

# **Bestimmung des Bebauungsgrades von archäologischen Stätten durch statistische Analyse geomagnetischer Daten**

Dissertation  
zur Erlangung des Doktorgrades  
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von  
**Filiz Bilgili**

Kiel 2005

Referent: Prof. Dr. Wolfgang Rabbel

Korreferent: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Thomas Bohlen

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2004

Zum Druck genehmigt: 01.06.2005

Der Dekan

"Güzel günler görecekiz çocuklar  
güneşli günler  
göre-  
-cekiz,  
motorları maviliklere süreceğiz çocuklar<sup>1</sup> ..."

N.HIKMET

---

<sup>1</sup>Kinder, wir werden schöne Tage erleben, sonnige Tage, und werden mit unseren Booten auf das Blaue fahren ...

## Abstract

The data acquisition speed in archaeo-geophysics has rapidly increased during the last years. Systems have been developed that apply several geophysical methods simultaneously. Geo-Information-Systems (GIS) are used to visualize and compare the measured data. While GIS has become an efficient tool during the last years with respect to the combination of different information layers, further development is required in data processing, especially with regard to the automation of interpretation and reclassification of large two-dimensional geophysical mapping.

In this work a processing procedure for the reclassification of geomagnetic maps is presented. A goal of this processing approach is the automatic identification of settlement areas, which are characterized rather by diffuse, small-scale anomaly patterns than by clearly recognizable building remainders. A qualitative correlation exists between the amplitude distribution pattern and the shard frequency in the ground.

The magnetic data this study is based on were recorded in a Hethitic city ruin (Sarissa ) in central Anatolia. For the prospection flux-gradient-sensors were used. The amplitude resolution is 0.5 nT. For spatially high resolution prospection the recording speed along the profile is selected in such a way that one value is recorded approx. every five centimeters.

The area to be classified is divided into subregions and depending on implementation two-dimensional (2D) powerspectra or variograms are calculated. A classification diagram is calculated for parameters derived from training regions. This provides representative values for this training regions and is the basis for a classification of unknown areas.

The two different implementations were verified with simulated data and work as follows:

The shape of the 2D powerspectra is analyzed dependent on the frequency. A  $1/f^\alpha$  model is fitted to the spectra in a least-squares sense, and three parameters are derived from this model: RMS error, exponential ( $\alpha$ ), and scaling factor (total power). It turns out that the RMS error is the most appropriate measure to quantify differences in the magnetic images, and it is thus used in the processing scheme. The RMS error describes the difference of the model curve to flicker noise.

A variogram describes the mean variance of the differences between two random variables and is therefore a measure for the spatial relation between these variables. In case of a large variance of differences, the spatial relation between the two random variables is small. The function that fits the empirical variogram is called theoretical or model variogram and is regarded as an estimate for the empirical one. The distance at which the variogram reaches a threshold value ('sill') is referred to as range. In this thesis range and sill values are used for a classification of image regions.

Geomagnetic map areas with shard-count surveys and different degrees of settlement are analyzed exemplarily with parameters derived from their 2D powerspectra and variograms and thus classified. Areas similar to the training regions were identified and assigned a degree of similarity. In addition the settlement degree of Sarissa's suburban area was defined. A correlation between shard number derived from shard count and from the processing scheme was found. A coarse estimate of the shard count was successful using statistical methods. An exact

quantitative statement, however, is not possible. Deviations are caused by the fact that the processing scheme not only is sensitive to the magnetic shard anomalies, but also to other settlement remains.

## Zusammenfassung

Geophysikalische Prospektionsmethoden gewinnen in der Archäologie immer mehr an Bedeutung, weil sie im Vergleich zu einer Ausgrabung Reste früherer Kulturen zerstörungsfrei und kostengünstig erfassen. Die Datenerfassungsgeschwindigkeit in der Archäogeophysik ist in den letzten Jahren rasant gestiegen. Es existieren mittlerweile Systeme, die mehrere geophysikalische Verfahren parallel durchführen. Geoinformationssysteme (GIS) werden benutzt, um die gemessenen Daten zu visualisieren und miteinander in Beziehung zu setzen. Während GIS in den letzten Jahren zu wirkungsvollen Werkzeugen in Bezug auf die Kombination unterschiedlicher Informationsschichten geworden sind, muss jedoch weitere Entwicklungsarbeit bei der Datenverarbeitung geleistet werden, besonders in Hinblick auf die Automatisierung der Interpretation und Klassifizierung großflächiger zweidimensionaler geophysikalischer Kartierungen. In dieser Arbeit wird ein Bearbeitungsschema entwickelt, das zur Klassifizierung geomagnetischer Pläne dient. Ziel dieser Bearbeitung ist die Identifikation von Siedlungsflächen, die weniger durch klar erkennbare Gebäudereste als vielmehr durch diffuse, kleinräumige Anomalienmuster gekennzeichnet sind. Dabei besteht ein qualitativer Zusammenhang zwischen dem Muster der Amplitudenverteilung und den Häufigkeiten von Tonscherben im Untergrund.

Die magnetischen Daten, die in dieser Arbeit Verwendung finden, wurden in einer hethitischen Stadtruine (Sarissa) in Zentralanatolien aufgenommen. Für die Prospektion wurden Fluxgate-Gradientensonden eingesetzt. Während eines Messvorganges lässt sich das Messgebiet entsprechend mit ein oder zwei Meter Profildbreite abdecken. Die Amplitudenauflösung liegt bei 0,5 nT. Für die räumlich hochauflösende Prospektion wird die Messgeschwindigkeit in Profilrichtung so gewählt, dass ca. alle fünf Zentimeter ein Messwert aufgezeichnet wird.

Die zu klassifizierende Fläche wird in Teilbereiche zerlegt, aus denen je nach Implementierung zweidimensionale (2D) Powerspektren oder Variogramme berechnet werden. Aus den in Trainingsgebieten gewonnenen Parametern wird ein Klassifikationsdiagramm berechnet. Dieses ermöglicht die Festlegung von repräsentativen Wertebereichen für die Trainingsgebiete und ist Grundlage einer Klassifikation unbekannter Flächen. Die zwei unterschiedlichen Implementierungen wurden mit magnetischen Modellrechnungen verifiziert und arbeiten wie folgt:

Das Verhalten der 2D-Powerspektren wird in Abhängigkeit der Frequenzen untersucht. Mit der Methode der kleinsten Quadrate (least-squares-Methode) wird ein  $1/f^\alpha$ -Modell angepasst. Drei Parameter werden aus diesem Modell gewonnen: RMS-Fehler, Exponent( $\alpha$ )- und Skalierungsfaktor (Total-Power). Der RMS-Fehler stellte als der am meisten geeignete Parameter dar, um die Unterschiede der Bilder zu quantifizieren, und wird im Bearbeitungsschema verwendet. Der RMS-Fehler beschreibt die Abweichung der Modellkurve vom 'rosa Rauschen'. Ein Variogramm gibt die mittlere Streuung der Differenzen zwischen zwei Zufallsvariablen an und ist damit ein Maß für den räumlichen Zusammenhang dieser beiden Variablen. Die Funktion, die dem empirischen Variogramm angepasst wird und als Schätzer für das Variogramm gilt, wird theoretisches oder Modell-Variogramm genannt. In dieser Arbeit werden sogenannte Range- und Sill-Werte zur Klassifikation der Bilderbereiche eingesetzt.

Eine geomagnetisch kartierte Fläche mit unterschiedlichen Besiedlungsgraden, für die Scherbenzählungen vorlagen, wurde mit variablen Fenstergrößen auf ihre Parameter aus 2D-Powerspektren oder Variogrammen untersucht. Bildbereiche, die den Trainingsgebieten ähneln, wurden identifiziert und ihr Ähnlichkeitsgrad ermittelt. Darüber hinaus konnte der Bebauungsgrad der Teilgebiete der Vorstadt von Sarissa ermittelt werden. Es besteht eine deutliche Korrelation zwischen der durch Zählen bestimmten Scherbenzahl und der mit Hilfe des Bearbeitungsschemas bestimmten Scherbenzahl. Eine grobe Abschätzung über die Scherbenanzahl mit statistischen Methoden ist gelungen. Eine exakte quantitative Aussage ist jedoch nicht möglich. Die Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass das hier entworfene Bearbeitungsschema nicht nur auf Scherben-Anomalien sondern auch auf Anomalien reagiert, die von anderen Siedlungsspuren herrühren.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Motivation . . . . .	3
1.2	Entwicklungskonzept . . . . .	4
1.3	Stand der Forschung und Beitrag dieser Arbeit . . . . .	5
1.3.1	Bildverarbeitung und Mustererkennung magnetischer Daten . . . . .	5
1.3.2	Powerspektrum . . . . .	6
1.3.3	Variogramm-Analyse . . . . .	7
1.4	Übersicht der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgebiet</b>	<b>10</b>
2.1	Geografische Lage, Morphologie und geologische Situation . . . . .	10
2.2	Archäologie . . . . .	12
<b>3</b>	<b>Ausgangspunkt, Zielsetzung und methodisches Konzept</b>	<b>17</b>
3.1	Einsatz geophysikalischer Methoden in Sarissa . . . . .	17
3.2	Methodisches Konzept . . . . .	21
3.2.1	Vergleich geophysikalischer Kartierverfahren . . . . .	21
3.2.2	Festlegung der Scherbenanzahl über die Analyse geomagnetischer Daten . . . . .	27
3.2.3	Vorarbeiten . . . . .	29

---

<b>4</b>	<b>Automatische statistische Klassifikation</b>	<b>31</b>
4.1	Einführung . . . . .	31
4.2	Methoden der Merkmalextraktion . . . . .	33
4.2.1	Texturmerkmale aus der Fouriertransformation . . . . .	35
4.2.2	Texturmerkmale aus dem Variogramm . . . . .	42
4.3	Bearbeitungsschema . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Untersuchung und Anwendung der Merkmalextraktionsmethoden</b>	<b>50</b>
5.1	Untersuchung und Anwendung des Fourierspektrums . . . . .	50
5.2	Untersuchung und Anwendung der Variogrammanalyse . . . . .	63
5.3	Ergebnisse . . . . .	69
5.3.1	Qualitative Aussage über den Bebauungsgrad . . . . .	69
5.3.2	Bestimmung der Scherbenanzahl . . . . .	76
<b>6</b>	<b>Simulationen</b>	<b>85</b>
6.1	Das Feld des magnetischen Dipols . . . . .	85
6.2	Fluxgate-Gradientensonden und Gradientenmessungen . . . . .	87
6.3	Berechnung simulierter Anomaliefelder . . . . .	87
6.3.1	Geometrie und Modelle . . . . .	89
6.3.2	Anwendung des Bearbeitungsschemas . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Abschließende Betrachtungen und Ausblick</b>	<b>100</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>103</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

Die natürliche Umwelt des Menschen wird durch intensive land- und forstwirtschaftliche Nutzung geschädigt. Dieses wird zurecht als eines der größten Probleme unserer Zeit bezeichnet. Auch im Boden liegende Reste früherer Kulturen sind von diesen Eingriffen der Menschen betroffen. Die Zerstörungen von archäologischen Denkmälern rückgängig zu machen, ist oft unmöglich oder mit sehr großem Aufwand verbunden. Für einen besseren Schutz müssen diese archäologischen Denkmäler aufgespürt werden. Erst danach können Forschungsarbeiten durchgeführt und weitere Details über frühere Kulturen gewonnen werden.

### 1.1 Motivation

Die klassische und wichtigste Methode der Archäologie, die Ausgrabung, ist teuer, und die Mittel, die für Ausgrabungen zur Verfügung stehen, werden knapper. Statt großflächig auszugraben, werden an bestimmten Stellen gezielte Suchschnitte angelegt, um über bestimmte Fragestellungen Klarheit zu schaffen. Eine systematische und großflächige Untersuchung ist aber für Archäologen unabdingbar. Nur mit Hilfe solcher Untersuchungen können Zusammenhänge in einer Stadtruine erkannt und Lebensumstände weitgehend erfasst werden. In diesem Zusammenhang kommt den geophysikalischen Prospektionsmethoden eine besondere Bedeutung zu. Im Vergleich zu einer Ausgrabung können diese Methoden kostengünstig und zerstörungsfrei Untergrundinformationen liefern. In den letzten Jahren wurden Anstrengungen unternommen, um eine mobile Durchführung dieser Untersuchungen zu verwirklichen. So werden mittlerweile Systeme entwickelt, die mit Differential-Global-Positioning-System (DGPS) ausgerüstet, über die zu prospektierenden Flächen fahren und parallel mehrere geophysikalische Verfahren durchführen. Die Entwicklung der geophysikalischen Prospektion hinsichtlich des Messfortschrittes ist in den letzten Jahren sehr weit vorangetrieben worden. Weitere Entwicklungsarbeit muss besonders bei der Datenverarbeitung und Interpretationstechnik geleistet werden. So

kann die automatische und schnelle Datenakquisition ergänzt werden:

- Geoinformationssysteme (GIS) werden benutzt, um die gemessenen Daten zu visualisieren und miteinander in Beziehung zu setzen. So können beispielsweise anspruchsvolle Fragen mit Hilfe gezielter Verknüpfungen verschiedener Datensätze in einem GIS gelöst werden. Diese Systeme bieten auch für die Auswertung geophysikalischer Daten nützliche Werkzeuge, wie z.B. Flächenverschneidungen, logische Operationen oder Falschfarben-Verfahren (color compositing).
- Automatisierung der Interpretation und Generierung digitaler Pläne ist die Basis für die Versuche der Mustererkennung. Die Motivation dabei ist vielschichtig. In wirtschaftlicher Hinsicht liegt sie dabei unter anderem in Schnelligkeit, Verfügbarkeit und Präzision, die eine Maschine anbietet. Der Mensch soll aber auch bei seiner Arbeit unterstützt und von stereotypischen Tätigkeiten entlastet werden.

## 1.2 Entwicklungskonzept

Grundlage dieser Arbeit sind großflächige geophysikalische Kartierungen im Gebiet der hethitischen Stadtruine Sarissa in Zentralanatolien. Diese archäologische Ruine ist bereits seit Längerem das Ziel umfangreicher archäologischer und geophysikalischer Untersuchungen. Mit Hilfe von Scherbenzählungen können Archäologen Siedlungsgebiete grob lokalisieren. Danach werden auf den so gefundenen Flächen häufig weitere archäologische Untersuchungen und/oder geophysikalische Detail-Untersuchungen durchgeführt. Die Scherbenzählungen werden visuell (mit bloßem Auge) durchgeführt und nehmen somit eine lange Zeit in Anspruch. Aufgrund der manuellen Zählung sind die so gewonnenen Erkenntnisse zu einem gewissen Grade subjektiv, also von der kartierenden Person abhängig.

In dieser Arbeit geht es darum, den Prozess der Kartierung besiedelter und unbesiedelter Gebiete nach definierten Kriterien zu objektivieren und (weitgehend) zu automatisieren. Das Ziel ist es, die visuellen Scherbenzählungen zu ersetzen oder auf kleine Gebiete zur Kalibrierung zu beschränken.

Ausgehend von den flächenhaft aufgenommenen geomagnetischen Daten wird ein Bearbeitungsschema vorgestellt, das eine Zuordnung unterschiedlicher Texturen in den gemessenen Daten zum Besiedlungsgrad ermöglicht. Diese Zuordnung wird als Klassifikation bezeichnet. Das Bearbeitungsschema zur Klassifikation wird mittels zweier verschiedener Parametertypen realisiert:

- Parameter, die aus der räumlichen Spektralanalyse (Fourier-Analyse) abgeleitet werden.
- Parameter, die aus der Variogramm-Analyse abgeleitet werden.

Mit Hilfe dieser beiden Parametertypen können die Texturen in geomagnetischen Plänen quantitativ erfasst werden. Beiden Verfahren liegt das folgende Bearbeitungsschema zugrunde:

Zunächst werden Flächen mit unterschiedlichen Texturen ausgesucht. Diese Flächen dienen im Bearbeitungsschema als Kalibrierungsflächen und werden oft auch als Trainingsgebiete oder Prototypen bezeichnet. Die Bilder (geomagnetische Pläne) werden mit unterschiedlichen Fenstergrößen in Teilflächen zerlegt und für jeden Teilbereich werden die Parameter berechnet, die diese charakterisieren und Unterschiede zu anderen Bereichen quantifizieren. In Streudiagrammen werden diese Parameter zueinander ins Verhältnis gesetzt und Häufigkeitsdiagramme helfen bei der Festlegung eines repräsentativen Wertebereiches. In einem Klassifikationsdiagramm wird schließlich die jeweils größte Punktdichte für jede Kombination der Parameterverteilung berechnet. Die Flächen können dann je nach Zugehörigkeit zu einer Klasse (unbesiedelter oder besiedelter Bereich) farbig kodiert werden. Die jeweilige Punktdichte wird als Intensität der Farbe dargestellt. Das Klassifikationsdiagramm dient einer Klassifikation von 'unbekannten' Flächen.

Vorerst wird ein Überblick über den Stand der Forschung gegeben und der Beitrag dieser Arbeit erläutert (Kapitel 1.3). Diese Einleitung wird mit einer Übersicht über den Aufbau dieser Arbeit abgeschlossen.

## 1.3 Stand der Forschung und Beitrag dieser Arbeit

Im Folgenden wird erst die Entwicklung der Bildverarbeitung bzw. Mustererkennung magnetischer Daten dargestellt. Anschließend werden die Forschungsarbeiten über die Anwendungen von Powerspektrum und Variogrammanalyse gegeben.

### 1.3.1 Bildverarbeitung und Mustererkennung magnetischer Daten

Eine der ersten Arbeiten von Agrarwal & Kanasewich (1971) nutzt die Fast-Fourier-Transformation, um zweidimensionale Potenzialfeld Daten zu analysieren. Mit Hilfe einer Kreuzkorrelationsfunktion wird eine Trendanalyse durchgeführt.

Einen Überblick über die Darstellungsmöglichkeiten geomagnetischer Daten in der Archäologie geben Scollar *et al.* (1986). In diesem Artikel behandeln die Autoren unterschiedliche Interpolations- und Filtertechniken, um eine bessere Darstellung für die Archäologen zu erreichen.

Von werden unterschiedliche Methoden der Bildverarbeitung (Kontrastverstärkung, Faltungoperationen) zu einer besseren strukturellen Interpretation aeromagnetischer Daten vorgeschlagen.

Rosatti & Cardarelli (1997) wenden 14 Texturparameter der Statistik 1. Ordnung an, die auf der Gray-Level-Cooccurrence-Matrix (GLCM) (Haralick et. al, 1973 und Haralick, 1979) basieren, um geomagnetische Anomalien zu erkennen.

Blakely & Simpson (1986) automatisierten die von Cordell & Grauch (1985) entwickelte Methode. Anhand des lokalen Maximums einer Anomalie werden die Ecken eines Störkörpers automatisch identifiziert. Vor der Anwendung dieser Methode müssen die Daten mit Hilfe von Pseudoschwere und Horizontal-Gradienten gefiltert werden.

Die Methode des analytischen Signals, die von Roest *et al.* (1992) entwickelt und von Thurston & Smith (1997) und Bastani & Pedersen (2001) erweitert wurde, um aus zweidimensionalen geomagnetischen Daten unterschiedliche Informationen eines Störkörpers zu bestimmen, z.B. Tiefe, Neigung und Suszeptibilitätskontrast.

Außerdem wird an weiteren Methoden geforscht, um automatisch bestimmte Trends in geomagnetischen Karten zu unterdrücken. So werden z. B. bei Pilkington & Roest (1998) dike-swarm-Anomalien oder bei Sykes & Das (2000) 'falsche' lineare Anomalien unterdrückt. Euler-Dekonvolution und die Methode des analytischen Signals werden von Keating & Pilkington (2004) für eine automatische Interpretation geomagnetischer Daten weiterentwickelt.

### 1.3.2 Powerspektrum

Die Spektralanalyse von Potenzialfeld Daten wird seit Längerem erforscht. Die früheren statistischen Arbeiten wie z.B. Horton *et al.* (1964) analysierten aeromagnetische Daten mit Hilfe von Autokorrelationsfunktion und Powerspektrum, um bestimmte Anomalie-muster hervorzuheben.

Mishra & Naidu (1970) vergleichen hingegen die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktion mit dem Powerspektrum, um Totalintensitätskarten zu analysieren. Mit Hilfe von Spektren werden Tiefenabschätzungen für magnetische Anomalien getroffen. Spector & Grant (1970) diskutieren die mathematischen Grundlagen der Powerspektrumanalyse für die Interpretation aeromagnetischer Kartierungen. Anomalien unterschiedlicher Prismen mit variierender Tiefe, Breite, Dicke und Magnetisierung werden als statistische Modelle betrachtet und deren Einfluss auf die Form des Powerspektrums bewertet. Es wird festgestellt, dass die Tiefe einen großen Einfluss auf die Form des Powerspektrums magnetischer Daten hat. Eine Methode, die die Neigung des Powerspektrums für eine Tiefenabschätzung nutzt, wird vorgeschlagen. Die Anwendung von Spector & Grant (1970) wird von Hahn *et al.* (1976) modifiziert. Die unendlich ausgedehnten Prismen werden durch Prismen mit einer endlichen Tiefe ersetzt. Eine positive Autokorrelation in Suszeptibilitäten und eine strenge Variabilität von Suszeptibilitäten in horizontaler Richtung wird angenommen. In vertikaler Richtung bleiben die Suszeptibilitäten konstant. Die Verteilungen von vielen physikalischen Parametern (z.B. Porosität, Permeabilität

und Suszeptibilität), die in den Geowissenschaften untersucht werden, haben eine hohe Komplexität, verbunden mit einer sogenannten 'power-law'-Charakteristik.

Das  $1/f^\alpha$ -Verhalten des Powerspektrums magnetischer Daten und die daraus abgeleiteten Parameter sind von unterschiedlichen Geophysikern untersucht worden. Als Beispiel sind hier die Arbeiten von Gregotski *et al.* (1991) und Pilkington *et al.* (1994) zu erwähnen. Gregotski untersucht die fraktale (power-law-) Charakteristik der aeromagnetischen Daten aus unterschiedlichen Gebieten Kanadas mit unterschiedlichen Skalen. In allen Gebieten wird eine Frequenzabhängigkeit ( $\alpha$ ) festgestellt. Diese Information fließt in ein Dekonvolutionsschema ein, in dem die Variabilität der oberflächennahen Suszeptibilitäten bestimmt wird.

Pilkington *et al.* (1994) stellt durch Bohrloch Suszeptibilitätsmessungen und Spektralanalysen aeromagnetischer Daten fest, dass die dreidimensionale Magnetisierungsverteilung in der Kruste fraktal ist. Diese Eigenschaft wird bei Interpretationsverfahren ausgenutzt, die statistische Informationen über die Variabilität der Magnetisierung benötigen. Zwei Anwendungen werden hervorgehoben: Tiefen-Abschätzung der magnetischen Körper durch Feldfortsetzung und *Gridded* flächenhafter Aeromagnetik-Daten mit dem Kriging-Interpolationsverfahren.

Maus & Dimitri (1996) betrachten neben den Exponenten ( $\alpha$ ) auch RMS-Fehler von Modell-Powerspektren, um die Tiefe geomagnetischer Anomalien abzuschätzen.

Eine Anwendung für eine Klassifikation geomagnetischer Daten mit diesen Parametern konnte in der Literaturrecherche nicht ausfindig gemacht werden. Es wurden Arbeiten in Betracht gezogen, die Exponent und Skalierungsfaktor zur Klassifikation natürlicher Bilder angewandt haben (Rudermann & Bialek, 1994; von Schaaf, 1998).

### 1.3.3 Variogramm-Analyse

Von Maus *et al.* (1999) werden die Variogramm-Analyse sowie das Powerspektrum für eine Abschätzung der Tiefe geomagnetischer Anomalien angewendet und beide Verfahren gegenübergestellt. Weitere Untersuchungen mit der Variogramm-Analyse für die Auswertung geomagnetischer Daten konnten in der Literatur nicht gefunden werden.

Eine Recherche der benachbarten Fachbereiche zeigte, dass die Variogramm-Analyse zur Klassifikation von Side-Scan-Sonar-Bildern intensiv und erfolgreich eingesetzt wird [z.B. Reed & Hussong (1989), Miranda *et al.* (1992), Herzfeld (1999)]. Bei Reed & Hussong (1989) werden statistische Parameter mit Hilfe einer *gray level co-occurrence matrix* (GLCM) berechnet, um eine Texturanalyse in den Side-Scan-Bildern durchzuführen. Eine Klassifikation mit *Region Growing* wird durchgeführt, indem die Bildbereiche mit GLCM-Parametern untersucht und Bereiche mit ähnlichen Parametern zusammengefügt und somit klassifiziert werden. Eine quantitative Interpretation von Side-Scan-Bildern wird erreicht.

Miranda *et al.* (1992) klassifizieren *Shuttle Imaging Radar-B* (SIR-B)-Daten mit Hilfe eines sogenannten Semivariogramm-Textur-Klassifikators (STK). Dieser ist ein deterministischer, überwachter *parallelpiped*-Typ-Klassifikator und kombiniert Texturinformationen, die durch Semivariogramm-Funktionen ausgedrückt werden, mit radiometrischen Informationen (Mittlere Digital Nummer). Für jeden zu klassifizierenden Flächentyp werden Grenzwerte *parallelpiped* für jeweilige lag-Weiten definiert. Für jeden zu klassifizierenden Bereich werden diese Parameter berechnet und mit Werten von Prototypen verglichen. Bei Übereinstimmung Werte mit einem Prototyp wird der Bereich entsprechend klassifiziert.

Herzfeld (1999) analysiert Fernerkundungsdaten von Eisoberflächen mit Hilfe der Variogrammanalyse. Die experimentellen Variogramme werden zur Klassifikation herangezogen. Die Variogramme werden gefiltert und Parameter, z.B. die lag-Weite vom ersten Maximum oder Maximum-Variogramm-Wert, extrahiert. Nach der Berechnung dieser Parameter für Proto-Typen werden mit einem gleitenden Fenster die Bereiche nach ähnlichen Parametern untersucht.

Eine Klassifikation geomagnetischer Daten mit den Parametern aus Variogramm-Analysen wird – meines Wissens nach – mit dieser Arbeit zum ersten Mal eingesetzt und damit Neuland in Richtung automatischer Betrachtung, Interpretation und Klassifikation betreten.

## 1.4 Übersicht der Arbeit

Im Anschluss an die Beschreibung der geographisch-geologischen Situation des Messgebietes und den archäologischen Hintergrundinformationen in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 zunächst ein Überblick über die Entwicklung der geophysikalischen Untersuchungen in der hethitischen Stadtruine Sarissa gegeben. Dabei wird ein Schwerpunkt auf den mobilen geophysikalischen Einsatz gelegt, da die vorliegende Arbeit durch diesen Einsatz motiviert wurde und so ihren Anfang genommen hat. Die Grundlagen der verwendeten geophysikalischen Verfahren (Georadar, Geomagnetik, Elektromagnetik (EM) und flächenhafte Suszeptibilitätsmessungen), die im Rahmen der Untersuchungen in Sarissa zum Einsatz kamen, werden ebenso in diesem Kapitel erläutert. In Kapitel 4 folgt eine Einführung in Grundbegriffe und gängige Ansätze der automatischen Klassifikation. In diesem Kapitel werden außerdem die theoretischen Grundlagen der Fourier-Analyse der Bilder und der Variogramm-Analyse erläutert und die Herleitung der hier eingesetzten Parameter aus den jeweiligen Methoden gezeigt. Die Arbeitsschritte des in dieser Arbeit ausgearbeiteten Bearbeitungsschemas folgen am Ende des 4. Kapitels. Kapitel 5 befasst sich mit der Anwendung des Bearbeitungsschemas auf die realen Daten aus der hethitischen Stadtruine Sarissa. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden anhand von Trainingsgebieten nach ihrer Eignung und Sensibilität hin untersucht und bewertet. Kapitel 6 behandelt

Simulationsrechnungen. Es wurden flächenhafte geomagnetische Daten simuliert, um die Ergebnisse der realen Daten zu verifizieren. Eine Diskussion der Ergebnisse in Verbindung mit einem Ausblick beschließt diese Arbeit.

# Kapitel 2

## Untersuchungsgebiet

Die Hethiter bildeten eine der drei großen indoeuropäischen Volksgruppen, die um die Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. in Kleinasien einwanderten. Die Erkenntnis, dass die Träger dieses Reiches Indogermanen waren, erweckte im europäischen Raum großes Interesse. Die Kenntnisse über diese Kultur beschränkten sich jedoch auf die Befunde der hethitischen Hauptstadt Hattuşa. Deswegen erregte die Entdeckung der hethitischen Stadtruine Sarissa große Aufmerksamkeit. Die archäologischen Untersuchungen in Sarissa begannen im Jahr 1992. Nach Probemessungen im Jahr 1993 wurde alljährlich geophysikalische Prospektion durchgeführt, die die ganze Erforschung der Stadt begleitete. Die Stadt wurde interdisziplinär untersucht. Neben Archäologie und Geophysik erfolgte auch der Einsatz von Archäobotanik, Geographie und Dendrochronologie eingesetzt, um ein umfassendes Bild des vergangenen urbanen Lebens zu erhalten. In dieser Arbeit werden die Geophysik und die Archäologie behandelt: Die geophysikalischen Untersuchungen werden in Kapitel 3.1 ausführlich diskutiert. Die archäologischen Untersuchungen werden nur im Bezug zu den geophysikalischen Ergebnissen betrachtet und diskutiert.

Für ein besseres Verständnis der unterschiedlichen geophysikalischen Kartierungen werden in diesem Kapitel zunächst die geografische Lage und Geologie des Messgebietes beschrieben. Anschließend werden die archäologischen Hintergrundinformationen und Untersuchungen, die dieser Arbeit wichtige Anhaltspunkte liefern, ausführlich behandelt.

### 2.1 Geografische Lage, Morphologie und geologische Situation

Die hethitische Stadtruine Sarissa mit dem heutigen Namen Kuşaklı liegt im Bergland des östlichen Zentralanatolien am Rand einer Hochebene. Verwaltungstechnisch gehört sie zum Bereich des vier Kilometer westlich gelegenen Dorfes Başörenköy, im Landkreis Altınyayla (Tonus), rund 50 km südlich der Provinzhauptstadt Sivas (Abb. 2.1, Karte).

## 2.1. GEOGRAFISCHE LAGE, MORPHOLOGIE UND GEOLOGISCHE SITUATION 11



**Abbildung 2.1:** Die Daten, die in dieser Arbeit Verwendung finden, wurden in Zentralanatolien in der Nähe der Provinzhauptstadt Sivas aufgenommen (Karte: [www.maps.com](http://www.maps.com)). Am südlichen Rand eines Hochtales, das von einem rund 2000 m hohen Berg flankiert, erstreckt sich die hethitische Stadtruine. Die Akropolis der Sarissa befindet sich auf dem Hügel in der Mitte des Fotos (Foto: [www.staff.uni-marburg.de/~kusakli](http://www.staff.uni-marburg.de/~kusakli)).

Die Ruine befindet sich auf einer natürlichen Anhöhe, die im Gipfelbereich gut 1650 m ü NN erreicht, am südlichen Rand eines von einem rund 2000 m hohen Berg flankierten Hochtales (Abb. 2.1, Foto).

Da bis jetzt in Sarissa keine lokalen geologischen Untersuchungen durchgeführt wurden, liegt nur eine geologische Karte der Umgebung im Maßstab von 1:100.000 vor. Aus unterschiedlichen Berichten, die z.B. von Institutionen wie dem staatlichen Wasserbauamt oder der Universität von Ankara erstellt wurden, konnten Rückschlüsse auf die Entstehungsgeschichte und jetzige geologische Situation gezogen werden. Nach diesen Berichten ist die Region durch fünf geologische Zeiten geprägt: obere Kreide, Paläozän, Eozän, Oligozän und Pliozän. Während die obere Kreide und das Paläozän durch turbiditischen Kalkstein, der durch Tuff, Tuffite, vulkanischen Sandstein und Lava angereichert ist, auszeichnen, finden sich im Eozän Konglomerat und toniger Kalkstein. Beide sind marinen Ursprungs. Das Oligozän besteht aus lagunärem Gips, limnischem Sandstein, Konglomerat und Mergel. Für das Pliozän sind neben dem Konglomerat toniger Kalkstein und Basalt terrestrischen Ursprungs typisch. Vom Paläozän bis zum Ende des Eozäns tritt in dem untersuchten Gebiet Ophiolith-Melange bei der Bildung des Basements durch gravitatives Gleiten in Form eines Olisthostroms (Gravitationsgleitmasse) als abgesonderte dünne Schicht auf. Vulkanoklastika, Turbidit, Kalkstein, die sekundäre Platznahme der Ophiolith-Melange und der geochemische Charakter des Vulkanismus deuten darauf hin, dass sich das Gebiet während des Paläozäns als eine Art 'back-arc' entwickelt hat (Gökten, 1983).

Wie man aus der geologischen Situation entnehmen kann, wird das Messgebiet durch Kalkstein geprägt. Das spiegelt sich gleichzeitig in den Baufundamenten von Sarissa wieder. Fundamente aus Kalkstein zeichnen sich durch magnetisch negative Anomalien, hohe spezifische elektrische Widerstandswerte bzw. niedrige elektrische Leitfähigkeiten aus. Neben Kalkstein spielen Lehmziegel eine besonders große Rolle. Luftgetrocknet oder nach einer Brandkatastrophe verursachen Lehmziegel bei geomagnetischen Kartierungen positive Anomalien. Bei Widerstandsmessungen spielen Lehmziegel eine untergeordnete Rolle.

## 2.2 Archäologie

Die Anfänge der Besiedlung lassen sich bis in das 16. Jahrhundert v. Chr. zurückverfolgen: Ihre Blütezeit erlebte die Siedlung im 15.-13. Jahrhundert v. Chr. In dieser Epoche dehnte sich das hethitische Großreich bis an die Grenzen des Pharaonenreiches Ägypten aus und wurde somit machtpolitisch zum Konkurrenten. Doch nach langjährigen militärischen Auseinandersetzungen schloss man schließlich Frieden. In dem Vertragstext,

der sowohl in seiner keilschriftlichen Fassung aus Boğazköy und Hattuša, wie auch in der ägyptisch-hieroglyphischen Version im oberägyptischen Karnak überliefert ist, wird unter anderem Sarissa erwähnt, ein Beleg für die überregionale Bedeutung des Ortes (Müller-Karpe, 1998). Die Stadt wurde in einer großen Brandkatastrophe gegen 1200 v. Chr. zerstört. Ein bescheidenes Nachleben in den Ruinen ist für die unmittelbar anschließende Epoche belegt, bevor der Platz zeitweilig ganz verlassen war. Im 7./6. Jahrhundert v. Chr. errichtete man eine Burganlage auf den Resten der hethitischen Akropolis, die jedoch bereits nach ein bis zwei Generationen ebenfalls wieder aufgegeben wurde (Müller-Karpe, 1998).

