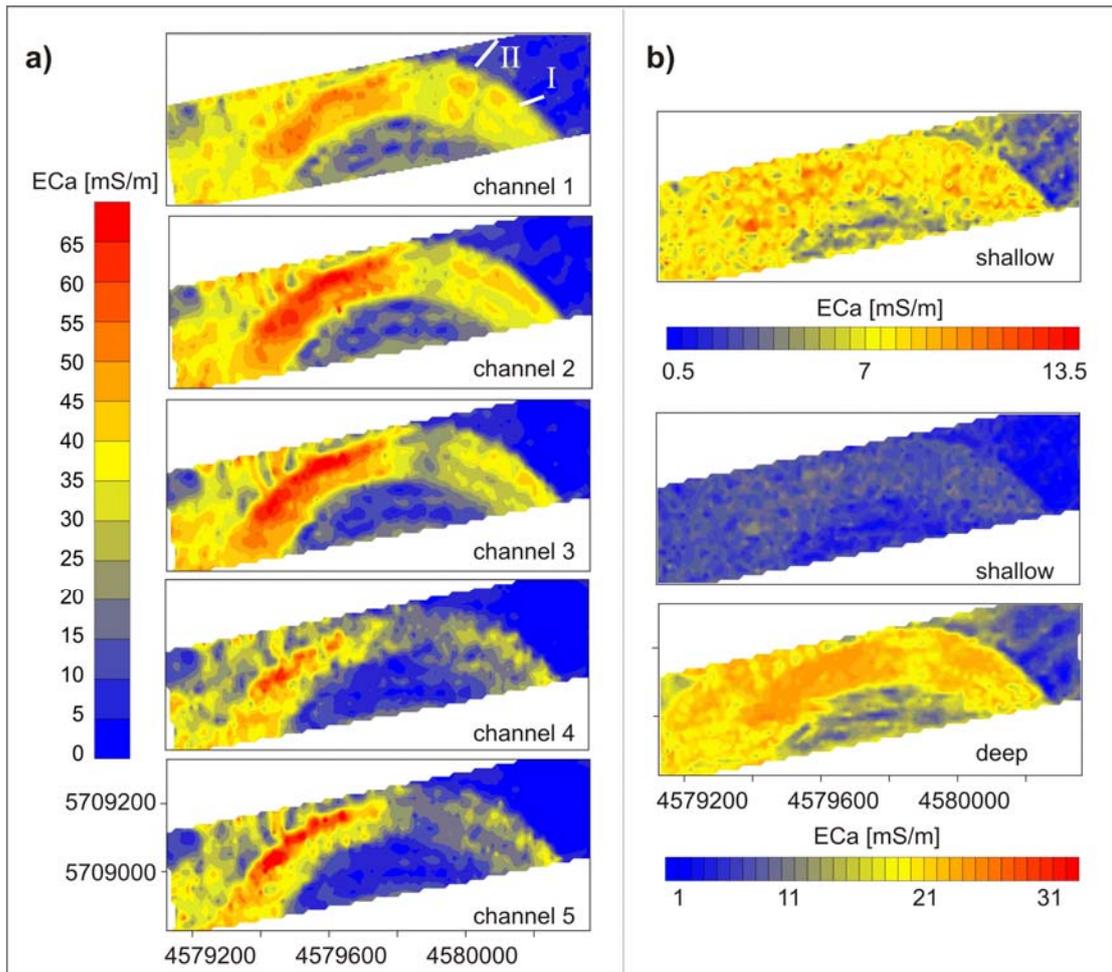


Abb. 27 Leitfähigkeitsverteilung für den Schlag Flugplatz – Frühjahr 2009

### 3.5. Evaluierung der GEOPHILUS-Daten an Hand von Referenzmessungen mit konventionell gesteckten Elektroden

Nicht alle Kartierungen in Köllitsch wurden mit einer gleich guten Qualität realisiert. Eine verkrustete und raue Oberfläche beeinträchtigt die Befahrbarkeit und die Ankopplung der Elektroden. So ist beispielsweise die Kartierung des Schlags ‚Am Park‘ am 29.04.08 sehr verrauscht. Schon während der Fahrt hat sich gezeigt, dass die Messfehler extrem groß sind. Obwohl der Boden einen ausreichenden Wassergehalt aufgewiesen hat, haben eine verhärtete und unregelmäßige Oberfläche zu einer schlechten Ankopplung der stark holpernden Elektroden geführt. Die Strukturen und der vertikale Trend der elektrischen Widerstandswerte sind allerdings verwertbar.

Um insbesondere die Kanäle 4 und 5 des GEOPHILUS beurteilen zu können, wurden auf verschiedenen Schlägen Referenztrassen mit konventionell gesteckten Elektroden realisiert und diese Daten mit den GEOPHILUS-Werten verglichen. Entlang der zwischen 100 und 250 m langen Transekte wurde mit einer Wenner-Anordnung gearbeitet. Derartige Vergleichsmessungen liegen in Köllitsch inzwischen für folgende Schläge vor: Am Park, Adelwitzer Park, Am Flugplatz, Pfaffenloch und Goldbreite. Auf dem Schlag Pfaffenloch wurden zwei Transekte ebenfalls mit fixen Elektroden, allerdings in einer äquatorialen Dipol-Dipol-Anordnung gemessen.

Auch hier werden nur stellvertretend für alle Messungen zwei Datenbeispiele gezeigt. Es handelt sich um die beiden in Abb. 27 eingezeichneten Transekte I und II für den Schlag Flugplatz. Das Profil I quert den Übergang von der sehr tonigen Rinne zum Sand, das Profil II liegt auf einem mehr oder weniger homogenen Boden mit leichten Unterschieden in der Mächtigkeit der Deckschicht. Die jeweiligen Leitfähigkeitsmodelle (Abb. 28) zeigen eine sehr gute Übereinstimmung in den Strukturen. In der oberen Zeile sind die invertierten Daten der fixen Aufstellung gezeigt, in der unteren Darstellung jeweils die Ergebnisse der GEOPHILUS-messungen. Die Unterschiede in den Absolutwerten können über die unterschiedliche Frequenzen erklärt werden. Während die oberen Ergebnisse mit einer Geotom (Geolog, Deutschland) mit einer Signalfrequenz 8.33 Hz gewonnen wurden, lag die Frequenz für die GEOPHILUSmessungen bei 62.5 Hz. Eine Zunahme der Leitfähigkeiten mit steigender Frequenz ist zu erwarten gewesen.

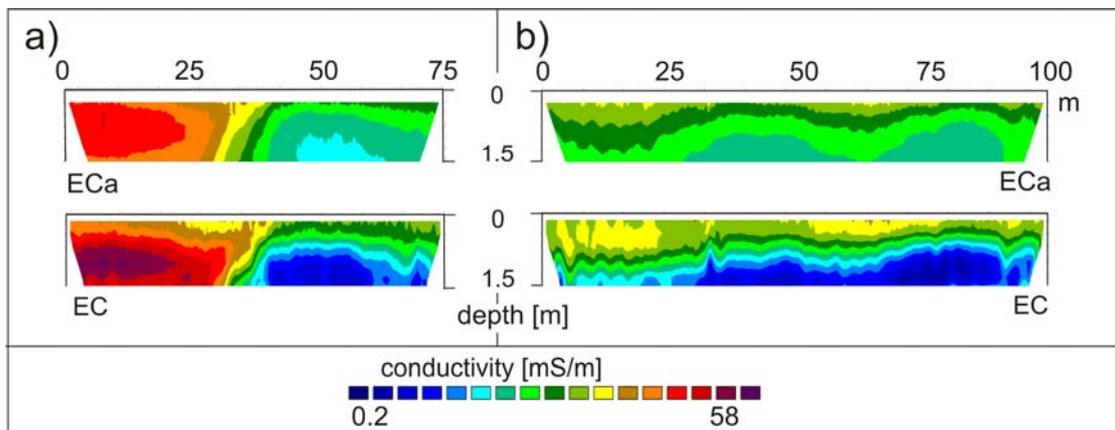


Abb. 28 Beispiele für Widerstands-Tiefen-Modelle gemessen mit konventionell gesteckten Elektroden entlang der Trassen I (a) und II (b) auf dem Schlag Flugplatz

## **4. Messungen in der agt Trebbin**

Der Betrieb in Trebbin ist momentan dabei, einzelne Arbeitsgänge auf eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung umzustellen und hat deshalb großes Interesse an der Einführung moderner Verfahren zur Erfassung von Flächenheterogenitäten. Insbesondere sollen die Informationen für eine teilflächenspezifische Düngung und Beregnung und zum Überdenken der Anbauplanung genutzt werden. Nach anfänglichen Diskussionen zum verwendeten geografischen Koordinatensystem hat man sich jetzt auf das amtliche ETRS89-Bezugssystem geeinigt. Die hier verwendeten Koordinaten entsprechen diesem System, allerdings ist in den Rechtswerten die erste Zahl (3) aus Platzgründen gestrichen worden.

Die Informationen aus der Reichsbodenschätzung wurden gesichtet und aufgearbeitet.

### **4.1. Schlagkarte und Luftbild**

Das Areal des Betriebes Trebbin ist weit größer als das von Köllitsch. Aus diesem Grund beschränken wir uns hier auf ausgewählte Regionen. Die im Fokus stehenden Flächen sind die Beregnungsflächen des Betriebes, weil diese Flächen für die ersten teilflächenspezifischen Düngungsversuche ausgesucht worden sind.

Im Rahmen einer Diplomkartierung wurden zwei Felder südwestlich der Ortslage Trebbin intensiv beprobt, so dass neben den Beregnungsflächen diese beiden Felder hier diskutiert werden. Alle anderen untersuchten Felder sind lose im Betrieb verstreut und werden deshalb im Bericht nicht berücksichtigt.

Zur Demonstration der Größe des Areals ist in Abb. 29 in einem Auszug aus der Schlagkarte die jeweilige Feldgröße in ha eingetragen. In der Abb.30 sind die für die Beregnungsflächen intern vergebenen Feldbezeichnungen enthalten, so dass die räumliche Zuordnung leichter wird. Die über das Luftbild gelegte Schlagkarte ist ein Auszug aus der Schlagkarte des Betriebes. Die im Projekt bearbeiteten Felder sind rot umrandet. Die Nummerierung der Felder erfolgte entsprechend der zeitlichen Abfolge der Messungen.

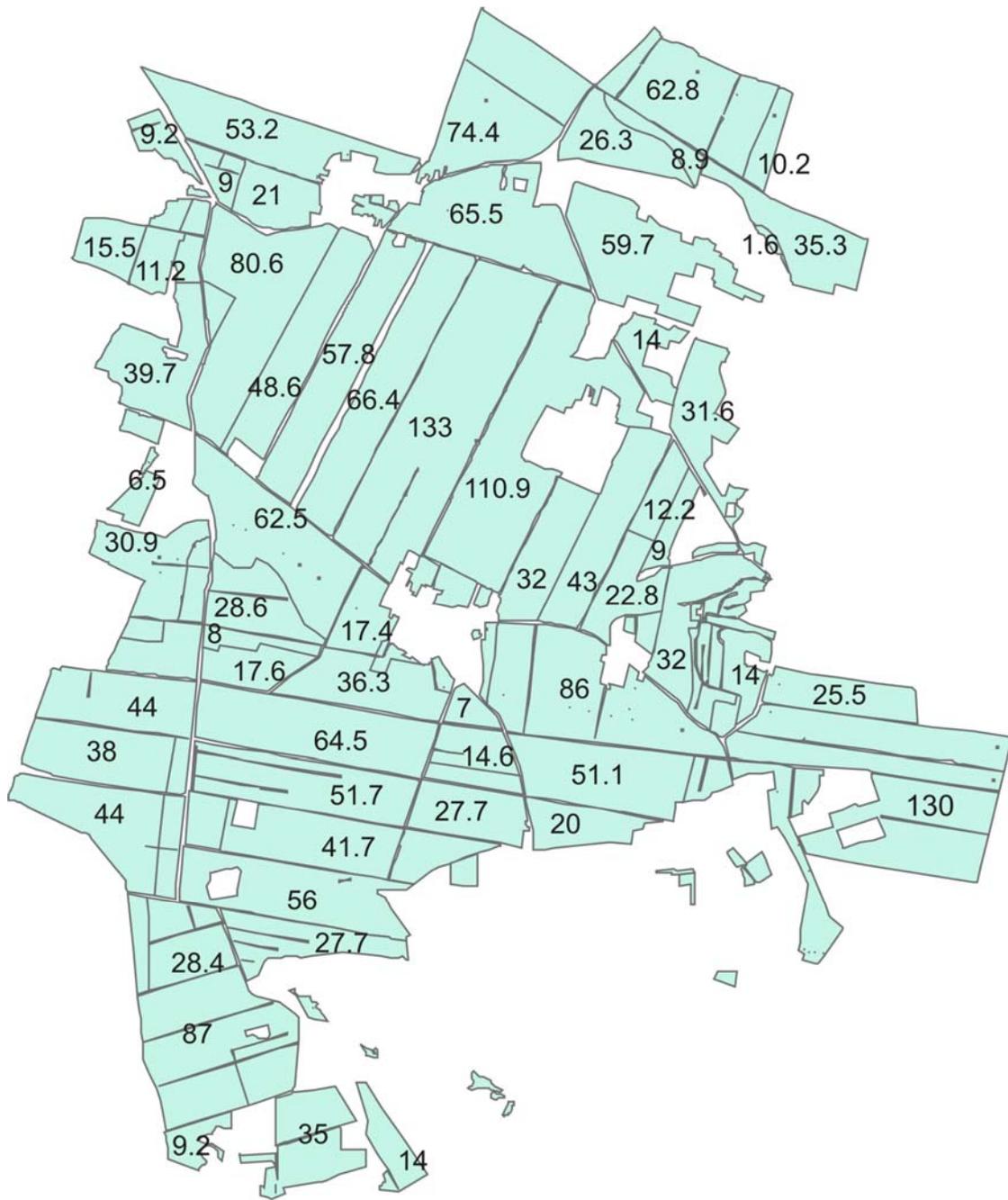


Abb. 29 Auszug aus der Schlagkarte von Trebbin

Die Tabelle 8 enthält für einen Teil der kartierten Schläge die betriebseigenen Schlagnummern und –bezeichnungen mit zugehöriger Feldgröße und die von uns vergebene Feld-Nr.

Tabelle 8 Feldzuordnung für die GEOPHILUS-Kartierung in Trebbin

Feld-Nr.	Schlagnummer	TF.Nr.	Bezeichnung	ha
	2	233	4 Außenschlag Lüd. Seite	8.60
	7	233	1 Außenschlag	68.96
	1	111	Beregnung 1	25.00
offen		111	Beregnung 1	23.69
	4	131	2 Beregnung 2	19.12
	8	131	5 Beregnung 2	38.71
offen		121	1 Beregnung 3	13.04
	13	121	2 Beregnung 3	31.83
offen		121	3 Beregnung 3	20.15
	3	141	1 Beregnung 4	39.62
offen		141	2 Beregnung 4	25.07
	9	151	Beregnung 5	60.65
	10	133	Beregnung 6	43.01
	10	337	hinter Spiesecke	4.85
offen		133	Beregnung 6	8.90
	14	144	2 Beregnung 8	13.96
offen		144	1 Beregnung 8	17.24
	14	113	2 Beregnung 9	27.25
offen		113	1 Beregnung 9	15.38
	14	312	Herosberg	7.98
	11	326	1 vor Lüdersdorf rechts	51.95
	12	348	hinter Meier	17.02
	15	252	Grenzgraben	50.41
offen		211	Hütung 1	50.49
offen		242	Wilmersd. Weg	42.03
	17	213	Hörstchen	24.80
	18	628	2 Ahrensdorfer Str. li hinten	18.60
	19	628	4 Ahrensdorfer Str. re vorn	10.03
	20	607	Beuthner Berg	31.59
	5	626	Wüste Wiese links	10.69
	6	513	Horst Löwendorf	39.41
	21	505	Wüste Wiese hinten	27.00
				887.03



Abb. 30 Auszug aus einer Luftaufnahme (Quelle: Google) mit überlagerten Schlagkarte. Die mit dem GEOPHILUS kartierten Flächen sind rot markiert.

## 4.2. Bodenkarten – Daten der Reichsbodenschätzung

Im Rahmen dieses Projektes wurden Informationen zur Reichsbodenschätzung beschafft. In Brandenburg ist die Aufarbeitung des alten Materials recht weit fortgeschritten und für alle als shape-Dateien zur Weiterverarbeitung mit entsprechender GIS-Software zugänglich.

Das Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg hat die von der Staatlichen Geologischen Kommission der DDR bearbeiteten Karten der Reichsbodenschätzung eingescannt und gibt diese in digitaler Form als gedruckte farbige Bodenschätzungskarten 1:25000 heraus. Auf der Basis dieses Kartenmaterials erfolgte eine Digitalisierung der Informationen, so dass man diese von der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (Dezernat Vertrieb und Öffentlichkeitsarbeit) unter Angabe des geografischen Koordinatensystems käuflich erwerben kann.

Ein Vergleich beider Quellen (analoger und digitalisierter Karten) hat gezeigt, dass die Karten nicht ganz deckungsgleich sind. Hierfür werden unterschiedliche Koordinaten-Transformations-Programme als Ursache angesehen. Es bleibt zu prüfen, inwieweit

dies bereinigt werden kann. Für eine landwirtschaftliche Anwendung wie etwa teilflächenspezifische Bewirtschaftung sind Ungenauigkeiten im Koordinatensystem von mehreren 10 Metern nicht tragbar.

Die Abb. 31 zeigt links die Rastergrafik und rechts einen Ausdruck der als shp-file erworbenen digitalen Informationen. Es handelt sich bei beiden Darstellungen um etwa den gleichen Kartenausschnitt (Berechnungsflächen des Betriebes). Die Einfärbung der Flächen wurde entsprechend der Bodenart ohne genaue Anpassung der Farbskalen vorgenommen. Es ist in beiden Abbildungen gut zu erkennen, dass die Flächen rund um Trebbin sandig sind – mit leicht variierenden Lehnteilen. Die als dunkel eingefärbten Moorgebiete im Westen der Region treten in beiden Darstellungen deutlich hervor. Im rechten Teil der Abbildung sind zusätzlich die Bohrstocklokationen der Reichsbodenschätzung eingezeichnet.

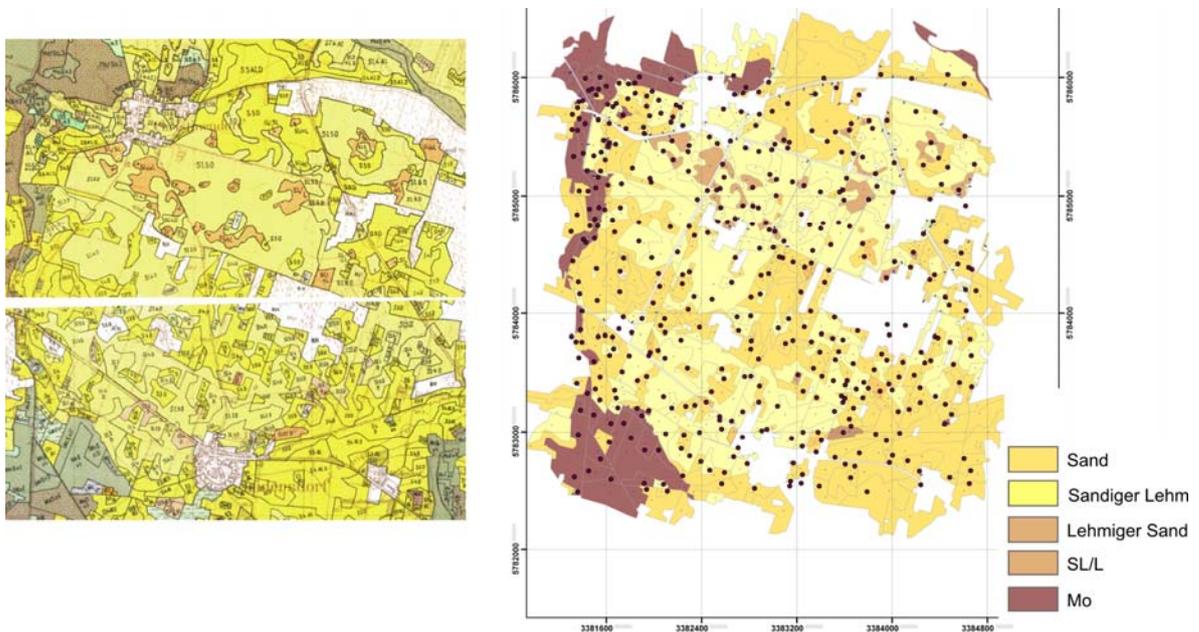


Abb. 31 Kartenmaterial zur Reichsbodenschätzung für ausgewählte Flächen des Standortes Trebbin

Die Angaben zur Reichsbodenschätzung enthalten einerseits die Bodenarten und andererseits die Bodenfruchtbarkeiten in Form von Ackerzahlen. Auf einer Skala von 1 bis 100 werden die Bodenfruchtbarkeiten abgestuft gewertet. In Abb. 32 ist links der gleiche Kartenausschnitt wie oben mit der Abstufung entsprechend der Ackerzahlen dargestellt. Es zeigen sich deutliche Tendenzen innerhalb des Betriebes:

- Ackerzahlen zwischen 0 und 43
- großräumige Gruppierungen kleinerer inhomogener Einheiten
- kleinräumige Musterverteilungen innerhalb der Schläge

Im rechten Teil der Abb. 32 ist noch einmal die farblich kodierte Darstellung der Bodenarten mit Überlagerung der Feldumrisse der kartierten Flächen dargestellt.