Die Akropolis wird von einer ca. 1,5 km langen Stadtmauer umgeben, und vier Stadttore führen in die Innenstadt. In der Akropolis befinden sich eisenzeitliche und hethitische Gebäudekomplexe, deren Funktionen und Bedeutungen weitgehend geklärt sind.

Neue Fragen stellten sich über die Bedeutung der Stadt im hethitischen Königreich und den Umfang des gesamten Besiedlungsgebietes.

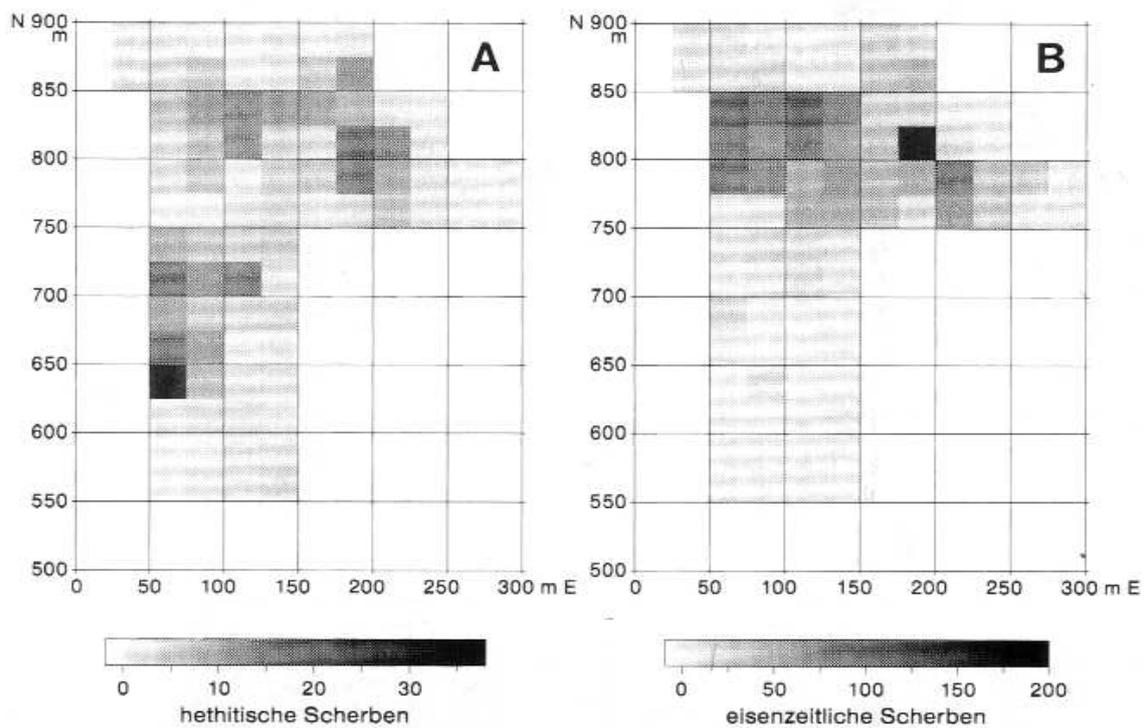
Anhand von geomagnetischer Prospektion und Scherbenzählungen konnte eine Vorstadt am nordwestlichen Ende dieses Hügels nachgewiesen werden (Jean, 1998):

Die hethitischen und eisenzeitlichen Scherben wurden getrennt nach ihrer Anzahl in einem Raster von 25x25 Metern kartiert. Die Flächen wurden durch Absteckpfähle markiert, und die Scherben gezählt und für die jeweilige Fläche eingetragen. Die Größe der Scherben wird in solchen Untersuchungen nicht berücksichtigt. Diese Art der Scherbenkartierungen gibt Hinweise über den Bebauungsgrad einer Fläche. Abbildung 2.3 stellt die Scherbenkartierungen vor. Die Flächen erhöhter Scherbenanzahl werden als besiedelte Gebiete bzw. Vorstadt interpretiert. In Abbildung 2.4 ist als Beispiel eine Scherbe dargestellt.

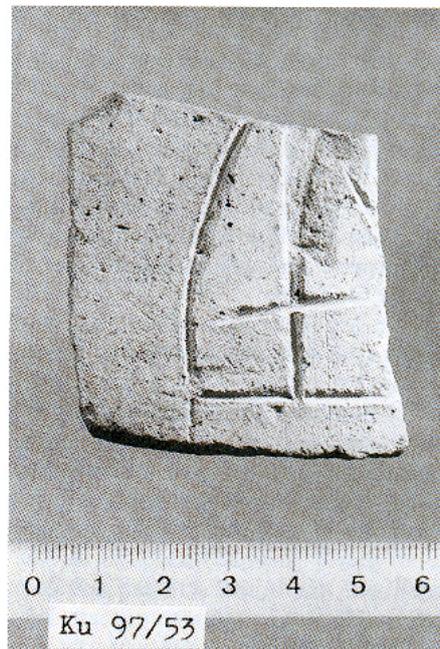
Auch die geomagnetische Prospektion liefert Signaturen, die als Siedlungsspuren interpretiert werden können und somit als Hinweis auf eine Vorstadt. Auf die Ergebnisse der geophysikalischen Prospektion in Sarissa und insbesondere deren Vorstadt wird in Abschnitt 3.2 näher eingegangen.



**Abbildung 2.2:** Die Akropolis der Stadt Sarissa wird von einer 1,5 km langen Stadtmauer umschlossen. Nordwestlich außerhalb der Akropolis schließt sich eine Vorstadt an. Durch die Kombination von Geophysik und Archäologie konnte man die Stadt als Ganzes erfassen. Innerhalb der Stadt sind viele Gebäude (u.a. Tempelanlagen, Archive, Speicher) zum Vorschein gekommen (Müller-Karpe, 2002).



**Abbildung 2.3:** Die ersten flächendeckenden Scherbenkartierungen in Sarissa wurden im Jahr 1997 durchgeführt (Jean, 1998). Die Flächen wurden im 25x25 m Raster auf die Scherbenanzahl hin untersucht. Eisenzeitliche und hethitische Scherben wurden für die jeweilige Fläche gezählt und eingetragen und geben wichtige Hinweise über den Bebauungsgrad eines Gebietes.



**Abbildung 2.4:** Eine der zahlreichen Scherben, die in der Vorstadt von Sarissa kartiert wurden. Diese Scherbe, die zu einem Tonkrug gehört und die Aufmerksamkeit der Archäologen weckt, trägt als Inschrift das hieroglyphische Zeichen für König (Jean, 1998).

# Kapitel 3

## Ausgangspunkt, Zielsetzung und methodisches Konzept

In der hethitischen Stadtruine Sarissa wurden ein Jahr nach Beginn der archäologischen Untersuchungen (1992) geophysikalische Probemessungen vorgenommen. Daran schloss sich alljährlich durchgeführte Prospektionsarbeit an (1993-2004). Zwischen Archäologie und Geophysik entstand eine beispielhafte Zusammenarbeit. Besondere Vorkommnisse wie die große Brandkatastrophe, durch die die Stadt gegen 1200 v. Chr. zerstört wurde, und die gebrannte Lehmziegel hinterließ, führten bei der geomagnetischen Kartierung zu sehr guten Ergebnissen (Stümpel, 1996, 1998, 1999, 2001).

Am Beispiel Sarissa wird in Kapitel 3.1 ein Überblick über die Entwicklung der geophysikalischen Arbeiten im letzten Jahrzehnt in der Archäologie gegeben. Ziel dabei ist, die neue Tendenz zu verdeutlichen, die sich auch in der Geophysik immer mehr durchsetzt, nämlich automatische, parallele und schnelle Datenaufnahme. Um dieser Tendenz der Datenaufnahme gerecht zu werden, müssen Anstrengungen für eine Automatisierung der Darstellung, des Prozessings und der Interpretation der Daten unternommen werden. Die Zielsetzung und Vorgehensweise dieser Arbeit, die in dieser Richtung einen potenziellen Beitrag liefert, wird detailliert in Kapitel 3.2 erläutert.

### 3.1 Einsatz geophysikalischer Methoden in Sarissa

Am Anfang der Prospektionen in Sarissa wurden verschiedene geophysikalische Methoden nacheinander, je nach Fragestellung und in unterschiedlichen Kombinationen eingesetzt. Da der Messaufwand bei der Geomagnetik am geringsten ist, wurde eine 'Voruntersuchung' mit diesem Verfahren durchgeführt. Nach Betrachtung und Interpretation der Geomagnetik mit Archäologen vor Ort, wird über die Flächen entschieden, auf denen Elektromagnetik (EM), Geoelektrik oder Georadar durchgeführt werden sollte. In Abb.

3.1 ist das bis 2004 geomagnetisch kartierte Gebiet dargestellt.

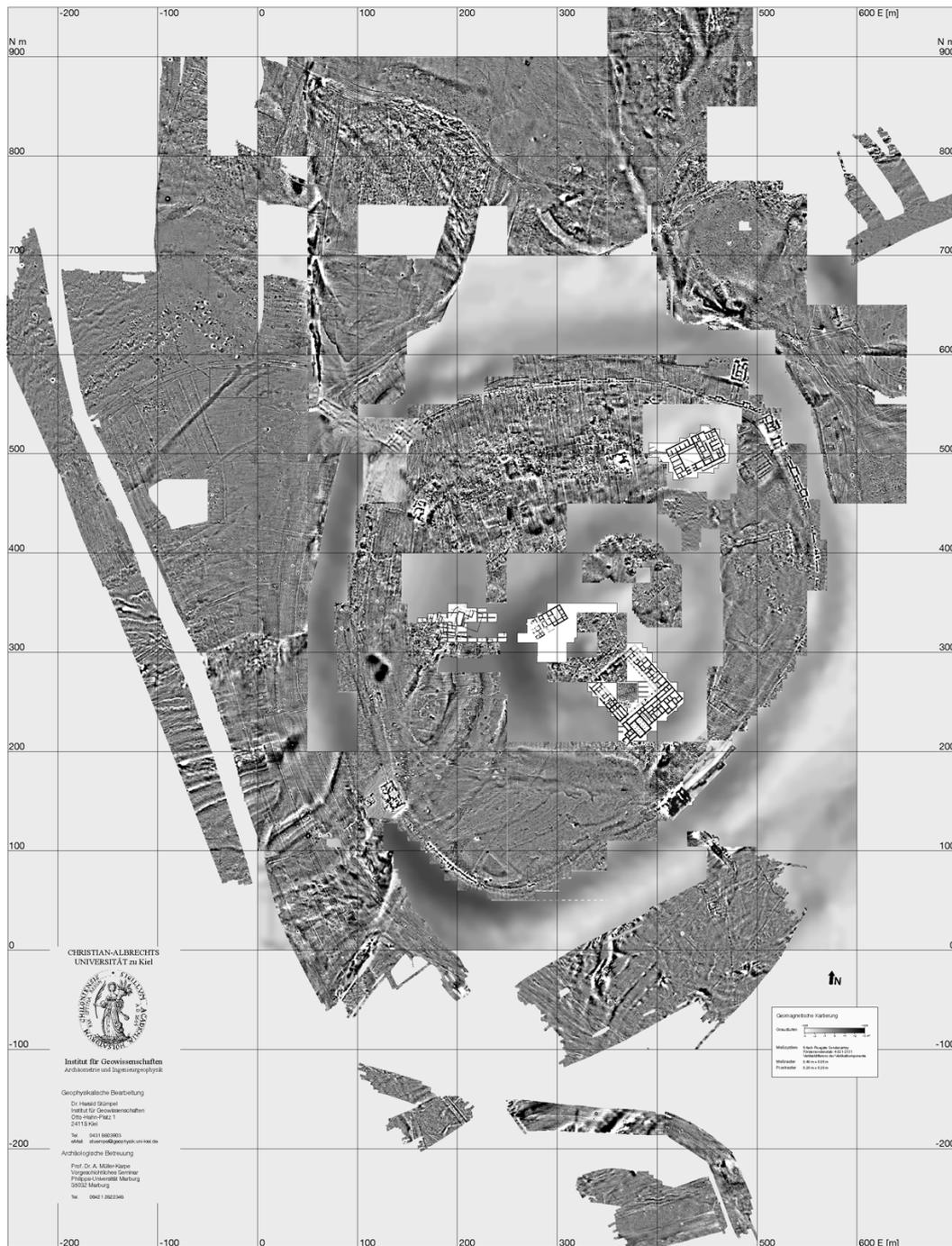
Weitere Fragen stellten sich im Zusammenhang mit der Bedeutung der Stadt im hethitischen Königreich und dem Umfang des gesamten Besiedlungsgebietes. So verschob sich der Schwerpunkt der Messungen auf die Gebiete außerhalb der Akropolis.

Die rasante Entwicklung der Messtechnik, Informationstechnologie und Speicherkapazitäten der Rechner öffnet auch für die geophysikalischen Verfahren neue Möglichkeiten. Im Jahr 2002 wurde ein Projekt mit einem Multi-Sensor-System gestartet und in Sarissa eingesetzt. Parallel zu DGPS-Koordinaten werden hierbei Daten der Verfahren Geomagnetik, EM und Georadar synchron aufgezeichnet. Das System liefert dem Operateur in Echtzeit die Koordinaten der Fahrspur auf einem Bildschirm, wodurch eine lückenlosen Überdeckung des zu messenden Gebiets erreicht werden kann. Durch den zeitgleichen Einsatz können die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Untergrundes direkt miteinander verglichen werden und es wird eine genauere Materialansprache erreicht. Der Einsatz unterschiedlicher Verfahren mit dem Multi-Sensor-System ermöglicht weiterhin eine zügige Untersuchung von großen Flächen. Die Kosten der Vermessung können dadurch gering gehalten werden. Einflüsse einer möglicherweise unterschiedlichen Witterung bei getrennten Vermessungen können ausgeschlossen werden (Erkul et al., 2004). Für die Stadt Sarissa konnten viele interessante archäologische Fragen mit Hilfe geophysikalischer Verfahren geklärt werden, u.a.:

- Die Fläche der sich über 13 ha erstreckenden Akropolis ist bis auf einige Stellen magnetisch prospektiert.
- Die Gebäudereste der ehemaligen Tempelkammer und Archivräume konnten kartiert werden.
- Die Stadtmauer mit ihren Wehrtürmen ist geomagnetisch vollständig erfasst.
- Die Toranlagen und einige Flächen in der Akropolis sind neben der Geomagnetik zudem mit Geoelektrik und Georadar untersucht worden.

Die Details sind in verschiedenen Veröffentlichungen zusammengefasst z. B. Stümpel (1996, 1998, 1999, 2001) und Bilgili (2000).

Bevor ein Beispiel des Multi-Sensor-Einsatzes dieses Kapitel abschließt, werden an dieser Stelle das Messprinzip und die Durchführung aller geophysikalischen Verfahren, die in dieser Arbeit Verwendung finden, kurz erläutert. Die Details können in zahlreichen Lehrbüchern nachgelesen werden, z.B. in Jung (1948), Militzer *et al.* (1978), Kearey & Brooks (1995), Kirsch (1995), Greinwald & Thierbach (1997).



**Abbildung 3.1:** Sarissa wird seit 1993 großflächig magnetisch prospektiert. In den Anfängen wurde nur mit einem von zwei Leuten getragenen Array aus fünf Sonden gemessen. Seit 2002 wird im Rahmen eines Multi-Sensor-Projektes auch mobil prospektiert. In dieser Abbildung sind alle geomagnetisch prospektierten Flächen dargestellt (Erkul et al., 2004).

### **Geomagnetik**

Auf einem Holzgestell sind fünf Fluxgate-Gradienten-Sonden, im Multi-Sensor-System dagegen sechs Sonden, angebracht. Es wird der Gradient der Vertikal-Komponente des magnetischen Feldes gemessen. Der Sondenabstand in vertikaler Richtung beträgt 0,4 m, der Profilabstand 0,4 m und in Profilrichtung liegt etwa alle 0,05 m ein Wert vor. Die Auflösung dieser Sonden beträgt 0,5 nT und der Abstand der Sondenunterkante zum Erdboden zwischen 0,3 und 0,4 m.

### **Geoelektrik**

Bei den geoelektrischen Messungen kam der computergesteuerte Multielektrodenapparat RESECS der Firma GeoServe (Kiel) zum Einsatz. Eine Integration dieses Verfahrens in das Multi-Sensor-System ist vorgesehen, aber noch nicht realisiert. Die Kartierungen werden in einem Messpunktraster von 1x1 Meter durchgeführt und es wird der scheinbare elektrische Widerstand gemessen.

### **Elektromagnetik**

Für die EM-Messungen wurde das Messgerät EM-38 verwendet, in dem Sende- und Empfangsspule integriert sind. Dieses Verfahren liefert Informationen über die elektrische Leitfähigkeit in der Nähe der Erdoberfläche. Die Einheit hierfür ist Milli-Siemens pro Meter (mS/m). 100 mS/m entsprechen 10 Ohmmetern. Die Messwerte liegen in einem 0,5x0,5 m Raster vor.

### **Georadar**

Die Messungen wurden mit dem Radargerät SIR-10 des Herstellers GSSI (USA) mit einer 200- oder 500-MHz-Antenne durchgeführt. Es wurden Reflexionen an Schichtgrenzen abgebildet. Das Radargerät besteht aus Monitor und Recorder. Die vertikale Auflösung beträgt bei einer Registrierrate von 50 Signalen pro Sekunde etwa zwei Zentimeter. Der Profilabstand für die 200-MHz-Messung beträgt 1 Meter, für die 500-MHz-Messungen 0,5 Meter.

### **Flächenhafte Suszeptibilitätsmessungen**

Die magnetische Suszeptibilität (dimensionslos, nach SI-Einheit) wurde mit dem Suszeptibilitätsmessgerät MS2D gemessen. Die Auflösung des Messgeräts liegt bei  $2 \times 10^{-6}$  (SI) und liefert eine direkte Angabe der magnetischen Suszeptibilität. Flächenhafte Sus-

Methode	U1	U2	B	Auflösung	Gerät	Messgröße
Scherbenzählung (eisenzeitlich)	+	+	+	25 x 25 m	menschliches Auge	Scherbenzahl
Scherbenzählung (hethitisch)	+	+	+	25 x 25 m	menschliches Auge	Scherbenzahl
Magnetik	+	+	+	0.05 x 0.4 m	Fluxgate-Gradientensonden	Grad. der Vertikalkomp.
Elektromagnetik	-	+	+	0.5 x 0.5 m	EM-38	Leitfähigkeit
Suszeptibilitätsmessung	+	+	+	bis zu 1 m Tiefe	MS2D	magnet. Suszept.
flächenhafte Suszept.	+	+	+	1 x 1 m	MS2D	magnetische Suszept.
Topographie	+	+	+	1 x 1 m	DGPS	Höhen

**Tabelle 3.1:** Die verschiedenen Methoden, die auf den ausgesuchten Musterflächen U1, U2 und B angewandt wurden.

zeptibilitätsmessungen sind im Rahmen des Multi-Sensor-Systems nicht vorgesehen.

Um die oben erwähnten Vorteile des Einsatzes verschiedener geophysikalischer Verfahren mit dem Multi-Sensor-System zu demonstrieren, wird in Abbildung 3.2 eine kombinierte Anwendung dieses Systems in Sarissa an einer archäologischen Fragestellung vorgestellt.

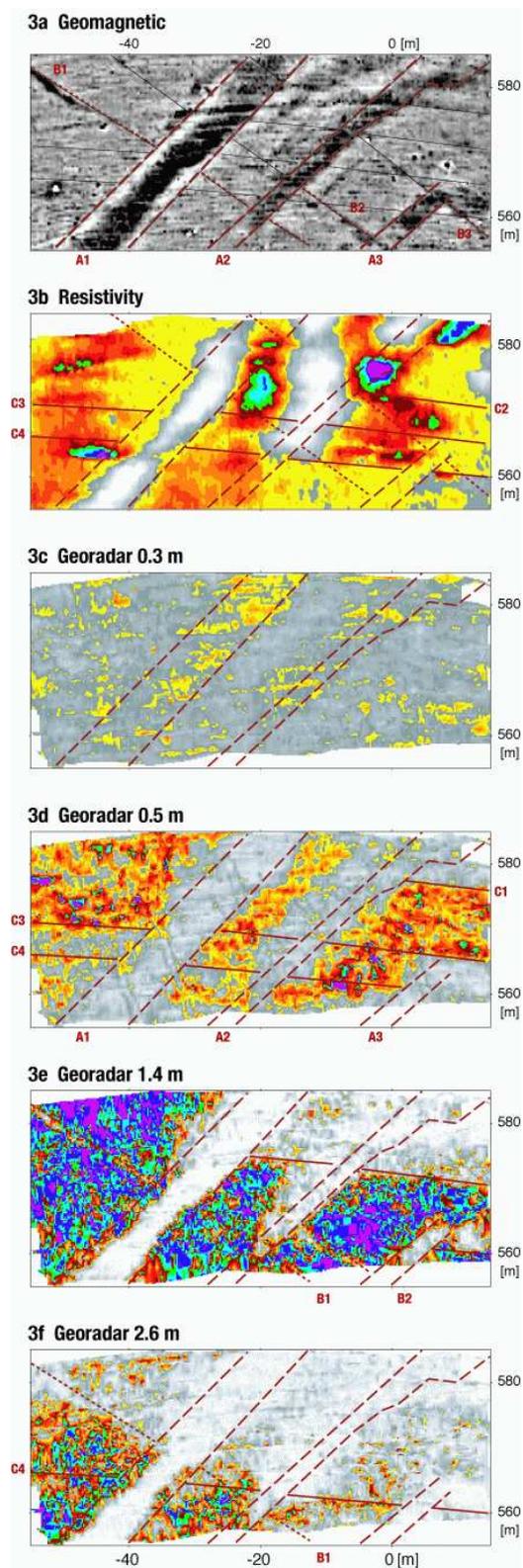
## 3.2 Methodisches Konzept

Den im Jahr 1997 durchgeführten Scherbenkartierungen (Abb. 2.3) folgten weitere Scherbenzählungen, und somit wurde eine 350x400 m Fläche in 25x25 m Teilflächen kartiert. In Abbildung 3.3 sind die nordwestliche geomagnetisch kartierte Fläche und die Scherbenkartierungen dieser Fläche gegenübergestellt. Es besteht eine augenscheinliche Korrelation zwischen dem magnetischen Anomalienmuster aus positiven und negativen magnetischen Werten, die durch die Tonscherben auf der Oberfläche, die Lehmziegel im Untergrund und die Anzahl eisenzeitlicher Scherben verursacht werden.

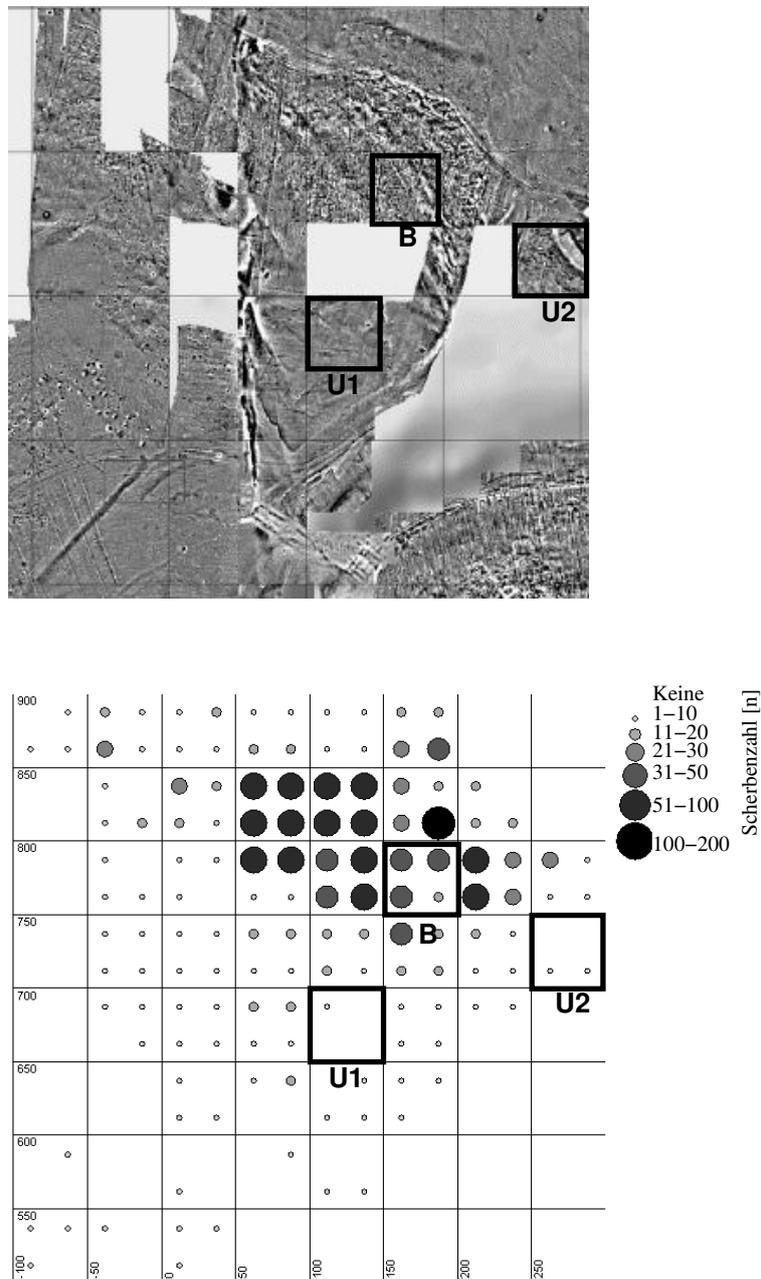
### 3.2.1 Vergleich geophysikalischer Kartierverfahren

Basierend auf diesen Scherbenkartierungen wurden drei Flächen mit unterschiedlichem Bebauungsgrad und mit verschiedenen Texturen aus den geomagnetischen Graustufenplots ausgewählt. Auf diesen drei ausgewählten Flächen wurden weitere geophysikalische Untersuchungen durchgeführt (Auflösung, die Geräte und Messgrößen sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst). Dabei stellte sich die Frage:

Mit welchem geophysikalischen Verfahren können die Scherben am besten erfasst werden?



**Abbildung 3.2:** Kombinierte Anwendung der Verfahren Geomagnetik, Georadar und EM38 in Sarissa. Eine aus archäologischer Sicht interessante Struktur wurde untersucht. Diese zeigt Gebiete a) hoher Magnetisierung b) niedrigen elektrischen Widerstandes c-d) niedrige Reflektivität elektromagnetischer Wellen (Erkul et al., 2004).



**Abbildung 3.3:** Scherbenzählungen (Hüser & Jean, 2002): Die Zahl der gezählten Scherben für die Teilbereiche (25x25 m) wird durch die Größe der Kreise dargestellt. Auf der Basis dieser Scherbenkartierungen (unten) und der Geomagnetik-Plots (oben) werden die Trainingsgebiete für eine Klassifikation ausgesucht.

Um diese Frage zu beantworten, wurden die flächenhaften geophysikalischen Kartierungen in Abbildung 3.4 gegenübergestellt und visuell und mit dem Falschfarben-Verfahren (Abb. 3.5) miteinander verglichen.

### **Visueller Vergleich**

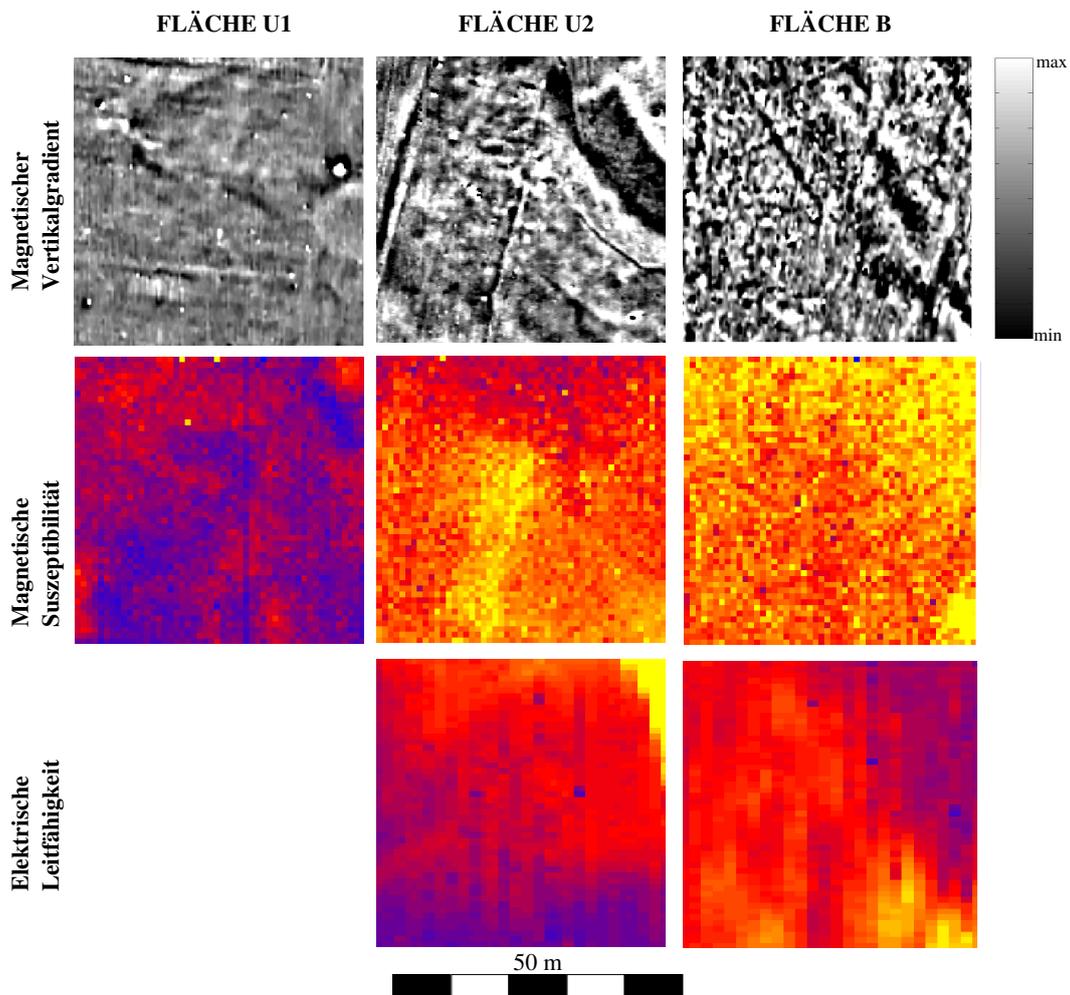
a) Die geomagnetische Kartierung liefert mit ihrer hohen räumlichen Auflösung die detailreichsten Ergebnisse. Die Flächen U1 und U2 sind geprägt durch ihre langwelligen Anomalien. Auf der Fläche U1 sind keine markanten Strukturen zu erkennen. Eine sehr große Anomalie, die wahrscheinlich von einem Scherbenhaufen stammt, fällt auf der rechten Seite auf. Auf der Fläche U2 hingegen sind markante großräumige Anomalien zu sehen: Die auf der linken Seite und in der Mitte verlaufenden länglichen Anomalien werden durch Feldkanten oder Ackerspuren hervorgerufen. Die Anomalie auf der rechten oberen Ecke hingegen entsteht durch die Geologie, d.h. durch eine Rinne im Untergrund. Diese beiden Flächen werden für den Rest der Arbeit als unbesiedelte, ruhige oder unbebaute Fläche bezeichnet. Die Fläche B hingegen hat ein unregelmäßiges Anomalienmuster aus positiven und negativen magnetischen Werten. Diese Anomalien werden durch große Mengen oberirdischer Tonscherben in Verbindung mit im Untergrund verborgenem Lehmziegelschutt hervorgerufen.

b) Die Suszeptibilitätskartierungen liefern im Vergleich zur geomagnetischen Kartierung weniger Details über die einzelnen Strukturen auf den jeweiligen Flächen. Erhöhte Suszeptibilitätswerte werden auf der Fläche B gemessen. Diese sind auf die Scherben, die sich auf der Oberfläche und im Untergrund befinden, zurückzuführen. Die Flächen U1 und U2 haben niedrigere Suszeptibilitäten.

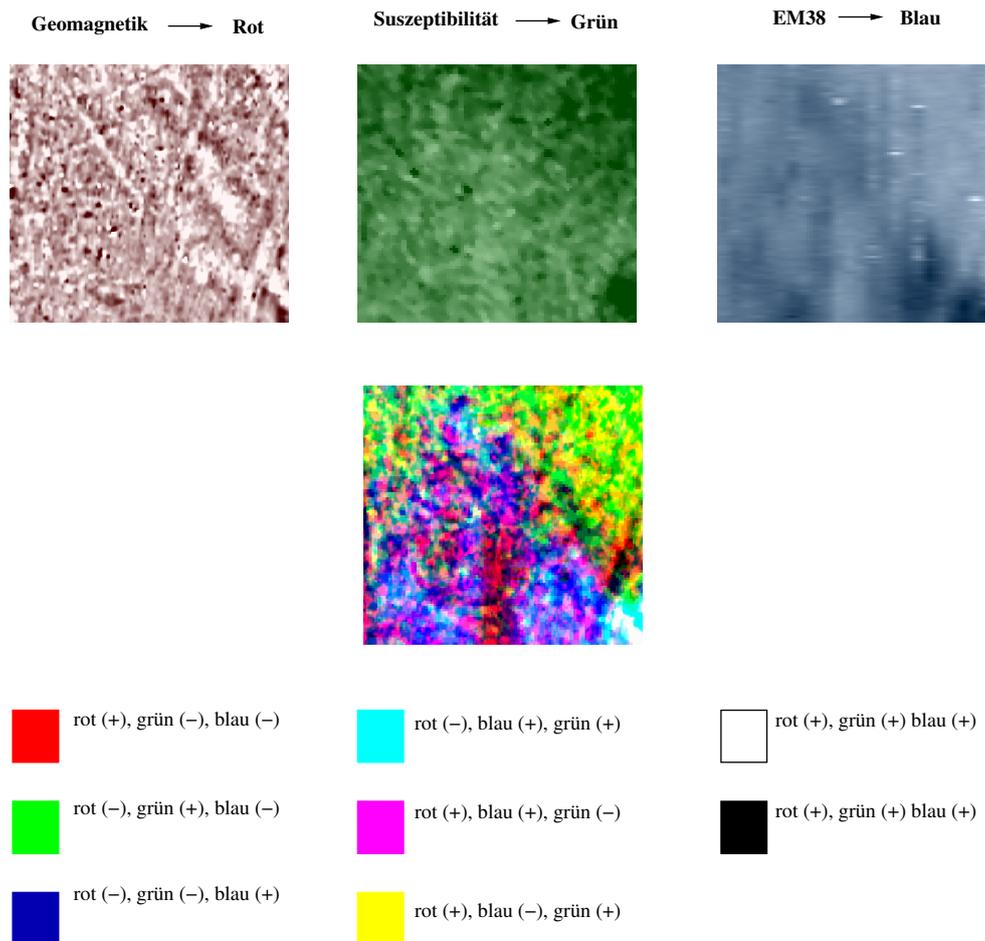
c) Bei den EM-Messungen können trotz des sehr groben Messrasters von 0,5x0,5 m (siehe Tabelle 3.1) besonders auf der Fläche B einige Details erfasst werden, z.B. die quer durch diese Fläche verlaufenden länglichen Anomalien.