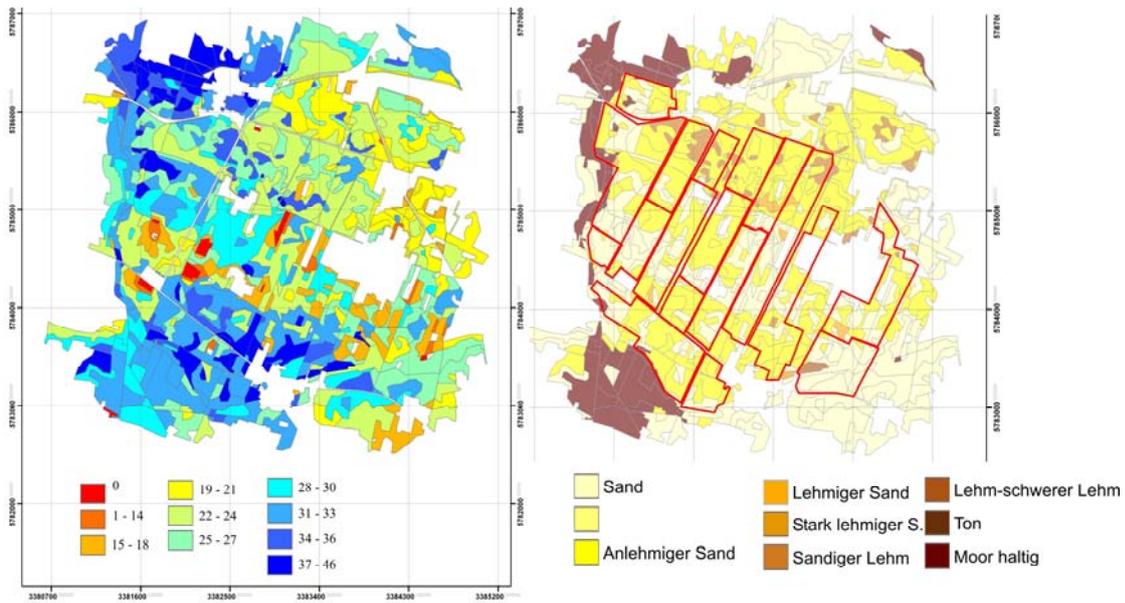


Abb. 32 Karten der Reichsbodenschätzung für die Hauptuntersuchungsfläche in Trebbin. Links: Ackerzahlen, Rechts: Bodenarten und überlagerte Schlagkarte

Die Abb. 33 gibt einen Überblick über weitere – im Projekt erworbene digitale Informationen zur Reichsbodenschätzung. Neben den hier als Hauptuntersuchungsflächen vorgestellten Feldern sind einzeln verstreute Felder kartiert und beprobt worden

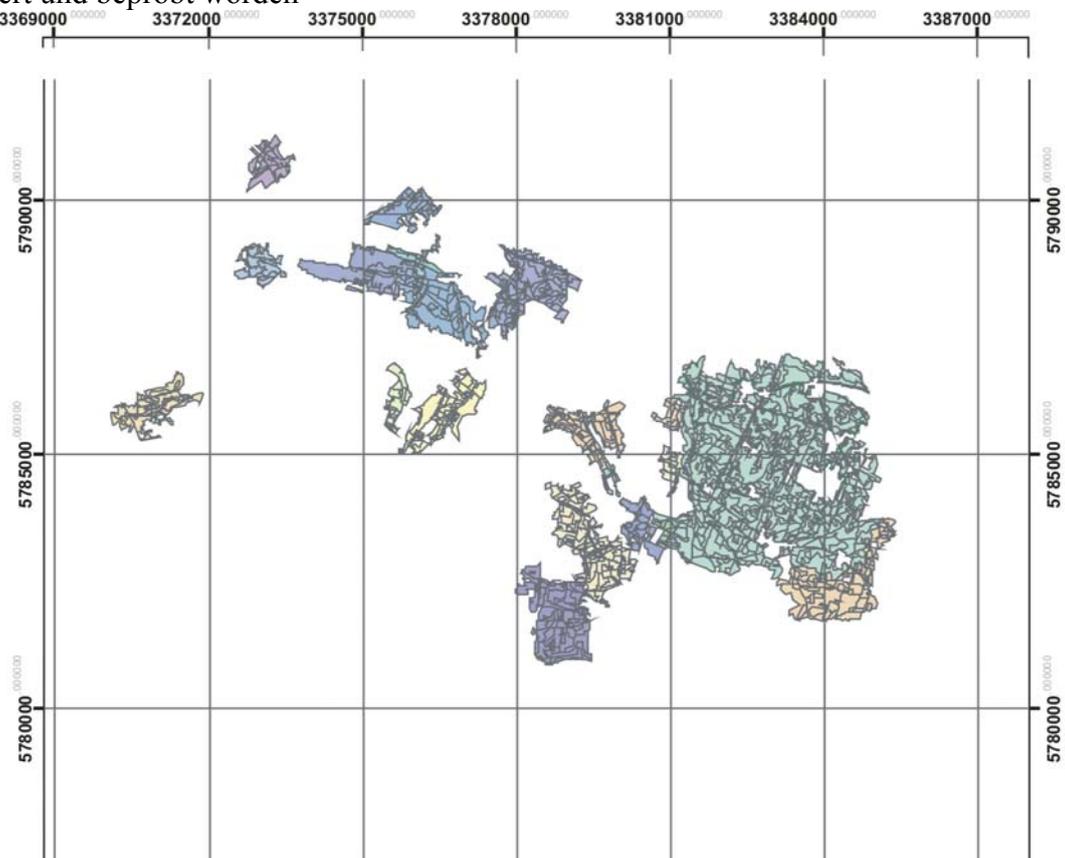


Abb. 33 Überblick über alle Flächen in Trebbin, für die digitale Informationen der Reichsbodenschätzung erworben wurden

Im Rahmen einer Diplomkartierung (Robert Glasmacher) wurden zwei Felder intensiv beprobt. In einem Messpunkttraster von 50 m Punktabstand, welches der Reichsbodenschätzung entspricht, wurden Bodenproben bis 1 m Tiefe entnommen und im Labor hinsichtlich Wassergehalt und Korngrößenverteilung untersucht. Die Lage der Probepunkte für die Felder (interne Bezeichnung Feld 18 und Feld 19) ist der Abb. 34 zu entnehmen.



### Legende

#### Probepunkte Feld 18 Feldbegrenzung

- |   |      |
|---|------|
| • | Feld |
| • | 18   |
| • | 19   |



0 37,5 75 150 225 300 Meter

Abb. 34 Lage der Probepunkte für die Intensivmessflächen (Felder 18 und 19) in Trebbin (Abb. entnommen aus Glasmacher, Diplomkartierung)

Auch in Trebbin wurden Referenzmessungen mit fixen Elektroden zur Beurteilung der Datenqualität durchgeführt. Entlang der südlichen Feldbegrenzung des Feldes 7 wurde eine Referenztrasse mit der Multielektrodenapparatur in Wenner-Anordnung gemessen und auf den in Abb. 35 angegebenen Punkten wurden mit einem 4-punkt-light (Firma Lippmann, Deutschland) wurde die GEOPHILUS-Anordnung mit fixen Elektroden nachgestellt. In Abb. 35 sind die Feldnummern (rot) und die Punktbezeichnungen (schwarz) enthalten.

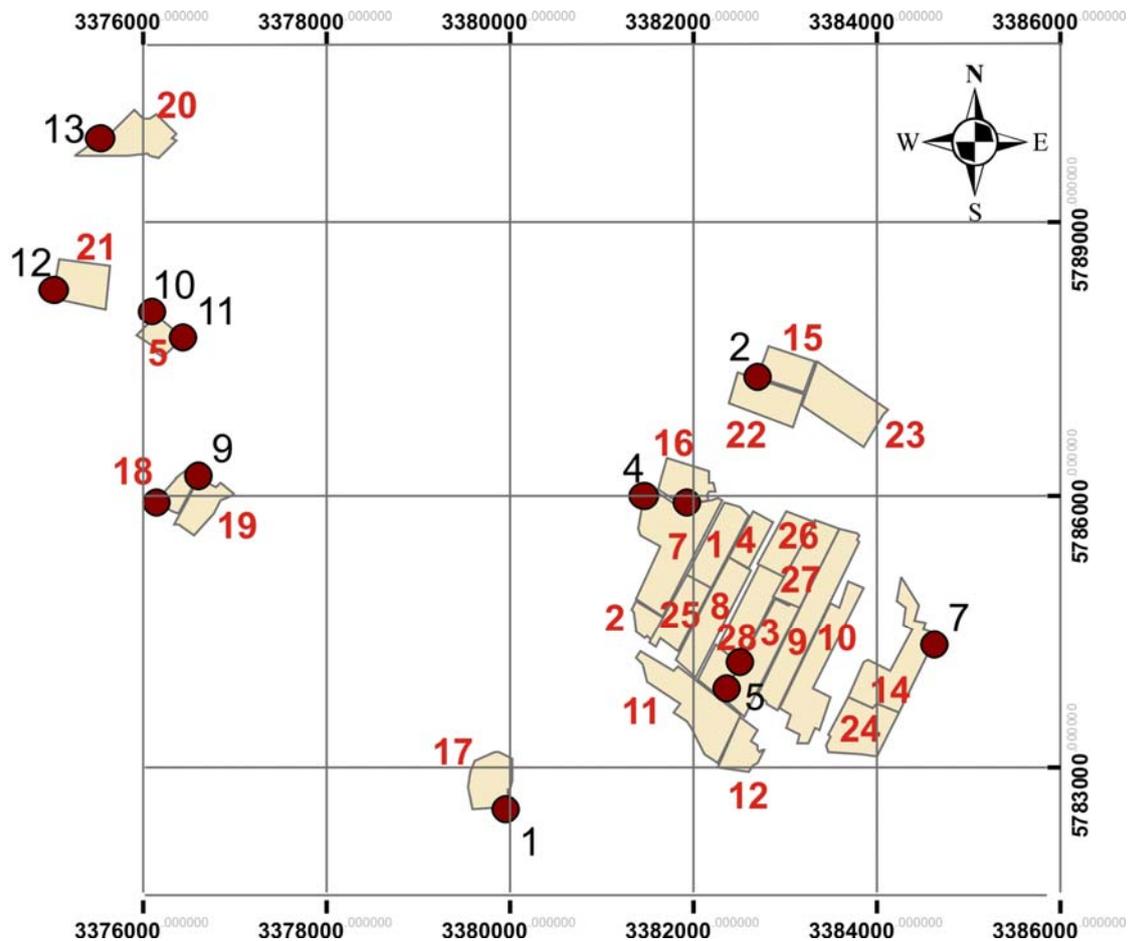


Abb. 35 Probepunkte verteilt über den Betrieb Trebbin (rot: Feldbezeichnung, schwarz: Punktbezeichnung)

Zur Veranschaulichung der im Stand durchgeführten Referenzmessungen ist in Abb. 36 ein Foto zu sehen, welches das Vorgehen demonstriert. Die rechts dargestellte Messgeometrie entspricht der Elektrodenanordnung des GEOPHILUS.

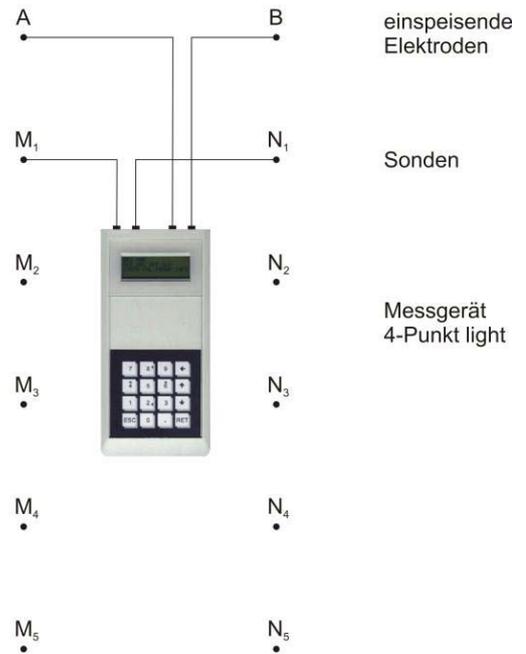


Abb. 36 Referenzmessungen mit fixen Elektroden zur Beurteilung der GEOPHILUS-Daten (aus: Meschzan, 2010)

## 4.3. GEOPHILUS-Daten Trebbin

### 4.3.1 Heterogenität in der Fläche

#### *Leitfähigkeitskarten*

In Trebbin sind inzwischen 28 Felder mit einer Gesamtfläche von mehr als 800 ha kartiert worden. Insbesondere handelt es sich dabei um die Beregnungsflächen des Betriebes. Ein Ausschnitt aus den Daten ist in Abb. 37 als Leitfähigkeitskarte gezeigt. Dabei handelt es sich um den Kanal 2 (etwa die obersten 50 cm Bodenschicht – kartiert mit einer Frequenz von 187.5 Hz).

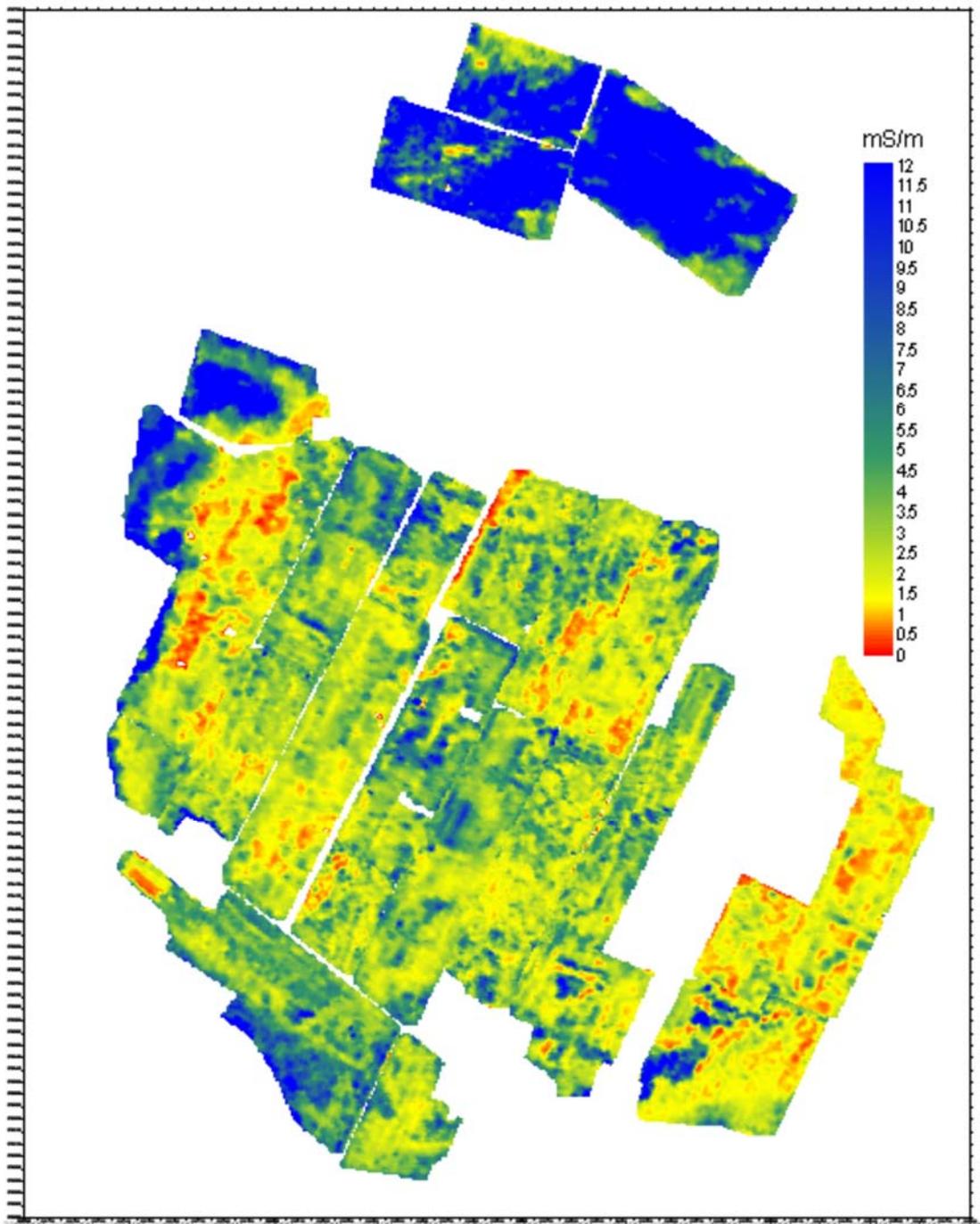


Abb. 37 Ausschnitt aus den Leitfähigkeitsdaten des Betriebes Trebbin bestimmt mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS

Die Darstellung in Abb. 37 ist so gewählt worden, dass alle Karten mit der gleichen Farbskala versehen sind, um die Unterschiede im Betrieb sichtbar zu machen. Bei der Betrachtung der Einzelfelder wäre möglicherweise eine feldangepasste Skalierung zu wählen, um die Strukturen innerhalb der Felder sichtbar zu machen. Auffällig sind mehrere Dinge:

- im zentralen Bereich der Fläche überwiegen sehr geringe Leitfähigkeiten im Oberboden, d.h. dort überwiegen sandige Böden
- Im Norden und im Westen dominieren Leitfähigkeiten um 12 mS/m, d.h. dort sind entweder lehmigere oder torfhaltige Böden zu erwarten
- Die Felder zeigen alle ein sehr unruhiges Muster, d.h. wir beobachten einen kleinräumigen Wechsel von Böden mit teilweise geringen Materialunterschieden.

Vergleicht man die Leitfähigkeitsdaten mit der Reichsbodenschätzung, dann ist zu erkennen, dass der moorige Bereich im Westen mit den gut leitfähigen Zonen übereinstimmt. Dies ist insbesondere durch das Wasserspeichervermögen moorhaltiger Böden zu erklären. Im Osten sind die Leitfähigkeiten am geringsten. Diese Region fällt mit der als Sandgebiet kartierten Region der Reichsbodenschätzung zusammen. Im Zentrum lösen sich sandige und sandig-lehmige Gebiete ab, was sich in leichten Leitfähigkeitsunterschieden bemerkbar macht.

Um großräumig Strukturen auch über Feldergrenzen hinaus sichtbar zu machen und Managementzonen abzuleiten, wurden Bereiche ähnlicher Leitfähigkeitswerte in gröbere Farbklassen zusammengefasst. Für den in Abb. 37 betrachteten Kartenausschnitt ist eine adäquate Darstellung mit einer Unterteilung in 4 Zonen in Abb. 38 zu sehen. Managementzonen werden in der Regel nicht nur auf der Grundlage von Bodenwerten (hier Leitfähigkeiten) vorgenommen. Die Abbildung soll eher zeigen, wie man aus den strukturierten Leitfähigkeitsinformationen die für die Praxis notwendigen Informationen ziehen kann, ohne dass eine allein auf Leitfähigkeitsdaten basierende Zonierung vorgeschlagen wird.

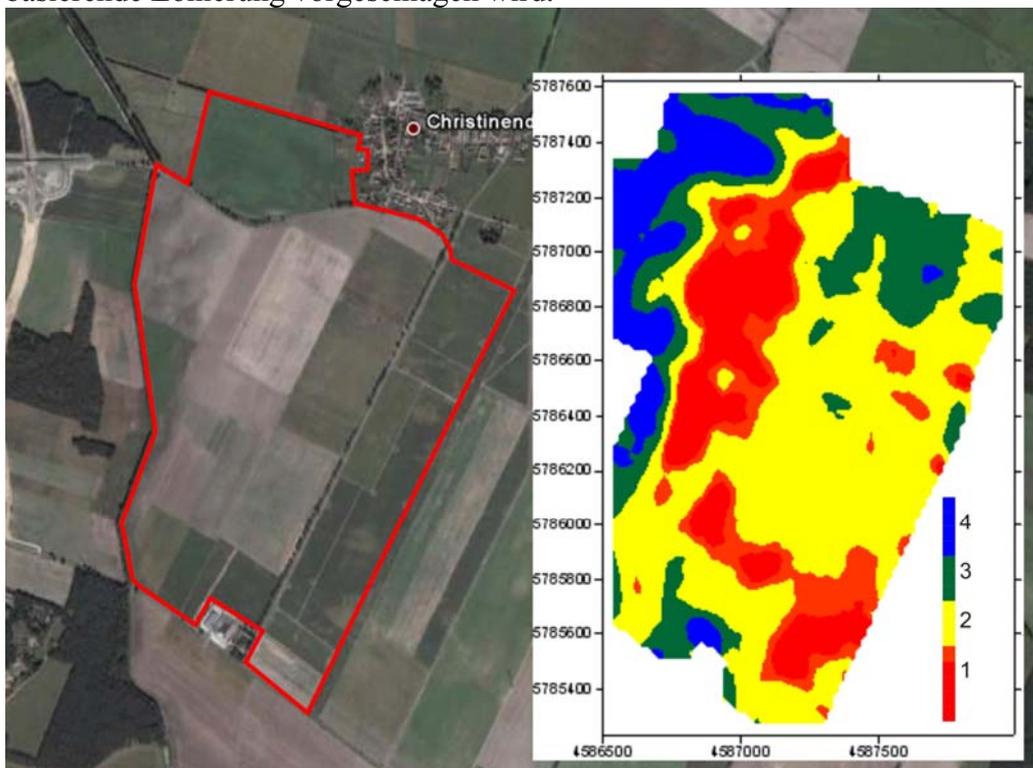


Abb. 38 Ableitung von Managementzonen aus der Leitfähigkeitskarte

Im Folgenden sollen noch stellvertretend für alle Kartierungen in Trebbin die Felder 18 und 19 vorgestellt werden, da sie als Intensivmessflächen für die bereits erwähnte Diplomkartierung dienten. In der Ab. 37 erfolgt für beide Felder eine visuelle Gegenüberstellung der GEOPHILUS-Daten und der jeweils stationären Punktmessungen. Die GEOPHILUS-Daten sind interpoliert unterlegt und die zur Referenz herangezogenen punktuellen Standmessungen sind in einer zweiten Ebene überlagert. Da die beiden Messungen nicht zeitgleich durchgeführt wurden, sind Unterschiede in den Absolutwerten zu erwarten gewesen, die räumlichen Anomalien bleiben aber vergleichbar.

Zur besseren Vergleichbarkeit sind alle 5 Tiefenstufen mit der gleichen Farbskala dargestellt. Ein Vergleich der fünf Kanäle lässt die für Trebbin typischen Verhältnisse erkennen. Anders als in Köllitsch nehmen in Trebbin die Widerstände mit der Tiefe ab, was auf eine Zunahme von Wasser- oder Lehmgehalt im Unterboden schließen lässt. Dieser Trend ist auch auf einer konventionell vermessenen Trasse auf dem Feld 18 zu erkennen, welche im Kapitel 4.3.2 vorgestellt wird.

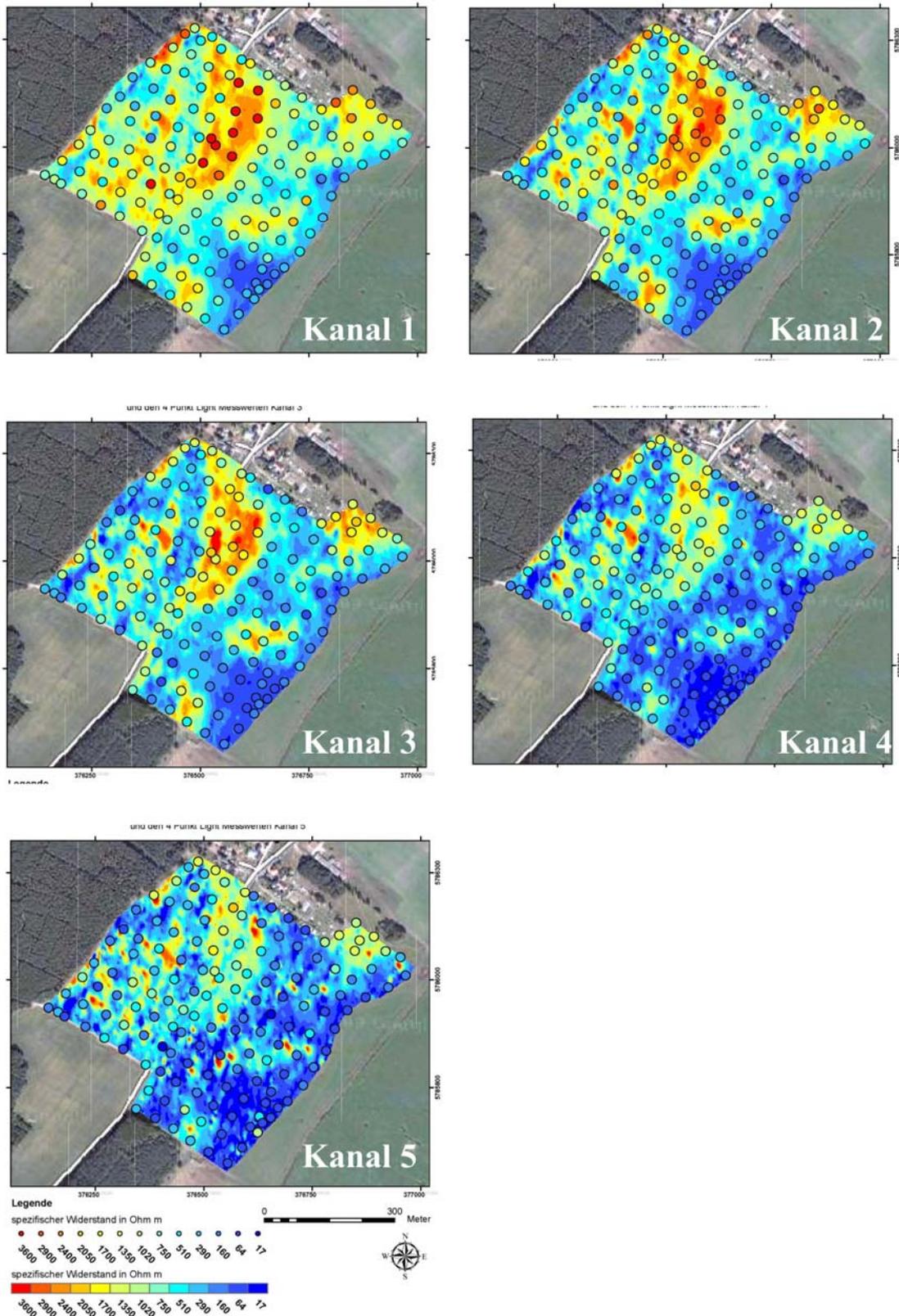


Abb. 39 Interpolierte Leitfähigkeitskarten der GEOPHILUS-Kartierung im Vergleich mit punktuellen, stationären Referenzmessungen (Darstellungen entnommen aus der Diplomkartierung R. Glasmacher)

### ***Phasenwinkelinformationen***

Alle bisher gezeigten Parameterkarten bezogen sich auf die elektrische Leitfähigkeit. Es hat sich herausgestellt, dass die Phasenwinkelmessungen in der Bewegung reproduzierbar sind – allerdings auf Grund der stärkeren Abhängigkeit von den Ankopplungsbedingungen mit einem größeren Fehler behaftet sind als die Leitfähigkeitswerte. Mit dem SIP-Messgerät Rabbit ist es ohne zusätzlichen Aufwand möglich, die Phasenwinkel parallel zur Leitfähigkeit zu erfassen, so dass dies für alle kartierten Felder auch praktiziert wurde.

Auf vielen Feldern folgen die Phasenwinkelmuster denen der elektrischen Leitfähigkeit. Nicht in allen Fällen sind wirkliche Zusatz-Informationen in den Phasenwinkelkarten enthalten. Es gibt aber einige Beispiele, die den Nutzen zeigen. So wurden beispielsweise in Trebbin in einem Vergleich zwischen Leitfähigkeits- und Phasenwinkelkarte Unterschiede sichtbar, die auf ein unterschiedliches Gefüge im Oberboden zurückzuführen waren. Deutlich ist der Unterschied in Abb. 40 c für den nördlichen Teil der Fläche. Es zeichnet sich eine scharfe Grenze ab, die von allen in NE-SW laufenden Fahrspuren erfasst wurde.

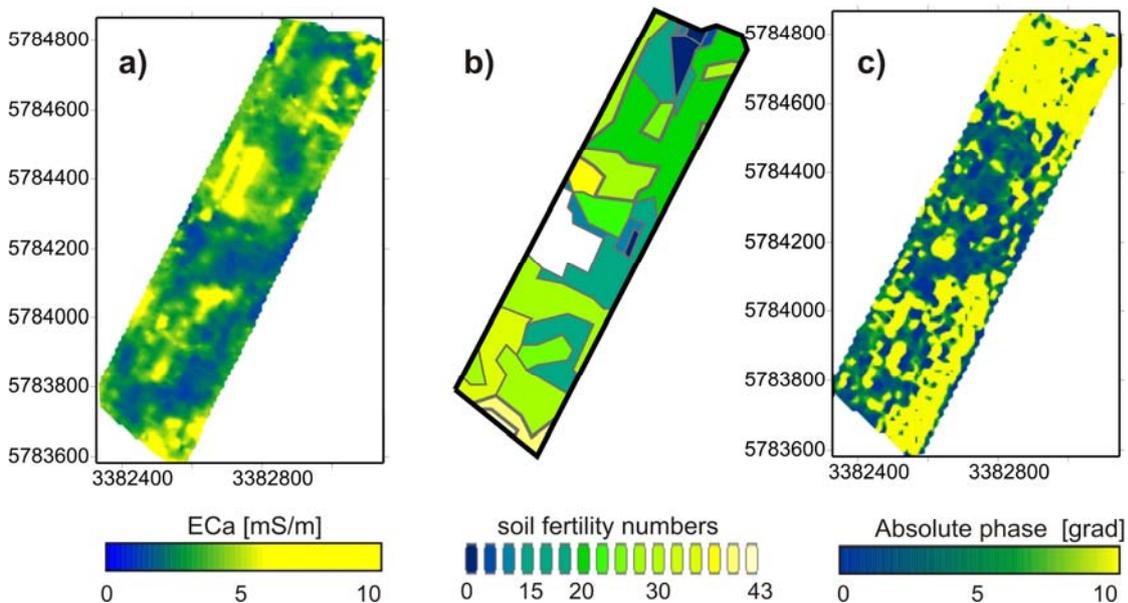


Abb. 40 Heterogenitätskarten für das Feld 3 in Trebbin

- a) Leitfähigkeitskarte
- b) Ackerzahlen der Reichsbodenschätzung
- c) Phasenwinkelanomalien

### 4.3.2 Schichtungsinformationen

An Hand ausgewählter Felder soll die Schichtung des Bodens näher untersucht werden. Wie bereits weiter vorn gezeigt wurde, werden in der Region die Widerstandswerte mit zunehmender Tiefe kleiner, d.h. unter der hochohmigen Sandschicht befindet sich eine gut leitfähige Schicht. Der Bau von Windrädern in dieser Region hat die Lehmunterlage unter der Sandschicht bestätigt. Für den Betrieb heißt dies, dass auf diesen Flächen in Zukunft möglicherweise auch tiefer wurzelnden Pflanzen (z.B. Raps) angebaut werden, die sich aus den größeren Tiefen das benötigte Wasser holen.

Für eine von NO nach SW verlaufende Trasse auf dem Feld 18 wurden entlang eines Transektes Messungen mit einer herkömmlichen Wenner-Anordnung (stationäre Messung mit fixen Elektroden) durchgeführt. Die Lage der Trasse in dem schlecht leitfähigen Gebiet im Norden des Feldes 18 ist in Abb. 41 skizziert. Die Abb. 41 enthält ebenfalls die Ergebnisse der Messung bzw. der Inversion. Während im oberen Bild der Abb. 41 die Darstellung der originalen Messwerte zu sehen ist, findet man im unteren Teil die Ergebnisse der Inversionsrechnung, die die wahren Widerstandswerte mit einer entsprechenden Tiefenzuordnung zeigen. Besonders in der invertierten Darstellung ist die Schichtung (hochohmiger Deckboden und besser leitfähiges Material darunter) zu sehen.

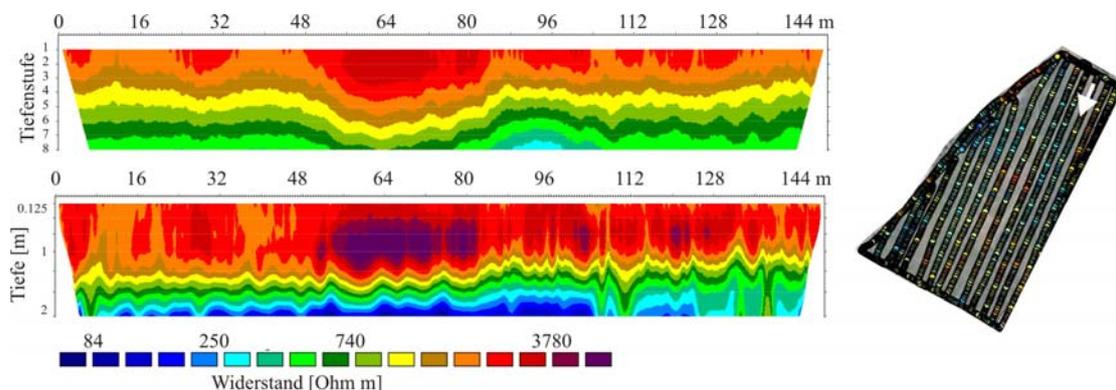


Abb. 41 Widerstands-Tiefen-Modell entlang einer Trasse auf dem Feld 18. In der Skizze rechts ist die Profillage und die Richtung des Transektes zu erkennen.

Ähnliche Darstellungen und Inversionsrechnungen lassen sich auch für die GEOPHILUS-Datensätze realisieren. In Abb. 42 ist ein Beispiel für einen über das gesamte Feld 1 in N-S-Richtung laufenden Transekt gezeigt. Auch hier sind in der Feldskizze im rechten Teil der Abbildung die Profillage und die –richtung gekennzeichnet. Das Profil hat folgende Koordinaten im Gauss-Krüger-System: Start: 4587274, 5786269 und Ende: 4587660,5787660. Auf Grund der großen Messpunkanzahl der GEOPHILUS-Daten müssen die Profile momentan noch in Teilstücken invertiert und später zusammengebaut werden. Dieses Problem ist nur über die Entwicklung einer den Daten angepassten Inversionssoftware möglich. Entsprechende Projektanträge sind in Vorbereitung.

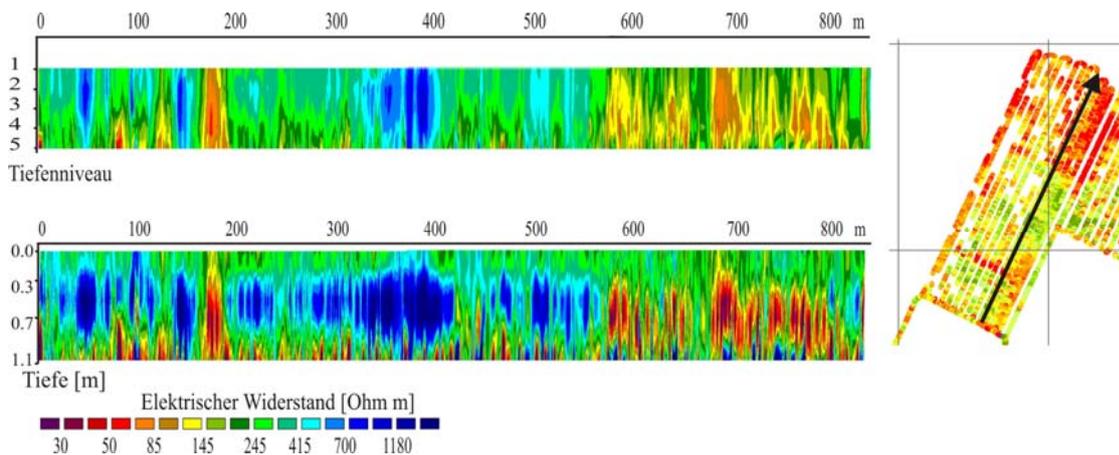


Abb. 42 Widerstands-Tiefen-Modell entlang einer Trasse auf dem Feld 1. In der Skizze rechts ist die Profillage und die Richtung des Transektes zu erkennen.

#### 4.4. Geländemodell

Im Verlauf des Projektes ist der GEOPHILUS mit einem Trimble-DGPS ausgerüstet worden, um die erforderliche Genauigkeit der GPS-Positionen zu erreichen. Die Genauigkeit in der x-y-Ebene wurde bereits in Abb. 10 durch eine ortsfeste Messung demonstriert. An dieser Stelle soll gezeigt werden, dass die Genauigkeit sogar ausreicht, um ein erstes Geländemodell zu erstellen. In Abb. 43 ist die Geländehöhe für vier Schläge (Feld 25-28) farblich kodiert dargestellt worden. Während aus den Messungen mit einfachen GPS-Empfängern auf Grund der Ungenauigkeiten und Niveausprünge keine Angaben zu Höhen verwendet werden konnten, zeigt das Beispiel in Abb. 43 doch anschaulich, dass wesentliche Zusatzinformationen über Geländehöhen und damit Geländeneigungen in den Daten enthalten sind.

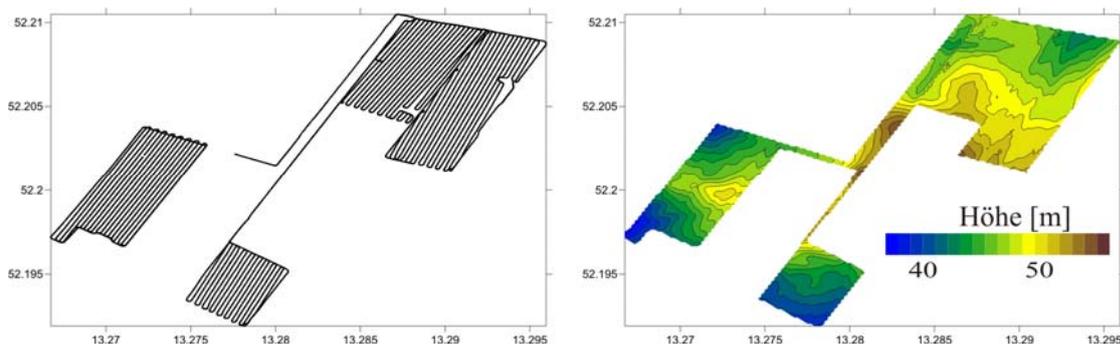


Abb. 43 Geländehöhen als Zusatzinformation der Leitfähigkeitskartierung  
Links: Messpunktverteilung, Rechts: Interpolierte Höhendaten

## 5. Ergebnisse auf weiteren Testflächen

Die Auswahl der weiteren Testflächen erfolgte in Kooperationen mit:

- 1) Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt, Dezernat Bodenkundliche Landesaufnahme und FIS-Boden – Dr. Klaus-Jörg Hartmann
- 2) Universität Hannover, Institut für Bodenkunde – Gunar Höfer.
- 3) Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung - BAM – Dipl.-Geoph. Ernst Niederleithinger
- 4) Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Referat Ackerbau und Grünland Paulinenaue – LVLf – Dr. R. Priebe
- 5) Gesellschaft für Montan- und Bautechnik mbH Schwarze Pumpe - GMB – Dr. Helfried Petzold, Dr. Grose
- 6) Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim – Dr. Horst Domsch, Dr. Robin Gebbers

### 5.1. Flächen in Ohrleben – Tonböden

Für die Flächen in Ohrleben liegen zahlreiche Bodenbeprobungen und Texturwerte vor, so dass die Flächen eine gute Möglichkeit für die Korrelation zwischen Leitfähigkeits- und Texturwerten liefern. Die Flächen sind insofern für das zu testende Messsystem spannend, da wir in Ohrleben Tongehalte zwischen 13 und 49 % (im Mittel 28 %) antreffen. Die daraus resultierenden sehr hohen Leitfähigkeiten führen dazu, dass schon bei geringen angelegten Spannungen starke Ströme fließen und die maximal mögliche Stromstärke von 125 mA die für die Messung begrenzende Größe ist. Ohrleben ist ein Beispiel von vielen, an denen die in Abhängigkeit von der Frequenz unterschiedliche Signalqualität gezeigt werden kann.

Bedauerlicherweise gab es zum Zeitpunkt der Messungen am Kanal 4 zumindest zeitweise ein Kabelproblem, so dass dieser Kanal nicht lückenlos über das gesamte Feld aufgezeichnet hat. In der Abb. 44 sind ausgewählte Leitfähigkeitskarten ( $f=6.25$  Hz) für Ohrleben zu finden.

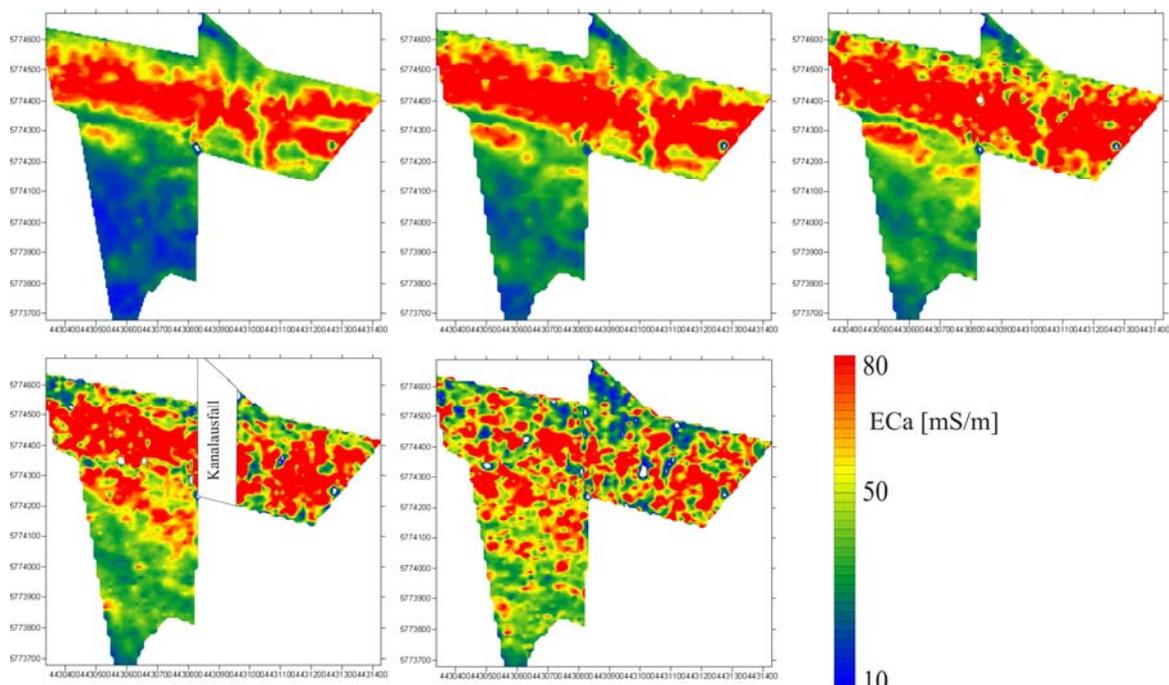


Abb. 44 Leitfähigkeitsverteilung in Ohrleben (Signalfrequenz 62.5 Hz)

Es zeigt sich, dass die beiden nördlichen Felder wesentlich geringere Widerstandswerte aufweisen als das südliche Feld. Die Muster decken sich gut mit den bereits bekannten Mustern aus früheren VERIS-Kartierungen (Abb. 45). Die Leitfähigkeitskarten unterscheiden sich auf Grund des erfassten Tiefenbereiches im Niveau. Die erkannten Strukturen sind gleich.

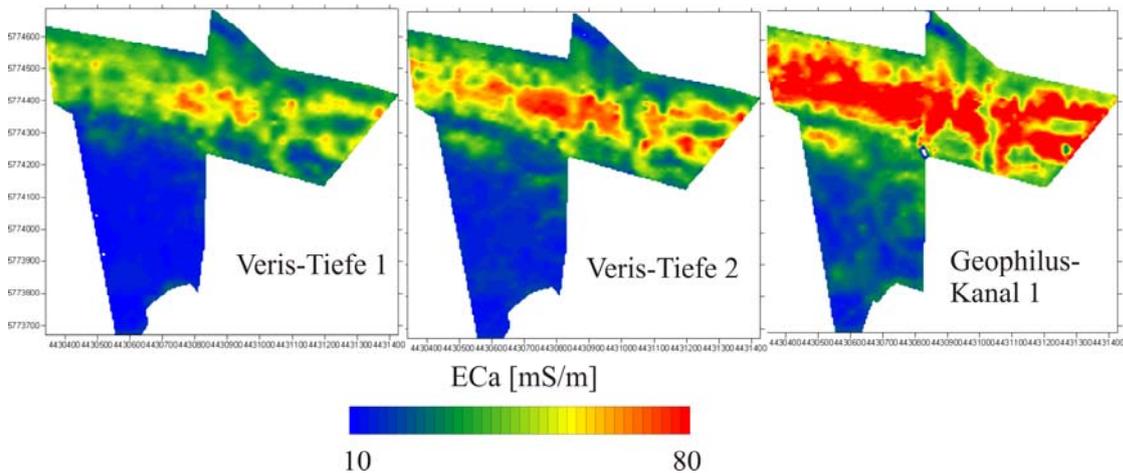


Abb. 45 Gegenüberstellung von VERIS-Daten und GEOPHILUS-Leitfähigkeitsdaten für den tonigen Standort Ohrleben

Alle fünf Darstellungen der Abb. 44 haben die gleiche Farbskala, d.h. bereits aus dem visuellen Vergleich der fünf Abbildungen ist auf den Widerstands-Tiefen-Verlauf zu schließen. Für das südliche Feld zeigt sich eine deutliche Abnahme des Widerstandes mit der Tiefe. Für Kanal 5 sind insbesondere für die nördlichen Felder die Werte sehr verrauscht, was an den vielen kleinräumigen Heterogenitäten zu erkennen ist. Schaut man sich die während der Messung berechneten Fehlerbalken an, dann ist zu erkennen, dass auf Grund der großen Fehlerbalken Vorsicht geboten ist. An dieser Stelle sind die Grenzen des derzeit eingesetzten Messgerätes erreicht. Es wird daraus geschlossen, dass zukünftige Messgeräte nach Möglichkeit eine unterschiedliche Empfindlichkeit der Einzelkanäle aufweisen sollten.

Für derartig gutleitfähige Böden verbessert sich die Signalqualität mit steigender Frequenz. In Abb. 46 sind zwei Leitfähigkeitskarten für den Kanal 5 gezeigt. Beide unterscheiden sich in der Signalfrequenz. Im linken Teil der Abbildung ist der verrauschte Datensatz ( $f=62.5$  Hz) zu sehen, im rechten Teil ist ein wesentlich ruhigeres Bild (aufgenommen mit einer Frequenz von 562.5 Hz) zu finden. In gutleitfähigen Böden verbessern elektromagnetische Effekte sichtbar die Signalqualität mit steigender Frequenz. In hochohmigen Regionen ist die Datenqualität von der Signalfrequenz nur wenig abhängig, so dass es in diesen Gebieten ausreicht, eine (willkürliche) Signalfrequenz für die Abbildung der Leitfähigkeitskarten zu nutzen.

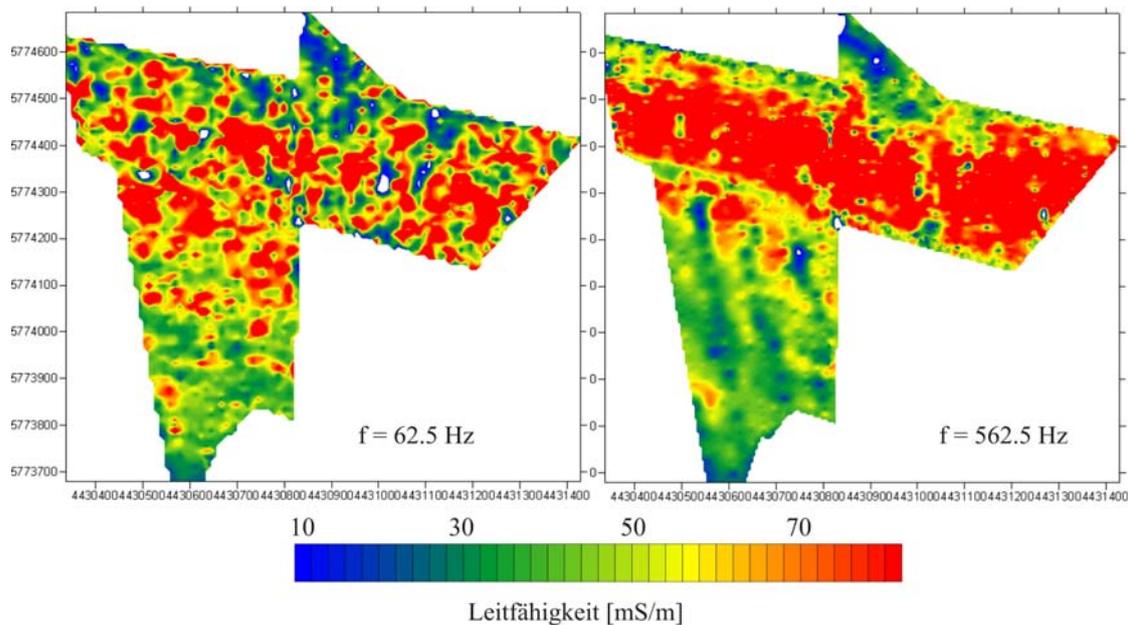


Abb. 46 Leitfähigkeitskarte für Ohrleben – Kanal 5

Um das Widerstands-Tiefen-Verhalten für die beiden nördlichen Felder zu bestätigen, wurde eine Widerstands-Tiefen-Sektion in N-S-Richtung auf den nördlichen Feldern gemessen. Das Ergebnis in Abb. 47 zeigt eindeutig die Abnahme des Widerstandes mit der Tiefe – so, wie es in den GEOPHILUS-Daten erfasst wurde. Bei einem Vergleich der Abbildungen 46 und 47 ist zu beachten, dass einmal die elektrische Leitfähigkeit und einmal der Widerstand als Messgröße dargestellt wurde.