### **Vergleich mit dem Falschfarben-Verfahren**

Für einen visuellen Vergleich wird das Falschfarben-Verfahren (color compositing) aus der Fernerkundung (Remote Sensing) angewandt. Mit Hilfe des Falschfarben-Verfahrens kann man eine Struktur vervollständigen, wenn unterschiedliche Teile dieser Struktur in unterschiedlichen Verfahren erfasst sind. In diesem Beispiel handelt es sich nicht um klar erkennbare Strukturen, sondern um kleinräumige Anomalien, deswegen liefert diese Anwendung Unterschiede und Gemeinsamkeiten der Verfahren. In Abbildung 3.5 ist als ein Beispiel ein Falschfarbenbild der Fläche B dargestellt. Die einzelnen 'Bilder', die in das



**Abbildung 3.4:** Die Ergebnisse geophysikalischer Verfahren auf den ausgesuchten Musterflächen: Geomagnetik liefert die detailreichsten Ergebnisse. Bei Suszeptibilitätskartierungen ist eine Erhöhung der Werte auf der Fläche B zu erkennen. Von der Fläche U1 liegen keine EM38-Ergebnisse vor.



**Abbildung 3.5:** Neben dem visuellen Vergleich in einem GIS-Programm wird das Falschfarben-Verfahren eingesetzt. Geomagnetik (rot), Suszeptibilität (Grün) und EM38 (blau) und das daraus entstehende Falschfarbenbild werden dargestellt.

Falschfarbenbild einfließen, sind in der oberen Reihe im jeweiligen Farbton dargestellt. Während die Farbe hellblau (hohe Grün- und Rotwerte) die von Suszeptibilitätsmessungen und EM gemeinsam erfassten Anomalien angibt, gibt rosa (hohe Blau- und Rotwerte) die gemeinsamen Anomalien von Geomagnetik und EM wieder und gelb (hohe Grün- und Rotwerte) die von Suszeptibilität und Magnetik. Weiß steht für Anomalien, die von allen Verfahren erfasst werden konnten.

## FAZIT

Die Verfahren wurden visuell (durch das Betrachten der Bearbeiterin) und automatisch (Falschfarbenbild) miteinander verglichen. Die interaktive Betrachtungsweise hat den Vorteil, dass die Erfahrungen der Bearbeiterin in die Interpretation einfließen. Die Anwendung des Falschfarbenverfahrens ermöglicht hingegen, die Unterschiede quantitativ zu erfassen:

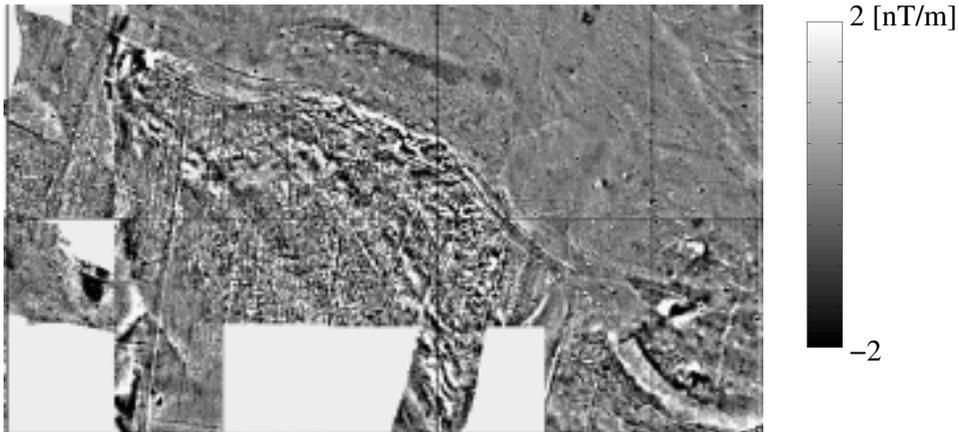
1. Mit EM können nur die ausgedehnten Anomalien (Geologie) kartiert werden. Dieses Verfahren ist für Scherbenkartierungen ungeeignet.
2. Suszeptibilitätskartierungen können die Scherben als solche nicht erfassen, geben aber mit erhöhten Suszeptibilitäten Hinweise auf die Existenz der Scherben.
3. Im Bezug auf Scherbenkartierungen mit geophysikalischen Verfahren stellt sich Geomagnetik als detailreichstes Verfahren heraus. Das besiedelte Gebiet mit hohem Scherbenanteil ergibt ein deutlich unruhigeres Bild, als die unbesiedelten Gebiete mit niedriger Scherbenanzahl. Es konnte eine Korrelation zwischen Scherbenanzahl und geomagnetischen Signaturen festgestellt werden, so dass die geomagnetischen Bilder als Basis für die weiteren Untersuchungen dienen.

### 3.2.2 Festlegung der Scherbenanzahl über die Analyse geomagnetischer Daten

Auf diesen Untersuchungen aufbauend stellt sich die Frage, ob aus den geomagnetischen Kartierungen die Scherbenanzahl quantitativ festgestellt werden kann?

In dieser Arbeit wird ein Bearbeitungsschema ausgearbeitet, durch das die geomagnetischen Kartierungen klassifiziert werden. Ziel dieser Klassifikation ist es, anhand der geomagnetischen Daten qualitative Aussagen über den Bebauungsgrad zu treffen und nach Möglichkeit darüber hinaus die Scherbenanzahl zu quantifizieren.

INPUT



OUTPUT

900	60% U	70% U	90% U	90% U	90% U	90% U
850	60% U	60% U	70% U	90% B	90% U	90% U
800	60% U	90% B	80% B	60% U	90% U	60% U
750	60% U				70% U	70% U
0	50	100	150	200	250	300

B= Besiedelt  
U= Unbesiedelt

**Abbildung 3.6:** Ausgehend von den flächenhaft aufgenommenen Daten (Input) wird ein Bearbeitungsschema entwickelt, das verschiedene Texturen unterscheiden lässt (U: unbesiedelte Fläche, B: besiedelt) und eine Zuordnung dieser Texturen zu den Trainingsgebieten (U1, U2, B) mit einem Ähnlichkeitsgrad ermöglicht. Z. B. bedeutet die Angabe 60%, dass der Bereich zu 60% der Fläche U ähnelt.

Die drei geomagnetischen Flächen dienen als reale Trainingsgebiete. Es werden außerdem Trainingsgebiete simuliert (siehe Kapitel 6). Anhand der realen Trainingsgebiete werden im Bearbeitungsschema mit verschiedenen Verfahren (siehe Kapitel 4) Parameter extrahiert, die eine Quantifizierung der Daten ermöglichen (Texturmerkmale). Diese Parameter dienen im selben Bearbeitungsschema der Klassifikation der anschließend bearbeiteten 'unbekannten' magnetisch kartierten Teilflächen.

Die Anwendung des Bearbeitungsschemas auf die simulierten Daten verfolgt ein anderes Ziel: Die Anzahl, Größe und der Tiefenbereich der Scherben werden variiert. Mit Hilfe des Bearbeitungsschemas werden Texturmerkmale auf deren Sensitivität hin untersucht.

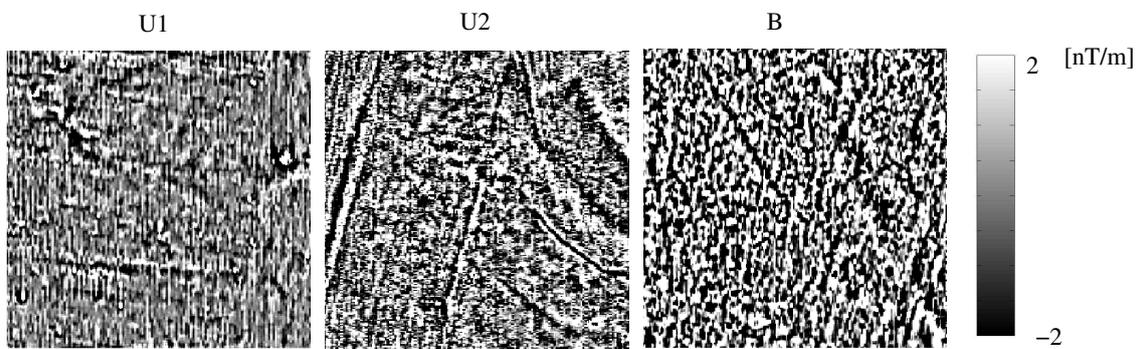
### 3.2.3 Vorarbeiten

Vor und während der Klassifikationsansätze wurden einige Transformationen und Korrekturen angewandt. Dabei wurden zwei Ziele verfolgt:

- die Unterschiede der Bilder hervorheben
- die Unterscheidung zu erleichtern

Die angewandten Korrekturen (Mean, Median, Curvature Trend-Analyse) dienen hauptsächlich der Kontrastverstärkung und werden im Anhang kurz beschrieben und dargestellt.

Die Transformationen 1. und 2. vertikale Ableitungen, Feldfortsetzung in beide Richtungen, analytisches Signal und 'Gravity Transformation' heben unterschiedliche Wellenanteile hervor und dienen zu einer besseren Erfassung der Unterschiede. In dieser Hinsicht stellte sich die erste vertikale Ableitung (Abb. 3.7) als beste Transformation heraus und könnte bei weiteren Untersuchungen Vorteile bieten. Für den vorliegenden Datensatz ergab sich in der späteren Analyse jedoch kein signifikanter Unterschied zu den Originaldaten. Die Anwendung der ersten vertikalen Ableitung kann die kurzwelligen Signalanteile, die z. T. von Scherben auf der Oberfläche oder im Untergrund verursacht werden, hervorheben.



**Abbildung 3.7:** Durch die erste vertikale Ableitung werden die hochfrequenten Signalanteile hervorgehoben, womit versucht wird, die Unterschiede zwischen bebauten (B) und unbebauten (U1) Flächen zu verstärken.

# Kapitel 4

## Automatische statistische Klassifikation

Basierend auf den Erfahrungen aus der Mustererkennung müssen geeignete Parameter gefunden werden, um die unterschiedlichen Muster (patterns) in einem Bild – in diesem Fall in einer geomagnetischen Kartierung – anhand quantitativer Merkmale zu erkennen (recognition) bzw. zu klassifizieren. Das Ziel dabei ist, die visuelle Interpretation zu formalisieren und den Auswerteprozess auf diese Weise zu automatisieren.

In diesem Kapitel werden die hier eingesetzten Methoden zur Gewinnung der zu Grundlegenden Merkmale der Klassifikation behandelt und das Bearbeitungsschema in einzelnen Schritten vorgestellt.

Als eine Einführung werden die gängigsten Ansätze der automatischen Klassifikation vorgestellt und die Grundbegriffe erläutert (4.1). Der theoretische Hintergrund und die einzelnen Methoden der Merkmalsextraktion, die in dieser Arbeit angewendet werden, sind in Kapitel 4.2 ausführlich diskutiert.

### 4.1 Einführung

Bevor die Grundbegriffe einer automatischen merkmalsbasierten Klassifikation erläutert werden, erfolgt eine Vorstellung der Ansätze der automatischen Klassifikation. Die folgenden Erläuterungen basieren auf einem Vorlesungsskript über *Statistische Mustererkennung* von Melzer (2003) und einem Lehrbuch von Duda *et al.* (2001):

- Nichtmetrische Methoden der Mustererkennung: Bei der strukturellen und syntaktischen Mustererkennung werden Muster hierarchisch durch Regelanwendung aus sogenannten Primitiven erzeugt.
- Neuronale Netze: Die Abschätzung einer Abhängigkeit oder Struktur eines Systems wird mit Anwendung limitierter Beobachtungen trainiert und gelehrt.

- Numerische Klassifikationsverfahren: Die numerischen Klassifikationsverfahren verwenden geometrische Abstandsmaße und die statistische Entscheidungstheorie zur Klassifikation.

Muster werden durch Merkmale beschrieben. Die Merkmalausprägung (*feature value*) ist der Wert, den ein Merkmal für ein gegebenes Muster annimmt. Ein Merkmal kann als Abbildung  $\varphi$  aus dem Musterraum (*pattern space*)  $P$  in den Merkmalraum (*feature space*)  $F$  verstanden werden:

$$\varphi: P \rightarrow F$$

Die Merkmalausprägungen (die Elemente von  $F$ ) werden durch Merkmalberechnungen (*feature computation*) als Bilder der Elemente von  $P$  erhalten. Zwei wichtige Kriterien bestimmen die Güte eines Merkmals: 1.) wie schnell und einfach damit klassifiziert werden kann und 2.) wie gut die zu klassifizierenden Klassen voneinander unterschieden werden können.

Der Begriff der Merkmalextraktion (*feature extraction*) wird in der Literatur nicht einheitlich definiert. Zwei unterschiedliche Definitionen kommen vor. Zum Einen wird der Begriff als die Auswahl oder Bestimmung der Abbildungsfunktion  $\varphi$  verwendet und zum Anderen als Merkmalberechnung.

Im Unterschied zur Merkmalextraktion geht es bei der Merkmalselektion (*feature selection*) darum, aus einer gegebenen Menge von Merkmalen ( $\varphi_1, \dots, \varphi_N$ ) eine kleine, bezüglich der gegebenen Klassifikationsaufgabe maximal 'informative' Untermenge auszuwählen.

Das untersuchte Bild muss in Bereiche mit gleichen Merkmalen eingeteilt werden. Den einzelnen Bereichen, die dadurch gebildet werden, können dann Attribute zugewiesen werden. Diese Zuweisung der Attribute zu den Bereichen wird als Klassifizierung bezeichnet (Abmayr, 1994).

Die Objektklassifikation kann mit Hilfe von zwei Methoden durchgeführt werden: unüberwachte Klassifikation (*unsupervised classification*) und überwachte Klassifikation (*supervised classification*).

Bei der unüberwachten Klassifikation werden die Objekte in Mengen mit gleichen Merkmalausprägungen eingeteilt. Diese Mengen stellen die einzelnen Klassen dar. Die Festlegung der symbolischen Namen der Klassen erfolgt anschließend durch den Anwender.

Überwachte Klassifikation geht von den symbolischen Namen aus und bestimmt in einer Trainingsphase anhand von Prototypen die Merkmale einer jeden Klasse. Aufgrund der gefundenen Merkmale bei der eigentlichen Klassifikation werden die Objekte den einzelnen Klassen mit den bereits vorhandenen symbolischen Namen zugeordnet. Aufgrund der Zuordnung eines Objekts zu einer Klasse macht die überwachte Klassifikation sofort Aussagen.

Die Ausprägung eines Merkmals wird durch einen numerischen Wert  $M$  beschrieben, der aus einem Intervall  $[0, A]$  stammt. Ist  $M=0$ , so ist das Merkmal nicht vorhanden, bei  $M=A$  ist das Merkmal komplett vorhanden. Werden mehrere Merkmale zur Klassifikation verwendet, so können diese in einem Merkmalvektor zusammengefasst werden (Haberäcker, 1989).

## 4.2 Methoden der Merkmalsextraktion

Zur Extraktion der Merkmale für eine Klassifikation von Bildbereichen werden in unterschiedlichen Disziplinen unterschiedliche Methoden angewandt. Die Methoden sind oft nicht eindeutig einzuordnen. Es gibt verschiedene statistische Ansätze zur Merkmalsextraktion der Bilder und es ist auch nicht immer klar, welcher Ansatz bei der Beschreibung der Merkmale am besten geeignet ist. Je nach Fragestellung ändert sich die am besten geeignete Methode. Zwei Methoden der Merkmalsextraktion werden in dieser Arbeit eingesetzt:

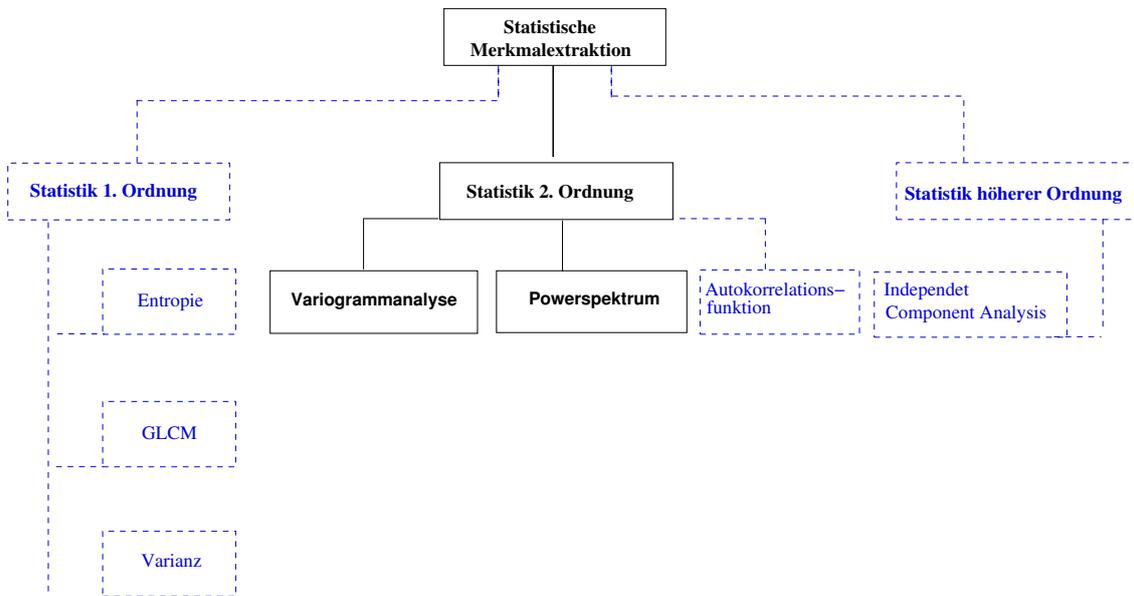
1. Powerspektrum: Die erste Methode ( $1/f^\alpha$ -Powerspektrum) beruht auf der Annahme, dass die geomagnetischen Bilder den Strukturen von natürlichen Bildern (natural images) ähneln und sich mit einer Statistik 2. Ordnung beschreiben lassen.
2. Variogrammanalyse: Die zweite Methode aus der Geostatistik setzt voraus, dass die Werteausprägungen in einem Bild nur mit räumlichen Attributen erklärt werden können.

In Abb. 4.1 werden die gängigen Methoden zur Merkmalsextraktion schematisch dargestellt. Da eine vollständige Darstellung der Methoden nicht das Ziel dieser Arbeit ist, wird vielmehr eine Übersicht über die vorhandenen Methoden gegeben, um den Lesern zu helfen, die in dieser Arbeit Verwendung findenden Methoden einzuordnen.

Diese Methoden kann man wie folgt unterteilen: Statistik der erste, zweite und höheren Ordnung.

Die Statistik erste Ordnung ist die einfachste Methode der statistischen Merkmalbeschreibung und behandelt jedes Pixel in einem Bild einzeln. Die Werte auf einem Bild werden ortsunabhängig betrachtet und untersucht, z.B. Varianz, Entropie, Gray-Level-Cooccurrence-Matrix (Jähne, 2002; Richards, 1982; Laughlin, 1981).

Die Statistik zweite Ordnung macht die Annahme, dass die Werte in einem Bild mit einem Ortsbezug beschrieben werden müssen, da sich die Werte nicht unabhängig voneinander ändern, sondern ganz im Gegenteil korrelieren. So untersucht diese Statistik den Einfluss zweier Messwerte in unterschiedlichen Positionen in einem Bild. In unterschiedlichen Disziplinen haben sich unterschiedliche Methoden der Statistik 2. Ordnung durchgesetzt. Die populärsten Methoden verwenden die Autokorrelationsfunktion und



**Abbildung 4.1:** Zusammenstellung der Methoden zur Extraktion von Merkmalen. Die in dieser Arbeit verfolgten Methoden sind mit durchgezogenen Kästchen dargestellt. Eine kurze Erläuterung der anderen Methoden findet sich im Text.

das Powerspektrum. Die Autokorrelationsfunktion ist ein Maß für die Korrelation zwischen zwei Messwerten in verschiedenen Positionen in einem Bild. Das Powerspektrum ist die fouriertransformierte Autokorrelationsfunktion (Wiener, 1964; Burton & Moorhead, 1987; Field, 1987, 1994; van Hateren, 1992; Ruderman & Bialek, 1994; van Schaaf, 1998).

Die Variogramm-Analyse untersucht auch die Varianz von Datenpaaren in variierten Abständen und wird der Statistik 2. Ordnung zugeordnet (Akin & Siemes, 1988; Deutsch & Journal, 1998).

Die Statistik in höherer Ordnung beschreibt, wie sich die Werte in drei oder mehr Positionen in einem Bild gegenseitig beeinflussen. Eine direkte Umsetzung benötigt komplizierte Algorithmen, aber dennoch wird diese Methode immer häufiger angewendet, z.B. Independent Component Analysis (ICA) (Srinivasan et al, 1982; Atick & Redlich, 1992; van Hateren, 1992; Ruderman, 1997; Bell & Sejnowski, 1997a, 1997b; Hurri et al, 1996).

### 4.2.1 Texturmerkmale aus der Fouriertransformation

In üblicher Form wird ein Bild als eine Intensitätsfunktion  $f$  dargestellt, die zu jedem Ort einen Grauwert  $f(x,y)$  definiert (Darstellung im Ortsraum). Nicht alle Informationen können aus dem Ortsraum abgeleitet werden. Mit Hilfe der Fouriertransformation kann man statistische Eigenschaften von Bildern analysieren. Feintexturierte Grauwertverläufe und scharfe Kanten erzeugen große Spektralampplituden im Powerspektrum bei hohen Ortsfrequenzen, wohingegen glatte Intensitätsänderungen im Bild niedrige Spektralampplituden erzeugen. Es gibt unterschiedliche Methoden, mit denen aus Powerspektren Texturmerkmale berechnet werden können.

Durch Aufsummieren der Spektralwerte in Kreisringen (Polarrouten) mit variierendem Radius und konstanter Dicke oder entlang von Linien konstanter Richtung werden aus dem Fourierspektrum oft Texturmerkmale extrahiert. Aus der Richtung mit den höchsten Spektralanteilen kann beispielsweise die Orientierung der Textur bestimmt werden.

Bevor das  $1/f^\alpha$  - Verhalten des natürlichen Powerspektrums und der daraus abgeleiteten Parameter eingegangen wird, gibt der nächsten Abschnitt einen Überblick über die Fourier-Transformation der Bilder und eine Erläuterung der Schritte zur Berechnung des Powerspektrums erläutert.

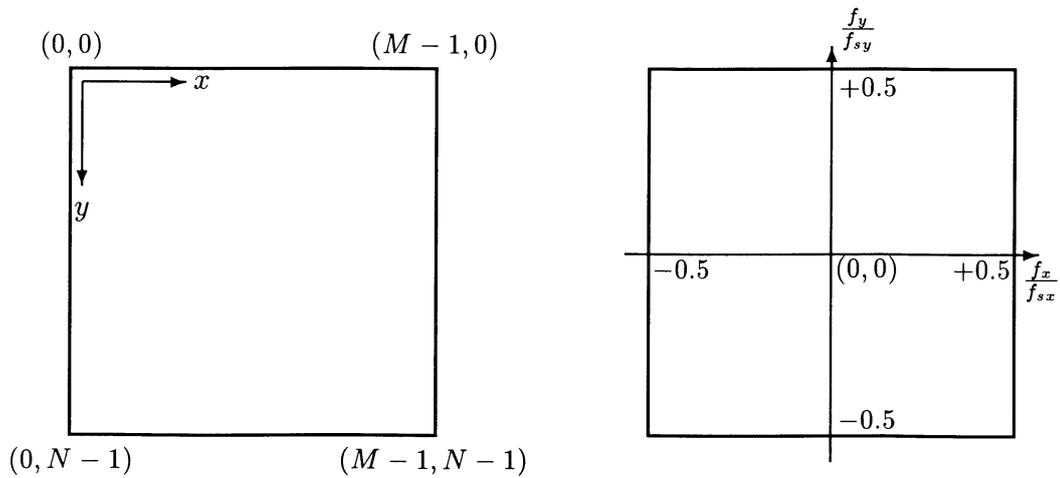
#### Fouriertransformation der Bilder

In einem zweidimensionalen Fall berechnet man aus der Ortsfunktion  $b(x, y)$  die Ortsfrequenzfunktion  $S(f_x, f_y)$ , wobei  $b(x, y)$  das Bild ist, das wir interpretieren möchten. Die zweidimensionale Fouriertransformation wird wie folgt berechnet:

$$S(f_x, f_y) = \int_{+\infty}^{-\infty} \int_{+\infty}^{-\infty} b(x, y) e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy \quad (4.1)$$

Die absolute Summierbarkeit der Bildfunktion  $b(x, y)$  ist für die Existenz der Spektralfunktion  $S(f_x, f_y)$  hinreichend:

$$\int_{+\infty}^{-\infty} \int_{+\infty}^{-\infty} |b(x, y)| dx dy < \infty \quad (4.2)$$



**Abbildung 4.2:** Darstellung eines Bildes im Ortsbereich (links) und im Frequenzbereich (rechts).

Die Ortsfrequenzfunktion  $S(f_x, f_y)$  ist eine komplexe Funktion mit Realteil und Imaginärteil:

$$S(f_x, f_y) = \Re\{S(f_x, f_y)\} + \Im\{S(f_x, f_y)\} \quad (4.3)$$

Powerspektrum oder PSD (engl. Power Spectral Density):

$$|S(f_x, f_y)| = \sqrt{\Re\{S(f_x, f_y)\}^2 + \Im\{S(f_x, f_y)\}^2} \quad (4.4)$$

In Abbildung 4.2 auf der linken Seite ist ein Bild  $b(x, y)$  im Ortsbereich mit  $M$  Spalten und  $N$  Zeilen dargestellt. Der Koordinatenursprung des Bildes befindet sich links oben und die Ortskoordinaten sind mit  $x$  und  $y$  bezeichnet. Das Powerspektrum dieses Bildes im Ortsfrequenzbereich mit normierten Ortsfrequenzen ist auf der rechten Seite wiedergegeben. Im Allgemeinen wird die Fouriertransformation eines Bildes wie folgt dargestellt:

$$S(f_x, f_y) = F\{b(x, y)\} \quad (4.5)$$

### Berechnung des Powerspektrums

In diesem Abschnitt werden die Arbeitsschritte für die Berechnung eines Powerspektrums beschrieben. Mit Erläuterungen des 2D-Powerspektrums (Periodogramm) und der daraus abgeleiteten Parameter wird dieses Unterkapitel abgeschlossen.

#### 'Zeropadding'

Für eine Berechnung des Powerspektrums müssen die Bilder im Allgemeinen nicht in Quadraten vorliegen, aber Zeilen- und Spaltenanzahl müssen jeweils eine Potenz von 2 sein (2,4,8,16,32,64,128, usw.), da meistens Fast-Fourier-Transformation-Algorithmen benutzt werden. Ein bekanntes Verfahren, um für  $N$  eine Potenz von 2 zu erhalten, stellt das Zero-Padding dar. Ein Bild wird an allen vier Seiten mit Nullen aufgefüllt, sodass das Bild mittig bleibt und die für die Fouriertransformation erforderliche Zeilen- und Spaltenanzahl erreicht ist.

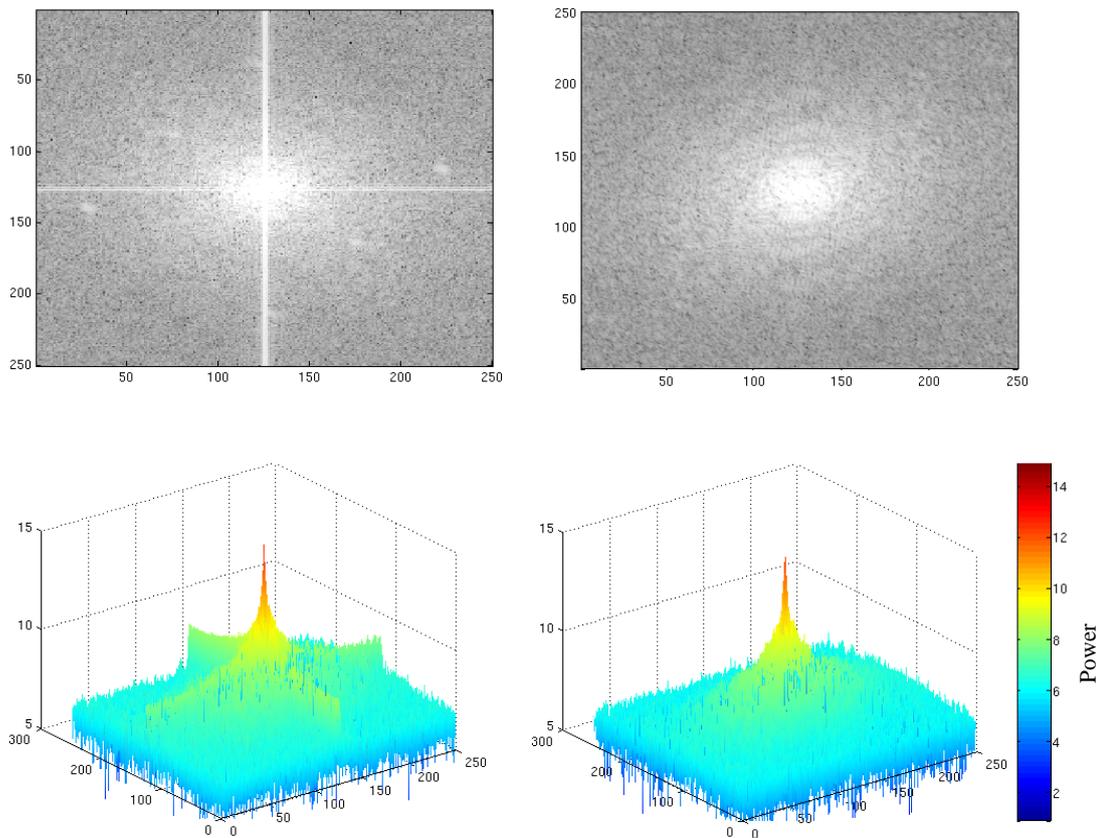
In Abbildung 4.3 ist das Powerspektrum mit seinen verschiedenen Darstellungsformen wiedergegeben.

#### 'Leakage-Effekt'

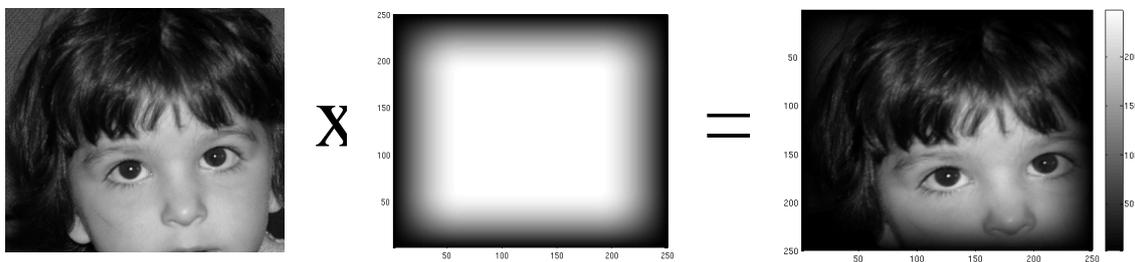
In Abbildung 4.3 fallen starke horizontale und vertikale Bänder auf. Es handelt sich hierbei um Randeffekte. Diese werden durch die periodische Fortsetzung des ausgeschnittenen Teilbildes (Grauwertenkanten) an den Übergängen erzeugt. Dieser Effekt wird *Leakage* bzw. Auslaufen des Spektrums genannt. Um den Leakage-Effekt einzudämmen, wird ein Rechteck-Fenster, das an den Rändern sanft gegen Null geht, verwendet. Es gibt unterschiedliche Fensterfunktionen (Taper), mit denen die Bilder multipliziert werden können:

- Bell-Taper
- Welsh-Taper
- Hanning-Fenster
- Bartlett-Taper

In dieser Arbeit wurde ein Rechteck-Fenster mit cos-Funktion als Taper angewendet. In Abbildung 4.4 ist das Beispielbild mit einem cos-Taper maskiert dargestellt. Wie man in Abbildung 4.3 (rechts) sehen kann, sind die Artefakte sehr abgeschwächt bzw. verschwunden. Die Größe der Maske muss allerdings richtig gewählt werden. Bei einem zu kleinen cos-Taper bleiben Reste dieser Artefakte und bei zu einem großen cos-Taper können die Bereiche zu eng gewählt sein, sodass die zu analysierende Textur nicht als



**Abbildung 4.3:** Oben und unten links sind Powerspektren vor der Maskierung mit 2D- bzw. 2.5D-Ansicht dargestellt. Oben und unten rechts wurde das Bild mit einem *cos*-Tape maskiert. Dadurch werden die vertikalen Bänder in den Powerspektren entfernt und eine bessere Betrachtungsweise erreicht.



**Abbildung 4.4:** Um den im Powerspektrum von Grauwertenkanten verursachten Leakage-Effekt einzudämmen, werden die Bilder mit einem Rechteck-Taper mit *cos*-Funktion maskiert.

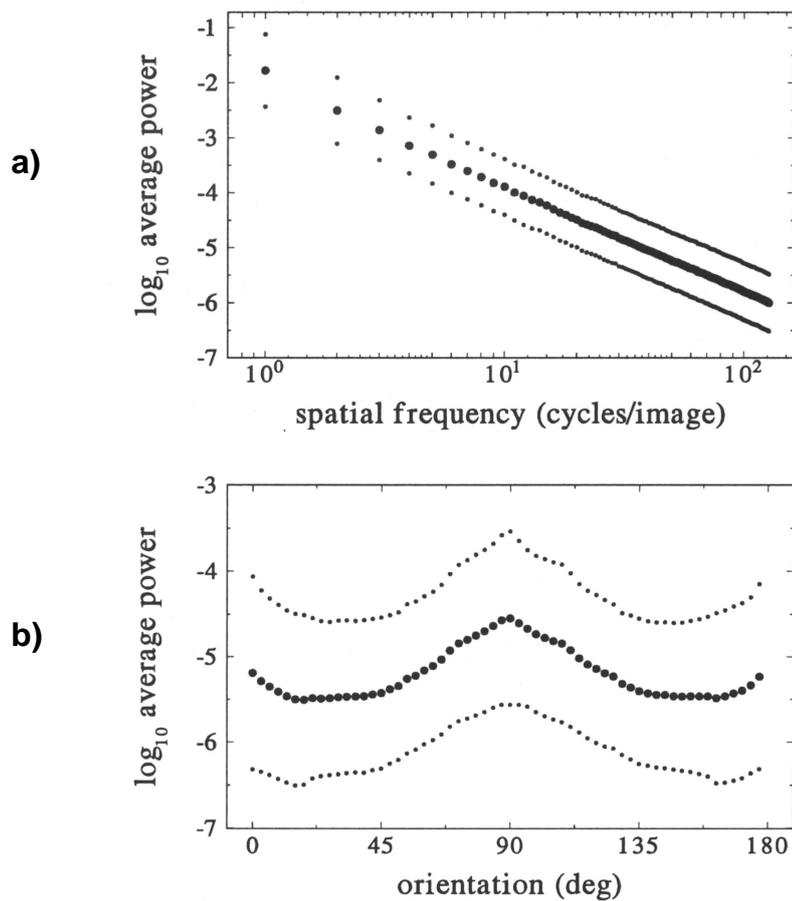
Ganzes erfasst werden kann.