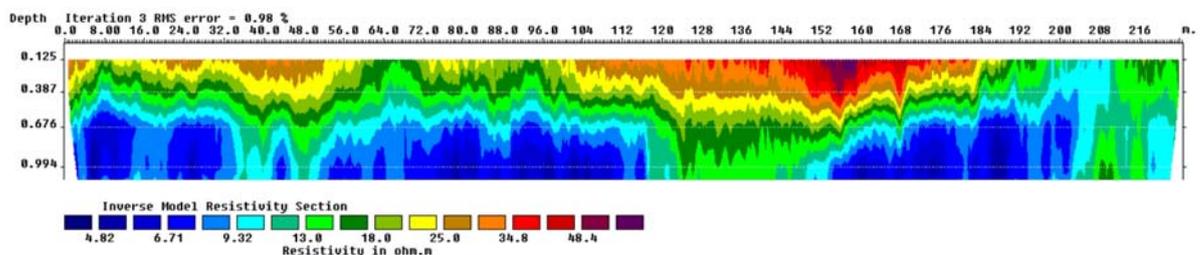


Abb. 47 Widerstands-Tiefen-Sektion entlang eines N-S-Profiles im nördlichen Teil der Untersuchungsflächen

Die Leitfähigkeitswerte des 1. Kanals (Tiefe etwa bis 30 cm) wurden den Texturanalysen des Landesamtes für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt gegenübergestellt. Die Beprobungspunkte verteilen sich gleichmäßig auf die drei Felder. Im linken Teil der Abb. 48 sind die Fahrspuren der GEOPHILUS-Kartierung und die Beprobungspunkte des Landesamtes dargestellt. Zu jeder Bodenanalyse wurde ein mittlerer Leitfähigkeitswert zugeordnet, der sich als Mittelwert aus einem Umkreis von etwa 2 m um den Beprobungspunkt ergibt. Es zeigt sich eine eindeutige Korrelation zwischen dem Tongehalt und der Leitfähigkeit. Eine zusätzliche Berücksichtigung des Feinschluffanteils verbessert die Korrelation nur unmerklich.

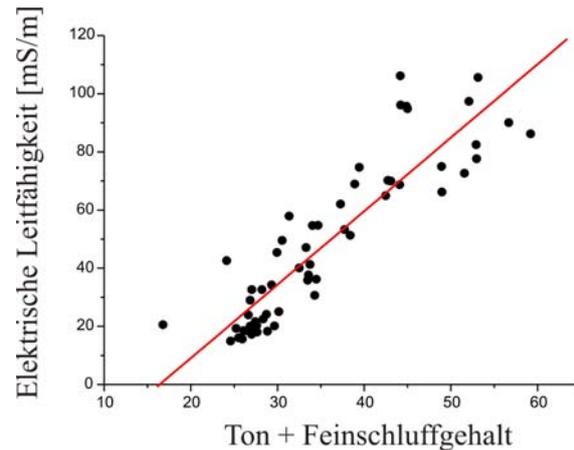
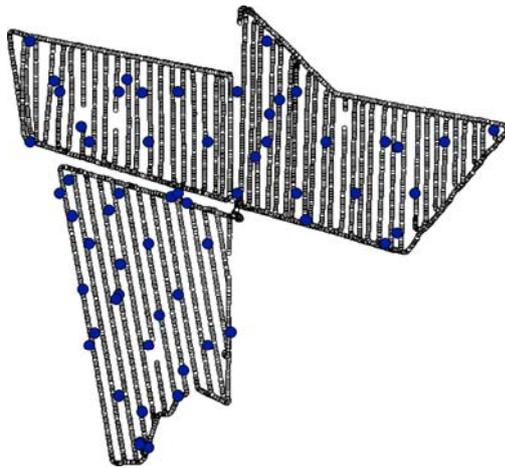


Abb. 48 Korrelation zwischen Textur und elektrischer Leitfähigkeit für Ohrleben

## 5.2. Verdichtungsexperiment in Ruthe/Hannover

Die Universität Hannover beschäftigt sich mit der Erfassung von Bodenverdichtungen und nutzt zur Abbildung verdichteter Zonen u.a. geophysikalische Verfahren. Der Einsatz des GEOPHILUS ELECTRICUS wurde auf einer Versuchsfläche von 154 x 66 m mit dem Ziel durchgeführt, verdichtete Gebiete innerhalb der Versuchsflächen zu erkennen. Der Einsatz auf relativ kleinen Versuchsflächen erfordert eine hohe Genauigkeit in der Positionierung der Messwerte und entsprechende Sorgfalt bei der Anbringungen von Shift-korrekturen etc. Häufig wird von uns der Versatz zwischen Positionsempfänger und Elektroden ausgemessen und korrigiert und der zeitliche Verzug des Datenspeicherns bleibt unberücksichtigt. Unterschiede in der Fahrgeschwindigkeit bleiben unberücksichtigt und sind bei der Kartierung derartiger Versuchsflächen zu sehen.

In der Abb. 49 wurden zwecks besserer Vergleichbarkeit alle Kanäle mit der gleichen Farbskala dargestellt. Es zeigt sich, dass einerseits die Oberfläche leicht erhöhte Widerstandswerte aufweist und dass andererseits eine niederohmige Deckschicht über einer etwas hochohmigeren Schicht liegt. Dieser Trend wurde durch eine Standmessung mit gesteckten Elektroden bestätigt. Die Karten zeigen unterschiedliche Flächenmuster. Zwei breite Gassen teilen das Feld in drei Teile. Diese Parzellen sind wiederum durch je zwei Fußwege gedrittelt. Diese Feldstruktur ist in den Widerstandskarten wieder zu finden. Die Wege verlaufen in NW-SE-Richtung und zeichnen sich in Folge der Verdichtung durch leicht geringere Widerstandswerte im Verhältnis zur Umgebung ab. Im östlichen Teil der Flächen sind die verdichteten von den unverdichteten Parzellen an Hand der Widerstandskarten deutlich abzugrenzen. Zur Veranschaulichung ist das Flächendesign des Versuchs rechts in Abb. 49 enthalten (Abbildung übernommen von G. Höfer).

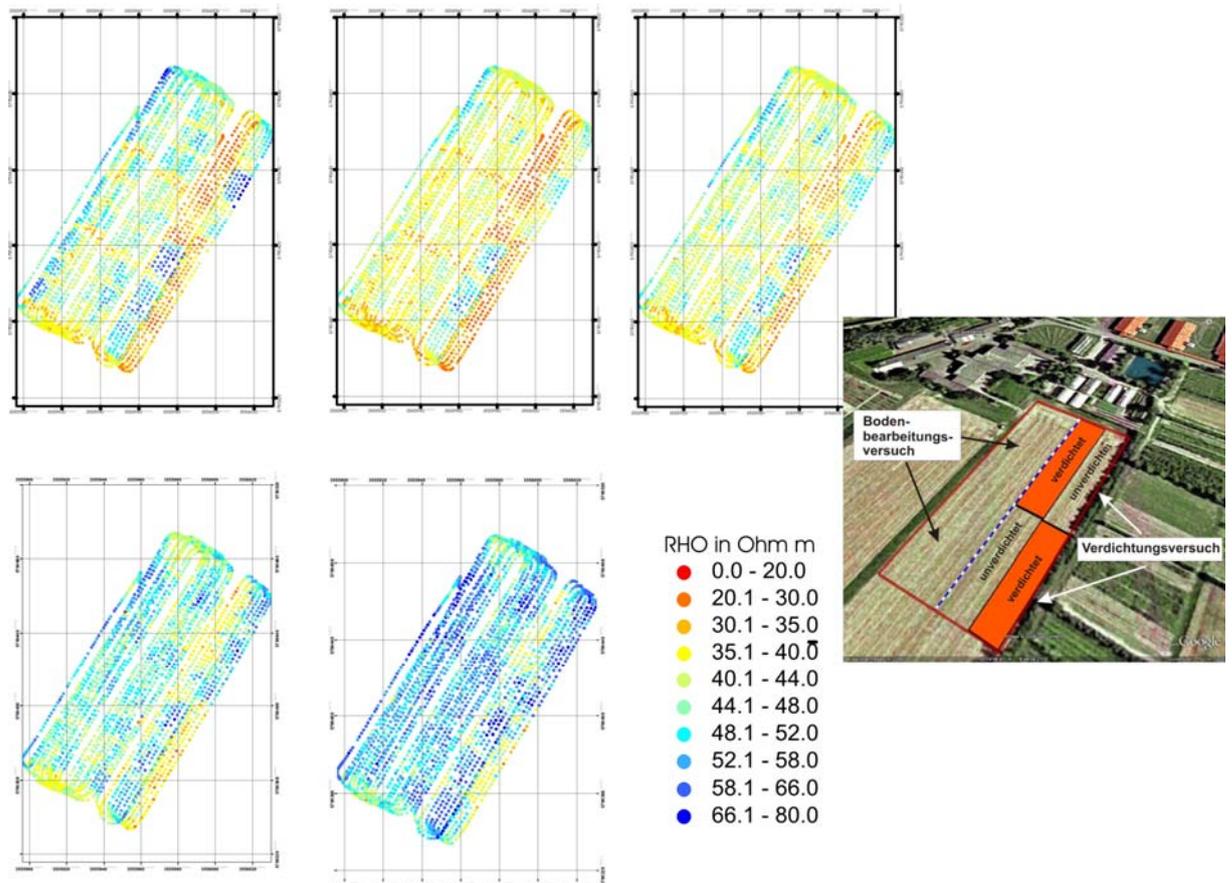


Abb. 49 Widerstandsverteilung der Versuchsfläche in Ruthe bei Hannover und Flächeneinteilung für die Versuchsdurchführung

Zusätzlich zu den Leitfähigkeitskarten zeigen auch ausgewählte Phasenwinkelkarten die Unterschiede im Bodengefüge auf. Da die Unterschiede nicht in allen Frequenzen gleich deutlich zu erkennen sind, werden weitere Experimente notwendig, um sichere Aussagen zur Abbildung von Verdichtungsstrukturen in Phasenwinkelmessungen abzuleiten. Abb. 50 zeigt einen Vergleich einer Leitfähigkeits- und einer Phasenwinkelkarte (Kanal 1,  $f = 187.5$  Hz).

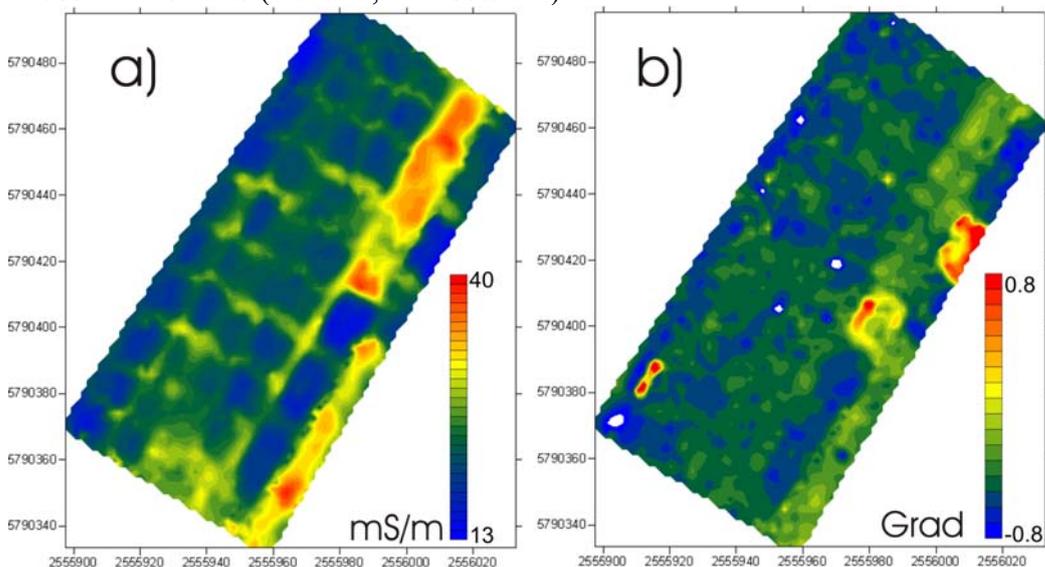


Abb. 50 Informationen aus a) Leitfähigkeits- und b) Phasenwinkelmessungen

Die Feldarbeiten in Ruthe haben gezeigt, dass sich ständig wechselnder Bewuchs, wie er auf den Versuchsfeldern angetroffen wurde, schwierig auf die Optimierung der Messparameter auswirkt. Ein ständiger Wechsel zwischen Winterweizen und Brache beeinflusst die einzuspeisende Stromstärke (im nassen Winterweizen Anstieg der Stromstärke auf 100mA und mehr → größere Einspeisung deshalb nicht möglich, auf den Brachflächen Abfall der Stromstärke auf ~50mA). Versuchsflächen mit einer kleinräumigen Parzellierung sollten deshalb besser zu einem Zeitpunkt nach der Bodenbearbeitung ohne Bewuchs kartiert werden.

### 5.3. Hochohmige Sandflächen in Horstwalde

Für die Fläche in Horstwalde liegen hoch aufgelöste Magnetikdaten sowie eine Leitfähigkeitskarte (EM38) vor, die zum Vergleich und zur Bewertung der GEOPHILUS-Daten herangezogen werden können. Die Messungen in Horstwalde hatten mehrere Zielstellungen:

1. Einsatz des GEOPHILUS unter extrem hochohmigen Bedingungen
2. Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der Daten durch Wiederholung der Befahrung mit geänderter Fahrtrichtung (Flächenkartierung einmal längs und einmal quer)
3. Vergleich der GEOPHILUSdaten mit den Karten von Magnetik, Elektromagnetik und Georadar

Um eine möglichst exakte Positionierung zu realisieren, wurde mit einem Tachymeter gearbeitet, welches das auf dem Zugfahrzeug befestigte Prisma während der Fahrt „verfolgte“ und über eine Lasermessung die Position bestimmte. Die damit erreichte Positionsgenauigkeit liegt im cm-Bereich. Die realisierte Punktverteilung aller Messungen und die zugehörigen Fahrtrichtungen sind in Abb. 51 gezeigt.

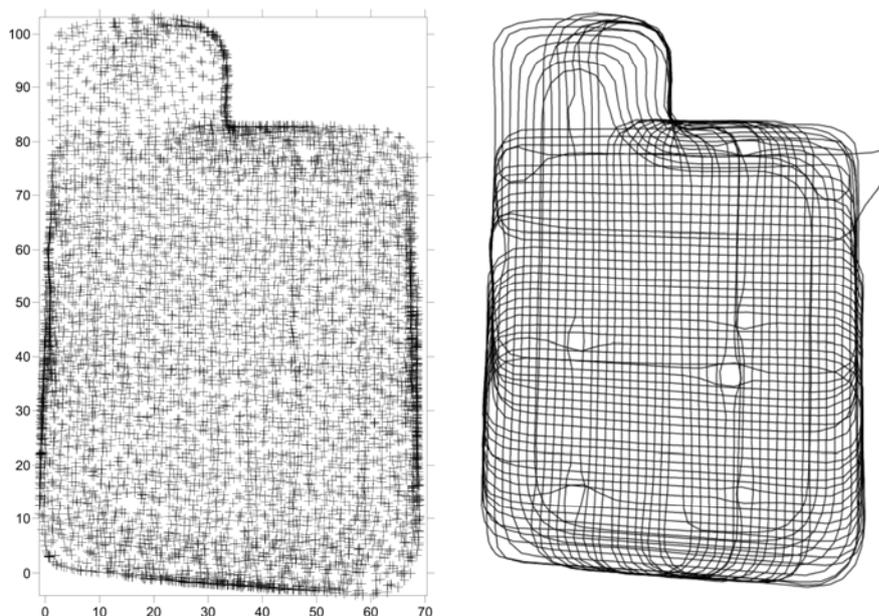


Abb. 51 Lage der Messpunkte für die GEOPHILUS-Kartierung in Horstwalde. (links: Lage der Messpunkte, rechts: Fahrspuren)

Die Abb. 52 zeigt ausgewählte Ergebnisse der Kartierung. Während die Grafiken A – C Leitfähigkeitskarten darstellen (A – Kanal 1, B – Kanal 2 und C – Kanal 5), enthält die untere Reihe Abbildungen der Phasenverschiebung. Es sind die Ergebnisse der Frequenz 187.5 Hz gezeigt. Die Leitfähigkeiten sind insgesamt sehr gering und zeigen wenig Differenzierung. Die Strukturen in den Phasenwinkelkarten sind wesentlich deutlicher. Im Osten der Fläche zeigt sich ein Gebiet mit negativen Phasenwinkeln. Es handelt sich hierbei um eine Betonplatte, die auf Grund der Phasenwinkelkarten als durchgehend angenommen werden muss. Dies ist im Gelände nicht ohne weiteres ersichtlich gewesen. Außerdem zeigt sich ein Netz linienartiger Strukturen, welche durch sich abwechselnde positive und negative Maxima in den Phasenwinkeln beschrieben werden können. Es handelt sich hierbei um Leitungen, die aus den anderen geophysikalischen Untersuchungen (Magnetikkartierung, Elektromagnetik, Georadar) eindeutig zu belegen sind (vgl. Abb. 53).

Um die Reproduzierbarkeit dieser Phasenwinkelinformationen zu überprüfen, wurde der Gesamtdatensatz in Längs- und Querprofile zerlegt. Eine Gegenüberstellung dieser Datensätze für den Kanal 5 und die Frequenz 187.5 Hz ist in der Abb. 53 zu sehen. Während im linken Teil der Abbildung die Längstrassen und im mittleren Teil die Quertrassen dargestellt sind, ist rechts der gesamte Datensatz gezeigt. Es zeigt sich, dass nicht alle Leitungen in allen Fahrtrichtungen gleich deutlich abgebildet werden, dass die Muster aber prinzipiell reproduzierbar sind. Auf eine Diskussion der anderen Datensätzen der Geophysik wird an dieser Stelle verzichtet.

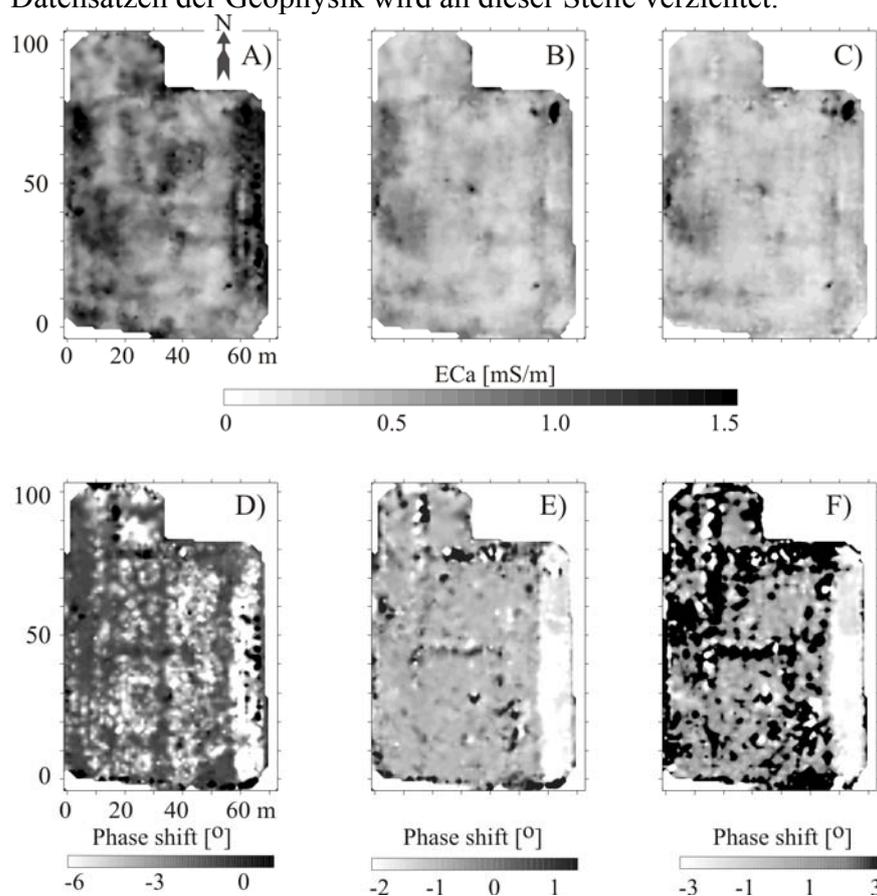


Abb. 52 Ausgewählte Ergebnisse der GEOPHILUS-Kartierung in Horstwalde (oben: Leitfähigkeitskarten für die Kanäle 1, 2 und 5 und unten: Phasenwinkelkarten)

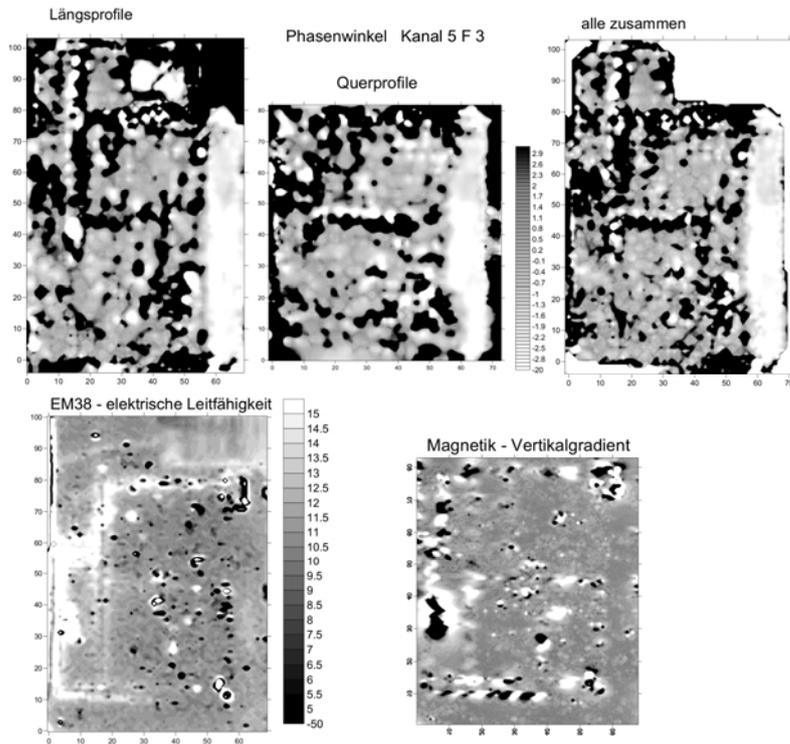


Abb. 53 Phasenwinkelkarten für Kanal 5 ( $f = 187.5$  Hz) in unterschiedlichen Fahrtrichtungen (oben) und Ergebnisse von Magnetik und Elektromagnetik (unten)

## 5.4. Torfböden in Paulinenaue

Hohe Tongehalte im Boden, Versalzungen und Torf führen zu gut leitfähigen Strukturen. Diese stellen Extremfälle für geoelektrische Kartierungen dar. In Paulinenaue haben wir auf einem Sandboden eine Torfauflage.

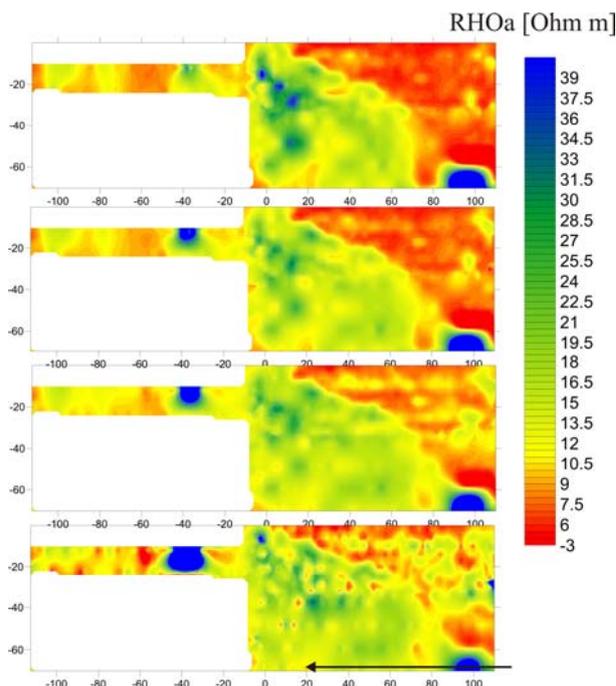


Abb. 54 Widerstandskarten – Flur 5 – Paulinenaue  
Der Pfeil markiert die Lage und die Richtung der Referenzmessung.

Ziel dieser Untersuchungen ist es herauszufinden, ob man mit dem GEOPHILUS in der Lage ist, die Schichtmächtigkeit des Torfes zu ermitteln. Erste Kartierungen hierzu erfolgten im Oktober 2008. Eine weitere Feldkampagne fand im März 2009 statt. Stellvertretend für alle Daten sollen hier ausgewählte Beispiele gezeigt werden. In Abb. 54 sind von oben nach unten die Kanäle 1, 2, 3 und 5 gezeigt. Es wird deutlich, dass mit zunehmender Tiefe die Widerstandswerte zunehmen, d.h. der Einfluss der unter dem Torf liegenden Sandschicht immer größer wird. An einzelnen Singularitäten tritt der Sand an der Oberfläche zu Tage. Diese Ergebnisse decken sich gut mit einer im Frühjahr 2009 gemessenen Transekte mit konventionell gesteckten Elektroden (Abb. 55) und mit den untersuchten Bohrstockproben. An der im Profil vorhandenen Sandlinse beobachten wir einen größeren Grundwasserflurabstand und an der Oberfläche ein Minimum im Wassergehalt. Dies hat Auswirkungen auf die geoelektrischen Messungen. In den Widerstandswerten wird über dem Sand ein Maximum beobachtet und in den Phasenwinkeln ein Minimum.

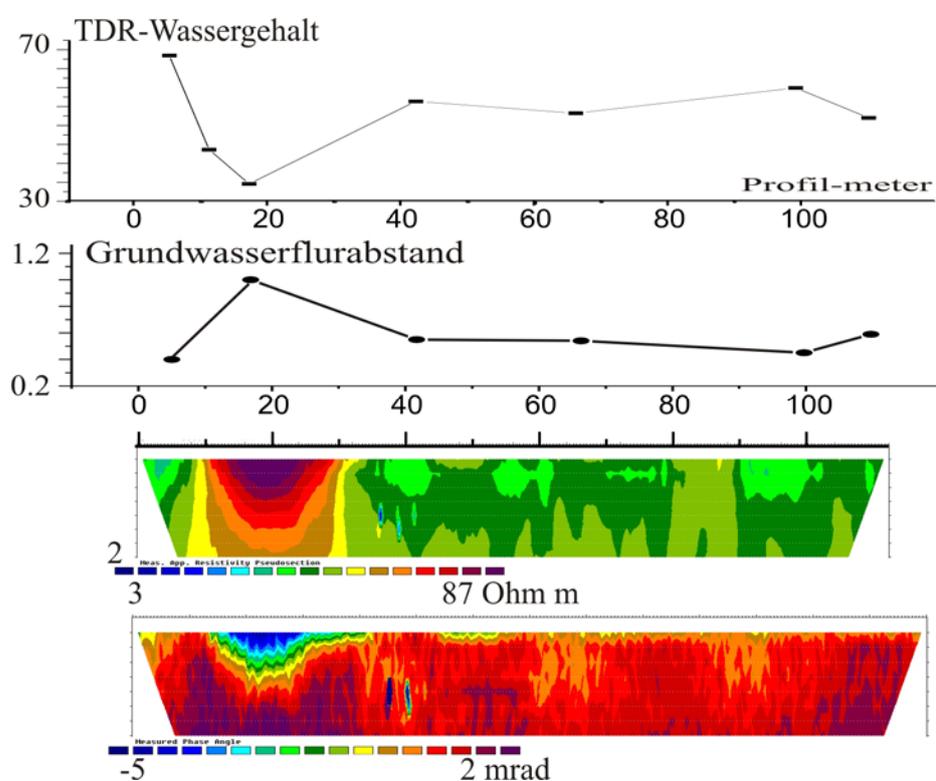


Abb. 55 Widerstands-Tiefen-Daten (Messwerte) entlang des in Abb. 54 eingezeichneten Profils

## 5.5. Rekultivierungsflächen

Rekultivierte Flächen ehemaliger Tagebaubetriebe werden heute teilweise geoelektrisch kartiert, um ein optimales Nutzungskonzept zu erstellen. Die damit beauftragten Ingenieurbüros führen diese Arbeiten konventionell aus. In einem festgelegten Punktraster (in der Regel 10 – 20 m Punktabstand) werden Wenner-Messungen mit einem einfachen Elektrodenabstand von 2 m realisiert. Eine dieser Flächen wurde von uns parallel mit dem GEOPHILUS abgefahren, um zu prüfen, inwieweit unser Gerät auch für derartige Aufgabenstellungen einsetzbar ist.

Zeitgleich zur GEOPHILUS-Kartierung wurden an den Messpunkten der Standmessungen TDR-Beprobungen zur Ermittlung des aktuellen Bodenwassergehaltes durchgeführt. In der Abb. 56 sind die Ergebnisse gegenübergestellt.

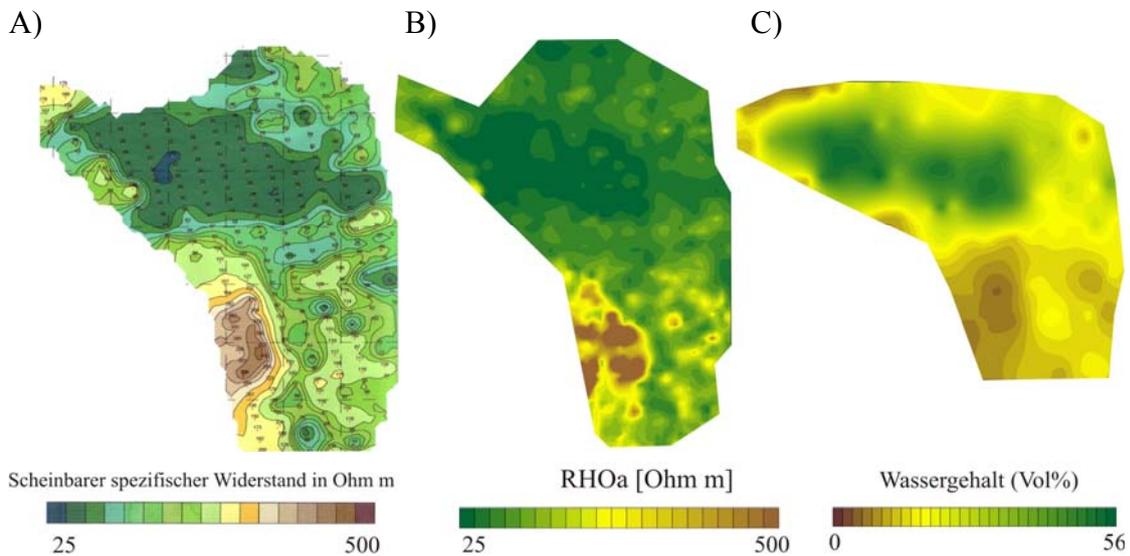


Abb. 56 Kartierung einer Rekultivierungsfläche in der Lausitz

- A) Konventionelle Geoelektrikkartierung mit Wenner-Anordnung,  $a = 2\text{m}$ , GMBmbH
- B) GEOPHILUS-Kartierung, Kanal 1,  $f = 62.5\text{ Hz}$
- C) TDR-Kartierung

## 5.6. Testfläche ‚Gutsfeld‘ in Bornim

Das Gutsfeld in Bornim stellt so etwas wie eine hauseigene Testfläche dar (Gebbers, Lück et.a., 2009). Seit 2003 werden auf einer Grasfläche von etwa  $150 \times 120\text{ m}$  geophysikalische Verfahren – insbesondere Leitfähigkeitskartierungen getestet. Damit liegt ein umfangreicher Datensatz vor, mit dem der GEOPHILUS verglichen werden kann. Das ATB (Institut für Agrartechnik Bornim) testet ebenfalls seine Entwicklungen auf dieser Fläche. Es bietet sich hiermit also vielleicht auch einmal die Möglichkeit, die beiden Parallelentwicklungen qualitativ zu vergleichen. Der momentan große Unterschied beider Geräte ist die Art der Messwertaufnahme. Während der GEOPHILUS kontinuierlich in der Bewegung misst, rollt das ATB zwar zu den einzelnen Messpunkten, misst aber dann jeweils im Stand. Damit muss die Flächenleistung dieses Sensors zwangsläufig geringer sein – bezüglich der möglicherweise auftretenden Unterschiede in der Datenqualität kann bisher keine Aussage gemacht werden, da es leider noch nicht zu einem Datenvergleich gekommen ist.

Die früheren Arbeiten wie etwa die Kartierung mit dem amerikanischen System VERIS-3100 oder mit dem französischen System ARP03 wurden von uns in Auftrag gegeben und begleitet. Die engmaschige EM38-Kartierung erfolgte in Eigenregie. Die Abb. 57 fasst einen Großteil der gesammelten Daten zusammen. Zusätzlich vorliegende magnetische Karten sind hier nicht enthalten.

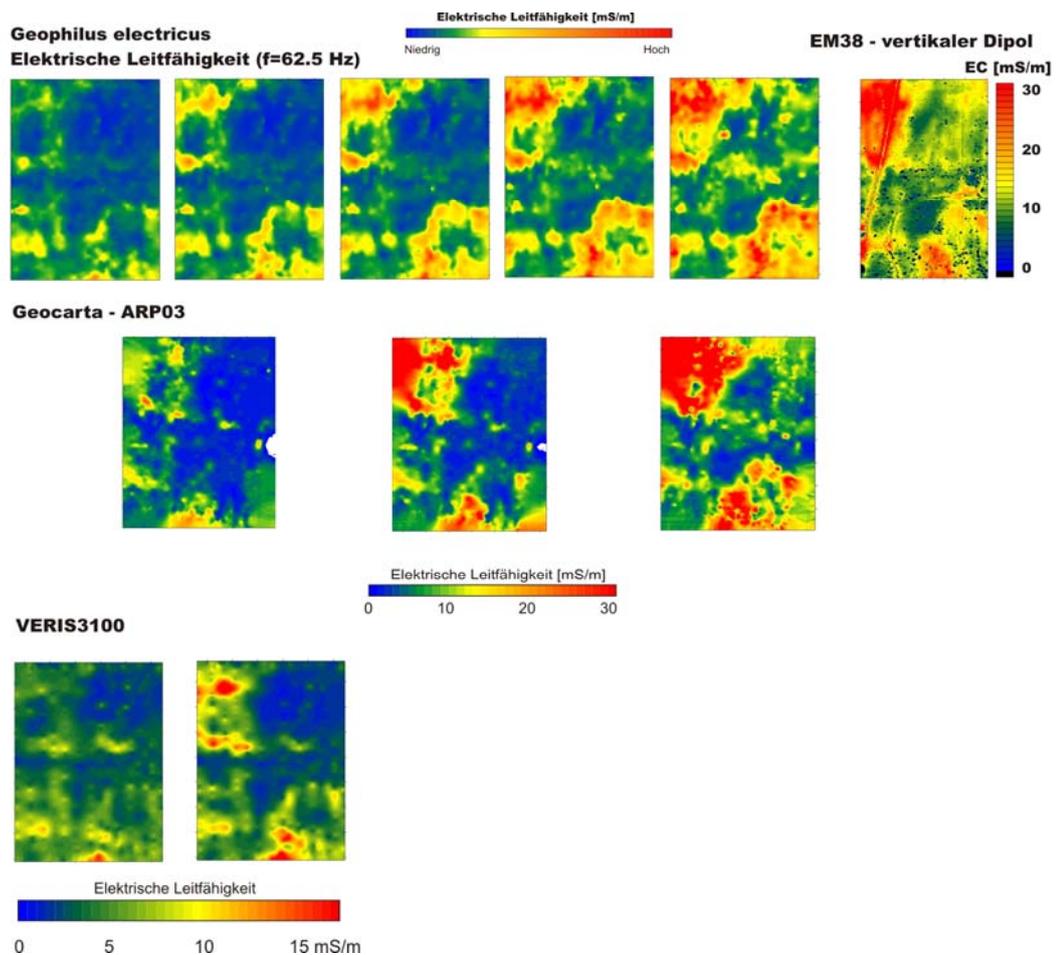


Abb.57 Gegenüberstellung diverser Kartierungen der Fläche ‚Gutsfeld‘ in Potsdam-Bornim

Alle Leitfähigkeitskarten weisen ähnliche Muster auf. Einerseits ist zu erkennen, dass die Leitfähigkeit mit der Tiefe zunimmt und andererseits fallen die lateralen Unterschiede ins Auge. Jeder eingesetzte Sensor schaut in einen etwas anderen Tiefenbereich. Damit lassen sich die Unterschiede zwischen einzelnen Geräten erklären. Schaut man sich die Sensitivitätskurven der einzelnen Kartiergeräte an, dann sind die auftretenden Unterschiede in den Leitfähigkeitskarten plausibel. In der Abb.58 sind die Sensitivitätskurven für die eingesetzten rollenden Elektroden gezeigt.

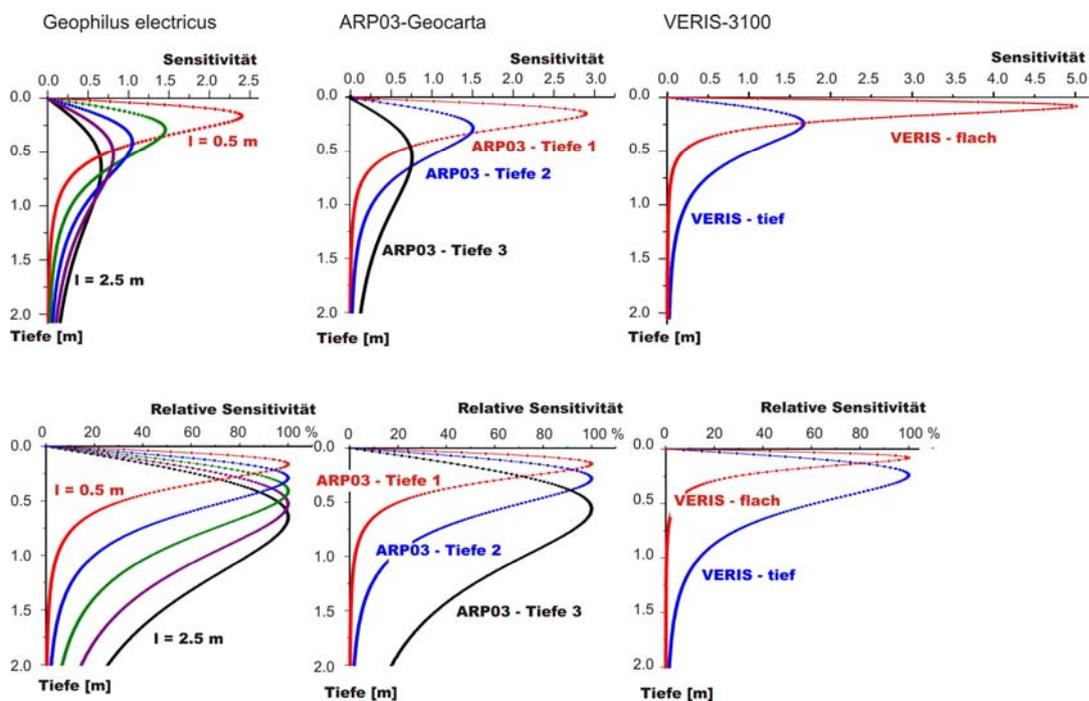


Abb.58 Sensitivitätsverteilungen A) für den GEOPHILUS, B) für das ARP03 und C) für das VERIS-3100

Für das Gutsfeld liegen zusätzlich drei Widerstands-Tiefen-Sektionen vor, die die aus den Kartierungen abzuleitende vertikale Schichtung sehr gut bestätigen.

## 5.7. Referenztrasse in Großbeeren

Im Institutsgelände des IGZ Großbeeren wurde eine Referenztrasse angelegt, die für methodische Tests zur Verfügung steht. Es wurden gezielt Strukturen im Boden vergraben bzw. es wurde ein Bodenaustausch vorgenommen, so dass isoliert Boden-anomalien aus bekannten Materialien und mit bekannter Geometrie vorliegen. An diesen Objekten können u.a. geophysikalische Verfahren getestet und validiert werden. Im Rahmen dieses Projektes wurde die Teststrecke genutzt, um die zeitliche Reproduzierbarkeit der GEOPHILUS-Messungen zu bestätigen. Zwischen dem 9. April und dem 15. Juli 2009 wurden insgesamt 12 Wiederholungsmessungen angelegt, die Feuchtezustände im Oberboden zwischen 4 und 20 Vol% erfassen. Die drei ausgewählten Widerstandsmessungen in Abb. 59 zeigen die Reproduzierbarkeit der Strukturen. Unterschiede in den Absolutwerten werden einerseits durch die zeitlich variablen Wassergehalte aber auch durch Unterschiede in der oberflächennahen Bodentemperatur hervorgerufen. Die Daten der Messungen sind in der Abbildung angegeben. Obwohl am 12.05.09 16.7 % Wasser im Oberboden gemessen worden sind, wurden auf Grund relativ geringer Bodentemperaturen die höchsten Widerstandswerte registriert. Am 04.06.09 lag der durchschnittliche Wassergehalt bei 20% und am 15.07.09 bei 3.6 %. Da es sich um Messwerte für den Oberboden handelt (Kanal 1), ist der Einfluss oberflächennaher Temperaturänderungen bei der Dateninterpretation zu berücksichtigen. Die Wiederholbarkeit für die Phasenwinkel-messungen sind deutlich schlechter.

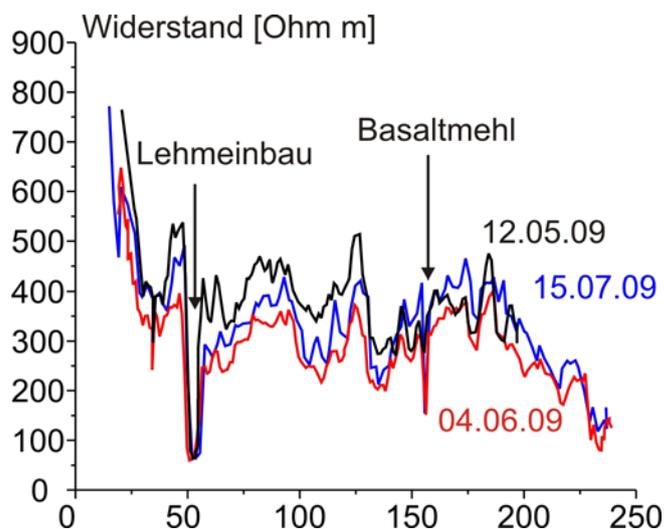


Abb. 59 Wiederholungsmessungen entlang der Referenztrasse in Großbeeren

## 5.8. Messung auf einer archäologischen Fundstelle in Kalbe/Milde

Der Einsatz des GEOPHILUS sollte in Zukunft nicht nur auf landwirtschaftliche Anwendungen begrenzt bleiben, sondern für alle Aufgaben, die den oberflächennahen Bereich abbilden, zur Verfügung stehen. Deshalb wurden erste Tests auf archäologischen Fundstellen gefahren. Dabei hat sich herausgestellt, dass das Messsystem bei prinzipieller Eignung verbessert werden muss. So werden insbesondere Anforderungen an die räumliche Abtastung und damit die Verkürzung der Messzeiten gestellt, die in Zukunft zu lösen sind. Abb. 60 zeigt eine Leitfähigkeitskartierung für die Kreisgrabenanlage bei Kalbe mit unterschiedlichen Messpunktdichten. Während im linken Teil der Abbildung der Fahrgassenabstand mehrere Meter beträgt, ist im rechten Teil eine hochauflösendere Darstellung zu sehen.

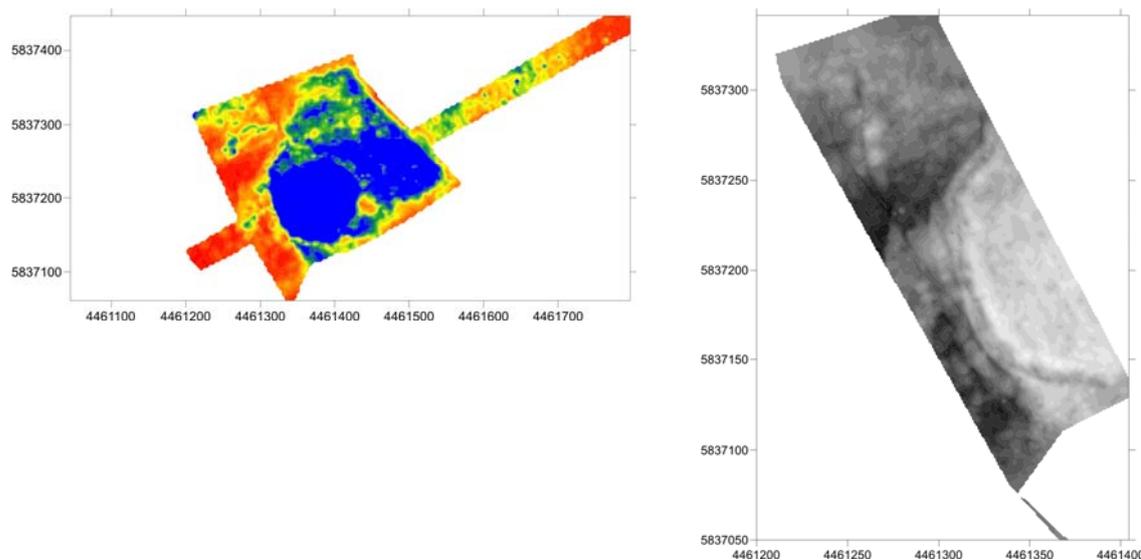


Abb. 60 Leitfähigkeitskarten für die Fundstelle Kalbe/Milde

## 6. Labormessungen

### 6.1. Bodenanalysen zur Bestimmung von Bodenwassergehalt und Textur

Aus früheren Untersuchungen ist bereits bekannt, dass es enge Zusammenhänge zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und Bodenparametern gibt, die für die Bodenfruchtbarkeit relevant sind. An dieser Stelle werden die Korrelationen zum Wassergehalt und zur Korngrößenverteilung näher beleuchtet, wobei beide eigentlich nicht losgelöst voneinander betrachtet werden dürfen. Die unter natürlichen Bedingungen angetroffene Variabilität im Wassergehalt wird wesentlich durch Texturunterschiede bestimmt, so dass auch zwischen diesen beiden Größen eine starke Korrelation besteht.