### $1/f^\alpha$ -Powerspektrum in der Natur

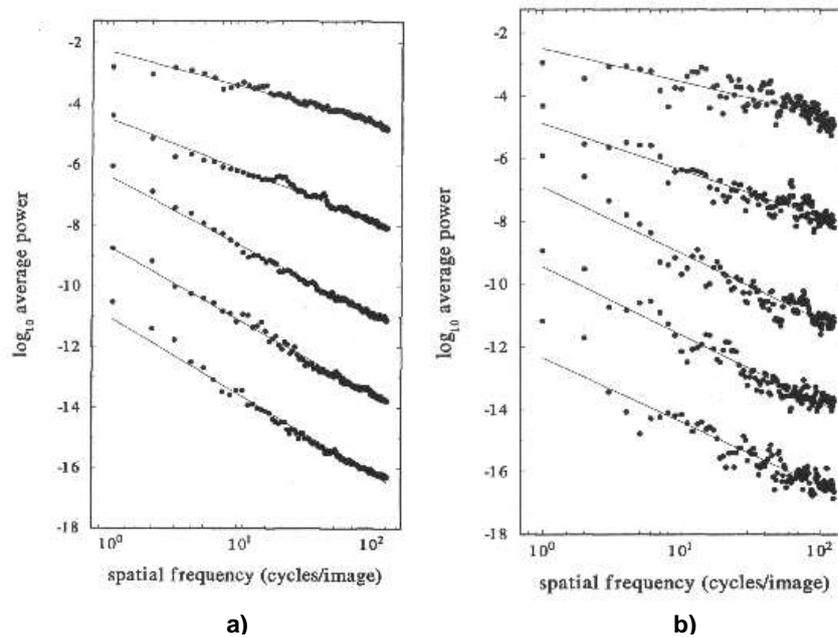
Log-log-Verteilungen des Powerspektrums ('power law'-Charakteristik) treten in der Natur bei sehr unterschiedlichen Phänomenen auf: Sonnenfleckenanzahl, Polschwankungen, Meeresströmungen, Nilwasserstände und Seismizität verhalten sich mit diesem Exponentialgesetz.  $1/f^\alpha$ -Rauschen (Flicker- oder rosa Rauschen) tritt in der Natur am häufigsten auf. Das bekannteste Beispiel von 'power law'-Charakteristik in der Geophysik ist der sog. *b*-Wert in der Erdbeben-Statistik (Gutenberg & Richter, 1954), der das Verhalten Magnitude-Häufigkeit beschreibt. Dabei ist  $\alpha$  nicht exakt 1, sondern kann durchaus aus dem Bereich 0,5 bis 1,5 stammen. Der *b*-Wert der Magnituden-Häufigkeitsverteilung nach Gutenberg-Richter liegt für viele Gebiete bei ungefähr 0,9 (Turcotte, 1997). Einige geophysikalische Parameter, z.B. Porosität, Permeabilität und Suszeptibilität folgen diesem Exponentialgesetz. Das  $1/f^\alpha$ -Verhalten der geomagnetischen Daten wird in dieser Arbeit untersucht. Es werden nicht die  $\alpha$ -Werte sondern die Abweichungen eines Powerspektrums von dem 'power law'-Verhalten zur Klassifikation eingesetzt. Während Powerspektren von 'natürlichen' Strukturen sich wie rosa Rauschen verhalten, werden die anthropogenen Einflüsse in den Abweichungen von diesem Verhalten erwartet. Im Allgemeinen werden die Powerspektren entweder über die Frequenzen oder die Richtung gemittelt betrachtet.

In Abbildung 4.5 ist die Power dargestellt: a) als eine Funktion der räumlichen Frequenzen  $f$ , gemittelt über alle Richtungen mit einer log-log Skala und b) als Funktion der Richtung gemittelt über Frequenzen b). Diese Berechnungen wurden mit einem Datensatz von 276 natürlichen Bildern durchgeführt. Die fetten Punkte stellen den Mittelwert, gebildet über die 267 Bilder, dar und die schwachen Punkte die Standardabweichungen (van Schaaf, 1998). Anhand von Abbildung 4.5 a) kann man erkennen, dass die Werte in einer log-log-Skalierung auf einer geraden Linie liegen, mit anderen Worten, die Power verhält sich gegenüber den Frequenzen mit einem Potenzgesetz. Durch eine Betrachtung von b) kann man sagen, dass das Powerspektrum anisotrop ist.

Abbildung 4.6 zeigt die Powerspektren aufgetragen gegen die Frequenz anhand fünf verschiedener natürlicher Bilder: a) Über alle Richtungen gemittelt, b) in einer bestimmten Richtung ( $30^\circ$ ) mit einer bestimmten Richtungstoleranz ( $3^\circ$ ). Wie man aus dieser Abbildung entnehmen kann, verhalten sich die einzelnen Bilder nicht nur in ihrem Total-Wert unterschiedlich, sondern weisen auch in den  $\alpha$ -Werten gewisse Unterschiede auf. Mit der richtungsabhängigen Betrachtungsweise kommen wesentlich mehr Details über das Verhalten der Frequenzen zum Vorschein.



**Abbildung 4.5:** In dieser Abbildung werden Untersuchungen mit einem Bilder-Set von 276 natürlichen Bildern vorgestellt. a) Die über alle Richtungen gemittelte Power ist gegen die räumliche Frequenz aufgetragen. Die fetten Punkte bezeichnen den gemittelten Wert der gesamten untersuchten Bilder, die schwachen Punkte sind die Standard-Abweichungen. b) Die über die Frequenzen gemittelte Power aufgetragen gegen die Richtung. Wie in a) bezeichnen die fetten Punkte die gemittelten Werte über das ganze Bilder-Set und die Schwachen die Standard-Abweichungen (van Schaaf, 1998).

**Abbildung 4.6:**

Die Untersuchungen sind für fünf natürliche Bilder gemacht. Für die einzelnen Bilder ist die Power über die gesamten Richtungen gemittelt gegen die Frequenz aufgetragen a) und in einer bestimmten Richtung mit einer bestimmten Richtungstoleranz gemittelt b). Die Anpassung erfolgte mit einem  $1/f^\alpha$  - Modell(durchgezogene Linie)(van Schaaf, 1998).

**FAZIT**

Nachdem die Power gegen die Frequenzen aufgetragen ist, wird eine Ausgleichskurve mit der Methode der kleinsten Quadrate (least-squares-Methode) einem  $1/f^\alpha$ -Modell angepasst. Aus diesem Modell werden drei Parameter abgelesen:

- Der RMS - Fehler beschreibt die Anpassung, inwieweit die modellierte Kurve einem  $1/f^\alpha$ -Modell ähnelt.
- $\alpha$  verkörpert die Neigung dieser Kurven (exponent) und sagt etwas über das Frequenzverhalten eines Bildes aus.
- Die Total-Power (Skalierungsfaktor) variiert ebenfalls und ist abhängig vom Kontrast im Bild bzw. von der Standardabweichung der Werte.
- Das Powerspektrum als eine Funktion der Frequenzen verhält sich ähnlich wie  $1/f^\alpha$  (Burton & Moorhead, 1987; Tolhurst, 1992; Badelley, 1997).

Nachdem Artefakte im Powerspektrum durch die Anwendung eines cos-Tapers auf das Input-Image vermieden werden, wird in dieser Arbeit das Verhalten des 2D-Powerspektrums in Abhängigkeit der Frequenzen in zwei Richtungen ( $0^\circ$  (horizontal) und  $90^\circ$  (vertikal)) untersucht. Die oben erwähnten drei Eigenschaften der Powerspektren werden anhand der Trainingsgebiete in Bezug auf eine Klassifikation und deren Sensibilität hin untersucht.

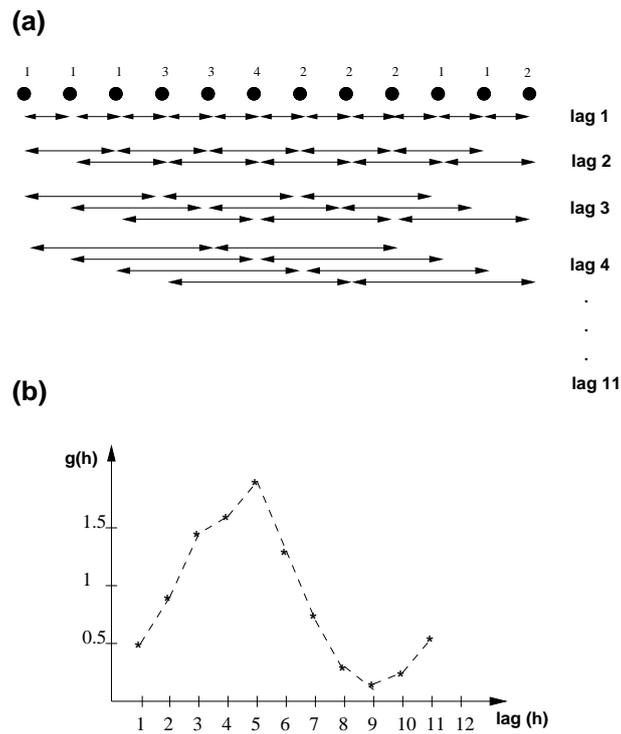
**4.2.2 Texturmerkmale aus dem Variogramm**

Geostatistik im engeren Sinne setzt voraus, dass die Werteausprägungen eines Phänomens ohne Berücksichtigung der räumlichen Attribute (Lage, Distanz, Nachbarschaft) von Werten nicht oder nur unzureichend erklärt werden (Isaaks & Srivistava, 1989).

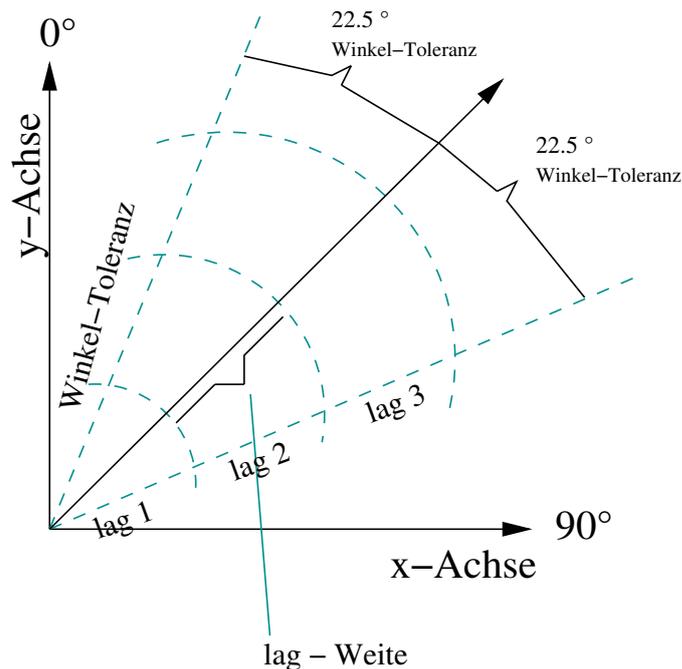
**Grundlagen**

Der erste Schritt in der Variogrammanalyse besteht aus der Berechnung der räumlichen Variation eines Datensatzes. Im Allgemeinen repräsentiert das experimentelle Variogramm die Varianz von Datenwerten bei variierten Abständen. Die Berechnung eines experimentellen Variogramms in einem 1D-Datensatz ist in Abb. 4.7 dargestellt. Die Variogrammfunktion  $\gamma(h)$  ist gegeben durch folgende Gleichung:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [z(i) - z(i+h)]^2 \quad (4.6)$$



**Abbildung 4.7:** Die Untersuchung entlang einer Linie (Transsektmessungen) ermöglicht die Schätzung eines Variogramms - die Schätzung der Varianzen für wachsende lags ( $h$ ) (Lorup, 200).



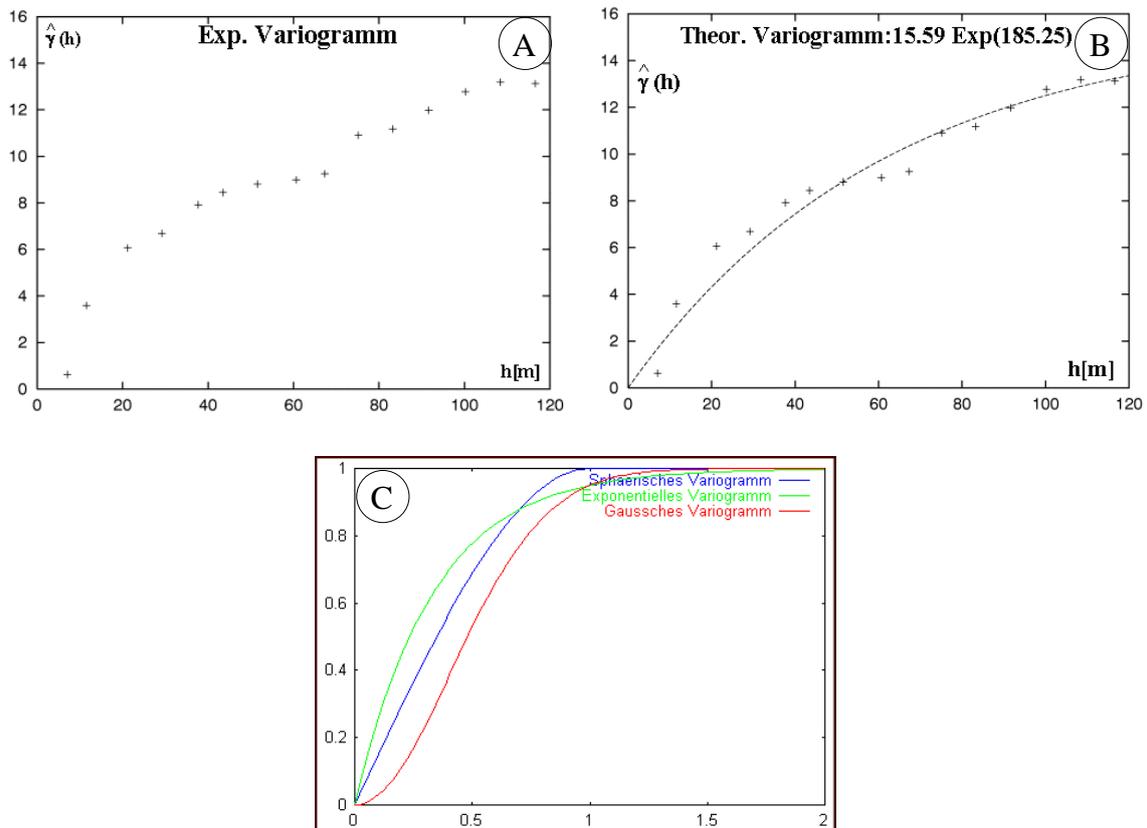
**Abbildung 4.8:** In der Praxis sind für die Erstellung eines Variogramms für eine bestimmte Richtung die Angabe des Richtungswinkels, des Halbwinkels und der maximalen Bandbreite nötig (geändert nach Lorup, 2000).

Ähnlich wie bei räumlichen Korrelationsmaßen werden Wertepaare gebildet und diese auf ihre Ähnlichkeit hin untersucht. Die Paarung erfolgt dabei zwischen den Werten an der Position  $i$  und den Werten an der Position  $i+h$  mit  $h$  als Betrag eines Vektors variabler Größe. Die durch die Größe  $h$  bestimmte Nachbarschaft wird als *lag* bezeichnet. Dabei können nicht nur unmittelbar benachbarte Werte ( $\text{lag}=1$ ) sondern auch räumlich weiter separierte Paare miteinander verglichen werden ( $\text{lag}=2$ ,  $\text{lag}=3$ ,  $\text{lag}=4$  usw.).

Die Daten können omnidirektional oder mit einer Richtungsangabe gepaart werden. Für eine gegebene Klasse von Vektoren kann Mittel der Variabilität gebildet werden. Alle Punktpaare werden mit Vektoren verbunden, deren Länge in einem spezifischen Intervall liegt und deren Richtung bis auf einen bestimmten Toleranzwinkel gleich ist. Für eine gegebene Klasse von Vektoren kann dann die Variabilität gebildet werden.

In der Abbildung 4.8 werden beispielsweise alle Datenpaare, die sich in der Richtung  $45^\circ \pm 22,5^\circ$  befinden, in die Berechnung einbezogen. Eine Untersuchung der Variabilitäten der Werte in unterschiedlichen Richtungen wird zur Untersuchung der Anisotropie eingesetzt. In dieser Arbeit wurde eine Variogramm-Analyse in einer bestimmten Richtung ( $90^\circ$ ) durchgeführt. Auf die Bestimmung der Anisotropie durch die Variogramm-Analyse wird nicht näher eingegangen.

Nachdem das experimentelle Variogramm (siehe Abb.4.9, a) berechnet wird, muss die-



**Abbildung 4.9:** Es werden mathematische Modelle gesucht, die eine Beschreibung der Form des experimentellen Variogramms (A) ermöglichen und so zu einem theoretischen Variogramm (B) führen. Abbildung C zeigt drei Beispiele mathematischer Modelle.

sem eine Funktion angepasst werden, die den Verlauf möglichst gut wiedergibt. Die Funktion, die dem experimentellen Variogramm angepasst wird und als Schätzer für das Variogramm gilt, wird theoretisches Variogramm (4.9 b) genannt.

In der Praxis wird dem experimentellen ein theoretisches angepasst, in dem aus den gängigen Variogrammmodellen ausgewählt wird. Hier sind drei Beispiele (4.9 c) aufgeführt:

### Das sphärische Modell

$$\gamma(h) = \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \quad (4.7)$$

**Das exponentielle Modell**

$$\gamma(h) = 1 - e^{-\frac{h}{a}} \quad (4.8)$$

**Das Gaußsche Modell**

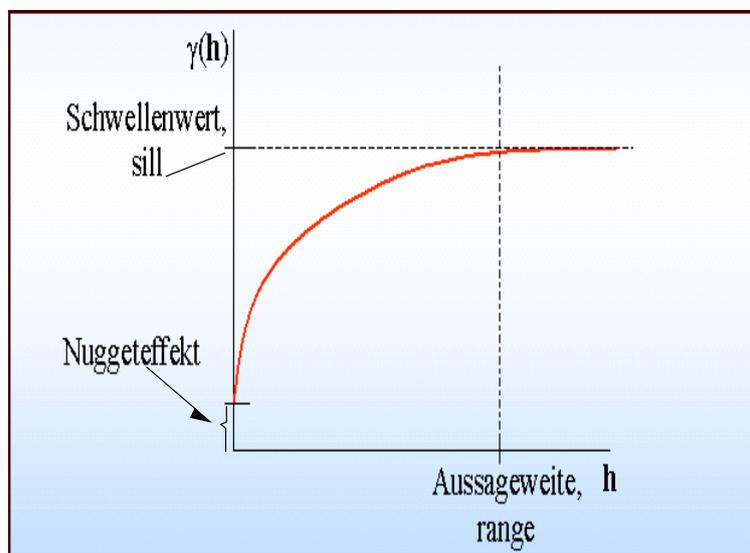
$$\gamma(h) = 1 - e^{-\left(\frac{h}{a}\right)^2} \quad (4.9)$$

Die Anpassung des Modell-Variogrammes an das experimentelle erfolgt halbautomatisch. Nachdem das Modell manuell ausgesucht wird, erfolgt die Anpassung anschließend automatisch über die Methode der kleinsten Quadrate. Eine geeignete Funktion zur Beschreibung des Variogramms muss in der Regel drei Eigenschaften beschreiben:

1. Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinate (Nugget)
2. Schnittpunkt der Kurve mit der Abszisse (Range)
3. Erreichen eines Grenzwertes für hinreichend große Werte von  $h$  (sill)

Nach Formel 4.7 sollte die Varianz auf einer Entfernung von null Pixeln eigentlich null sein. Abtastfehler oder Variabilitäten in kleinen Abständen führen jedoch zu unterschiedlichen Werten in diesen Bereichen. Das erscheint als Diskontinuität in der Wurzel des Variogramms und wird als Nugget-Effekt bezeichnet. Da in den untersuchten Daten der Nugget-Effekt sehr klein ist, wird dieser als nicht signifikant eingestuft.

Sill repräsentiert die totale Varianz und Range die Entfernung, über die die Daten korrelieren. Die Range- und Sill-Werte werden für die weiteren Berechnungen als Parameter zur Merkmalbeschreibung benutzt.

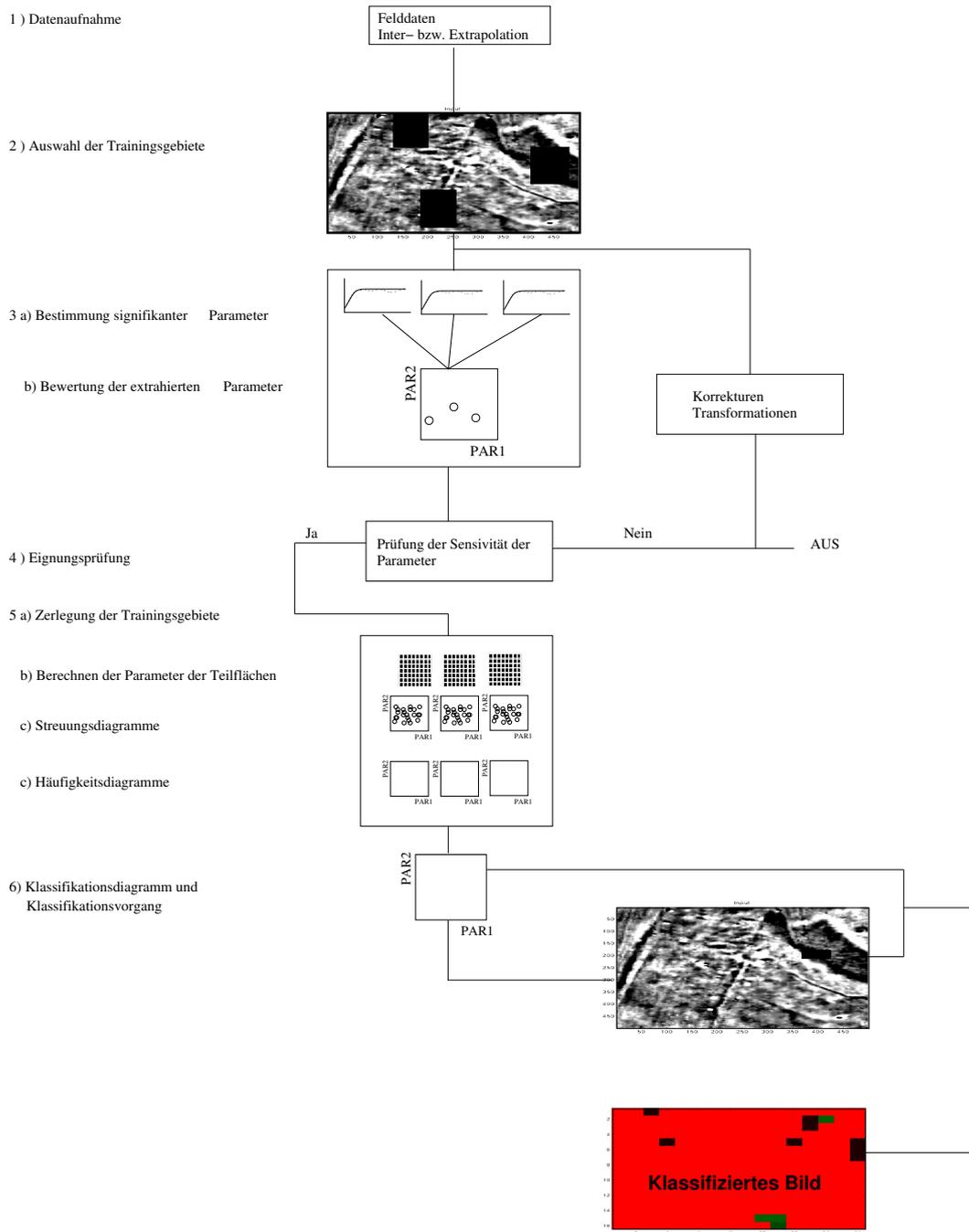


**Abbildung 4.10:** Die Hauptkomponenten eines theoretischen Variogramms sind hier dargestellt. Da der Nuggeteffekt in den bearbeiteten Daten sehr klein und nicht signifikant ist, werden hier Sill- und Range - Werte als Parameter zur Merkmalbeschreibung angewendet.

## 4.3 Bearbeitungsschema

In diesem Abschnitt werden die Arbeitsschritte des Bearbeitungsschemas vorgestellt (siehe Abb. 4.11). Zunächst erfolgt eine heuristische Beschreibung des Verfahrens, das anschließend in mathematischer Form dargestellt wird.

- Nach Aufnahme der Daten werden Vorarbeiten durchgeführt, die in der Regel zu einer besseren Betrachtung und Interpretation der Daten dienen, z.B. Mittelwert-Korrektur oder Inter- bzw. Extrapolation (Abb.4.11, Schritte 1a-b).
- Weil es hier nicht um klar erkennbare großräumige Muster, sondern vielmehr um diffuse kleinräumige Anomalie Muster geht, werden die Trainingsgebiete visuell ausgewählt (Abb.4.11, Schritt 2).
- Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, werden zur Merkmalsextraktion zwei Verfahren einbezogen. Beide Verfahren extrahieren jeweils zwei Parameter für die Trainingsgebiete als Ganzes (Schritte 3a-b).
- Wenn die Trainingsgebiete im Merkmalraum nicht separiert werden können, besteht die Möglichkeit, die Unterschiede der Trainingsgebiete durch Transformationen oder Filtern hervorzuheben. Wenn nach diesen Anstrengungen keine Verbesserung erzielt wird, muss die Klassifikation aufgegeben werden (Abb.4.11, Schritt 4).
- Da hier eine komplexe Entscheidungsgrenze der Merkmale vorliegt, wird ein Klassifikator eingesetzt, der die Streudiagramme der Parameter aus den zerlegten Teilflächen der Trainingsgebiete verwendet. Aus diesen Streudiagrammen wird eine statistische Verteilung (Dichtefunktion) der Merkmale berechnet (Abb.4.11, Schritte 5a-d).
- Im Klassifikationsdiagramm wird die jeweils größte Punktdichte für jede mögliche Kombination der Parameter der Trainingsgebiete ermittelt. Diese werden dann je nach Trainingsgebiet farblich kodiert und die jeweilige Punktdichte als Intensität der Farbe in diesem Diagramm dargestellt (Abb.4.11, Schritt 6).
- Anhand des Klassifikationsdiagramms wird mit einem gleitenden Fenster über das zu klassifizierende Bild gefahren und das unbekannte Bild klassifiziert. Zwei wichtige Kriterien sind bei diesem Schritt zu berücksichtigen. Zum Einen müssen die Trainingsgebiete grundsätzlich aus dem zu klassifizierenden Bild entstehen. Zum Anderen muss das Klassifikationsfenster, das über das unbekannte Bild gefahren wird, unbedingt die gleiche Fenstergröße aufweisen wie das Fenster, mit dem das Klassifikationsdiagramm aus den Trainingsgebieten berechnet wurde (Abb.4.11, Schritt 7).



**Abbildung 4.11:** Das Bearbeitungsschema ist hier schematisch dargestellt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden im Text näher erläutert.

# Kapitel 5

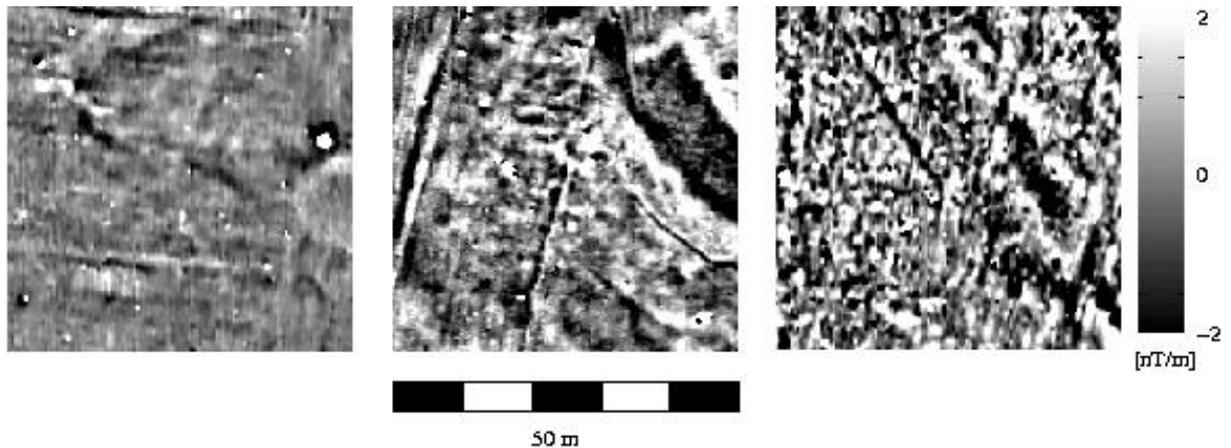
## Untersuchung und Anwendung der Merkmalextraktionsmethoden

Drei magnetisch kartierte Flächen, U1: unbebaut, U2: unbebaut mit geologischen Strukturen und B: besiedelt, werden als Trainingsgebiete für eine Klassifikation benutzt (Abb. 5.1). Es wird der Frage nachgegangen, ob Erscheinungsunterschiede bzw. Unterschiede in den Wellenzahlen mit Hilfe der Variogramm-Analyse bzw. von Powerspektren erfasst werden können.

Im ersten Schritt werden Variogramme bzw. Spektrogramme der Trainingsgebiete mit einer Fenstergröße von 50x50 m (entsprechend der Gesamtgröße der Fläche) berechnet. Dieser Schritt dient als Test für den Sensitivitätsgrad der Parameter bestimmt. Wenn die Flächen als Ganzes nicht zu unterscheiden sind, müssen, wie im Bearbeitungsschema dargestellt, Korrekturen bzw. Transformationen vorgenommen werden. Wenn die Methode auch nach diesem Schritt nicht sensitiv reagiert, wird die Klassifikationsprozedur aufgegeben. Im nächsten Schritt werden Trainingsgebiete in Teilflächen zerlegt und das Verhalten der Parameter untersucht. Ein weiteres Kriterium für die Prüfung der Sensibilität der Parameter zeichnet sich in der Unterscheidung der Flächen U2 und B ab, da diese zwei Flächen nach ihren Scherbenhäufigkeitsverhalten und Texturen Unterschiede aufweisen, die aber in den Parametern schwer abgebildet werden können. Es wird erwartet, dass die Parameter für U1 und U2 ähnliche Werte aufweisen und den Unterschied zu B hervorheben.

### 5.1 Untersuchung und Anwendung des Fourierspektrums

In diesem Kapitel wird überprüft, ob man durch Parameter aus den Spektrogrammen (Skalierungsfaktor, Exponent und RMS-Fehler wurden in Kapitel 4.2.1 erläutert) Unter-



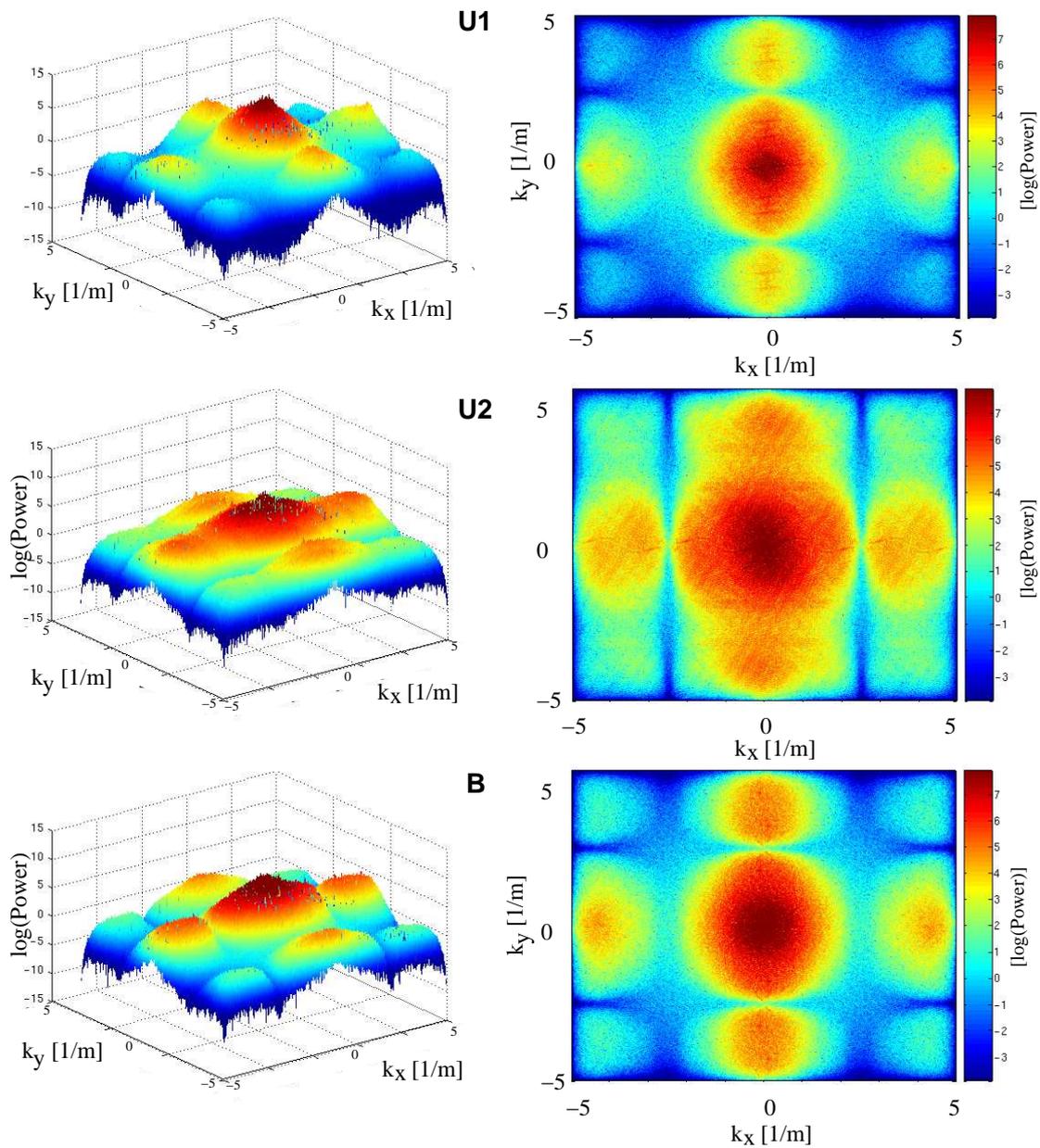
**Abbildung 5.1:** Die Trainingsgebiete nach ihren optisch dominant erscheinenden Wellenlängen betrachtet: In U1 überwiegen langwellige Anteile, aber auch kurzwellige Anteile sind präsent. In B ist das Verhältnis umgekehrt. U2 ähnelt U1: Der langwellige Anteil überwiegt, jedoch ist auch ein starker kurzwelliger vorhanden.

schiede quantifizieren kann.