In Laborexperimenten wurden Versuchsreihen gefahren, die den Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Wassergehalt demonstrieren. Abb. 61 zeigt die Ergebnisse einiger Messreihen, die durch systematische Austrocknung der Böden im Zusammenhang mit Leitfähigkeitsmessungen entstanden sind. In künftigen Untersuchungen wird versucht werden, an Hand der Steilheit der Kurven bodenartentypische Korrelationsfunktionen zu bestimmen.

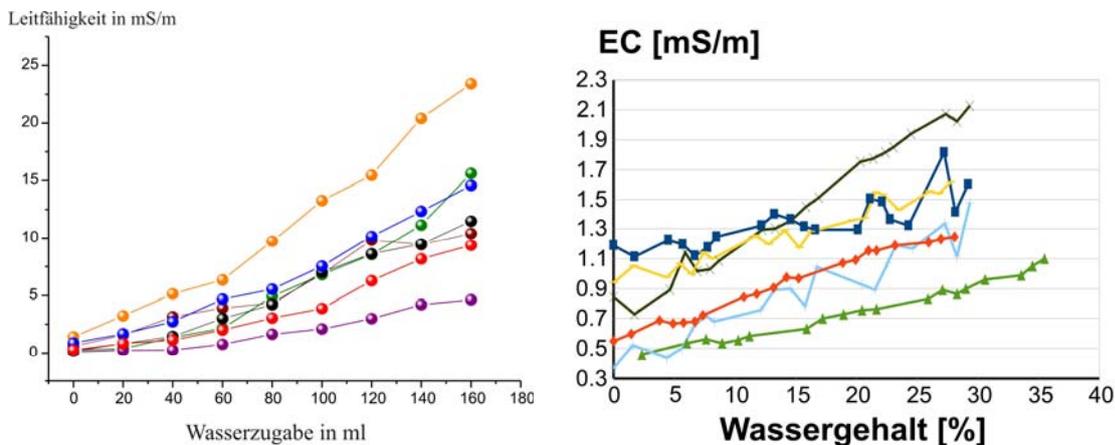


Abb. 61 Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit und Wassergehalt

Korrelationen für Labordaten sind auf Grund der gezielten Parametervariation oft viel deutlicher zu erkennen als für Felddaten. Die Korrelation zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Wassergehalt wird aber auch an Felddaten deutlich. Beispielhaft sollen hier die Ergebnisse für die Felder 18 und 19 in Trebbin vorgestellt werden. Mit einem Punktabstand von 50 m wurden beide Felder beprobt und die Bodenproben aus jeweils drei Tiefenlagen hinsichtlich Bodenwassergehalt und Korngrößenverteilung im Labor untersucht. Die Schichtgrenzen für die drei Tiefen wurden dabei entsprechend der Bodenansprache im Gelände festgelegt, d.h. es wurde keine starre metrische Tiefenunterteilung vorgenommen. Die gravimetrisch bestimmten Bodenfeuchtwerte lagen zwischen 2 und 23%, d.h. es konnte eine relativ starke Differenzierung beobachtet werden und ein guter Zusammenhang zur elektrischen Leitfähigkeit beobachtet werden. In Abb. 62 ist ein optischer Vergleich zwischen beiden Größen

dargestellt. Der interpolierten Bodenfeuchteverteilung sind Widerstandsmesswerte (Kanal 4,  $f = 62.5 \text{ Hz}$ ) überlagert. Es zeigt sich, dass Gebiete mit hohen Widerstandswerten als Gebiete mit geringen Wassergehalten ausgewiesen sind.

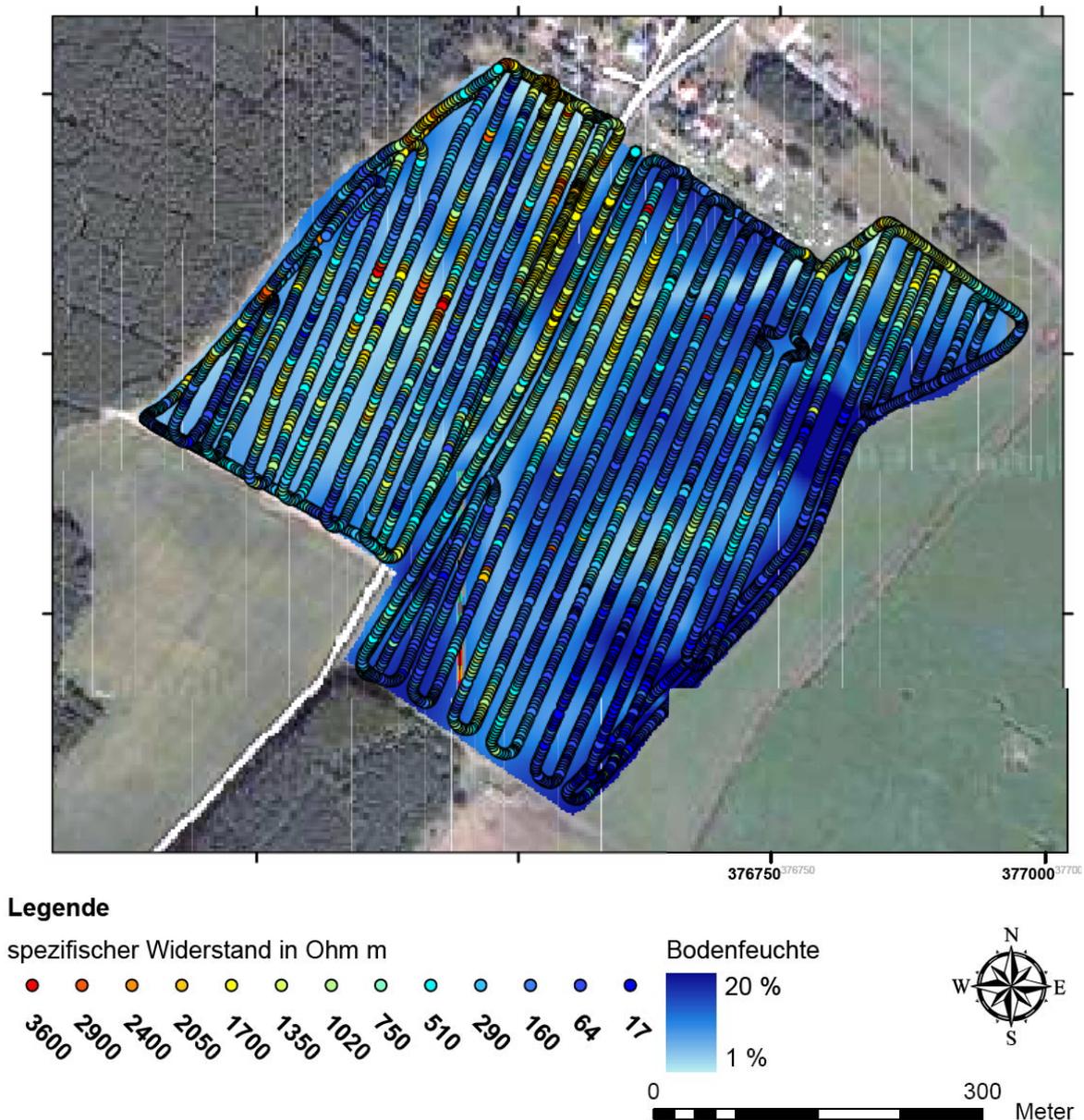


Abb. 62 Räumliche Verteilung der Bodenfeuchte im Vergleich zur Widerstandsverteilung (Abbildung entnommen aus der Diplomkartierung R. Glasmacher, 2009)

Die Texturuntersuchungen für die Betriebe Trebbin und Köllitsch bestätigen die Unterschiede zwischen beiden Betrieben. Während für große Teile des Betriebes Trebbin Sandgehalte zwischen 50 und 99 % und Tongehalte zwischen 0.09 und 8.5% beobachtet werden, sind die Böden in Köllitsch deutlich feinkörniger und die Schichtung entgegengesetzt. In Trebbin liegt die Sandschicht auf der lehmigen Unterlage. In Köllitsch ist die Sandschicht bedeckt von einem Boden mit höheren Feinanteilen (siehe Abb. 63). In der Abb. 63 ist ein Profilschnitt durch den Schlag Pfaffenloch gezeigt. Der Profilschnitt ist an Hand einer Bodenansprache im Gelände (Bohrstockproben bis 1 m Tiefe) entstanden. Die Zunahme des Sandgehaltes von

reichlich 20 % im Oberboden auf über 50% im Unterboden wurde durch Laboranalysen bestätigt (vgl. Tab. 4). Die aus dem Profilschnitt zu erwartende Leitfähigkeitsabnahme mit der Tiefe ist in der Abb. 25 bereits gezeigt worden.

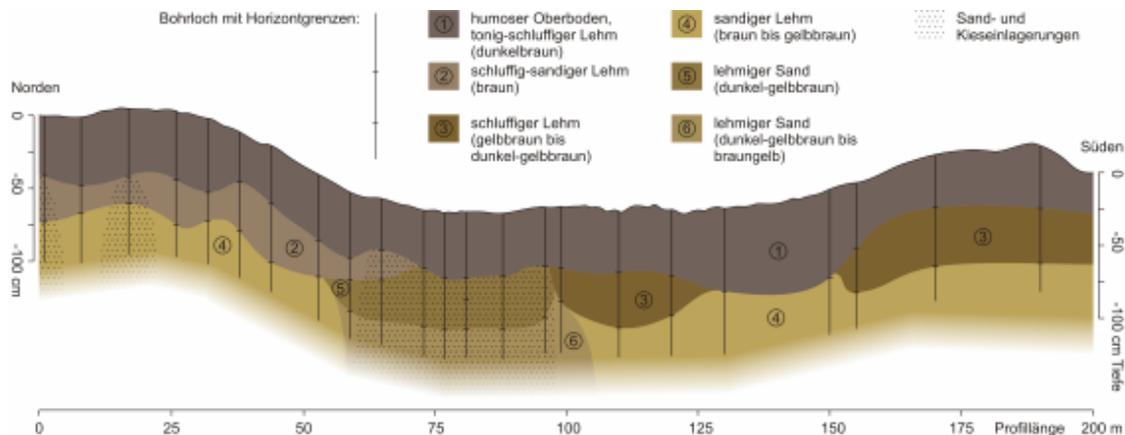


Abb. 63 Profilschnitt durch den Oberboden des Schlages Pfaffenloch in Köllitsch (Diplomarbeit T.Meschzan, 2010).

## 6.2. SIP-Messungen an Bodenproben

Die SIP-Messungen (Spektrale Induzierte Polarisation) beinhaltet Messreihen von sowohl elektrischem Widerstand als auch Phasenwinkel in Abhängigkeit von der Frequenz. Elektrische Labormessungen an Lockermaterialien sind noch relativ jung. Im Vergleich zu Messungen an festen Materialien hat man bei Bodenuntersuchungen mit weit mehr Unzulänglichkeiten zu rechnen.

- Im Laufe der Jahre durchgeführte Untersuchungen haben gezeigt, dass beispielsweise die Temperaturstabilität der Messzelle und deren Umgebung die Messqualität wesentlich verbessert und dass selbst geringe Schwankungen im Umfeld bei Wiederholungsmessungen an einer Probe sichtbar werden.
- Des Weiteren muss sich ein Gleichgewicht in der Probe einstellen, so dass nicht unmittelbar nach Befüllen einer Messzelle reproduzierbare Werte ermittelt werden können.
- Insbesondere Phasenwinkelmessungen hängen stark von der Befüllung der Messzellen ab. Daraus muss sich beinahe die Frage ableiten, wie repräsentativ derartige Labordaten sind.
- Im Labor hat man die Möglichkeit, einzelne Parameter zu variieren. Man muss sich die Frage stellen, inwieweit es überhaupt möglich ist, alle anderen Parameter konstant zu halten.

Die vorangegangenen Punkte sollen die Schwierigkeiten von Laboruntersuchungen etwas erläutern. Darauf aufbauende, zunehmende Laborerfahrungen geben Anlass, bereits untersuchte Zusammenhänge zu überprüfen. Seit einigen Jahren ist an der Uni Potsdam ein Messplatz in Betrieb, der die spektrale induzierte Polarisation von Bodenproben bestimmen lässt. Über einen Log-In-Verstärker kann ein Frequenzspektrum zwischen 0.1 und 100 000 Hz durchfahren werden. Dies kann entweder Computer-gesteuert automatisch erfolgen oder manuell gesteuert. Auch wenn die Apparatur in einem klimatisierten Raum steht und somit die auftretenden

Temperaturschwankungen gering gehalten werden, so zeigen sich doch in den computergesteuerten Messreihen immer wieder Schwankungen, die in den Handmessungen nicht beobachtet werden. Die Abb. 64 zeigt die Wiederholungsmessungen für eine Bodenprobe aus Trebbin. Zwischen den beiden Messterminen wurde die Messzelle neu befüllt, wobei das gleiche Material und die gleiche Menge verwendet wurden. Es zeigt sich ein überraschend stabiles Phasenwinkelverhalten, während die Absolutwerte des elektrischen Widerstandes deutliche Unterschiede aufweisen, der frequenzabhängige Abfall hingegen gleich bleibt. Die Phasenwinkelstabilität kann nur erreicht werden, wenn der Einbau „mehr oder weniger kontrolliert“ erfolgt. Schwierigkeiten können für eine lockere Schüttung auftreten. In diesem Fall weist jede Materialprobe eine unterschiedliche Anzahl an großen und kleinen Porenraumbereichen auf. Die Phasenspektren zeigen deutlich, dass bei undefiniertem Einbau eine Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse unmöglich ist (Halisch und Weller, 2006).

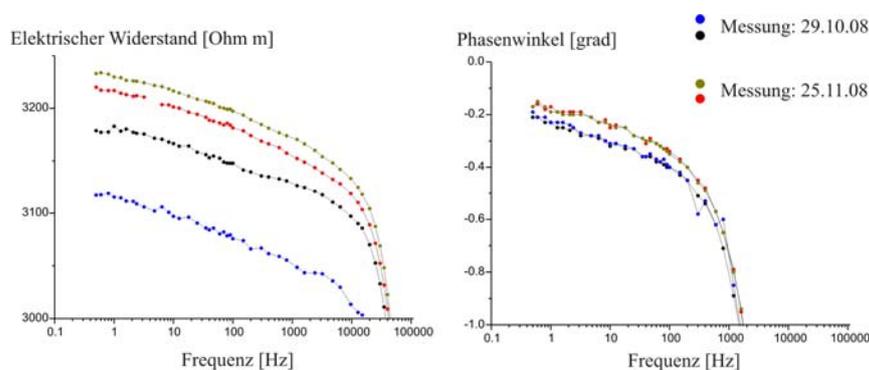


Abb. 64 SIP-Wiederholungsmessungen an einer Bodenprobe aus Trebbin

Aus den Laboruntersuchungen können folgende Schlussfolgerungen abgeleitet werden:

- Labormessungen an Lockermaterialien sind sehr sensibel hinsichtlich der Probenaufbereitung
- Die frequenzabhängigen Änderungen sind möglicherweise nicht auf Polarisations- sondern auf elektromagnetische Effekte zurückzuführen. Die Messeinrichtung an der Uni Potsdam ist nicht ausreichend, um mit der erforderlichen Genauigkeit Frequenzen kleiner als 1 Hz zu messen. Für Polarisierungseffekte (Minimum im Phasenwinkel) wäre aber gerade dieser Frequenzbereich besonders interessant.
- Insbesondere der Frequenzverlauf der Phasenwinkelmessungen wird von der Art der Befüllung der Messzellen beeinflusst. Eine lockere Befüllung der gleichen Zelle mit dem gleichen Material führt zu unterschiedlichen Phasenwinkelkurven. Der Phasenwinkel reagiert sehr sensibel auf das Bodengefüge.
- Eine zunehmende Versalzung des Bodens führt zu einer Verringerung der elektrischen Widerstandswerte und gleichzeitig zu einer Verringerung der Phasenverschiebungen
- Ein zunehmender Wassergehalt im Boden minimiert die Phasenverschiebung

Labormessungen haben gegenüber Feldmessungen den Vorteil, dass einzelne Parameter gezielt variiert werden können. So können beispielsweise Verdichtungsgrade oder Wassergehalte an natürlichen Bodenproben eingestellt und die Auswirkung auf die elektrischen Kenngrößen studiert werden. In Abb. 65 ist eine Messreihe aus Ohrleben zu finden, bei der systematisch der Wassergehalt der

Bodenprobe erhöht wurde und der resultierende Abfall der Widerstandswerte studiert wurde. Für die im rechten Teil der Abb. 65 enthaltenen Phasenwinkelmessungen lassen sich keine systematischen Zusammenhänge erkennen. Für die Widerstandswerte wurden ähnliche Ergebnisse sowohl für Bodenproben aus Köllitsch als auch aus Trebbin erhalten. Die Phasenwinkelspektren für Köllitsch zeigen deutliche Unterschiede zwischen der ganz trockenen Probe und einer leicht feuchten Probe (Abb. 66). Während die trockene Probe eine deutliche Frequenzabhängigkeit im Phasenwinkel erkennen lässt, geht der Phasenwinkel nach Zugabe einer geringen Wassermenge auf Null und ändert sich innerhalb des interessierenden Frequenzbereiches bis 100 Hz praktisch nicht mehr.

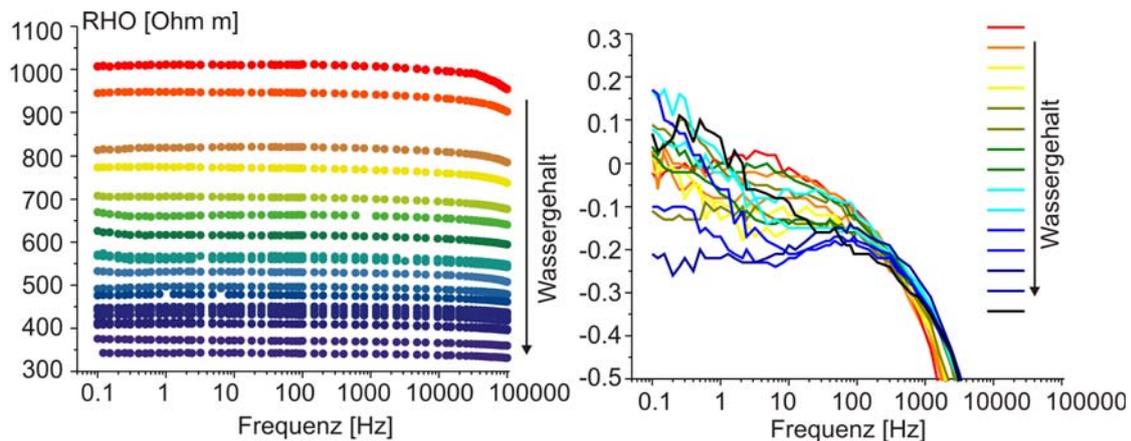


Abb. 65 SIP-Labormessungen an einer Bodenprobe aus Ohrleben

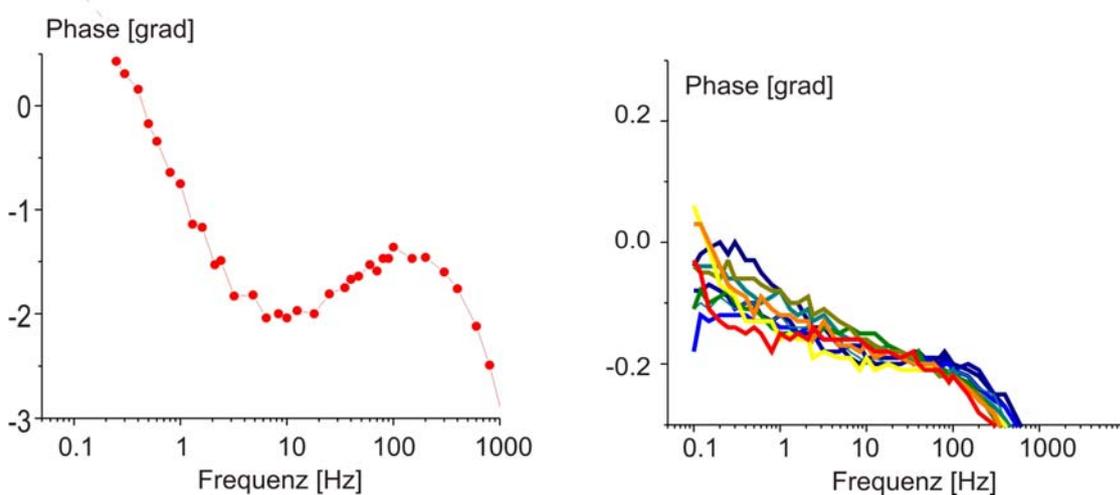


Abb. 66 Phasenwinkelspektren für eine Bodenprobe aus Köllitsch (Toter Mann)  
Links: trockene Probe, rechts: Variationen des Wassergehaltes

### 6.3. SIP-Messungen an Testnetzwerken

Um die Güte von Widerstands- und Phasenwinkelmessungen mit der Rabbit bewerten zu können, wurden im Labor Testnetzwerke realisiert, die sich aus bekannten Widerständen und Kondensatoren zusammensetzen lassen. In Anlehnung an das Ersatzschaltbild für den Boden nach Pelton et al. 1978 wurde die in Abb. 67 gezeigte Schaltung realisiert. Die im Modell enthaltene Kapazität ist für die Effekte der

induzierten Polarisation verantwortlich. Die Widerstandswerte bestimmen die Größenordnung der elektrischen Leitfähigkeit des Bodens.

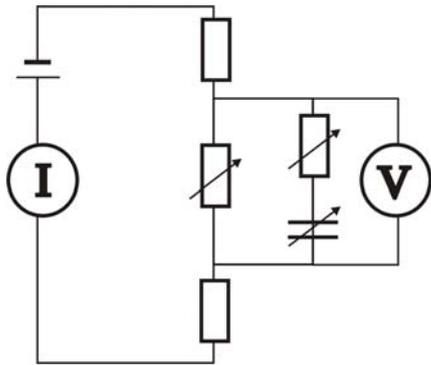


Abb. 67 Ersatzschaltbild zur Modellierung elektrischer Bodeneigenschaften

Für die jeweils eingestellten Widerstände und Kapazitäten wurden unter Berücksichtigung der Signalfrequenz die theoretischen Bodenwiderstände und Phasenverschiebungen berechnet und mit den im Labor über die Rabbit bestimmten Werten verglichen. Es ergibt sich eine recht gute Übereinstimmung in Form eines linearen Zusammenhangs zwischen berechneten und gemessenen Größen. Abb. 68 zeigt einige Ergebnisse für die Signalfrequenz von 62.5 Hz. Ähnliche Datensätze wurden für die drei weiteren Vorzugsfrequenzen erhalten. Um die gewählten Kapazitäten zu demonstrieren, ist im linken Teil der Abb. 68 die Änderung des Phasenwinkels mit der Kapazität gezeigt. Die beiden anderen Diagramme zeigen eine Gegenüberstellung von berechneten und gemessenen Größen. Die Abweichung der Absolutwerte ist auf Grund einer fehlenden Kalibriereinstellung für dieses Netzwerk entstanden.

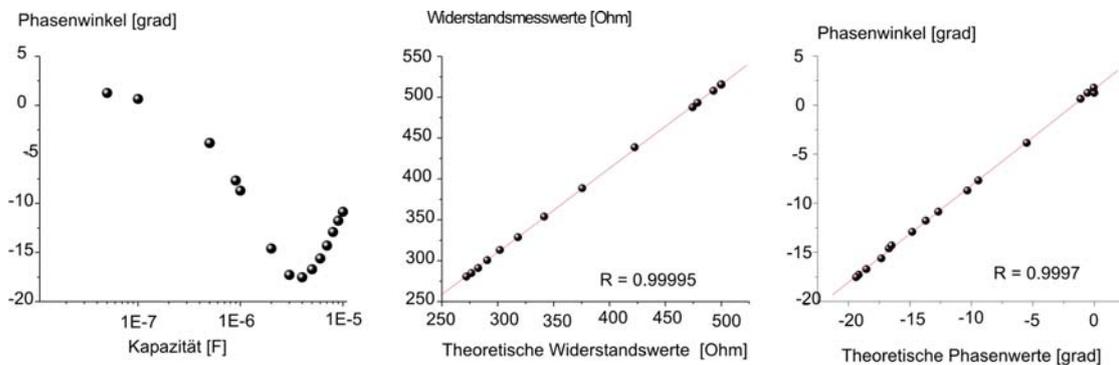


Abb. 68 Laborergebnisse an Testnetzwerken im Vergleich zu theoretisch berechneten Werten

## 7. Schlussfolgerungen

Der GEOPHILUS ELECTRICUS hat sich im Feldeinsatz sehr gut bewährt. Die Bedienung des existierenden Systems erfordert auf Grund der Komplexität eine Einarbeitung, um durch Bedienung entstandene Fehler auszuschließen. Momentan wird geprüft, inwieweit das als Forschungsgerät konzipierte Messgerät vereinfacht werden kann, um es Dienstleistern und Landwirten an die Hand zu geben.

Die Qualität der Leitfähigkeitskarten ist vergleichbar mit anderen Sensoren. Der Vorteil des GEOPHILUS liegt in seiner Kanalanzahl. Derzeit werden 5 Tiefenstufen erfasst – mit dem geplanten Nachfolgegerät sind es sechs Stufen. Auf Grund der Erfahrungen aus diesem Projekt (Unterschiede in der Signalqualität für die einzelnen Kanäle) werden in dem neuen Gerät kanalabhängige Verstärkerstufen und Spannungsteiler eingebaut.

Die neben der Leitfähigkeit erfasste Phasenverschiebung hat sich für unterschiedliche Aufgaben als hilfreich erwiesen. Verdichtungen, Versalzungen sowie im Boden befindliche Leitungen können damit erkannt und abgegrenzt werden. Die gemessenen Phasenwinkelunterschiede haben ihre Ursachen allerdings nicht wie angenommen in der induzierten Polarisation sondern beruhen eher auf elektromagnetischen Effekten und Unterschieden in den Ankopplungsbedingungen.

Mit dem existierenden System ist es möglich, bei einem Fahrgassenabstand von etwa 18 m mehr als 100 ha am Tag zu kartieren.

Die Flächeninformationen für die Betriebe Köllitsch und Trebbin werden von den Betrieben als Datengrundlage für eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung genutzt werden. Im Frühjahr 2010 hat der Betrieb Trebbin die erste teilflächenspezifische Düngung auf der Basis der erstellten Leitfähigkeitskarten und den Informationen aus der Reichsbodenschätzung durchgeführt.

Das Projekt hat als Pilotprojekt wesentlich dazu beigetragen, den GEOPHILUS ELECTRICUS in der Landwirtschaft zu demonstrieren und die Grenzen und Möglichkeiten auszuloten. In Gesprächen mit Dienstleistungsunternehmen wird ein großes Interesse zum Einsatz des Gerätes auch in anderen Betrieben bekundet.

## Literatur

Archie G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min., Met. & Petr. Eng.*, 146. pp 54-62

Böniger, U., Tronicke, J., 2009. A high-precision, real-time positioning solution applied to kinematic GPR and magnetic surveying, *Journal of Applied Geophysics*. (submitted)

Gebbers, R., Lück, E., Dabas, M., Domsch, H., 2009. Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale, *Near Surface Geophysics*, 12pp. accepted: March 2009

Glasmacher, R., 2010. Diplomkartierung bei Löwendorf, Stadt Trebbin. Universität Potsdam.

Halisch, M., Weller, A., 2006. Spektrale induzierte Polarisation (SIP) an Lockermaterial: Einfluss von Einbaumethodik, Feinkornanteil und Wassergehalt auf die Messergebnisse  
Beiträge des IfG zum 1. Symposium zur Impedanzspektroskopie, Essen.

Habberjam, G.M., Watkins, G.E.. 1967. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*. Volume 15 Issue 3, pp 445 - 467

Lück, E., Rühlmann, J. (2008): Electrical conductivity mapping with GEOPHILUS ELECTRICUS, extended abstract, *Near surface geophysics*, EAGE, Krakow

Lück, E., Spangenberg, U., Rühlmann, J. (2009): Comparison of different EC-mapping sensors, *European Precision Farming conference*, Wageningen, 8 pages.

Meschzan, Thomas (2010): Geoelektrisches Auflösungsvermögen des Bodensensors GEOPHILUS ELECTRICUS bei der Erfassung von Inhomogenitäten im Untergrund. Ein geophysikalischer Feldversuch auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen des Lehr- und Versuchsgutes Köllitsch (Freistaat Sachsen). Diplomarbeit an der Universität Potsdam

Pelton W.H., Ward S.H., Hallof P.G., Sill W.R. and Nelson P.H. 1978: Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, 43, 588-609

Ponitka J., Pößneck, J., 2006. Untersuchungen zur Anwendung ausgewählter teilflächenspezifischer Bewirtschaftungsmethoden am Beispiel eines Auenstandortes der Elbe  
[http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/2654\\_1.pdf](http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/2654_1.pdf) (Zugriff: 14.04.09)

Roy, A., Apparao A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, vol. 36, No. 5, p 943 – 959

Schliephake W., Albert E., 2005. Entwicklung und Erprobung praxistauglicher Einsatzstrategien von Wirtschaftsdüngern zur Verminderung von diffusen Nährstoffausträgen. Abschlussbericht zum Projektvorhaben 041.30 der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Laufzeit: 05/2003 – 04/2005. Sächsische

Landesanstalt für Landwirtschaft, FB 4, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 10  
[http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/1619\\_1.pdf](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/1619_1.pdf)  
(15.04.09)

Schliephake W., 2007.  
Reduktion von Nährstoffausträgen durch teilschlagspezifische Bewirtschaftung als Beitrag zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie , Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Heft 34

## Anhang

### Veränderung der Geometriefaktoren für Kurvenfahrten des GEOPHILUS

Im Kapitel 1.1 ist auf die Bedeutung des Geometrie- (Konfigurations)faktors hingewiesen worden. In den Geometriefaktor gehen die Abstände zwischen den einzelnen Elektroden ein. Daher nehmen diese Faktoren je nach Stellung der Elektroden zueinander verschiedene Werte an und beeinflussen damit die aus den Messgrößen berechneten Widerstandswerte.

Die folgenden Formeln zeigen die Berechnungen. Aus der Spannung zwischen den Elektroden M und N und aus der Stromstärke zwischen A und B lässt sich durch Multiplikation mit dem Konfigurationsfaktor K der Widerstand  $\rho$  berechnen. Die Abstände  $r_i$  erklären sich wie folgt:  $r_1 = AM$ ,  $r_2 = AN$ ,  $r_3 = BM$ ,  $r_4 = BN$ .

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$
$$K = 2\pi \frac{1}{\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) - \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4}\right)}$$

In der Abb. A1 sind einige möglichen Elektrodenanordnungen während einer Kurvenfahrt zusammen mit den sich ergebenden Konfigurationsfaktoren (rot) dargestellt. Die Berechnungen erfolgten für die 2. Spannungsachse, d.h. für einen Abstand von 1m zum Einspeisedipol. Während für eine ungestörte Fahrt entlang einer geraden Fahrspur der Faktor bei 10.7 liegt, können die Werte in Abhängigkeit von der Radstellung zwischen 8.1 und 10.7 schwanken. In den Kurven werden also durchschnittlich geringere Widerstandswerte abgebildet, als dies bei einer geradlinigen Überfahrt an diesen Punkten passieren würde. Allerdings sind die Unterschiede stellenweise auch nicht so dramatisch, so dass bisher darauf verzichtet wurde, die Datensätze bezüglich der Kurvenfahrten zu bereinigen.

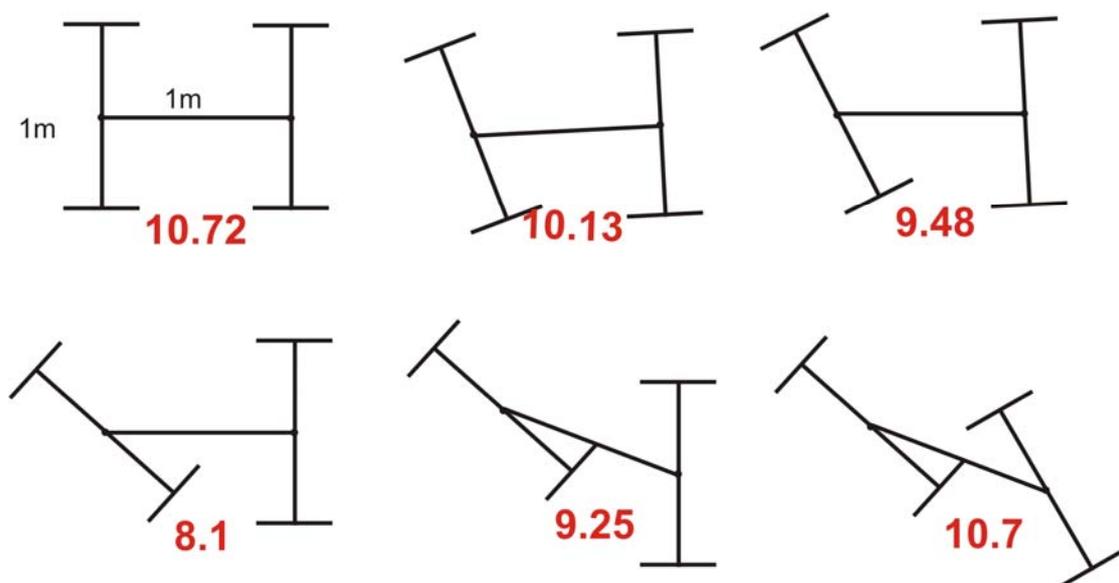


Abb. A1 Konfigurationsfaktoren für Kurvenfahrten mit dem GEOPHILUS ELECTRICUS für den Kanal 2

## **Technische Angaben**

Das Messgerät Rabbit wird über einen Kabelbaum mit dem rollenden Elektrodensystem verbunden. Am Messgerät selbst sind Buchsen verwendet worden, die über den Elektronikfachhandel Farnell (Electronic Component Distributor) zu beschaffen sind. Prinzipiell können auch andere Elektrodensysteme an das Messgerät angeschlossen werden, wenn die Kontakte zum Gerät über folgende Stecker realisiert werden:

UTP6169S (Farnell-Best. Nr. 535-394)

UTG16PG (Farnell-Best. Nr. 105-592)

Buchsen-Kontakte nach Drahtdurchmesser SC16ML1D70....SC24ML1D70

## **Poster**

Im Folgenden sind die Poster zu finden, die während der Projektphase auf Tagungen und Workshops präsentiert wurden. Die Poster sind in folgender Reihenfolge aufgeführt

1. Poster auf der EAGE-Jahrestagung in Krakow – 2008
2. DGG-Jahrestagung in Kiel – 2008
3. DLG-Feldtage in Buttelstädt bei Weimar 2008
4. Technologietransfertag in Potsdam - 2008
5. JIAC in Wageningen – 2009
6. JIAC in Wageningen – 2009
7. SIP workshop in Bonn – 2009
8. Evaluierung des Institutes für Geowissenschaften der Universität Potsdam - 2009



# 4508. Electrical Conductivity Mapping with

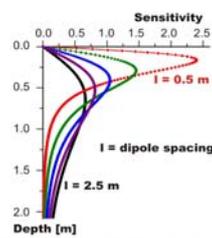
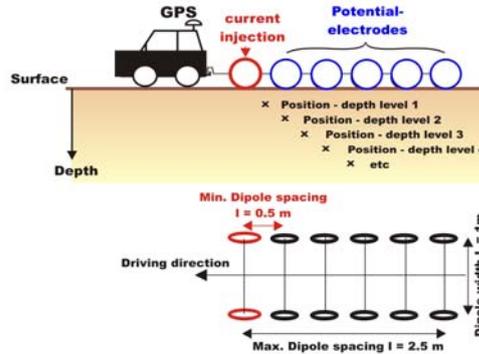


# Geophilus Electricus



E. Lueck\* (University of Potsdam) & J. Ruehlmann (Institute of Vegetable and Ornamental Crops)

## The measuring system



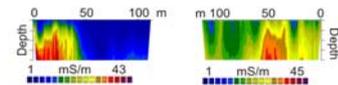
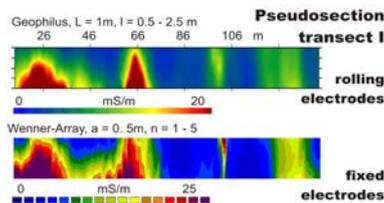
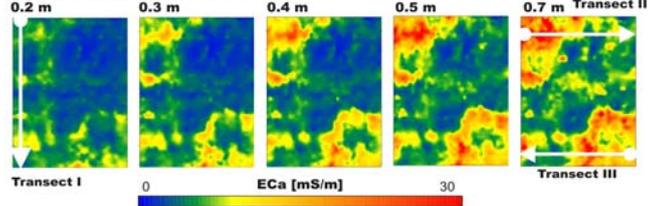
### Technical data:

- Equatorial Dipole-Dipole-Array
- 1 dipole for current injection
- 5 potential dipoles → 5 depth levels
- Estimation of the magnitude of electrical conductivity and phase angle
- Power: 50 W, maximal ±400 V, ±125 mA
- Frequency range: 1 mHz - 1 kHz
- Simultaneous measurement of 4 frequencies
- > Spectral behavior of electrical soil properties
- Used frequencies: 62.5 Hz, 125 Hz, 187.5 Hz and 565 Hz → 40 datasets
- Combination with (d)GPS or total station for positioning

## Conductivity data

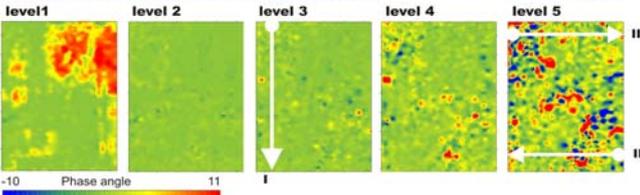
- Testsite: 115 x 160 m covered with grass
- Soil texture: loamy sand (75 % sand, 8 % clay)
- Mean grid point increment = 3m
- Comparison with conventional measurements along three transects

### Geophilus Data - Maps of Apparent Conductivity



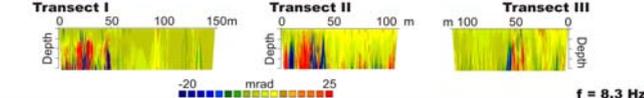
## Phase angle

### Geophilus Data - Maps of Phase Angle



The conductivity maps are only slightly influenced by the frequency. Data of phase angle show a strong dependency.

### Pseudosections measured with fixed electrodes (Geotom, Geolog)



## Conclusions

Geophilus electricus is a soil mapping system which is based on rolling electrodes. It is capable to measure complex resistivity (amplitude and phase angle) for a frequency range of 1 mHz to 1 kHz. The sampling rate is about 1/s measuring four frequencies simultaneously.

funded by: UMWELT STIFTUNG





# Geophilus Electricus im Praxiseinsatz



U. Spangenberg, E. Lück (Universität Potsdam)

J. Rühlmann (Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren)

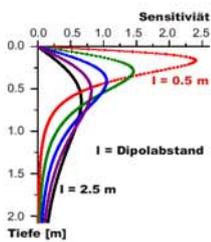
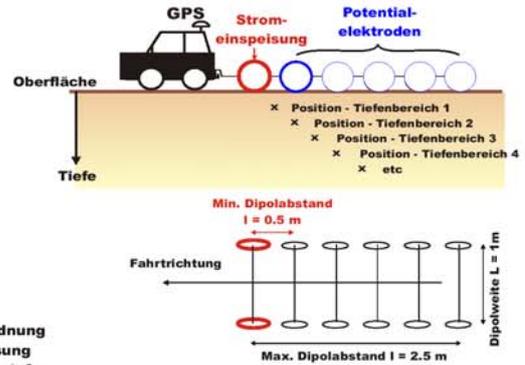
## Messprinzip



Rollende Elektroden



SIP-Messgerät Rabbit entwickelt von T. Radic



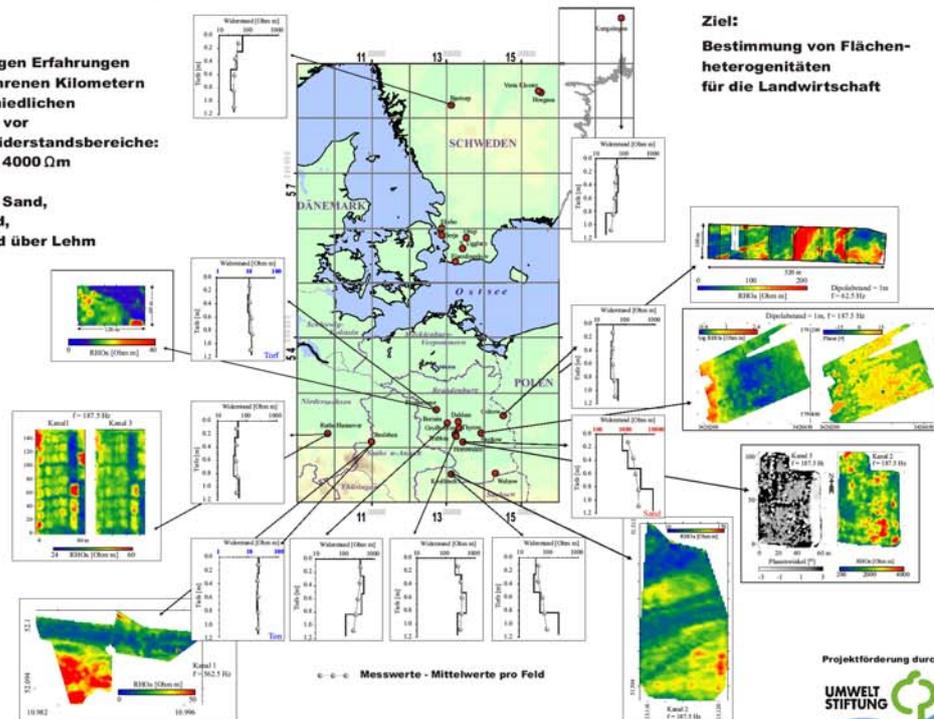
## Technische Daten:

- Äquatoriale Dipol-Dipol Anordnung
- 1 Dipol für die Stromeinspeisung
- 5 Potentialdipole -> 5 Tiefenstufen
- Messung von Leitfähigkeit und Phasenwinkel
- Leistung: 50 W, maximal  $\pm 400$  V,  $\pm 125$  mA
- Frequenzbereich: 1 mHz - 1 kHz
- gleichzeitige Messung von 4 Frequenzen
- > Spektralverhalten elektrischer Bodenparameter
- Genutzte Frequenzen: 62.5 Hz, 125 Hz, 187.5 Hz and 562.5 Hz -> 40 Datenfiles
- Kombination mit (d)GPS oder dem Tachymeter für Datenzuordnung

## Ausgewählte Messgebiete

- insgesamt liegen Erfahrungen aus 700 gefahrenen Kilometern in 25 unterschiedlichen Messgebieten vor
- gemessene Widerstandsbereiche: von  $10 \Omega$ m bis  $4000 \Omega$ m
- Bodenarten: Auelehm über Sand, Torf über Sand, Sand und Sand über Lehm

Ziel: Bestimmung von Flächenheterogenitäten für die Landwirtschaft



Projektförderung durch:  
UMWELTSTIFTUNG

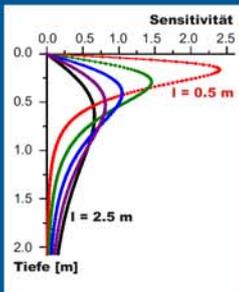
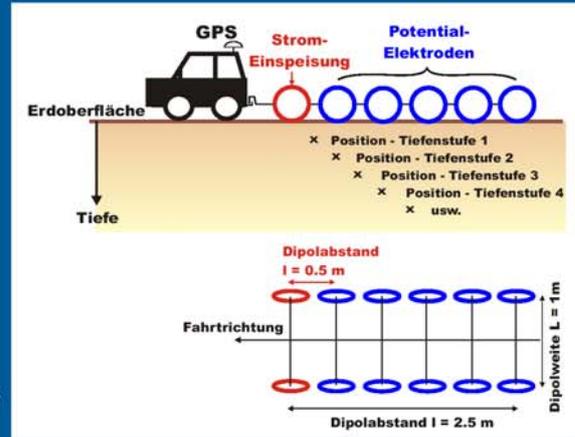




# Leitfähigkeitskartierung Geophilus electricus



## Messsystem

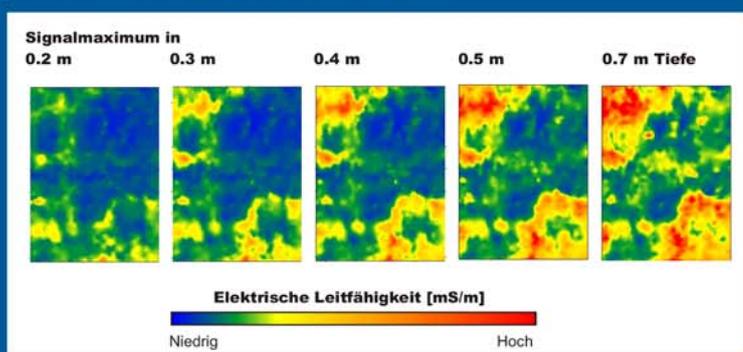
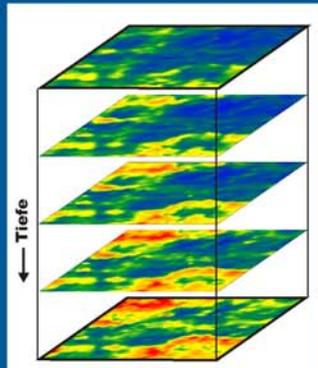


### Technische Daten:

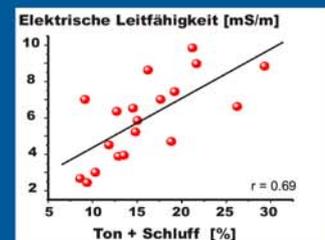
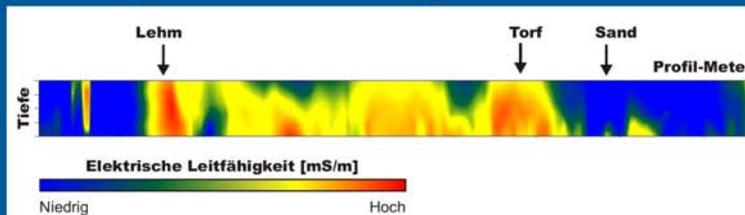
- Äquatoriales Dipol-Dipol-Array
- 1 Einspeisedipol
- 5 Messdipole --> 5 Tiefenstufen
- Leistung: 50 W, maximal  $\pm 400$  V,  $\pm 125$  mA
- gemessen werden Betrag der Leitfähigkeit und Phasenwinkel
- Frequenzbereich 1 mHz und 1 kHz
- Überlagerung von max. 4 monofrequenten Signalen
- > Spektralverhalten der elektrischen Eigenschaften
- derzeitige Frequenzen: 62.5 Hz, 125 Hz, 187.5 Hz und 565 Hz

Pro Überführung 40 Datensätze zur Charakterisierung der Fläche

## Flächenkartierung in fünf Tiefenstufen



## Tiefenprofile entlang von Trassen







## Sensor für Precision Farming

Böden weisen eine räumliche Variabilität ihrer physikalischen Eigenschaften auf. Deren Kenntnis kann zur Optimierung von Managementstrategien und einer umweltschonenden Landwirtschaft beitragen.