Die Amplituden der Daten aus den Trainingsgebieten (Abb.5.1) werden in Bezug auf ihre räumliche Wellenzahlen bzw. Wellenlängen betrachtet. Diese Gebiete sind in ihren Erscheinungsbildern und Wellenzahlen unterschiedlich:

- In U1 (unbebaut) überwiegt scheinbar der langwellige Anteil (niedrige Wellenzahl), jedoch sind auch einige kurzwellige Anteile (hohe Wellenzahl) präsent. Die oberflächennahen kleinräumigen Anomalien aus negativen und positiven Amplituden werden durch an der Oberfläche liegende Scherben verursacht.
- In B (bebaut) überwiegt optisch scheinbar der kurzwellige Anteil, aber auch wenige langwellige Anteile sind präsent. Ursachen für diesen Anteil sind oberirdisch sichtbare Scherben und der im Untergrund verborgene Lehmziegelschutt (Stümpel, 1999).
- In U2 (unbebaut mit geologischen Strukturen) findet sich ein Gemisch aus kurzwelligem und langwelligem Anteil, es überwiegt optisch jedoch der langwellige Anteil. Die große markante Anomalie wird durch eine Rinne im Untergrund hervorgerufen.

Bevor die einzelnen spektralen Parameter verglichen werden und deren Sensibilität im Bezug auf eine Klassifikation diskutiert wird, erfolgt in 5.2 eine Vorstellung der Powerspektren. Die Powerspektren der Trainingsgebiete werden, wie im Abschnitt 4.2.1 beschrieben, berechnet.



**Abbildung 5.2:** Die Powerspektren für die Flächen U1, U2 und B wurden berechnet. Zur Klassifikation wurde die Ähnlichkeit der Spektren mit rosa Rauschen für eine Raumrichtung ermittelt. Weitere Erläuterungen im Text.

Man kann keine systematischen Unterschiede erkennen. Die Fläche U1 hebt sich zwar von den Flächen U2 und B deutlich ab, aber die Ähnlichkeiten der Flächen U1 und U2 in ihren Frequenzverhalten wird nicht erfasst.

Wie man der Abbildung 5.2 entnehmen kann, weisen die Powerspektren eine scheinbare Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) auf, die durch unterschiedliche Abtastraten bzw. unterschiedliche Interpolation in X- und Y-Richtung hervorgerufen wird. Großräumige geologische Strukturen verursachen ebenso solche Anisotropien. Bei den Fragestellungen, wo solche Strukturen im Interesse stehen, müssen daher die Powerspektren in beiden Richtungen betrachtet werden.

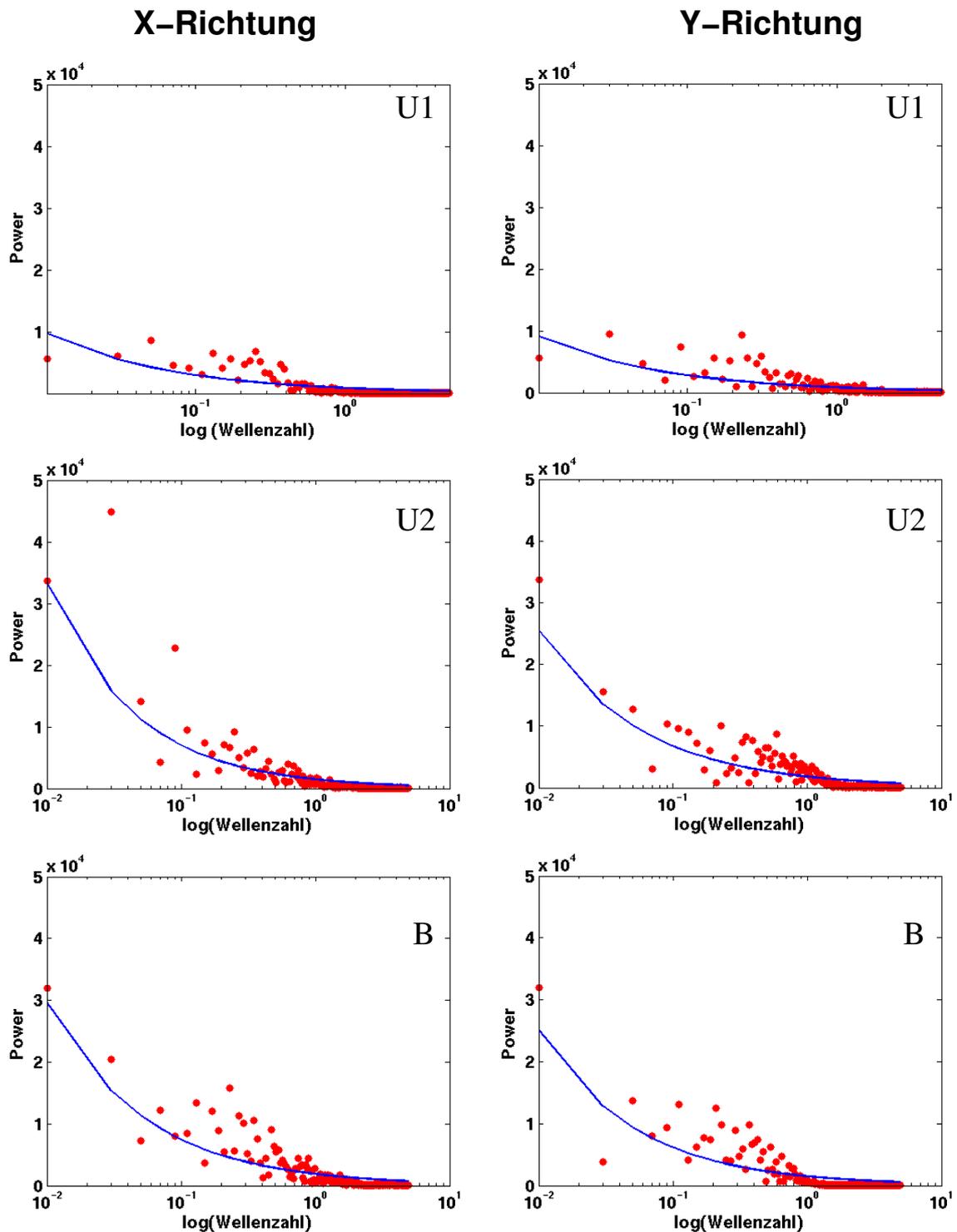
Eine richtungsunabhängige Herangehensweise (Betrachtung des Betrags der RMS-Fehler) verringert die Streuung der RMS-Werte und führt damit zu einer besseren oder robusteren Klassifikation. Das in dieser Arbeit entwickelte Bearbeitungsschema für eine Klassifikation mit Powerspektren berücksichtigt keine (mögliche) Richtungsabhängigkeit in den Daten.

Die Spektren werden vorerst in beiden horizontalen Richtung getrennt betrachtet (Spektrogramme) und die Parameter abgeleitet. In Abbildung 5.3 sind auf der rechten Seite die Spektrogramme in X-Richtung und auf der linken Seite in Y-Richtung dargestellt. Die Amplituden sind gegen entsprechende Wellenzahlen für die X-Richtung aufgetragen. Um die einzelnen Parameter zu verdeutlichen und den Kurvenverlauf besser zu erkennen, wird die Wellenzahl logarithmisch und die Power linear dargestellt. Es fallen die flache Neigung der Kurve (niedrige Exponentwerte) bei U1 und die niedrigen Total-Power-Werte (Skalierungswert) auf. Die Flächen U2 und B sind hingegen von ihren Exponent- und Skalierungswerten sehr ähnlich.

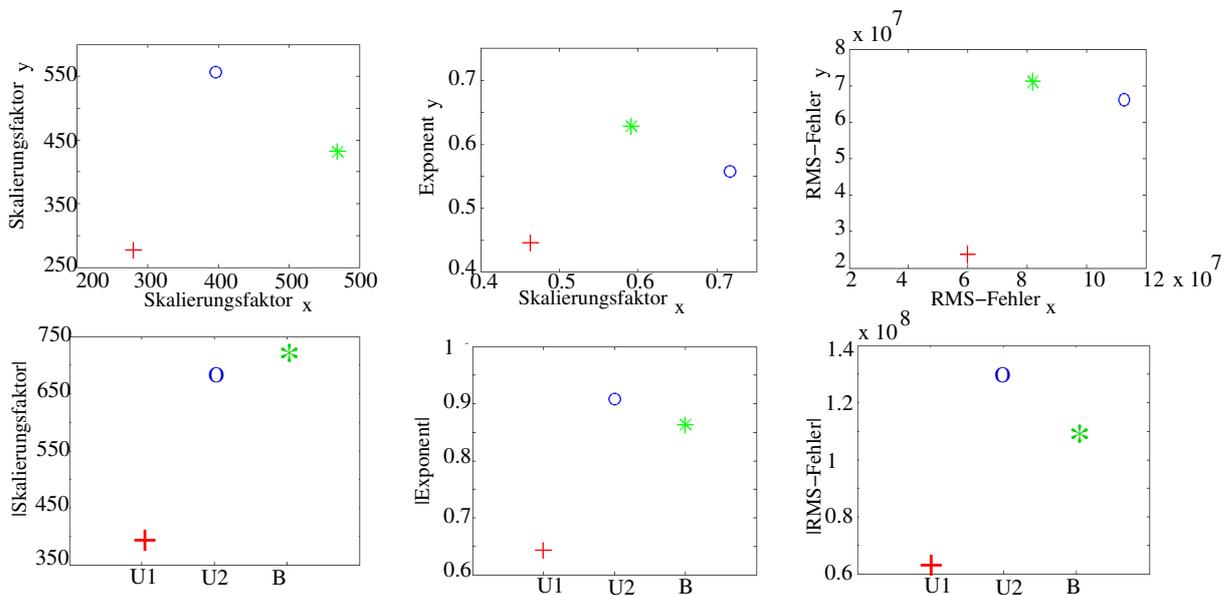
Diese Parameter, berechnet für die Gesamtgröße, werden in Abbildung 5.4 (a) in Richtungsabhängigkeit und b) nach einer Betragsbildung) miteinander verglichen. In den Streuungsdiagrammen kann man sehen, dass Unterschiede vorhanden sind. Fläche U1 hebt sich von U2 und B deutlich ab. Es ist schwierig, die Flächen U2 und B auseinander zu halten. Die textuelle Ähnlichkeit der Flächen U1 und U2 können mit dieser Fenstergröße nicht erfasst werden. Um dieses Ergebnis sicherzustellen, werden die Trainingsgebiete in Teilgebiete zerlegt und diese Parameter detailliert untersucht.

In Abbildung 5.5 ist die Fläche U1 mit zwei Zerlegungen und den dazugehörigen Spektrogrammen dargestellt. Auf der rechten Seite oben erfolgte die Zerlegung mit einer Fenstergröße von 25 m, unten rechts mit 12,5 m. Die Spektrogramme einzelner Teilgebiete weisen größere Unterschiede auf. Die markanten Strukturen (I und II in den Bildern) verursachen Undulationen in bestimmten Wellenzahlbereichen (I und II in Spektrogrammen).

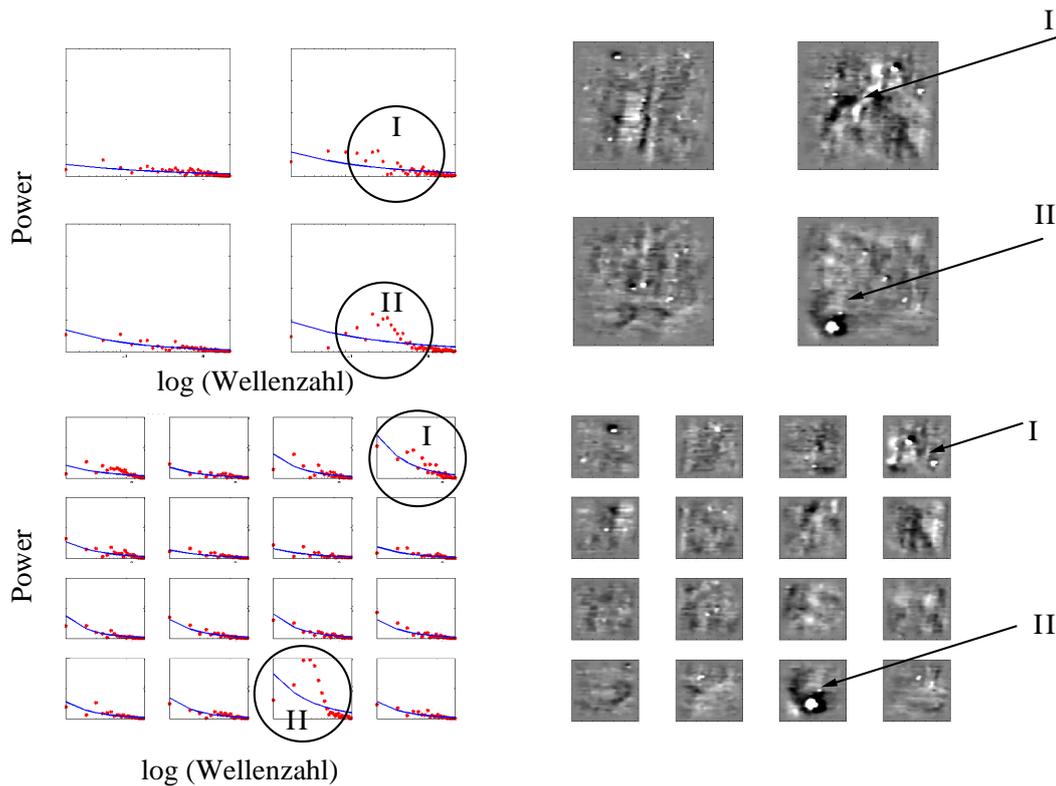
Die Parameter werden nach der Zerlegung erneut zueinander ins Verhältnis gesetzt (siehe Abb. 5.6). Der Exponent versagt als Kenngröße nach dieser Zerlegung, aber anders als bei 50 m Fenstergröße reagieren der Skalierungsfaktor und der RMS-Fehler sensitiv. Die



**Abbildung 5.3:** Die in Abbildung 5.2 dargestellten Periodogramme werden in vertikaler (X) (rechte Seite) und horizontaler Richtung (Y) (linke Seite) betrachtet und mit einem  $(1/f^\alpha)$ -Modell angepasst. Durch die Neigung der Verläufe (Exponent) und der Total-Power (Skalar) die Trainingsgebiete zu klassifizieren, erweist sich als schwierig. Daher wird ein weiterer Parameter in Betracht gezogen: Fehler der Anpassung.



**Abbildung 5.4:** Die einzelnen Parameter (Skalierungsfaktor, Exponent und RMS-Fehler) der gesamten Trainingsgebiete werden hier a) in Richtungsabhängigkeit und b) nach einer Betragsbildung gegenübergestellt. Fläche U2 und B weisen in ihren Parametern Unterschiede auf. Die erwartete Tendenz, dass sich U1 und U2 in ihren Parametern ähneln, zeichnet sich hier nicht ab und muss nach einer Zerlegung betrachtet werden.



**Abbildung 5.5:** Mit einer Zerlegung eines Bildes (Fläche U1) wird die Wirkung der unterschiedlichen Teilbereiche und unterschiedlichen Texturen auf ein Spektrogramm demonstriert. Auf der linken Seite sind die Spektrogramme der X-Richtung (Wellenzahl gegen Amplitude) der Bilder von der rechten Seite dargestellt. Die einzelnen 'Peaks' (I) aber auch die länglichen Texturen (II) verursachen eine 'Unruhe' in Verlauf in den Spektrogrammen. Erst durch eine weitere Zerlegung können die Bereiche genau identifiziert werden.

Wertebereiche der einzelnen Flächen sind deutlich unterschiedlich. U1 und U2 liegen nahe beieinander. Da sich der Skalierungsfaktor proportional zu den Amplituden verhält, wird der Skalarwert für eine Klassifikation nicht weiter verfolgt. Im Weiteren werden nur die RMS-Fehler betrachtet.

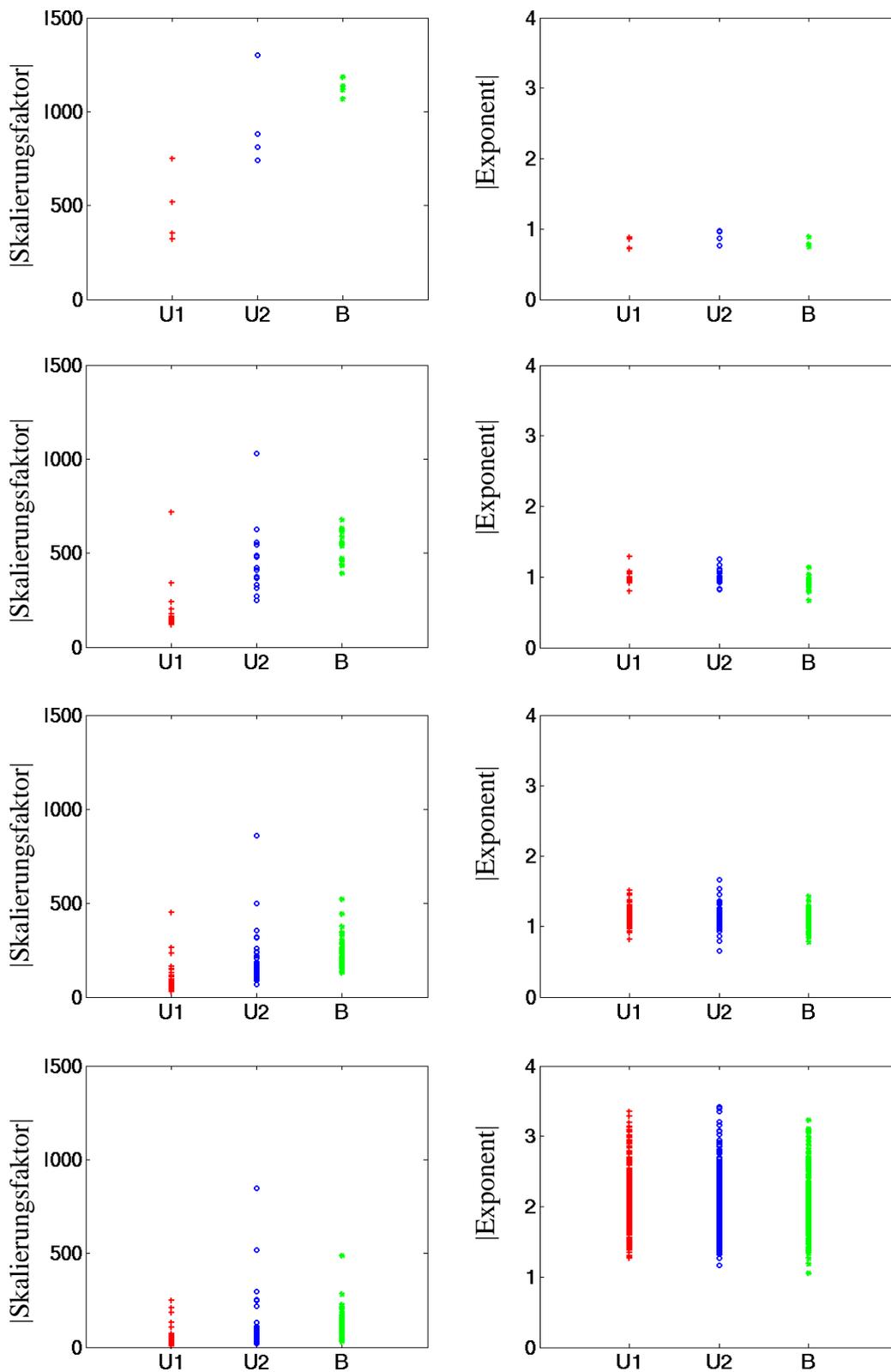
In Abbildung 5.7 ist der Betrag der RMS-Fehler mit vier verschiedenen Fenstergrößen dargestellt. In allen Fenstergrößen kann man die Unterschiede erkennen. Bei kleineren Fenstergrößen (6,25 und 3,12 m) müssen Häufigkeitsdiagramme berechnet werden, um die repräsentativen Wertebereiche festzustellen.

Im nächsten Schritt werden von einzelnen Streuungsdiagrammen die RMS-Fehler-Häufigkeitsdiagramme berechnet, wobei diese in Bereiche eingeteilt werden müssen. Zu diesem Zweck werden für das Streuungsdiagramm Teilbereiche (sogenannten Bins) definiert. Die Anzahl der Punkte in jedem Bin ergibt die Punktdichte. Mit den Häufigkeitsdiagrammen können die repräsentativen Wertebereiche festgelegt werden. Das Klassifikationsdiagramm wird dann aus diesen Häufigkeitsdiagrammen berechnet.

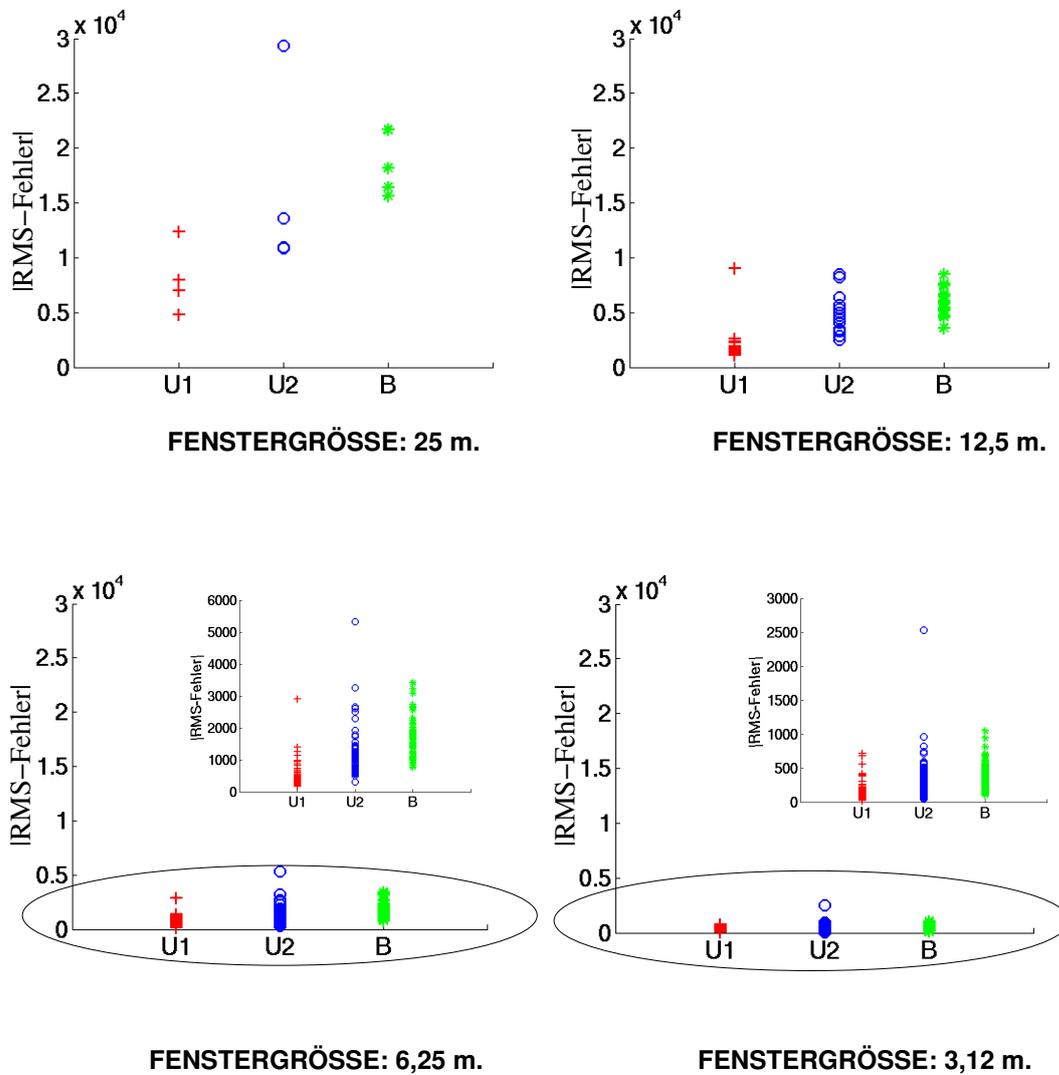
In Abbildung 5.8 wird am Beispiel eines Streuungsdiagramms (RMS-Fehler) das weitere Vorgehen im Bearbeitungsschema erläutert. Aus den Häufigkeitsdiagrammen (untere Reihe) wird ein Klassifikationsdiagramm berechnet. Die Diagramme werden in Bereiche unterteilt und jeweils die Punktdichte berechnet. Diese Informationen werden in einem Klassifikationsdiagramm zusammengefügt, indem für jeden Bereich die größte Punktdichte berechnet wird. Wenn die meisten Punkte aus der Fläche U1 kommen, wird der Bereich rot gekennzeichnet, kommen die meisten aus Fläche U2 bzw. B blau bzw. grün. Die Punktdichte wird durch die Farbintensität wiedergegeben.

In Abbildung 5.9 wird der Schritt vom Streuungsdiagramm zum Klassifikationsdiagramm für eine Fenstergröße von 12,5 m vorgestellt. Die Streuungsdiagramme und Häufigkeitsdiagramme werden nach einer Quadratwurzel-Bildung betrachtet und mit einer Bin-Zahl von 20 berechnet. Die Bedeutung des Klassifikationsdiagramms wird in Abbildung 5.9 erklärt. Ab einer Fenstergröße von 6,5 m sind die repräsentativen Wertebereiche schwer auseinander zu halten. Nur durch ein Klassifikationsdiagramm wird dieses möglich.

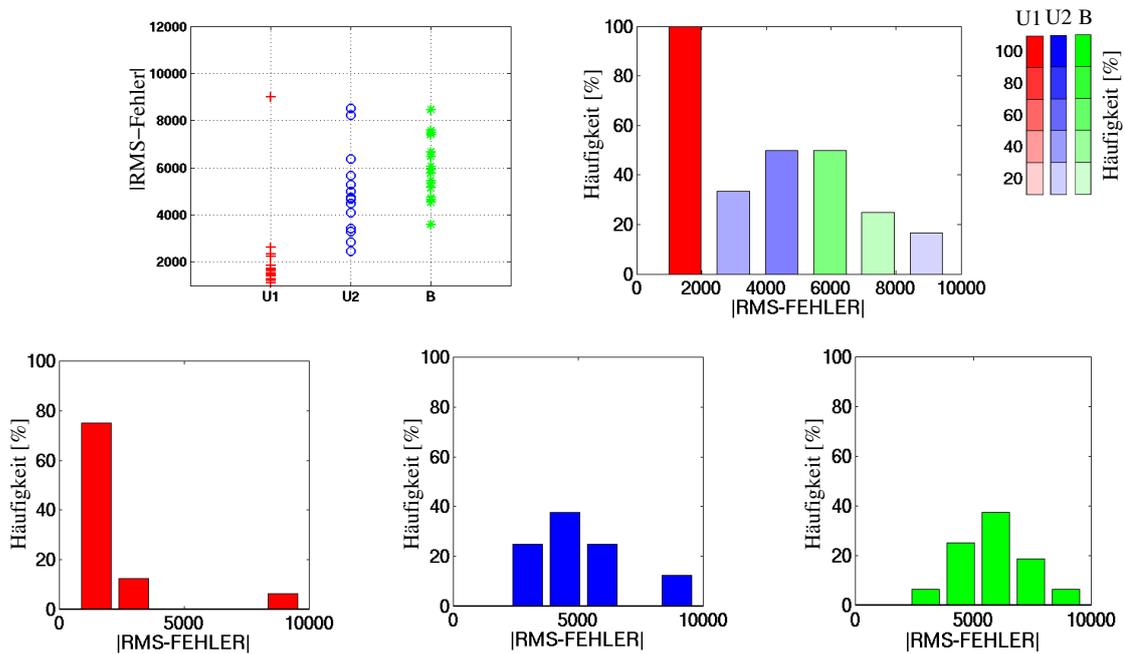
Eine Testklassifikation der Trainingsgebiete mit zwei Fenstergrößen ist in Abbildung 5.10 dargestellt. In der oberen Reihe sind die Trainingsgebiete U1, U2 und B zu sehen. Die Klassifikationen für 25, 12,5, 6,25 und 3,12 m Fenstergrößen sind dargestellt. Wie man durch einen Vergleich der klassifizierten Graustufen-Plots der geomagnetischen Daten erkennen kann, kann man die drei unterschiedlichen Bereiche mit diesen Parametern auseinander halten und quantifizieren. Die groben Strukturen wie z.B. auf der Fläche U2 werden erfasst. Eine Verfeinerung anhand der kleineren Fenstergröße bringt wie erwartet eine Verschlechterung mit sich, weil die Texturen nicht als Ganzes, sondern als Teilbereiche in die Berechnung eingehen.



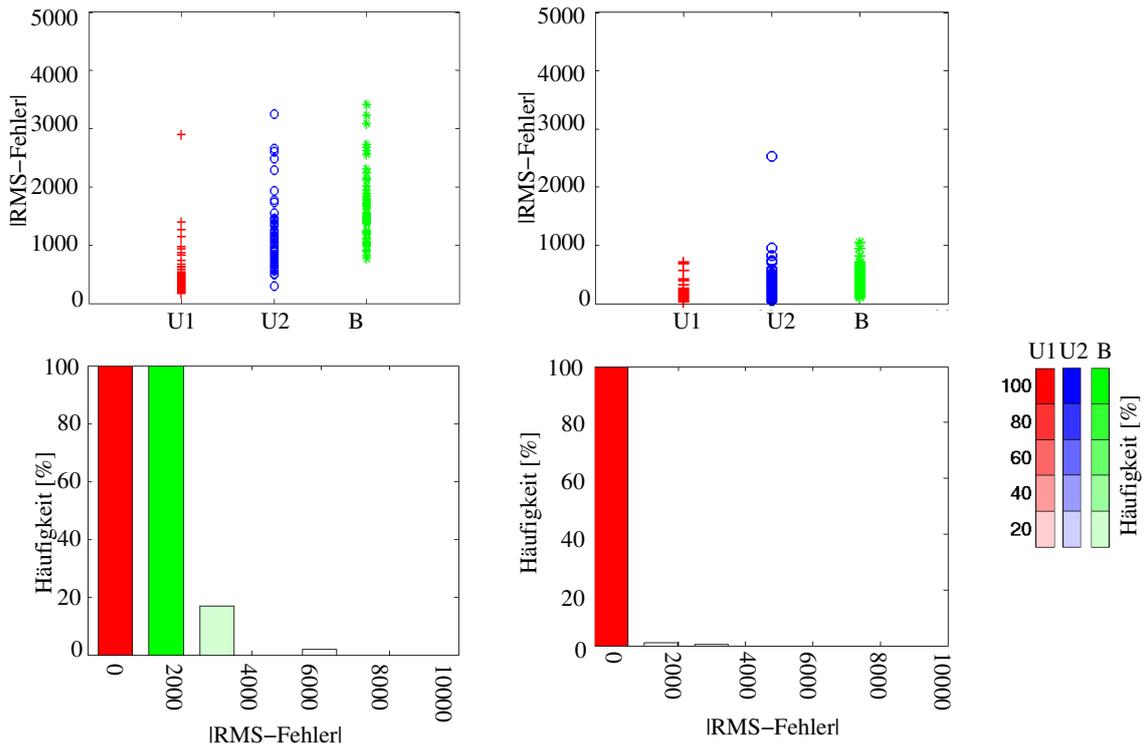
**Abbildung 5.6:** Die zwei Parameter Skalierungsfaktor und Exponent, die sich bei einer Fenstergröße von 50 m für eine Klassifikation als ungeeignet erwiesen haben, verhalten sich auch mit Verkleinerung der Fenstergröße ähnlich und werden als unbrauchbar eingestuft.



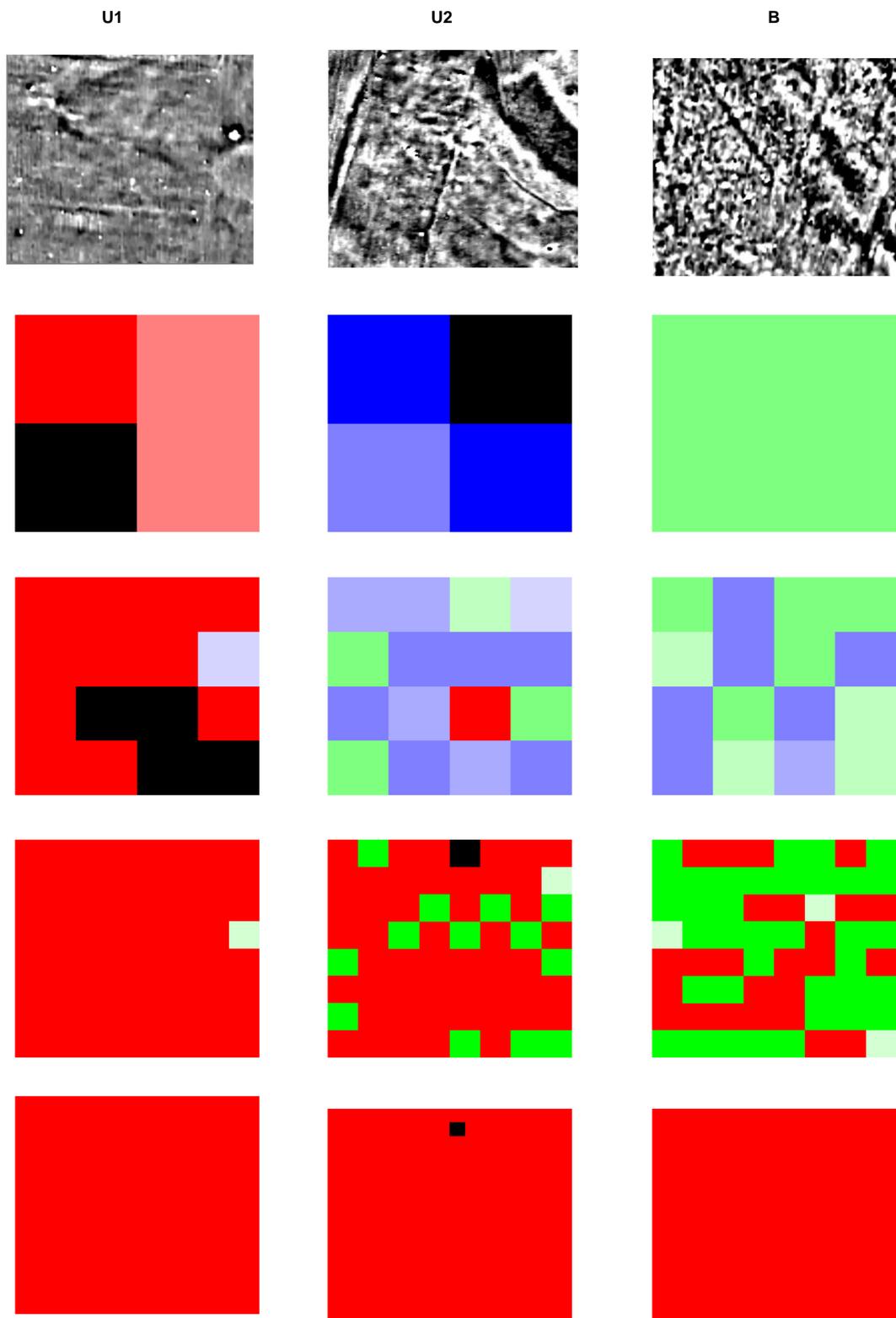
**Abbildung 5.7:** Wie bei der Fenstergröße von 50 m kann man bei der Größe von 25 m die Trainingsgebiete anhand der RMS-Fehler visuell unterscheiden. Bei den kleineren Fenstergrößen (6,25 m und 3,12 m) können die repräsentativen Wertebereiche erst mit Hilfe von Häufigkeitsdiagrammen festgestellt werden (siehe Abbildungen 5.8 und 5.9).