Eine kleinräumige Bestandesführung beinhaltet eine angepasste Reaktion auf Boden und Pflanze. Variable Saat und Düngung können zu Einsparungen von Betriebsmitteln und einer ökologischen Entlastung führen.

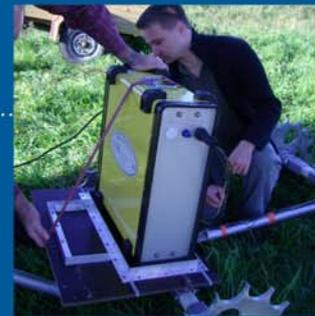


## Hochauflösender Bodensensor

Für die Steuerung werden moderne Sensoren für Boden und Pflanze benötigt. Das entwickelte Messsystem gestattet die digitale Erstellung räumlich hoch aufgelöster, dreidimensionaler Bodenkarten.

## Geophilus electricus

Die gemessenen elektrischen Eigenschaften der Böden stehen in engem Zusammenhang zu landwirtschaftlich relevanten Parametern. Zusätzlich zu den Flächenheterogenitäten werden wichtige Informationen über die Schichtungsverhältnisse bereitgestellt.



## Projektpartner

Universität Potsdam  
Angewandte Geophysik  
Dr. Erika Lück

Institut für Gemüse- und  
Zierpflanzenbau Großbeeren  
Dr. Jörg Rühlmann

Wissenschaftlicher Gerätebau  
RADIC-RESEARCH Berlin  
Dr. Tino Radic

Agrar-GmbH Trebbin  
Uwe Mertin



Projektförderung durch



Wissenschaft für Unternehmen





# Geophilus electricus:

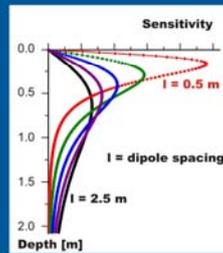
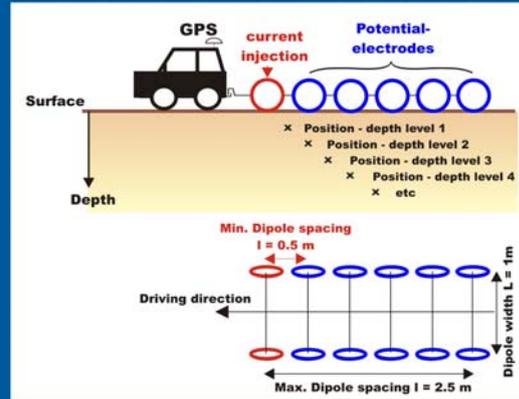
## A new soil mapping system



Ruehlmann J. (Institute of Vegetable and Ornamental Crops)

Lueck E., Spangenberg U. (University of Potsdam)

### The measuring system



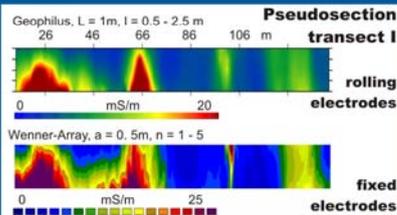
#### Technical data:

- Equatorial Dipole-Dipole-Array
- 1 dipole for current injection
- 5 potential dipoles → 5 depth levels
- Estimation of the magnitude of electrical conductivity and phase angle
- Power: 50 W, maximal  $\pm 400 \text{ V}$ ,  $\pm 125 \text{ mA}$
- Frequency range: 1 mHz - 1 kHz
- Simultaneous measurement of 4 frequencies
- > Spectral behavior of electrical soil properties
- Used frequencies: 62.5 Hz, 125 Hz, 187.5 Hz and 565 Hz → 40 datasets
- Combination with (d)GPS or total station for positioning

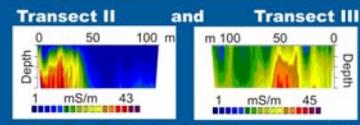
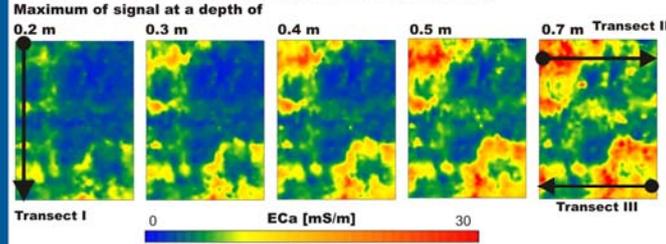
### Conductivity data

- Testsite: 115 x 160 m covered with grass
- Soil texture: loamy sand (75 % sand, 8 % clay)
- Mean grid point increment = 3m

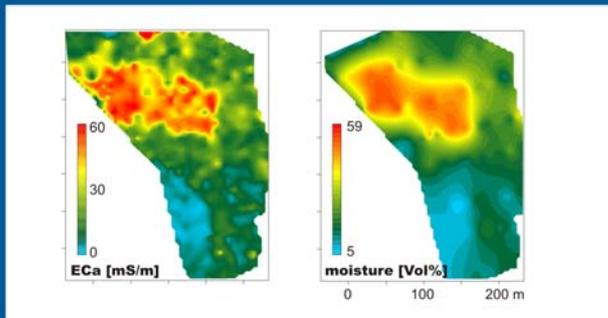
- Comparison with conventional measurements along three transects



#### Geophilus Data - Maps of Apparent Conductivity



### TDR measurements and ECa data



### Conclusions

Geophilus electricus is a soil mapping system which is based on rolling electrodes. It is capable to measure complex resistivity (amplitude and phase angle) for a frequency range of 1 mHz to 1 kHz. The sampling rate is about 1/s measuring four frequencies simultaneously.

There is a good correlation between electrical conductivity and water content.



funded by:



# Assessment of soil properties on cropping farms with Geophilus electricus



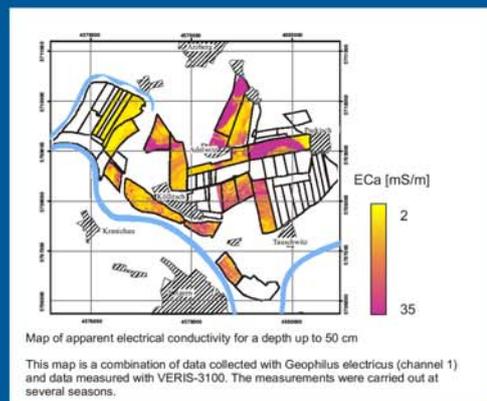
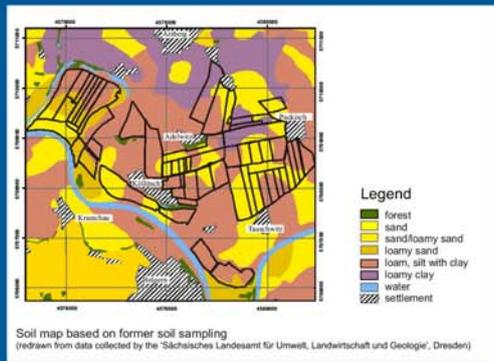
Spangenberg U., Lueck E. (University of Potsdam)  
Ruehlmann J. (Institute of Vegetable and Ornamental Crops)

## Introduction

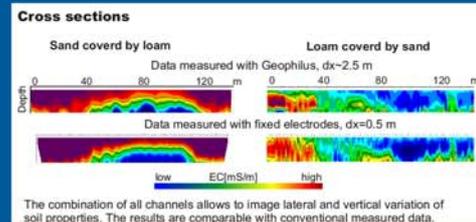
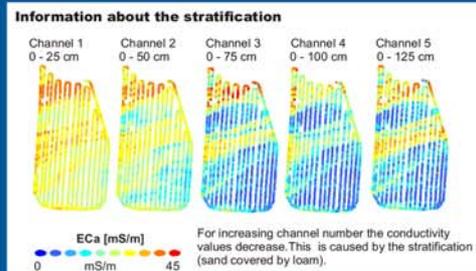
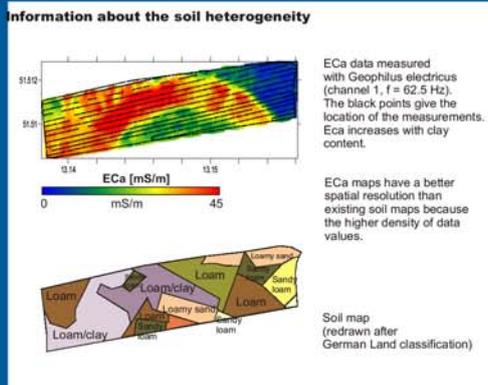


Geophilus electricus was developed to measure continuously the apparent electrical conductivity (ECa) at five depth intervals. It allows the delineation of conductivity structures in the three spatial dimensions and the transformation of the measured structures in a subsurface model.

## Farm scale



## Field scale



## Conclusions

The practical applicability of the system was demonstrated under routine conditions. It is possible to map about 100 ha per day. Data were collected along more than 700 km. The conductivity range was between 0.3 and 100 mS/m.

The project is funded by







# About the data quality of the rolling system 'Geophilus electricus'



E. Lueck, U. Spangenberg (University of Potsdam)  
J. Ruehlmann (Institute of Vegetable and Ornamental Crops)

## Introduction

Determining soil properties, such as soil moisture and clay content, is essential in a variety of soil science applications. Characterizing the heterogeneity of soil systems including their physical properties helps, for example, to develop precision farming strategies. In soil science applications, the most promising and popular geophysical techniques are frequency domain electromagnetics and DC electrical methods, because they are robust and electrical conductivity (EC) might be related to salinity, soil texture, cation exchange capacity, soil moisture, organic carbon and bulk density. However, significant research efforts are needed to optimize mapping strategies and to improve our knowledge about the relationships between geophysical and the target physico-chemical soil parameters.

## Geophilus electricus

Geophilus electricus is a novel soil mapping system which has been developed within different projects over the past years (Figure 1). Its design and technical specifications allow to measure apparent EC (Eca) at different depth levels (Figure 2) and at different frequencies using an array of galvanically coupled electrodes. Currently, it consists of an equatorial dipole-dipole array (six pairs of electrodes) combined with a special induced polarisation (SIP) instrument developed by T. Radic (Radic Research, Berlin). It is capable of measuring complex resistivity (amplitude and phase) within a frequency range of 1 mHz and 1 kHz. Using DGPS for positioning and a suitable cross-country vehicle, it is possible to map about 100ha/day.

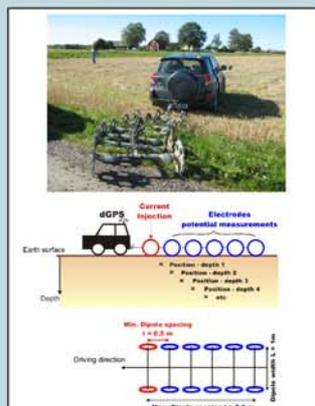


Figure 1: Geophilus electricus: A system to map complex resistivity with an equatorial dipole-dipole-array

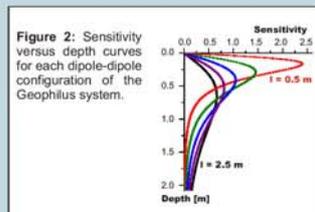


Figure 2: Sensitivity versus depth curves for each dipole-dipole configuration of the Geophilus system.

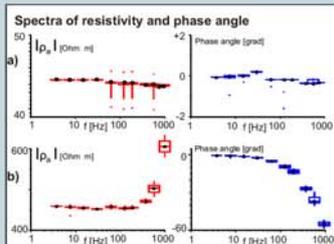


Figure 3: Spectra at fixed positions for a) loamy soil and b) sandy soil

**Technical details**

- Measurement of electrical resistivity and phase angle
- Modular system up to 5 channels
- Superposition of 4 frequencies (1 mHz - 1 kHz)
- High potential source:  $\pm 400$  V,  $\pm 125$  mA, 50 W
- Input voltage:  $\pm 2$  V
- A/D converter: 24 bit
- Data rate  $\sim 1$  Hz

## Field Data Examples

The applicability of the Geophilus system has been demonstrated at several sites on soils with different electrical characteristics (from  $\sim 0.3$  to  $\sim 100$  mS/m). Here, only a few typical data examples are presented. Figure 3 shows typical spectra collected at fixed positions for a conductive as well as for a resistive soil. To evaluate the data quality, repeated measurements were done varying several field parameters. Figure 4 presents a) the reproducibility of repeated resistivity measurements along a transect for channel 1 and 5 and demonstrates b) the reproducibility in dependence on signal frequency. Figure 5 shows the influence of the driving velocity on data quality. The overall consistency of the individual maps (Figure 6 - 8) as well as the obvious stratification (also confirmed by independent data) indicates excellent data quality. Figure 6 represent maps of conductivity data which have been collected over an agricultural field in Germany. Figure 7 shows an application using phase angle data to illustrate man-made structures and Figure 8 gives an example to use resistivity and phase shift to image the experimental design of an agricultural test site.

## Reproducibility of the resistivity measurements

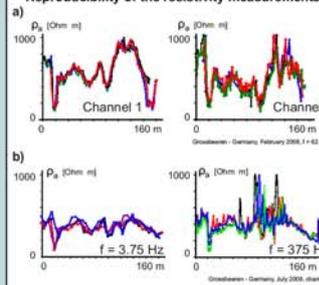


Figure 4: Repeated measurements of apparent resistivity ( $\rho_a$ ) along a transect a) using two different dipole spacing (channel 1 and 5) b) using different signal frequencies

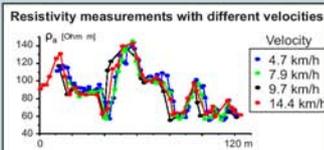


Figure 5: Repeated measurements of apparent resistivity ( $\rho_a$ ) driving with different velocities

## Information about man-made structures

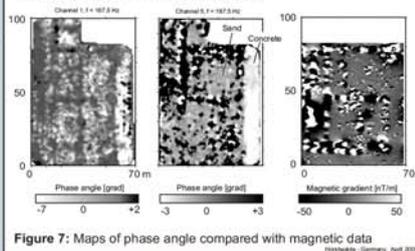


Figure 7: Maps of phase angle compared with magnetic data

## Information about the spatial heterogeneity and about the stratification

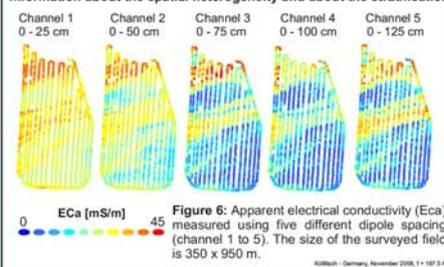


Figure 6: Apparent electrical conductivity (Eca) measured using five different dipole spacing (channel 1 to 5). The size of the surveyed field is 350 x 950 m.

## Information about experimental design

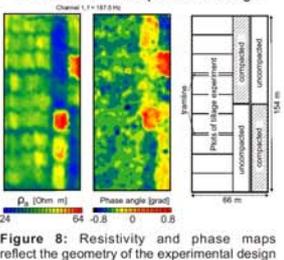


Figure 8: Resistivity and phase maps reflect the geometry of the experimental design

## Acknowledgements

The project has been supported by Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU.

## Further Readings

Lück, E., Gebbers, R., Rühlmann, J., Spangenberg U. (2009): Electrical Conductivity Mapping for Precision Farming, Near Surface Geophysics, 7, pp. 15 - 25  
Gebbers R., Lück E., Dabas M., Domsch H. (2009): Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale, Near Surface Geophysics, Vol.7, No 3, pp. 179-190  
Lück, E., Spangenberg, U., Rühlmann, J. (2009): Comparison of different EC-mapping sensors in: Precision agriculture '09 edited by: E.J. van Henten, D. Goense and C. Lokhorst, Wageningen Academic Publishers, pp. 445-42.





# Applied Geophysics

Agrogeophysics: Innovations in Soil Mapping  
Erika Lück, Jörg Rühlmann (IGZ, Großbeeren), Ute Spangenberg, Jens Tronicke

## Introduction

Determining soil properties, such as soil moisture and clay content, is essential in a variety of soil science applications. Characterizing the heterogeneity of soil systems including their physical properties helps, for example, to develop precision farming strategies. Only recently, the potential of near-surface geophysical techniques has been recognized to characterize soils in a minimum-invasive and efficient manner. In soil science applications, the most promising and popular geophysical techniques are frequency domain electromagnetics and DC electrical methods, because they are robust and electrical conductivity (EC) might be related to salinity, soil texture, cation exchange capacity, soil moisture, organic carbon, plant available nutrients, pH, bulk density and soil type. However, significant research efforts are needed to optimize surveying strategies and to deepen our understanding of the relationships between geophysical and the target physico-chemical soil parameters. In this context, our research activities focus on the development of an innovative EC mapping system as well as laboratory based investigations. The ultimate goal of our activities is to develop a ready-to-use, reliable and efficient agrogeophysical mapping system applicable in a variety of soil science applications.

## Geophilus Electricus

Geophilus Electricus is a novel soil mapping system which has been developed within different projects over the past years (Figure 1). Its design and technical specifications allow for measuring apparent EC (Eca) at different depth levels (Figure 2) and at different frequencies using an array of galvanically coupled electrodes. Currently, it consists of an equatorial dipole-dipole array (six pairs of electrodes) combined with a spectral induced polarization (SIP) instrument measuring complex resistivity (amplitude and phase) within a frequency range of 1 mHz and 1 kHz. Using DGPS for positioning and a suitable cross-country vehicle, it is possible to map ~100 ha/day.

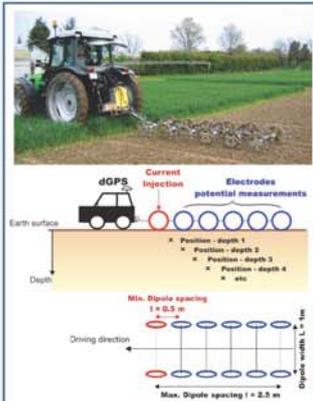


Figure 1: Geophilus Electricus: A system to map complex resistivity with an equatorial dipole-dipole array.

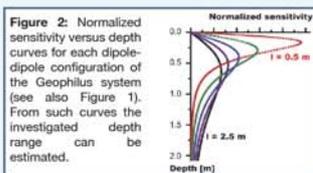


Figure 2: Normalized sensitivity versus depth curves for each dipole-dipole configuration of the Geophilus system (see also Figure 1). From such curves the investigated depth range can be estimated.

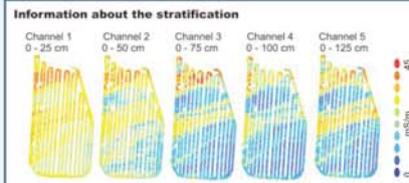


Figure 3: Geophilus Electricus raw data maps: Apparent electrical conductivity (Eca) measured using five different dipole spacing (channel 1 to 5). The size of the surveyed agricultural area is 350 m x 950 m.

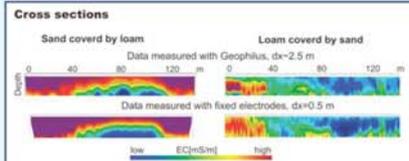


Figure 4: Inversion results using Geophilus Electricus data compared to results obtained using a conventional Wenner pseudosection measured with fixed electrodes for two different soil environments.

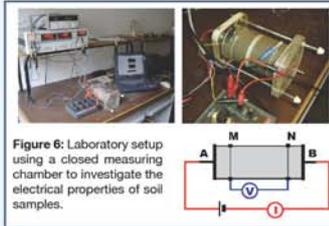


Figure 6: Laboratory setup using a closed measuring chamber to investigate the electrical properties of soil samples.

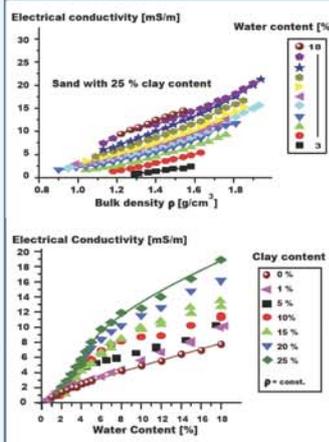


Figure 7: Typical results of laboratory investigations to understand and establish the relation between electrical conductivity and target soil properties.

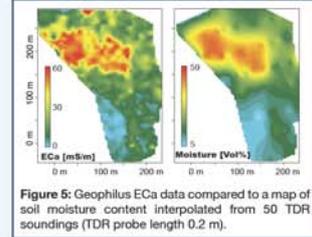


Figure 5: Geophilus Eca data compared to a map of soil moisture content interpolated from 50 TDR soundings (TDR probe length 0.2 m).

## Field Data Examples

The applicability of the Geophilus system has been demonstrated at several sites on soils with different electrical characteristics (from ~0.3 to ~100 mS/m). Here, only a few typical data examples are presented. Figure 3 presents raw data which have been collected over an agricultural test site in Germany. The overall consistency of the individual maps as well as the obvious stratification (also confirmed by independent data) indicate excellent data quality.

As electrical conductivity is measured at five different pseudo depths, the data sets can be inverted to image lateral and vertical EC variations. Figure 4 shows a comparison between inversion results obtained using Geophilus data and conventional fixed electrode data. The inverted models are in close agreement, which again indicates an overall good data quality.

Figure 5 illustrates a comparison between Geophilus Eca data recorded with a dipole spacing of 0.5 m and interpolated TDR (time domain reflectometry) soil moisture data. The data have been collected over a reclamation area in Germany. In this field example, the obvious correlation between Eca and TDR data shows that Eca can be used as a proxy for mapping soil moisture.

## Laboratory Experiments

To investigate the relation between electrical conductivity and the target physico-chemical soil parameters, laboratory studies on soil samples are indispensable. A typical experimental setup is shown in Figure 6 and some typical results are illustrated in Figure 7. Such experiments deepen our understanding how the corresponding parameters are inter-related and can further be used to establish site-specific petrophysical relations. In a current project, we are also investigating the potential of measuring electrical conductivity at different frequencies and using SIP characteristics as further electrical parameters. First results suggest that such spectral measurements might help to reduce ambiguities regarding target parameter estimation and, thus, might help to establish more reliable and stable links between the different parameters.

## Summary and Conclusion

Near-surface geophysical techniques such as the developed Geophilus Electricus system have the potential to map important soil parameters, especially, soil texture and moisture content. However, due to the complex parameter relationships usually observed, further research is needed to understand the electrical behavior of natural soils and to develop efficient and ready-to-use agrogeophysical surveying strategies.

## Acknowledgements

These activities have been supported by Deutsche Bundesstiftung Umwelt DBU and Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung BLE.

## Further Reading

Gebbers, R., Lück, E., Debas, M., Domsch, H. (2009): Comparison of instruments for geoelectrical soil mapping at the field scale, Near Surface Geophysics, 7, 179-190.  
Gebbers, R., Lück, E. (2008): Comparison of Geoelectrical Instruments in Different Soil Types. In: Handbook of Agricultural Geophysics, ed. Alfred, B.J., Daniels, J.J., Ehtani, M.R., CRC Press, 295-302.  
Lück, E., Gebbers, R., Rühlmann, J., Spangenberg, U. (2009): Electrical Conductivity Mapping for Precision Farming, Near Surface Geophysics, 7, 15-25.  
Lück, E., Rühlmann, J. (2008): Electrical Conductivity Mapping with Geophilus Electricus. 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics, Karkov, Poland (four pages).  
Lück, E., Rühlmann, J. (2007): Survey of the Swedish soil fertility sites with electrical methods, Success Stories of Agricultural Long-Term-Experiments, KSLAT, Kungl. Skogs-och Lantbruksakademien TIDSKRIFT nr 9, pp. 41-44.