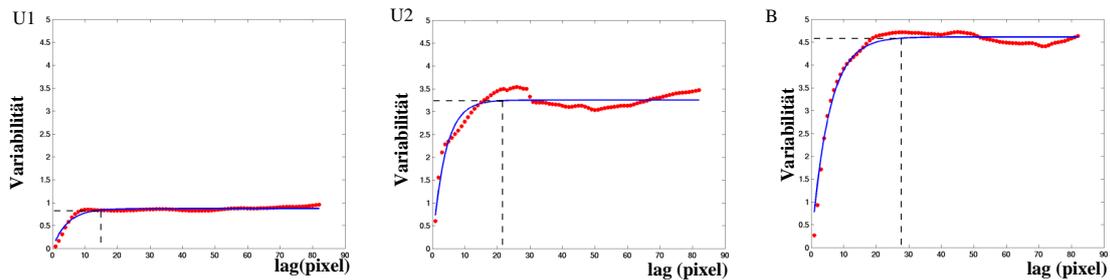
**Abbildung 5.8:** Darstellung zur Verdeutlichung der Schritte vom Streudiagramm bis zum Klassifikationsdiagramm. Obere Reihe: Streudiagramm (links), Klassifikationsdiagramm (rechts). Untere Reihe: Häufigkeitsdiagramme (U1-links, U2-mitte, B-rechts) berechnet für eine Fenstergröße von 12,5 m. (näheres im Text).



**Abbildung 5.9:** Oben: Streudiagramme von RMS-Fehlern mit einer Zerlegung von 6,5 m (links) und 3,12 m (rechts). Unten: daraus berechnete Klassifikationsdiagramme (6,25 m (links) und 3,12 m (rechts)). Die deutliche Trennung der drei Trainingsgebiete, die man in den Streuungs- und Häufigkeitsdiagrammen mit Fenstergrößen 50, 25 und 12,5 m beobachten konnte, sind ab 6,5 m nicht mehr erkennbar. Ab dieser Fenstergröße sind die Teilgebiete in den Graustufen-Plots so klein, dass nicht die gesamte Struktur, sondern nur Teile davon in die Berechnung eingehen.



**Abbildung 5.10:** Testklassifikation der Trainingsgebiete (obere Reihe). Klassifikationen mit Fenstergrößen von 25, 12,5, 6,25 und 3,12 m (von oben nach unten) sind gegenübergestellt. Die Farben geben Hinweise, für welche Fläche (U1, U2 oder B) die aus dem jeweiligen geomagnetischen Teilgebiet berechneten RMS-Fehler-Werte typisch sind. Wenn der Wert in einem Wertebereich liegt, in dem alle Flächen präsent sind und eine Bestimmung unmöglich ist, nimmt der Teilbereich die Farbe Schwarz an. Die Intensitäten der Farben beschreiben, wie typisch dieser Wert für die jeweilige Fläche ist.



**Abbildung 5.11:** Berechnete Variogramme der gesamten Trainingsgebiete. Die in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Parameter (Range, Sill und Varianz) dieser Trainingsgebiete erwiesen sich für eine Klassifikation als geeignet.

## FAZIT

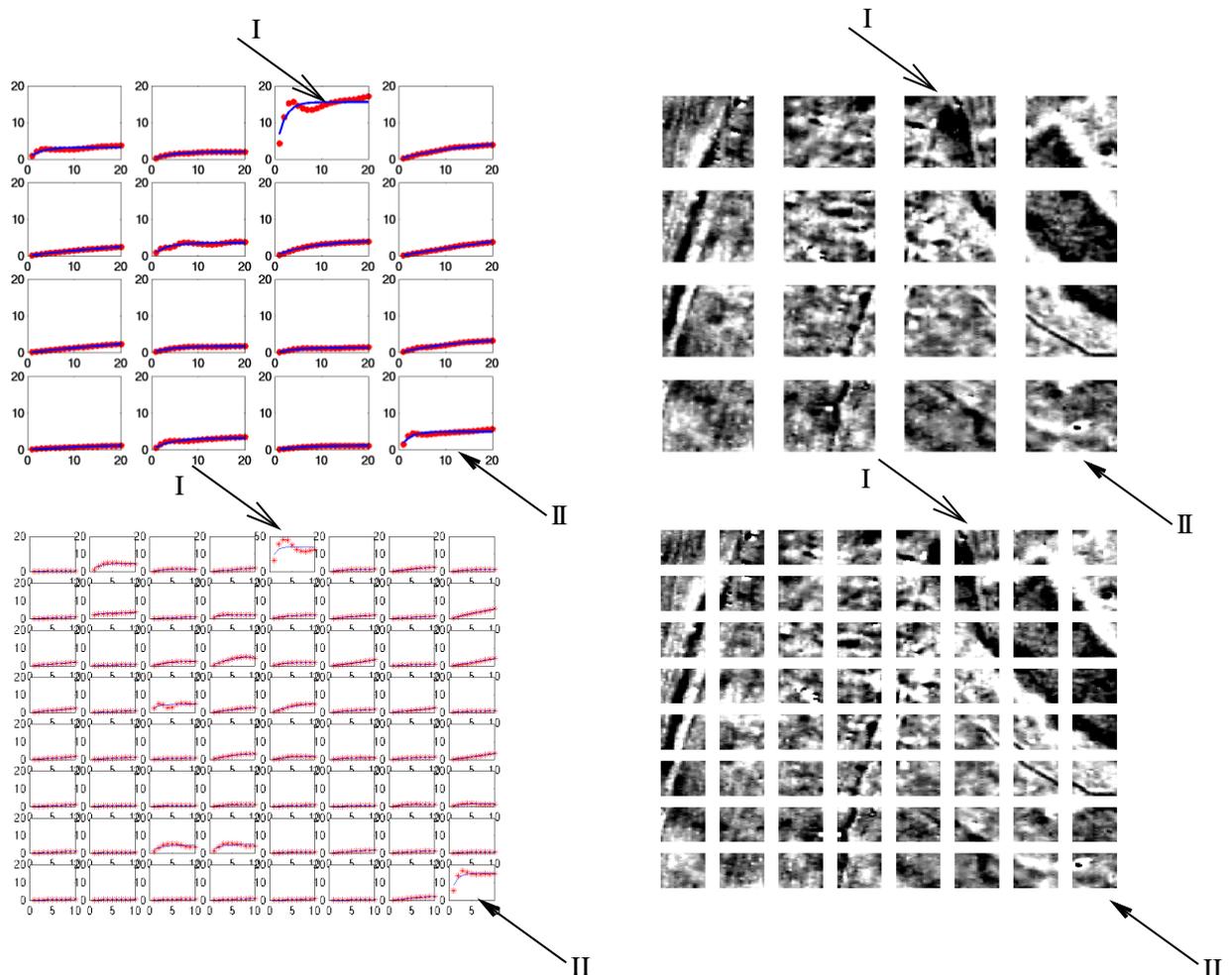
Drei Parameter (Skalierungsfaktor, Exponent und RMS-Fehler) wurden auf ihre Sensibilität für eine Unterscheidung der drei Trainingsgebiete untersucht. Skalierungsfaktor und Exponent stellten sich als nicht geeignet heraus. Der RMS-Fehler wird als am besten geeigneter Parameter in den folgenden Untersuchungen angewendet.

## 5.2 Untersuchung und Anwendung der Variogrammanalyse

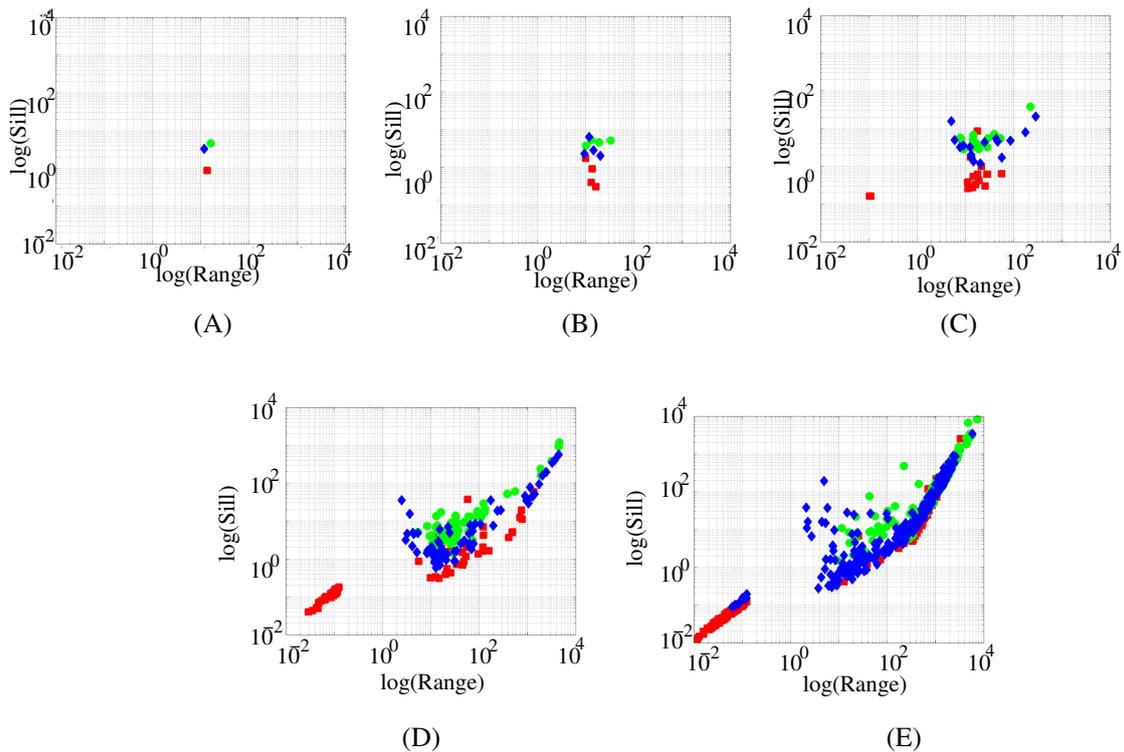
Die Variogramme der Trainingsgebiete (Abb. 5.1) werden mit einer Fenstergröße von 50 m berechnet und sind in Abbildung 5.11 vorgestellt.

Da sich die Sill- und Nugget-Werte zueinander proportional verhalten (beschrieben in Abschnitt 4.2.2 und Abb. 4.10), werden nur Sill und Range als signifikante Parameter angewandt. Bei den ruhigen Flächen U1 und U2 wird Range bei geringeren lag-Werten erreicht als bei Fläche B. Auch in den Sill-Werten unterscheiden sich die drei Trainingsgebiete.

Nachdem sich die Variogramm-Analyse für die gesamte Fläche als sensitiv herausgestellt hat, wurden die Flächen in Teilflächen zerlegt und die Variogramme betrachtet. Ein Ziel der Zerlegung ist die Verfeinerung der Methode. Außerdem kann man durch die Zerlegung den Einfluss der einzelnen Bereiche im Bild untersuchen. Jede geomagnetische Fläche wird in Teilflächen mit unterschiedlichen Größen zerlegt (50-25-12,5-6,25-3,12 m usw.). In Abbildung 5.12 sind als ein Beispiel die zerlegte Fläche U2 und die dazugehörigen Variogramme dargestellt. Oben rechts ist die Fläche mit 12,5 m Fenstergröße und unten rechts mit 6,25 m dargestellt. Die dazugehörigen Variogramme sind auf der linken Seite abgebildet.



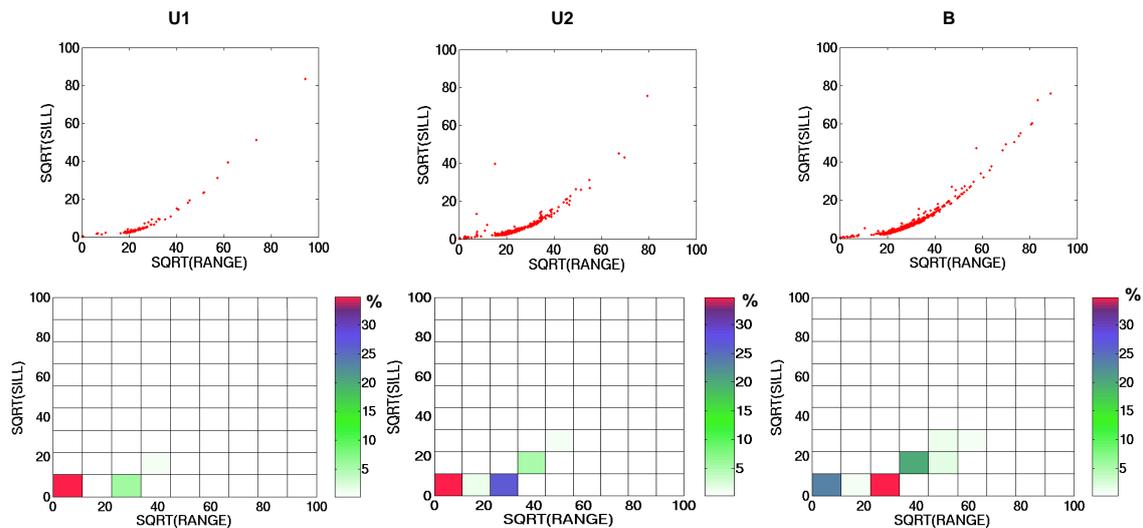
**Abbildung 5.12:** Zwei Zerlegungen der Fläche U1 (rechts) und die dazugehörigen Variogramme (links) mit zwei Fenstergrößen (obere Reihe: 12,5 m und untere Reihe: 6,25 m). Mit einer Zerlegung des gesamten Trainingsgebietes konnten die Variogramme der einzelnen Bildbereiche betrachtet und so die erzielte Klassifikation verfeinert werden. Erst durch eine Verfeinerung ist es möglich, die Anomalien zu identifizieren, die die Änderungen in den Variogrammen hervorrufen.



**Abbildung 5.13:** Scatter-Plots von Range und Sill für die verschiedenen Fenstergrößen (A:50 m, B:25 m und C:12,5 m, D:6,25 m und E:3,12 m). Mit kleiner werdender Fenstergröße müssen immer mehr Parameter für eine Klassifikation einbezogen werden. Das erschwert die Betrachtung und die Bestimmung des repräsentativen Wertebereiches der Flächen.

Die mit Pfeilen markierten Bereiche I und II bezeichnen die Bildbereiche mit großen Ausreißern (Peaks) und die jeweiligen Variogramme mit abrupten Änderungen. Ein starker Peak auf einem Bild bestimmt den gesamten Bereich und führt zu falschen Klassifikationen, wenn die Fenstergröße zu grob gewählt wird. Erst durch eine Verkleinerung der Fenstergröße kann der eigentliche Bereich, der diesen Unterschied hervorruft, identifiziert werden.

Aus den Variogrammen werden Range- und Sillwerte abgelesen und in Streuungsdiagrammen (Scatter-Plots) zueinander ins Verhältnis gesetzt. In Abbildung 5.13 sind die Streuungsdiagramme (Range gegen Sill) mit verschiedenen Fenstergrößen, 50 m (A), 25 m (B), 12,5 m (C), 6,25 m (D) und 3,12 (E), dargestellt. Der Bereich der repräsentativen Werte der ruhigen Fläche (U1) hebt sich von der unruhigen Fläche (B) deutlich ab. Als schwierig erweist sich jedoch eine Unterscheidung der Flächen U2 und B. Während U1 optisch U2 ähnelt und nach archäologischen Scherbenkartierungen als unbebaut bezeichnet wird, ist dieser Unterschied aus den Scatter-Plots nicht ablesbar. Die Werte der

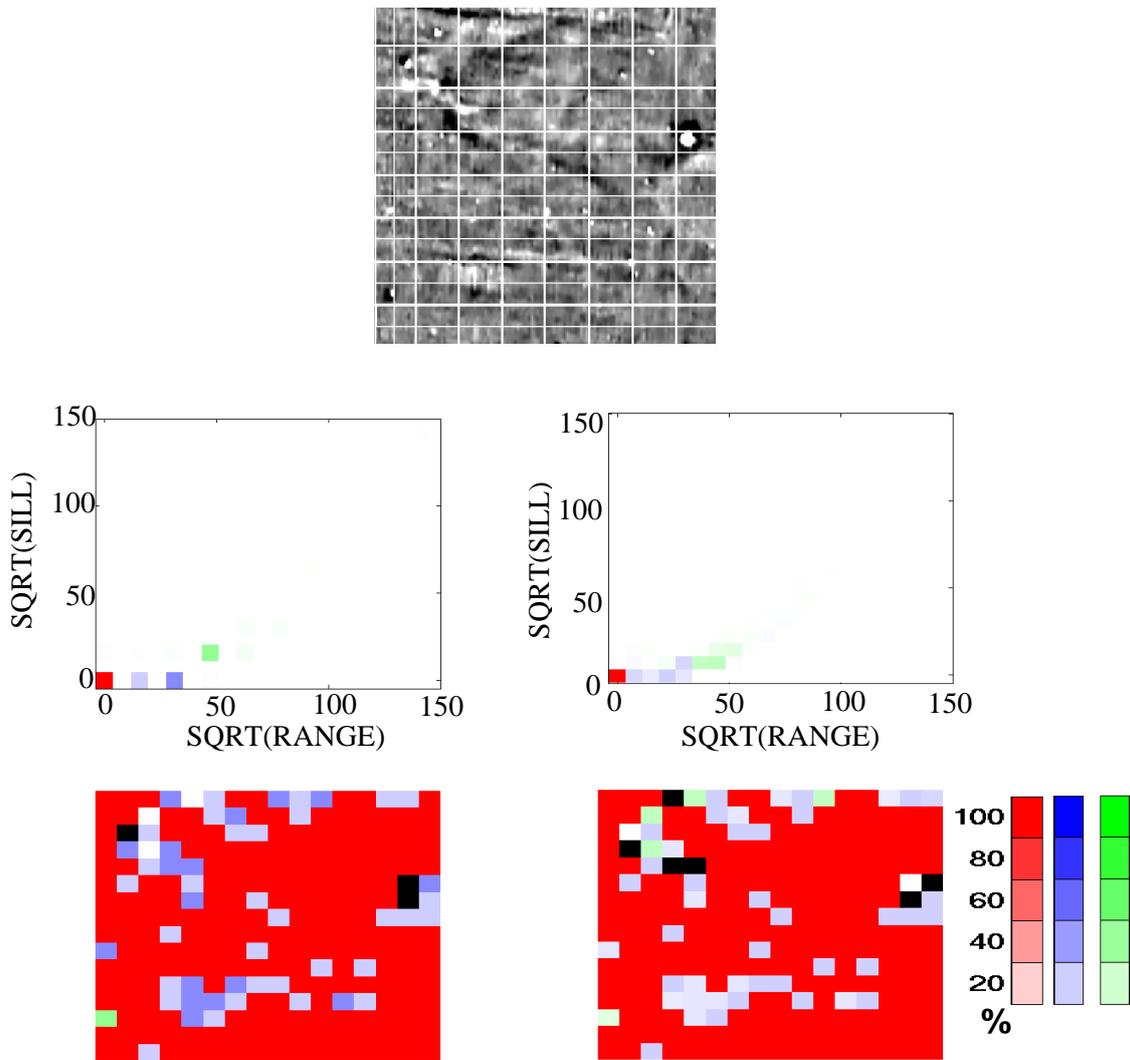


**Abbildung 5.14:** Um aus den Streuungsdiagrammen (obere Reihe) die repräsentativen Wertebereiche für die Trainingsgebiete zu extrahieren, wurden Häufigkeitsdiagramme (untere Reihe) berechnet. Wie man aus dem Verlauf der Streuungsdiagramme erahnen und in Häufigkeitsdiagrammen erkennen kann, liegen die repräsentativen Wertebereiche von U1 und U2 im Gegensatz zu B bei kleinen Range- und Sillwerten.

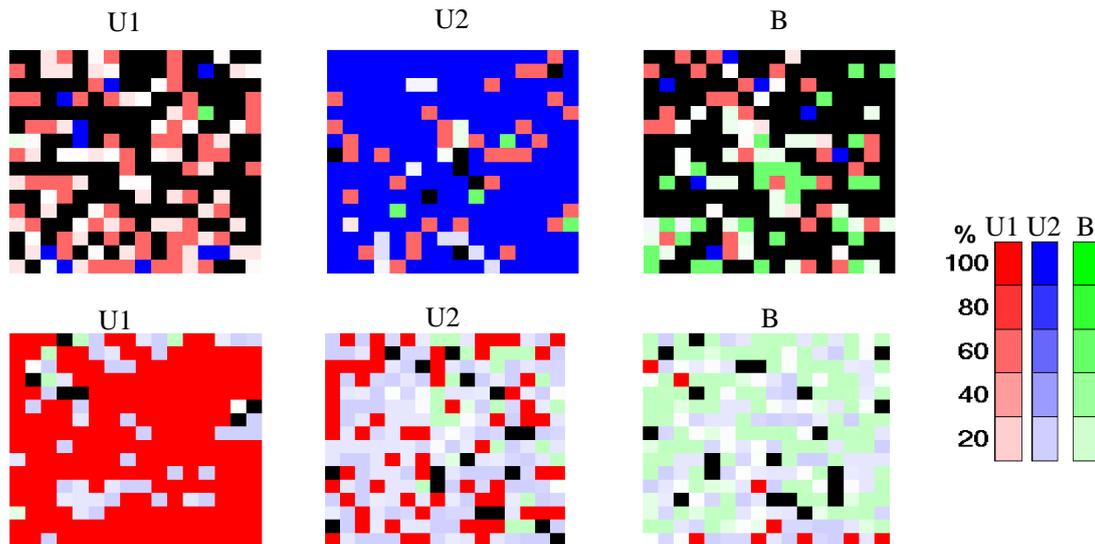
Fläche U1 häufen sich in kleineren Bereichen. Die Werte für U2 und B hingegen gehen ineinander über und sind schwer auseinander zu halten. Mit kleineren Fenstergrößen kristallisiert sich auch der Bereich der Fläche B mehr und mehr heraus. Fläche U2 stellt sich als eine gemischte Fläche heraus, in der Werte sowohl aus Fläche U1 als auch aus Fläche B präsent sind.

Die Streuungsdiagramme helfen bei der Festlegung des repräsentativen Wertebereiches. Da die logarithmische Darstellung (Abb. 5.13) die Wertebereiche sehr stark 'verzerrt', wird für die Streuungsdiagramme und Häufigkeitsdiagramme eine Quadratwurzel-Darstellung bevorzugt. Durch unterschiedliche Bin-Größen können die Bereiche, für die die Punktdichte berechnet wird, festgelegt werden. Bei einer kleineren Bin-Größe fallen wenige Punkte in die einzelnen Bins und sind dadurch nicht repräsentativ für eine Aussage. In Abbildung 5.14 ist eine Untersuchung über den Einfluss der Bin-Größe dargestellt. Oben sind die Streuungsdiagramme der drei Trainingsgebiete und unten die dazugehörigen Häufigkeitsdiagramme abgebildet.

Im Klassifikationsschritt wird die jeweils größte Punktdichte für jede mögliche Kombination von Range- und Sillwerten der drei Trainingflächen ermittelt. Diese werden dann je nach Bebauungszustand (U1, U2, B) farblich (rot: U1, blau: U2, grün: B) kodiert und die jeweilige Punktdichte als Intensität der Farbe im Klassifikationsdiagramm dargestellt. In Abbildung 5.15 ist das Klassifikationsdiagramm mit 3,1 m Fenstergröße dargestellt.



**Abbildung 5.15:** Aus den drei Häufigkeitsdiagrammen wird ein Klassifikationsdiagramm berechnet. Durch dieses Diagramm kann eine unbekannte Fläche mit der gleichen Fenstergröße, mit der das Klassifikationsdiagramm erstellt wurde, klassifiziert werden.



**Abbildung 5.16:** Die Details, die mit einer Klassifikation der Originaldaten (untere Reihe) erfasst sind, können bei der Testklassifikation mit vertikalen abgeleiteten Daten (obere Reihe) nicht mehr erfasst werden.

Die Klassifikation erfolgt durch die Anwendung derselben Fenstergröße auf das zu klassifizierende magnetische Bild (Abb. 5.15 a). Eine Verfeinerung der Klassifikation wird durch Vergrößerung der Bin-Zahl erreicht. Während die erste Klassifikation mit einer Bin-Zahl von 10 errechnet ist (Abb. 5.15 b), beträgt die Bin-Zahl der zweiten 20 (Abb. 5.15 c). Bei der ersten sind zwei Klassen von Texturen erkennbar, wobei bei der zweiten ein Teil der Teilflächen deutlich als zweite unbebaute Fläche klassifiziert werden kann. Fehl- (weiß) und nicht bestimmbare Klassifikationen nehmen deutlich ab.

In Abbildung 5.16 sind zwei weitere Testklassifikationen gegenübergestellt. Oben ist eine Testklassifikation der Trainingsgebiete nach der ersten vertikalen Ableitung (siehe Abb. 3.7) dargestellt. Die bisher vorgestellten Bearbeitungsschritte werden mit den neuen Trainingsgebieten durchgeführt und ein neues Klassifikationsdiagramm erstellt. Zum Vergleich ist in der unteren Reihe die Testklassifikation der Trainingsgebiete dargestellt. Obwohl nach der ersten vertikalen Ableitung die hochfrequenten Signal-Anteile hervorgehoben werden und sich dadurch die Unterschiede besonders zwischen U2 und B zu verstärken scheinen, spiegelt sich dieser Effekt nicht in den Klassifikationen wieder. Während in der Testklassifikation mit den Originalbildern die markanten Strukturen auf den Flächen und die Übergänge beispielsweise von einem ruhigen zu einem unruhigen Bereich zu erkennen sind, gehen diese Details bei einer Testklassifikation mit der ersten vertikalen Ableitung verloren. Eine Verbesserung der Klassifikation nach einer Transformation (erste vertikale Ableitung) konnte nicht festgestellt werden.

Bei weiteren Klassifikationen von 'unbekannten' Flächen wird daher das Klassifikationsdiagramm mit originalen Trainingsgebieten angewandt.

## 5.3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Klassifikationen mittels Powerspektrum- und Variogramm-Analyse betrachtet. Zwei Fragen aus der Zielsetzung dieser Arbeit wird nachgegangen:

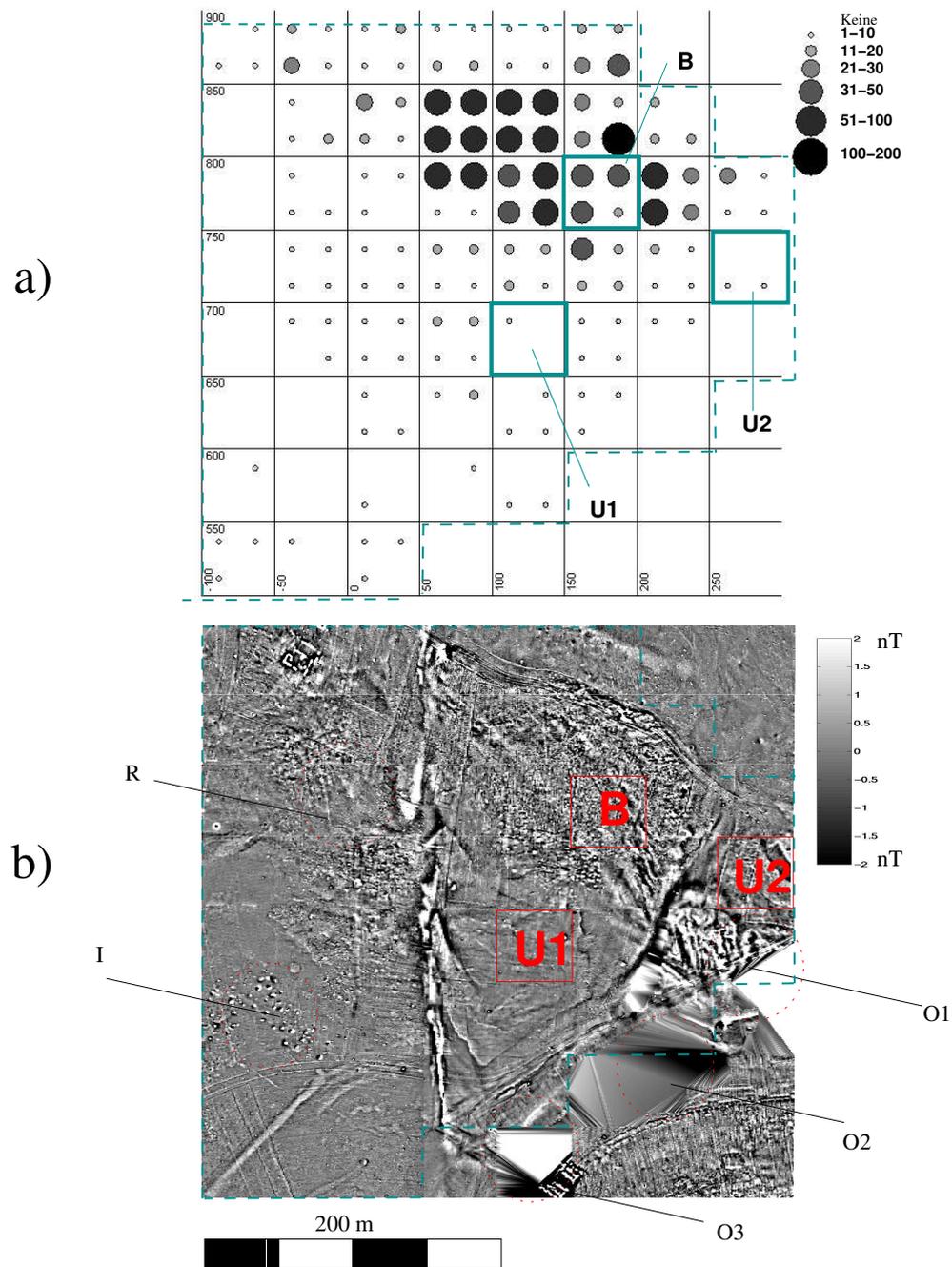
Ist es möglich, durch unser Bearbeitungsschema

1. eine qualitative Aussage über den Bebauungsgrad zu treffen?
2. eine quantitative Aussage über die Anzahl der Scherben zu machen?

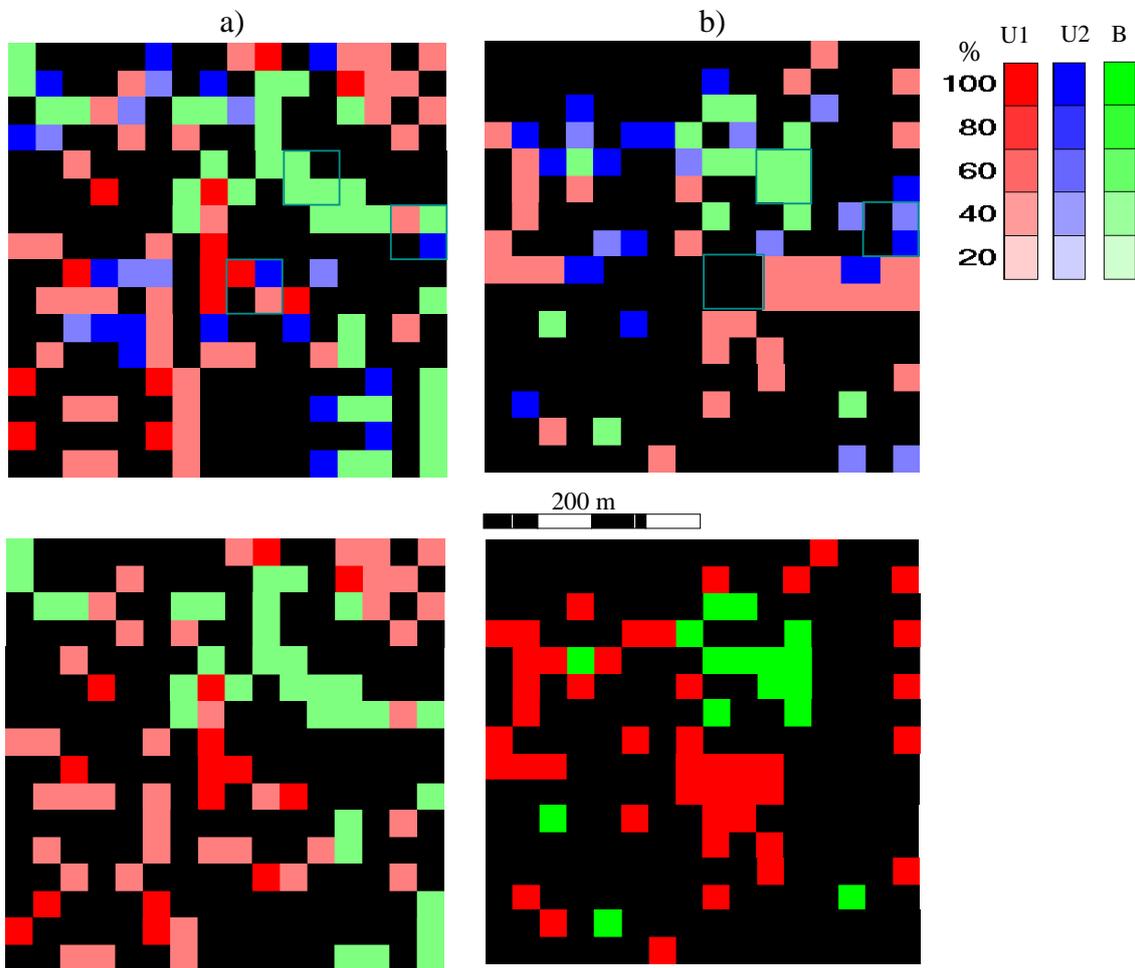
### 5.3.1 Qualitative Aussage über den Bebauungsgrad

In Abbildung 5.17 werden die Scherbenzählungen und die zu klassifizierende Fläche verglichen. Wie bei der Scherbenkartierung werden bei der geomagnetischen Kartierung die Trainingsgebiete und die Bereiche, die bei der Bewertung der Klassifikation berücksichtigt werden, markiert. Um die Korrelation der Parameter mit den Scherbenzählungen auf der Fläche zu untersuchen, auf der diese vorliegen, wird mit einer Fenstergröße von 25 m, mit der die Scherbenzählungen durchgeführt wurden, klassifiziert. In Abbildung 5.18 sind die Klassifikationen dieser Fläche mit Spektralparametern (a) und mit Variogrammparametern (b) dargestellt (obere Reihe mit drei und untere mit zwei Trainingsgebieten). Um die Orientierung auf der klassifizierten Fläche zu erleichtern, werden die Linien zur Markierung des Bereichs der Scherbenzählungen und Trainingsgebiete beibehalten. Diese Fenstergröße reicht für eine Aussage nicht aus, weder mit Spektral- noch mit Variogrammparametern. Auffällig ist, dass bei der Klassifikation mit Spektralparametern 2/3 und mit Variogrammparametern 3/4 der Teilflächen nicht klassifiziert werden konnten. Diese nicht klassifizierbaren Bereiche erschweren die Betrachtung und auch die Interpretation. Außerdem sind bei den klassifizierten Bereichen markante Fehler vorhanden:

- Fläche U2, unbesiedelt mit geologischen Strukturen, wird fälschlicherweise in der Klassifikation mit Spektralparametern als besiedelt (grün) und mit Variogrammparametern als unbesiedelt (rot) kodiert.
- Die Bereiche O1 und O2, von denen keine Daten vorhanden sind, werden als besiedelt (grün) oder unbesiedelt mit Geologie (blau) fehlklassifiziert.



**Abbildung 5.17:** Scherbenzählungen (a) und geomagnetische Daten sind hier gegenübergestellt. Zwecks einer deutlichen Erläuterung der folgenden Ergebnisse und deren Abbildungen wurden die markanten Strukturen gekennzeichnet. Außerhalb der Trainingsgebiete (U1, U2 und B) wurden zusätzlich die Bereiche I, R, O1, O2 und O3 betrachtet. Für O1, O2 und O3 liegen keine magnetischen Daten, sondern nur interpolierte Werte vor.



**Abbildung 5.18:** *Klassifikationen mit Spektral (a)- und Variogrammparametern (b) bei einer Fenstergröße von 25 Metern. In der oberen Reihe wurde eine Klassifikation mit drei Trainingsgebieten (U1, U2 und B) durchgeführt und in der unteren mit zwei (U1 und B). Durch eine Klassifikation mit zwei Trainingsgebieten erwartete man, dass die Anzahl der unklassifizierten Gebiete abnimmt und eine bessere Aussage über die Korrelation zwischen Scherbenanzahl und den Parametern erreicht werden kann. Eine Verbesserung der Klassifikation ist nicht erreicht, da sich die Wertebereiche der Trainingsgebiete deutlich unterscheiden und dadurch gegenseitig nicht beeinflussen.*

Eine Klassifikation mit zwei Trainingsgebieten bringt keine Verbesserung.

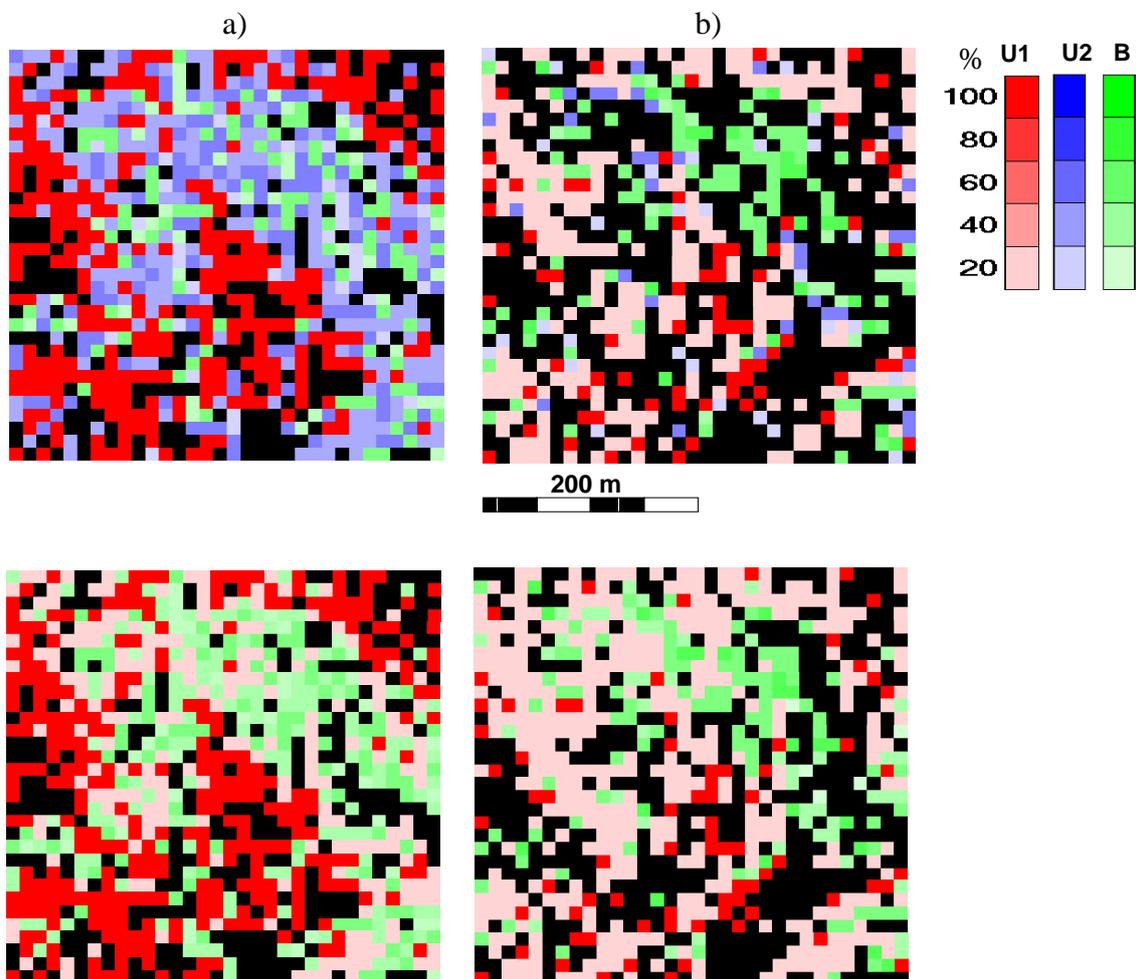
In Abbildung 5.19 sind die Klassifikationen mit einer Fenstergröße von 12,5 m dargestellt. Beide Klassifikationen sind relativ ähnlich. Die einzelnen Trainingsgebiete und auch der Gesamtbereich sind besser klassifiziert als mit der Fenstergröße von 25 m. Die Zahl der nicht klassifizierbaren Bereiche ist in beiden Klassifikationen zurückgegangen. Trotzdem können die Details, wie z.B. die Übergänge von besiedelten zu unbesiedelten Bereichen und die kleinen Bereiche (I, R) (siehe Abb. 5.18), nicht erfasst werden.

In den Abbildungen 5.19 und 5.20 werden die Klassifikationen mit den Fenstergrößen von 12,5 m und 6,25 m miteinander verglichen. Die Klassifikation mit Spektralparametern erreicht ihre optimale Größe mit der Fenstergröße von 6,25 m. Die Gebiete mit hoher Scherbenanzahl sind korrekt als Grün klassifiziert, ebenso wie auch die unbebauten Bereiche mit einem deutlichen Rot. Die Bereiche I und R, die von der Scherbenzählung als unbesiedelt oder mit wenig Siedlungsspuren identifiziert sind, werden als besiedelt (Grün) klassifiziert. Durch eine Betrachtung der magnetischen Kartierung kann man jedoch feststellen, dass diese Bereiche eindeutige Siedlungsspuren beinhalten. Die Klassifikation mit Variogrammparametern liefert ebenfalls gute Ergebnisse, jedoch sind die Bereiche nicht so klar erkennbar wie bei der Klassifikation mit Spektralparametern.

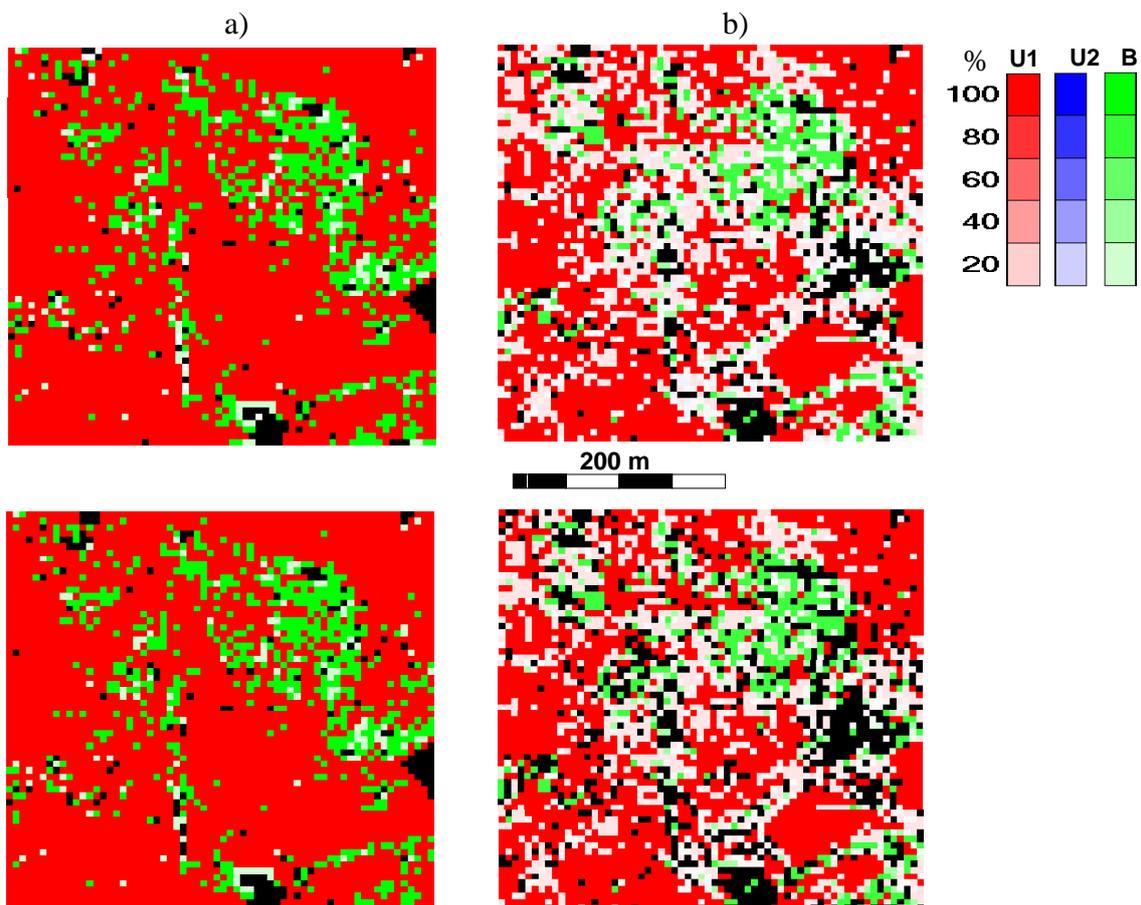
In der Abbildung 5.21 sind zwei Klassifikationen mit Variogrammparametern (rechte Seite: 3,15 m und linke Seite: 1,5 m) dargestellt. In der oberen Reihe wurde mit drei Trainingsgebieten klassifiziert, in der unteren mit zwei. Die Klassifikation mit 3,15 m liefert keine brauchbaren Ergebnisse. Nur die unbesiedelten Bereiche sind mit einem klaren Rot klassifiziert. Die besiedelten Bereiche kann man in ihren Farben kaum identifizieren, da sie keine klaren repräsentativen Bereiche in ihren Klassifikationsdiagrammen aufweisen. Variogrammparameter erreichen ihre optimale Fenstergröße mit 1,5 m. Neben unbesiedelten Gebieten sind mit dieser Fenstergröße auch die besiedelten Bereiche richtig klassifiziert. Wie bei der Klassifikation mit Spektralparametern bei optimaler Fenstergröße (6,25 m) werden Abweichungen von den Ergebnissen der Scherbenzählung festgestellt.

## FAZIT

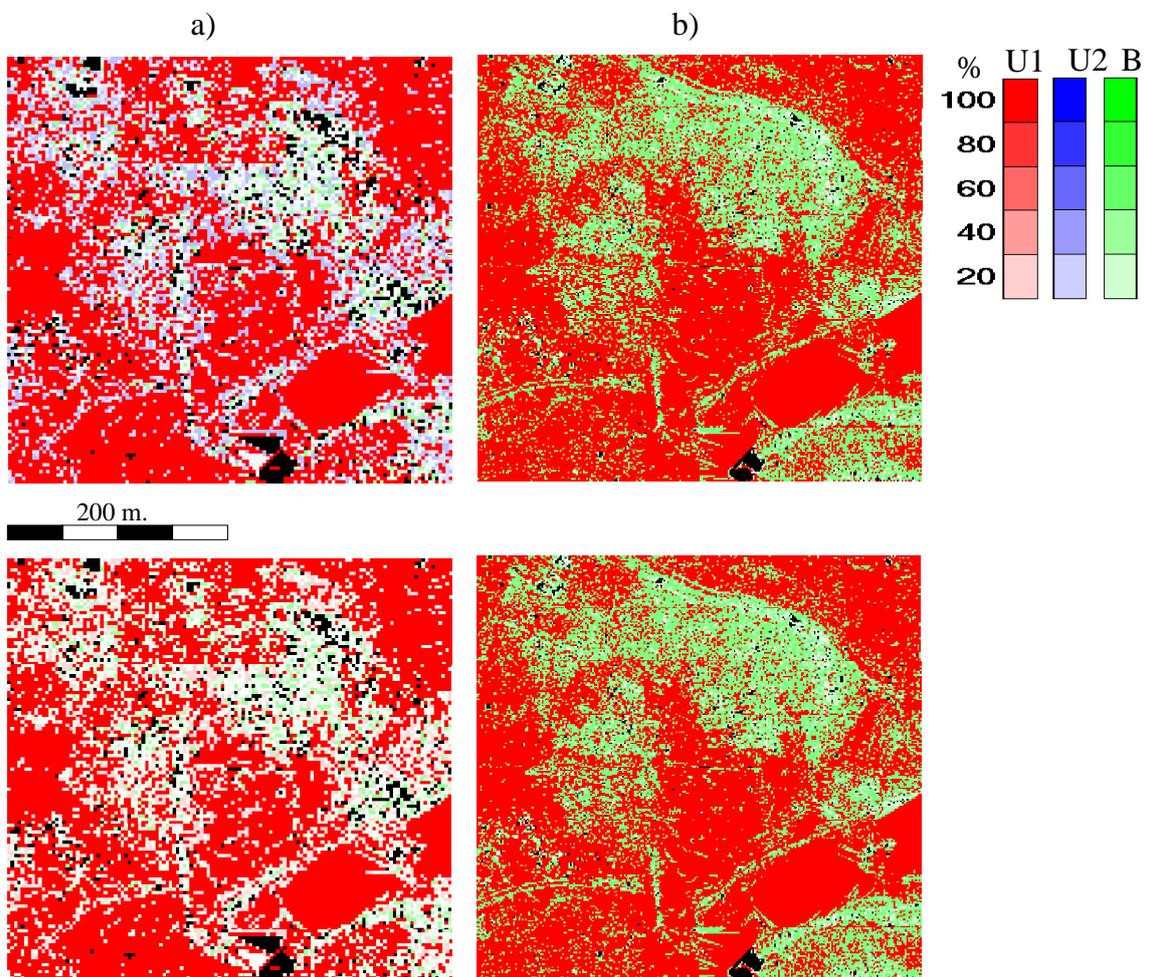
Mit dem ausgearbeiteten Bearbeitungsschema können die repräsentativen Wertebereiche der Trainingsgebiete U1, U2 und B festgestellt werden. Durch Klassifikationsdiagramme werden anschließend die unbekanntene Bereiche nach ihren Ähnlichkeiten zu den Trainingsgebieten untersucht. Ein Vergleich der Klassifikationen mit geomagnetischen Kartierungen zeigt, dass die Bereiche mit ähnlichen Signaturen richtig klassifiziert werden konnten. Durch dieses Bearbeitungsschema ist es uns gelungen, eine verlässliche Aussage über den Bebauungsgrad der untersuchten Vorstadt von Sarissa zu treffen.



**Abbildung 5.19:** Zwei Klassifikationen von Spektral- (a) und Variogrammparametern mit einer Fenstergröße von 12,5 m (obere Reihe drei Trainingsgebiete und untere Reihe zwei Trainingsgebiete) werden miteinander verglichen. Eine Verbesserung gegenüber der Klassifikation mit der Fenstergröße 25 m wurde erreicht. Auch eine Verbesserung durch die Klassifikation mit zwei Trainingsgebieten mit Spektral- und Variogrammparametern kann festgestellt werden, da die Bereiche mit hoher Scherbenanzahl bei der Klassifikation mit Spektralparametern als blau und mit Variogrammparametern als schwarz fehlklassifiziert wurden.



**Abbildung 5.20:** Obere Reihe (Klassifikationen mit drei Trainingsgebieten): Klassifikation mit Spektralparametern erreicht ihre optimale Fenstergröße (6,25 m). Die Bereiche mit hoher Scherbenanzahl sind mit einem sehr deutlichen Grün als besiedelte Gebiete klassifiziert. Die Klassifikation mit Variogramm-Parametern hingegen zeigt gewisse Verbesserungen gegenüber größeren Fenstergrößen, da sich die Anzahl der nicht klassifizierbaren (schwarzen) Bereiche vermindert hat. Untere Reihe (Klassifikationen mit drei Trainingsgebieten): Kaum Veränderungen gegenüber den Diagrammen mit drei Trainingsgebieten.



**Abbildung 5.21:** Obere Reihe (Klassifikation mit drei Trainingsgebieten): Klassifikationen mit Variogrammparametern a) mit der Fenstergröße 3,15 m und b) mit der Fenstergröße 1,5 m. Fenstergröße 3,15 m versagt. Weder die Korrelation mit Scherbenzählungen noch Ähnlichkeiten in der Textur können erfasst werden. Mit der Fenstergröße 1,5 m erreicht die Klassifikation mit Variogrammparametern ihre optimale Fenstergröße. Untere Reihe (Klassifikation mit zwei Trainingsgebieten): Keine Verbesserung gegenüber der Klassifikation mit drei Trainingsgebieten vorhanden.

### 5.3.2 Bestimmung der Scherbenanzahl

Um der Frage nachzugehen, ob aus den geomagnetischen Kartierungen die Scherbenanzahl quantitativ festgestellt werden kann, wurden weitere Untersuchungen vorgenommen. Die mit dem Spektralparameter und den Parametern der Variogrammanalyse erhaltenen Klassifizierungen und die Scherbenzählungen wurden zueinander in Beziehung gesetzt. Die bisherigen Klassifikationen ermöglichen eine Aussage über den Ähnlichkeitsgrad zwischen einem unbekanntem Teilgebiet und den jeweiligen Trainingsgebieten. Mit einem Vergleich zwischen Klassifikationen und Scherbenzählungen lässt sich verifizieren, ob die Klassifikationen Informationen über die Scherbenanzahl liefern.

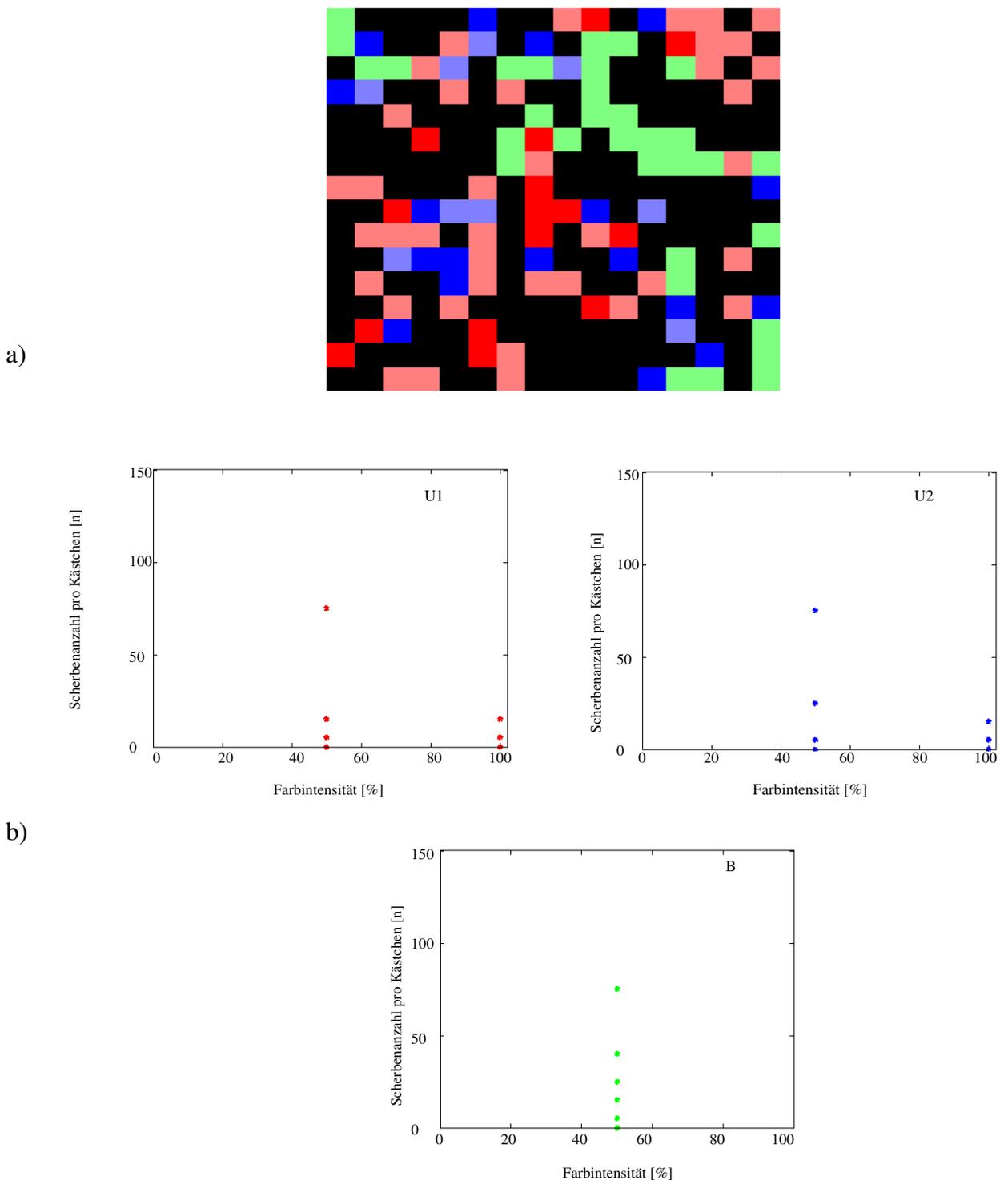
Da die Scherbenzählungen mit einer Fenstergröße von 25 m durchgeführt wurden, wurde die Klassifikation von 25 m gewählt, obwohl diese Fenstergröße nicht der optimalen Fenstergröße für beide Methoden entspricht (die besten Klassifikationsergebnisse wurden mit den Spektralparametern bei 6,5 m und mit den Parametern der Variogramm-Analyse bei 1,5 m erreicht). Es wurde untersucht, welche Scherbenanzahl die als unbesiedelt (U1 und U2) und besiedelt (B) klassifizierten Bereiche aufweisen. Das Ziel ist es dabei, eine mittlere Scherbenanzahl für jedes Trainingsgebiet zu berechnen.

In der Abbildung 5.23 ist die mit dem Spektralparameter klassifizierte Vorstadt (a) dargestellt. Abbildung 5.23 b zeigt die Diagramme, die die Beziehung zwischen Klassifikation und Scherbenzahl verdeutlichen. Als unbesiedelt (U1, rot) wurde mit zwei Intensitätsgraden (50 und 100 %) klassifiziert. Diese Bereiche wiesen 5, 15, 25 und 75 Scherben auf. Die unbesiedelte Fläche U2 (blau) und die besiedelte B (grün) verhalten sich ähnlich wie die unbesiedelte U1. Erst durch Häufigkeitsdiagramme wird deutlich, dass die Bereiche mit weniger Scherbenzahlen überwiegend als unbesiedelt, U1 (rot) und U2 (blau) klassifiziert wurden. Von insgesamt 40 als unbesiedelt (U1) klassifizierten Bereichen enthielten 39 (97,5 %) weniger als 20 Scherben. 23 Bereiche waren als U2 (blau) klassifiziert und davon hatten 21 (91,3 %) eine Scherbenanzahl unter 20. Bei den als B (grün) identifizierten kommen sehr unterschiedliche Scherbenzahlen vor, der wichtige Teil (42,3 %) hat jedoch mehr als 20 Scherben.

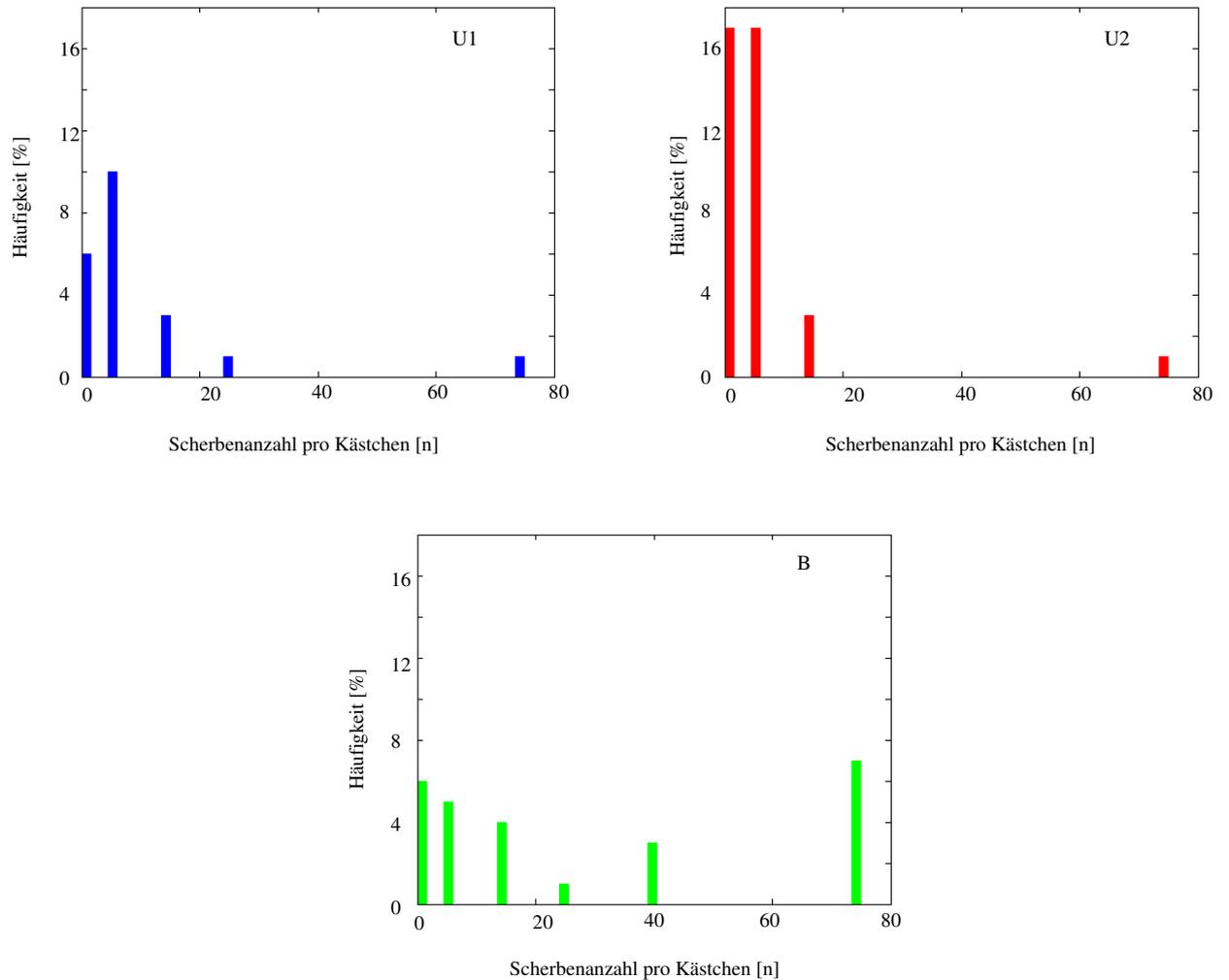
Mit Hilfe der kumulativen Histogramme aus Abb. 5.24 kann für jede Fläche ein Medianwert der Scherbenanzahl bestimmt werden. Den einzelnen Bereichen werden folgende Scherbenzahlen zugewiesen.

Klassifizierung	Unbebaut (U1)	Unbebaut (U2)	Bebaut(B)
Medianwert der Scherbenzahl	5	4	15

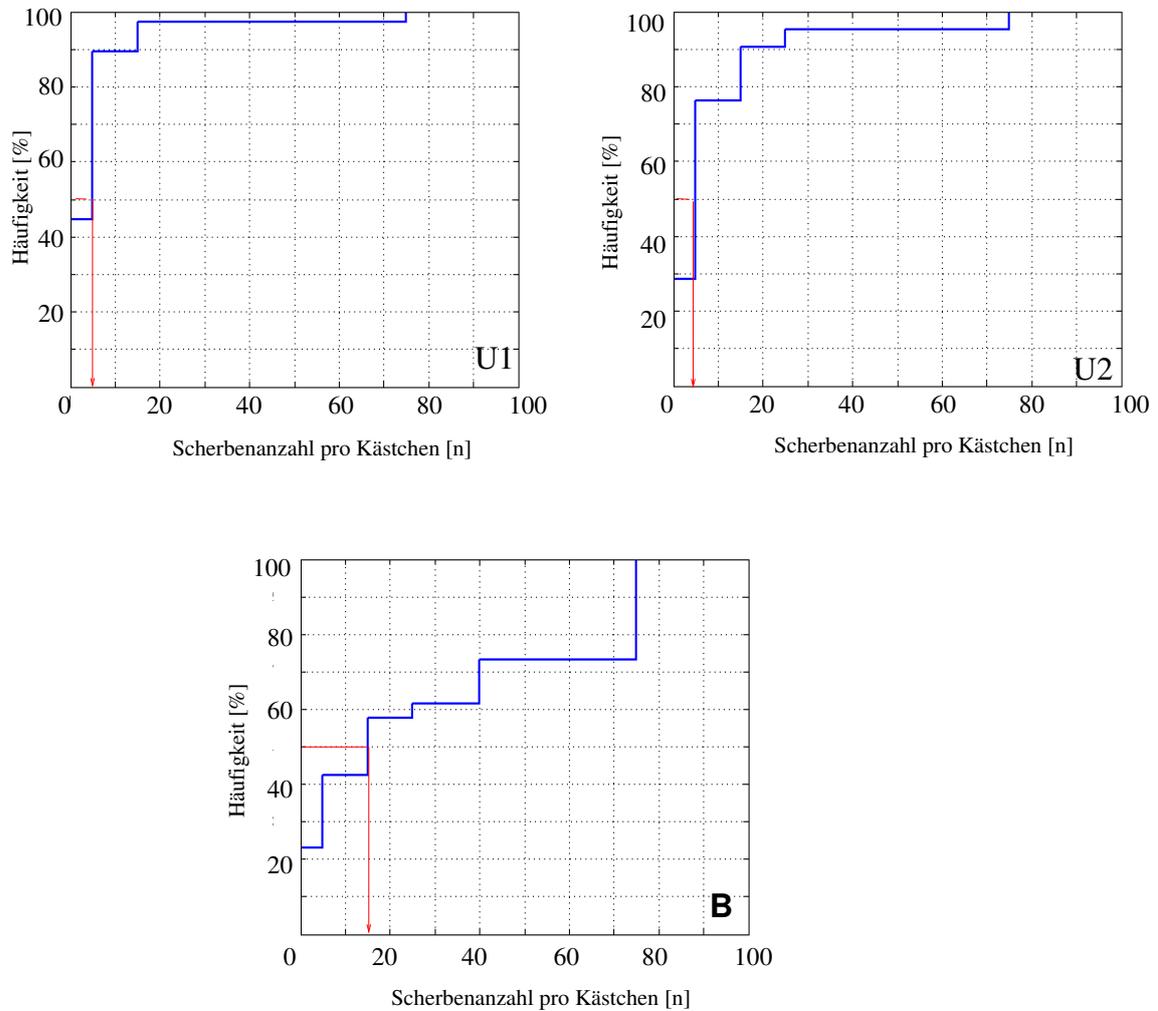
In der Abbildung 5.25 ist die mit den Variogrammparametern klassifizierte Vorstadt (a) dargestellt. In Abbildung 5.25 b) sind Diagramme dargestellt, die die Beziehung zwischen



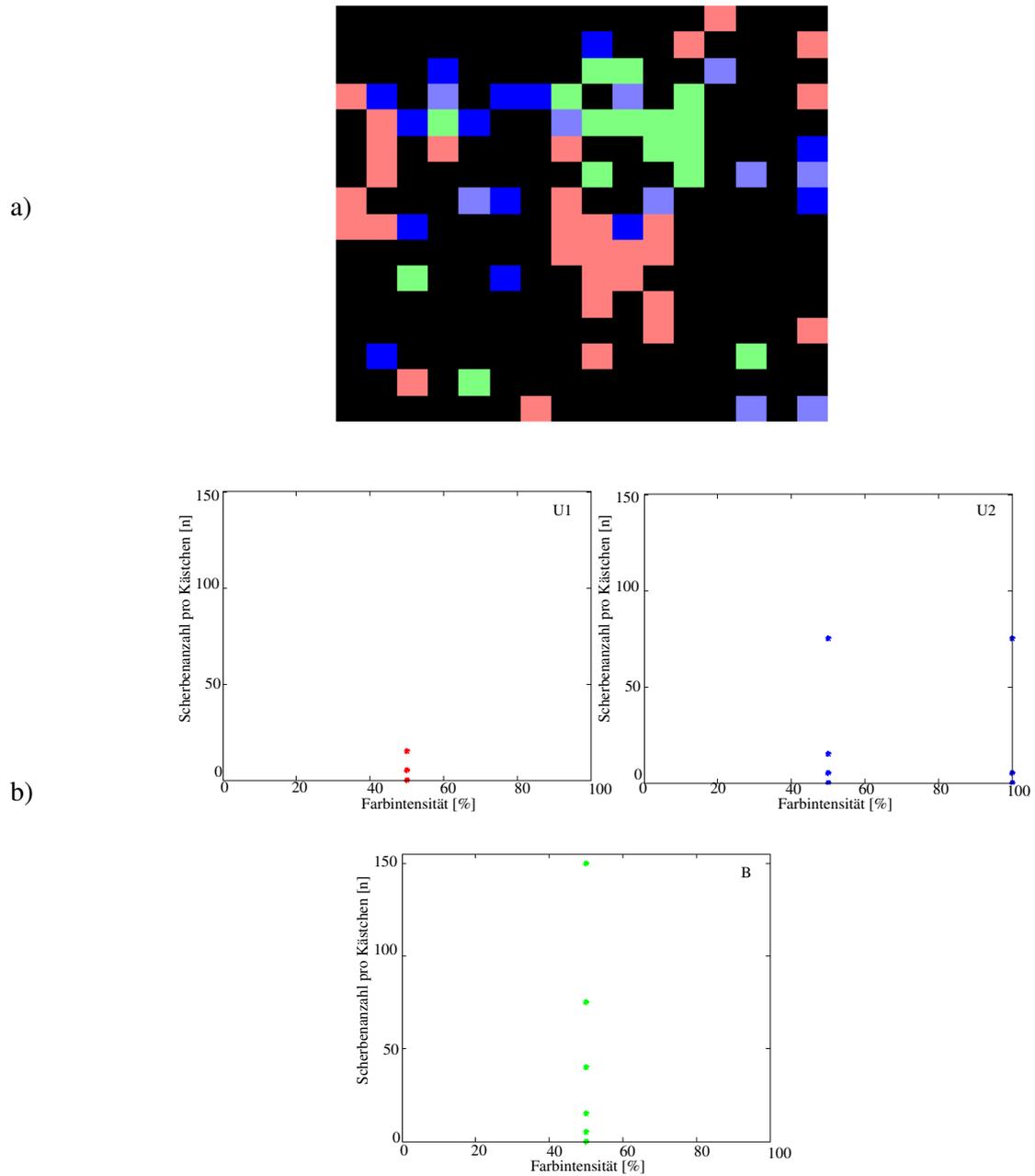
**Abbildung 5.22:** a) Die mit Hilfe des Spektral-Parameters klassifizierte Fläche (Vorstadt). b) Als unbebaut (U1,rot), unbebaut (U2, blau) und bebaut (B, grün) klassifizierte Teilbereiche wurden mit der Scherbenzählung (siehe Abb. 5.17) in Beziehung gesetzt.



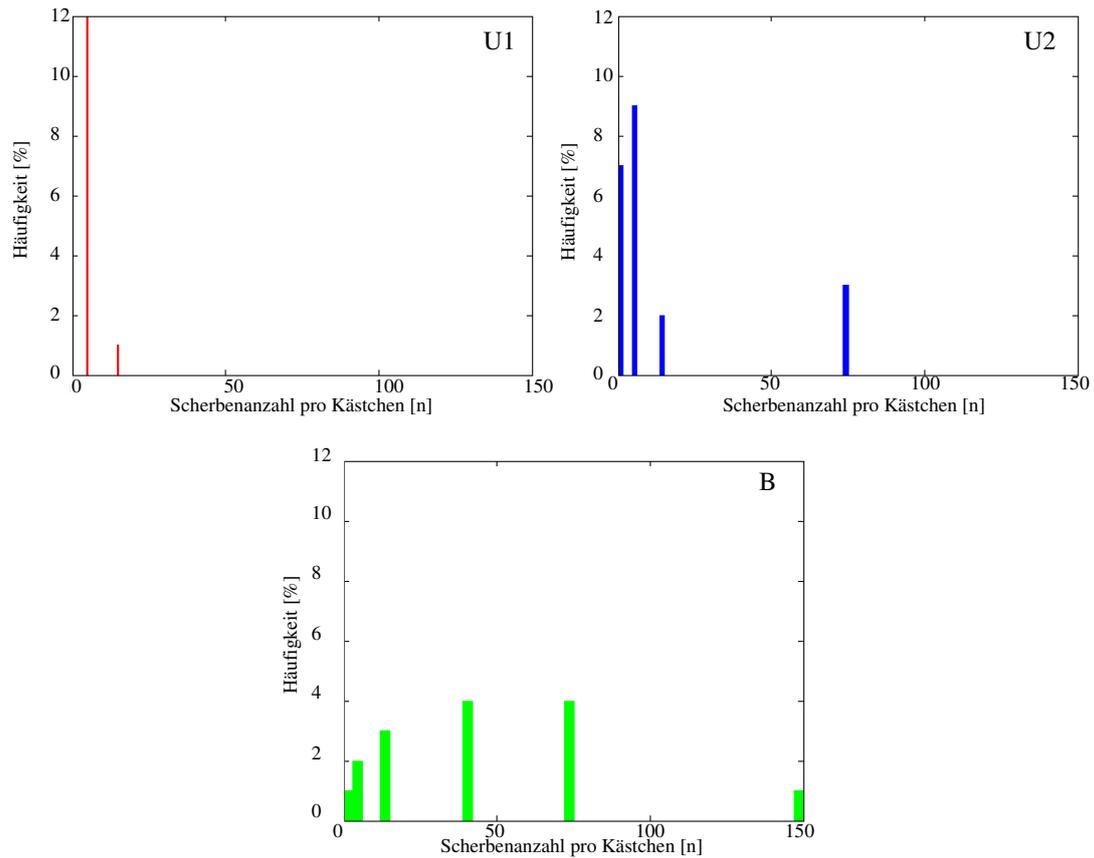
**Abbildung 5.23:** Durch die Betrachtung der Häufigkeitsdiagramme kann man erkennen, dass die als unbebaut (U1 und U2) klassifizierten Bereiche überwiegend eine Schervenanzahl von weniger als 20 aufweisen. Bei der bebauten Fläche (grün) sieht die Verteilung anders aus: Es wurden viele Bereiche mit einer Schervenanzahl unter 20 als bebaut (grün) klassifiziert. Ein beachtlicher Anteil enthält jedoch mehr als 20 Scherben.



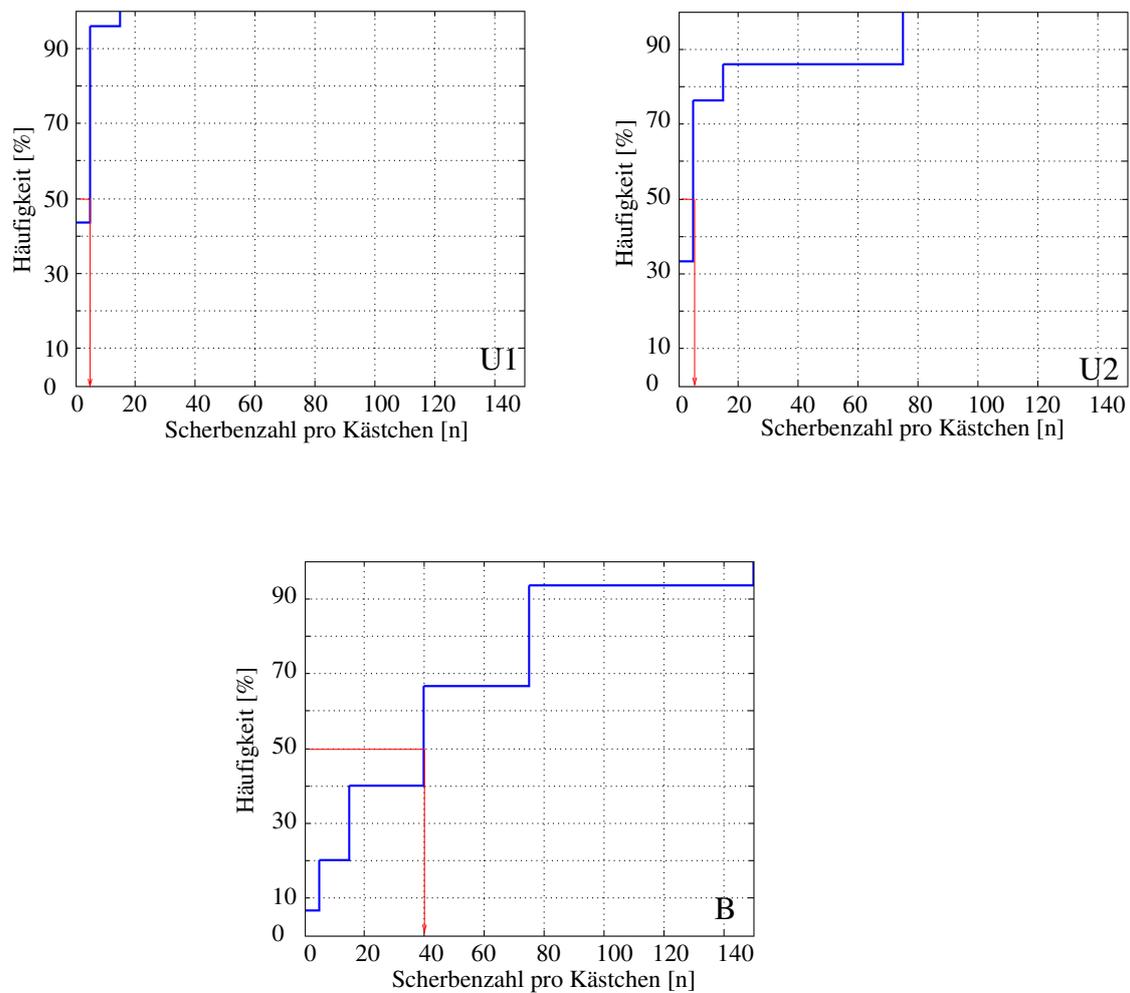
**Abbildung 5.24:** Um aus der Verteilung die Scherbenanzahl zu berechnen, wurden kumulative Histogramme betrachtet. Aus diesen Histogrammen konnte die Median-Scherben-Anzahl für den jeweiligen Bebauungsgrad bestimmt werden. Für unbebaut, U1 (rot), beträgt der Medianwert für die Scherbenanzahl 5, für unbebaut, U2 (blau), 4 und für bebaut, B (grün), 15.



**Abbildung 5.25:** a) Mit Hilfe der Variogrammparameter klassifizierte Fläche (Vorstadt)  
b) Die als unbebaut (U1, U2) und bebaut (B) klassifizierte Bereiche wurden mit Scherbenzählungen in Beziehung gesetzt.



**Abbildung 5.26:** Die Häufigkeitsdiagramme machen deutlich, dass die als unbaut (U1 und U2) klassifizierten Bereiche eine Scherbenanzahl von weniger als 20 aufweisen. Viele Bereiche mit einer Scherbenanzahl von weniger als 20 wurden als bebaut (B) klassifiziert, jedoch hat ein beachtlicher Teil mehr als 20 Scherben.



**Abbildung 5.27:** Um aus der Verteilung die Scherbenanzahl zu berechnen, wurden kumulative Histogramme betrachtet. Von diesen Histogrammen konnte die Median-Scherben-Anzahl für die jeweilige Fläche bestimmt werden. Für unbebaute Flächen (U1 und U2) beträgt der Medianwert für die Scherbenanzahl 4 und für die bebaute Fläche (B) 40.

dieser Klassifikation und der Scherbenzählung darstellen. Wie oben können erst durch die Betrachtung der Häufigkeitsdiagramme Unterschiede hervorgehoben werden. Die Bereiche mit geringen Scherbenzahlen wurden überwiegend mit rot und blau klassifiziert. Von insgesamt 19 als unbesiedelt (U1) klassifizierten Bereichen enthielten 100 % weniger als 15 Scherben. 20 Bereiche waren als U2 (blau) klassifiziert, und davon hatten 17 (88 %) weniger als 15 Scherben. Bei den als besiedelt klassifizierten Bereichen (insgesamt 15) kommen sehr unterschiedliche Scherbenzahlen vor, ein wichtiger Teil, ca 60%, weist jedoch mehr als 20 Scherben auf.

Anhand der kumulativen Histogramme (Abb. 5.27) wird für jede einzelne Klassifikation ein Medianwert bestimmt.

Klassifizierung	Unbesiedelt (U1)	Unbesiedelt (U2)	Besiedelt
Medianwert der Scherbenzahl	4	4	40

In der Abbildung 5.28 wurden die aus den kumulativen Histogrammen gewonnenen Medianwerte der Scherbenanzahl zugewiesen und mit der Scherbenzählung der Archäologen verglichen. Es ist eine deutliche Korrelation zwischen der Scherbenzahl aus der Scherbenzählung und derjenigen, die mit dem hier beschriebenen Bearbeitungsschema bestimmt wurde, festzustellen. Eine exakte quantitative Aussage ist jedoch nicht möglich. Die Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass das Bearbeitungsschema nicht nur auf Scherbenanomalien, sondern auch auf die Anomalien von anderen Siedlungsspuren reagiert. Insgesamt ordnet das hier beschriebene Verfahren deutlich weniger Scherben zu, als in der Scherbenzählung angegeben wurde. Die Bereiche I und die an die Bebauungslücke R angeschlossenen Bereiche mit Anomalienmuster (5.17) auf der magnetischen Kartierung deuten beispielsweise auf Siedlungsspuren, wo keine oder nur sehr wenige Scherben gefunden wurden. Diese Bereiche wurden bei den Klassifikationen mit optimalen Fenstergrößen deutlich als besiedelt (B) identifiziert (siehe Abbildung 5.20 und 5.21).

ORIGINALDARSTELLUNG

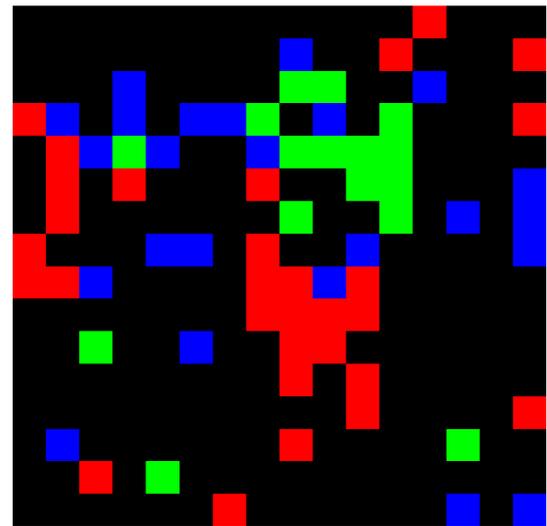
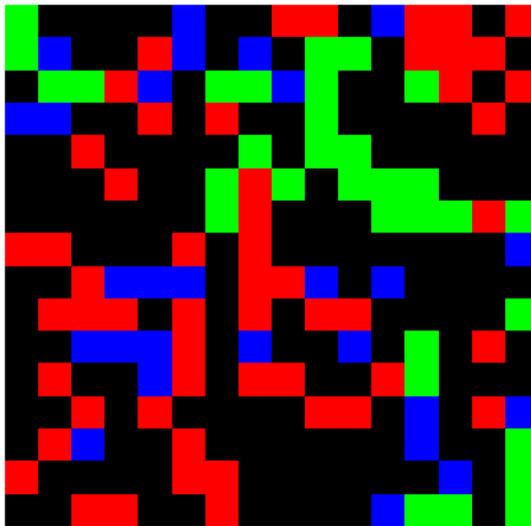
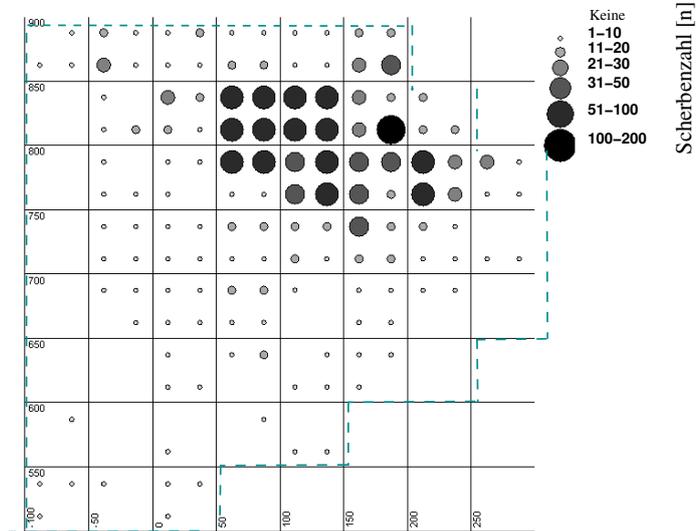


Abbildung 5.28: Die aus den kumulativen Histogrammen ermittelte Scherbenanzahl wurde der jeweiligen Farbe zugewiesen.

# Kapitel 6

## Simulationen

Mit Hilfe der im Bearbeitungsschema ausgearbeiteten Häufigkeitsdiagramme werden die Änderungen der Parameter - bei Variogramm-Analyse Range-Sill und bei Fourier-Analyse (RMS-Fehler<sub>X</sub>) und (RMS-Fehler<sub>Y</sub>)- betrachtet. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die der Klassifikation zu Grunde liegenden Parameter zu verifizieren.

Da es sich bei den Zielobjekten dieser Arbeit nicht um große klare Strukturen handelt, sondern um den Einfluss der Scherben auf die Magnetikergebnisse, werden Anomalien von Scherben aus unterschiedlichen Tiefen und mit unterschiedlichen Größen simuliert. Da die Scherben in den Simulationen als magnetische Dipole betrachtet werden können, wird im Kapitel 6.1 die Theorie zur Berechnung dieser magnetischen Anomalien vorgestellt. Die Arbeitsweise der Fluxgate-Gradienten-Sonden und Berechnung der Gradienten wird im darauffolgenden Kapitel (6.2) erläutert. In Kapitel 6.3 wird detailliert beschrieben, wie die Scherben simuliert und für die Untersuchungen vorbereitet werden. Außerdem werden die Simulationen vorgestellt und die Parameter zur Merkmalextraktion auf ihre Sensivität hin untersucht.

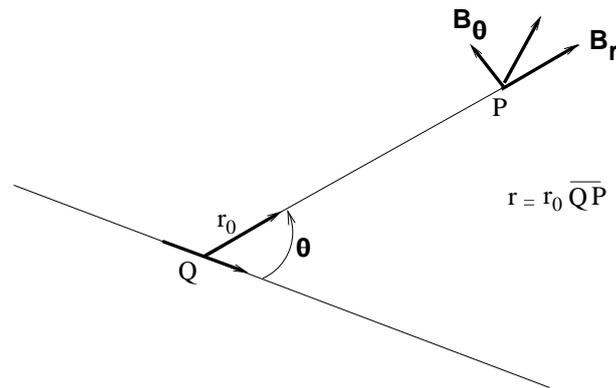
### 6.1 Das Feld des magnetischen Dipols

Das Grundelement in der Magnetostatik ist der magnetische Dipol mit dem Dipolmoment  $m$ . Das Magnetfeld des Dipols im Vakuum lässt sich aus dem skalaren magnetostatischen Potential  $U$  ableiten. Das magnetische Potential  $U$  eines Dipols mit dem Moment  $\mathbf{m}$  im Punkt  $Q$  im Abstand  $r$  zu einem Punkt  $P$  (Abb. 6.1) ist gegeben durch:

$$U = -\frac{1}{4\pi} \mathbf{m} \cdot \mathbf{grad}_P \frac{1}{r} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\mathbf{m} \cdot \mathbf{r}}{r^3} = \frac{1}{4\pi} \frac{m \cos(\theta)}{r^2} \quad (6.1)$$

Im Vakuum ergibt sich das Magnetfeld  $B$  aus

$$\mathbf{B} = -\mu_0 \mathbf{grad}_P U, \quad (6.2)$$



**Abbildung 6.1:** Das Magnetfeld des magnetischen Dipols

$\mu_0$  ist die magnetische Permeabilität des Vakuums. In Polarkoordinaten (Abb. 6.1) sind die radiale und tangentialen Komponente des Magnetfeldes  $\mathbf{B}$  gegeben durch

$$B_r = -\mu_0 \frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m \cos \theta}{r^3}$$

$$B_\theta = -\mu_0 \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial \theta} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2m \sin \theta}{r^3}$$

Der Betrag von  $B$  ergibt sich aus

$$B = \sqrt{B_r^2 + B_\theta^2}$$

Außerhalb magnetisierter Körper erfüllt das skalare magnetische Potential  $U$  die Laplace-Gleichung. Es gilt

$$\Delta U = 0$$

Ein magnetischer Dipol kann in vielen Fällen als erste Näherung für einen Störkörper, der in keiner Richtung besonders ausgedehnt ist, angesehen werden. Es lässt sich auch zeigen, dass das Feld einer homogen magnetisierten Kugel außerhalb der Kugel identisch ist mit dem Feld eines Dipols im Zentrum der Kugel. Das magnetische Moment  $m$  der Kugel mit der Magnetisierung  $M$  und dem Volumen  $V$  beträgt

$$m = MV$$

Aufgrund der bekannten Geometrie und der physikalischen Zusammenhänge kann die von einer beliebigen Dipol-Verteilung verursachte Anomalie errechnet werden.

## 6.2 Fluxgate-Gradientensonden und Gradientenmessungen

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, wurden in Sarissa bei geomagnetischen Kartierungen Fluxgate-Gradientensonden (Gradiometer) eingesetzt.

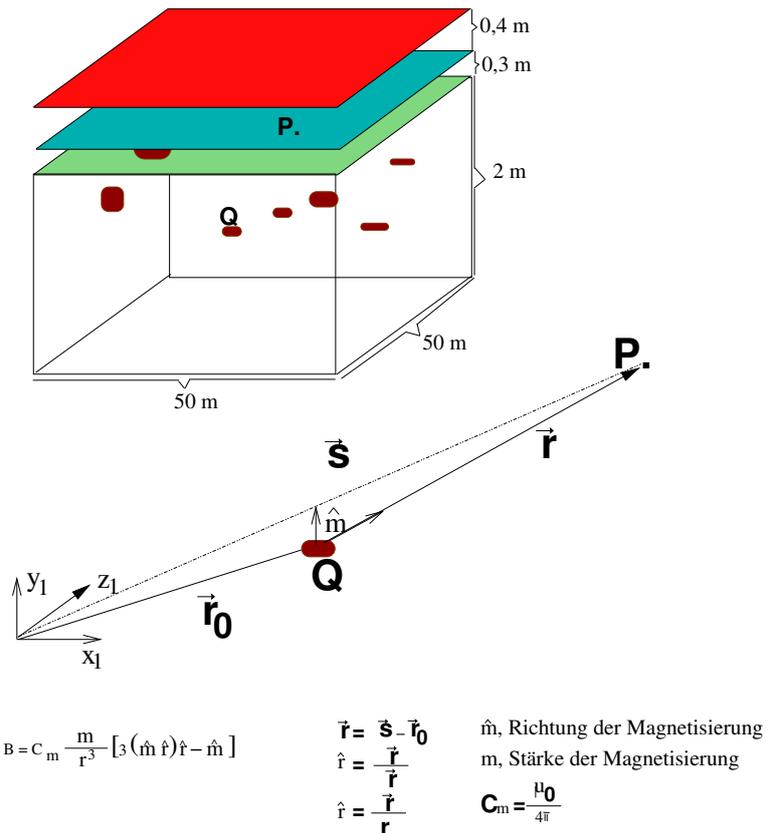
Bei diesen Gradientenmessungen wird die Vertikaldifferenz der Vertikalkomponenten in einem festen Abstand von 0,4 m gemessen. Diese Anordnung ermöglicht eine hohe Empfindlichkeit gegenüber kleinen Objekten in der Nähe der Erdoberfläche unterhalb des Sensors. Die Einflüsse seitlich gelegener Objekte hingegen werden mit dieser Anordnung abgeschwächt. Dadurch erreicht man eine hohe laterale Auflösung archäologischer Anomalien, hat aber den Nachteil, dass dadurch die effektive Eindringtiefe verringert wird. Unter günstigen Voraussetzungen können mit Gradiometern oberflächennahe Objekte mit hohem Magnetisierungscontrast (z. B. Gräber, Feuerstellen oder Siedlungsspuren) erfasst werden.

Die Stärke des Erdmagnetfeldes fällt in der dritten Potenz mit der Entfernung ab. Der untere Sensor 'sieht' mehr Anomalien als der obere. Durch die Bildung der Differenz fallen zeitliche Variationen, die von beiden Sensoren gleich registriert werden, weg. Der Abstand der Sensoren ist ausschlaggebend, wieviel Signal von der Störquelle in der Differenz der beiden Sensoren erhalten bleibt.

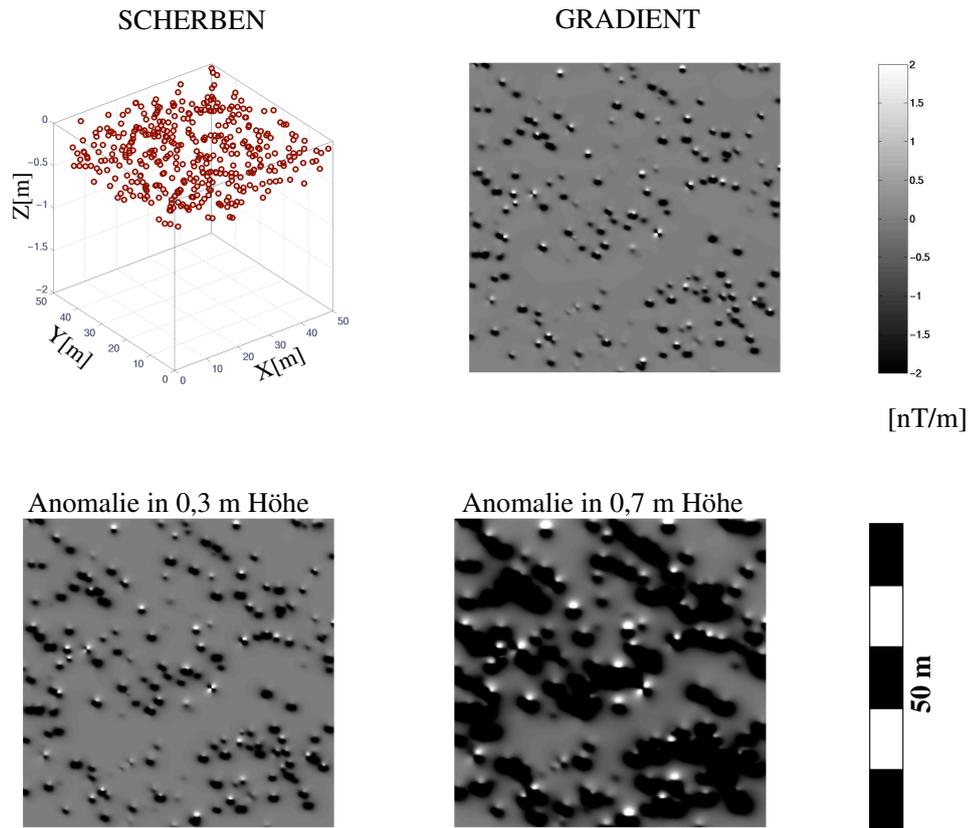
Ein wichtiger Faktor der Gradiometermessungen ist der Abstand des unteren Sensors zum Boden. Die Messgrößen werden in Nanotesla (nT) bzw. Nanotesla pro Meter (nT/m) angegeben und haben eine Empfindlichkeit von 0,1 nT bzw. 0,1 nT/m.

## 6.3 Berechnung simulierter Anomaliefelder

Für die Simulationsrechnungen werden die Scherben als magnetische Dipole betrachtet und in einem dreidimensionalen Raum, von 50 m x 50 m x 2 m mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators verteilt. Wie bei gemessenen Daten wird für zwei Höhen das Anomaliefeld der vertikalen Komponenten berechnet und daraus der Gradient in vertikaler Richtung gebildet. Die Höhe der ersten Simulation ist auf 0,3 Meter und der Abstand zur nächsten



**Abbildung 6.2:** Modellgeometrie für die Simulationsrechnungen: Die Scherben werden in einem dreidimensionalen Raum, von 50 m x 50 m x 2 m mit Hilfe eines Zufallsgegenerators verteilt. Für zwei Höhen wird das Anomaliefeld der vertikalen Komponenten berechnet und daraus die Differenz gebildet.



**Abbildung 6.3:** Scherbenmodell und magnetische Anomaliefelder: Um den Gradienten zu berechnen, wurden die magnetischen Anomalien in zwei Höhen simuliert. Die Höhen entsprechen den Höhen der gemessenen Daten und betragen 0,3 m (erste Simulation) und 0,7 m (zweite Simulation).

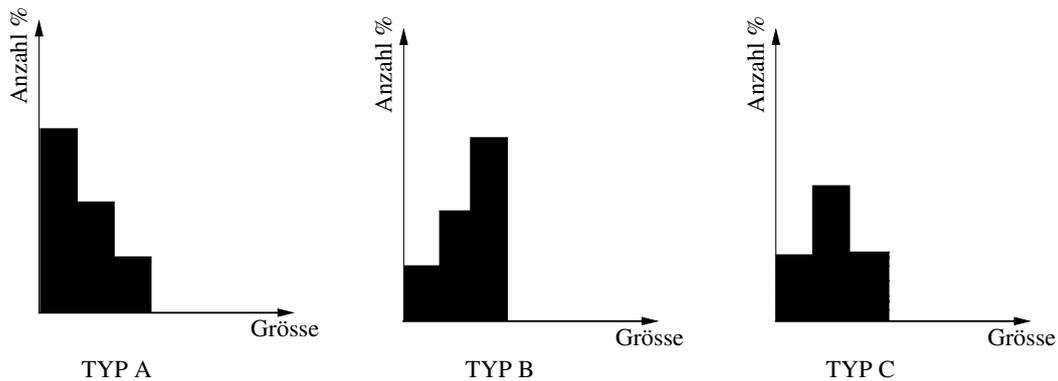
Höhe, wie bei den gemessenen Daten, auf 0,7 Meter gesetzt (Abb 6.2). Um daraus den Gradienten zu bilden, wurde die Differenz gebildet.

In Abbildung 6.3 sind diese Simulationen in zwei Höhen und die daraus gebildeten Gradienten dargestellt. Das Simulationraster ist identisch mit dem Messraster: In Profil- und Messrichtung wurde mit 0,2 Meter Abstand je ein Messwert berechnet, was für jede Fläche eine Gesamtzahl von 250x250 Messwerte ergibt.

### 6.3.1 Geometrie und Modelle

Da statistische Informationen über die Größe der Scherben (Größenmuster) und ihre Verteilung im Untergrund nicht vorhanden sind, musste mit verschiedenen Variationen simuliert werden.

Die Scherben sind in drei Größen unterteilt: klein (3), mittel (6) und groß (12). Die



**Abbildung 6.4:** Mit unterschiedlichen Verteilungsmustern der Scherbengrößen wurden Simulationen durchgeführt. Drei verschiedene Größenverteilungen wurden betrachtet. Die Scherben sind in drei Größen relativ zueinander in die Berechnungen eingeflossen: klein(3), mittel(6) und groß(12). Typ A: 60% klein, 30% mittel und 10% groß. Typ B: 10% klein, 30% mittel und 60% groß. Typ C: 30% klein, 40% mittel und 30% groß.

Variationen der Größenmuster werden in Abbildung 6.4 dargestellt. Diese werden Typ A, B und C genannt und beschreiben die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Scherbengrößen:

1. Typ A: 60 % klein, 30 % mittel und 10% groß
2. Typ B: 10 % klein, 30 % mittel und 60% groß
3. Typ C: 30 % klein, 40 % mittel und 30% groß

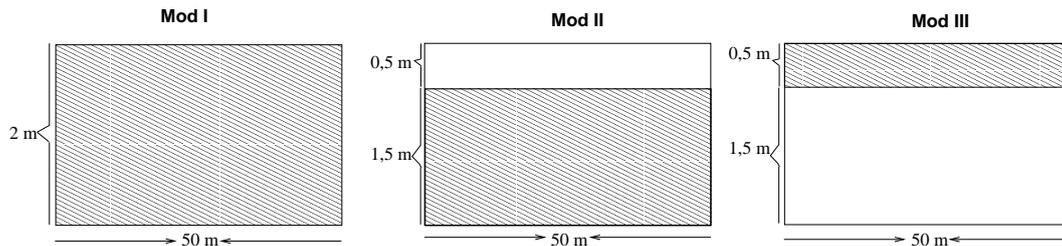
Basierend auf den Scherbenzählungen (Abb. 3.3) wurde mit drei unterschiedlichen Gesamtanzahlen simuliert.

Für alle der vorgestellten Größenmuster werden Simulationen mit einer zufälligen Streuung durchgeführt.

Die Untergrundmodelle sind nach den Tiefenbereichen, in denen die Scherben verteilt sind, wie folgt benannt:

1. Modell I: Über den ganzen Tiefenbereich (2 m) sind Scherben vorhanden.
2. Modell II: Im obersten Bereich bis 0,5 m sind keine Scherben, ab dieser Tiefe kommen Scherben vor.
3. Modell III: Nur im obersten Tiefenbereich (0-0,5 m) sind Scherben vorhanden.

In Abbildungen 6.6 und 6.7 werden zwei Beispiele der Simulationen vorgestellt.



**Abbildung 6.5:** Die Scherben werden mit verschiedenen Untergrundmodellen, in denen die Scherben verteilt sind, simuliert. In Modell I sind die Scherben im gesamten Tiefenbereich verteilt, in Modell II ab 0,5 Meter und in Modell III nur in den oberen 0,5 Metern.

Das erste Beispiel ist mit Modell II berechnet (Abb.6.6) und das zweite mit Modell I (Abb.6.7).

Für beide Modelle wurden Simulationen mit einer Scherbenanzahl von 400, 200 und 40 durchgeführt. Um eine Annäherung der simulierten Daten an die realen Daten zu erreichen, wurden die Simulationen mit einem realen Hintergrund-Bild vermischt. Im Folgenden werden die simulierten und die gemischten Daten zusammen betrachtet und verglichen.

Um die Unterschiede zwischen den Abbildungen der simulierten Daten und denen der gemischten zu verdeutlichen, wird jeweils das Bild mit realen Daten dazu geplottet.

#### **40 Scherben:**

Die einzelnen Scherben, ihre verschiedenen Stärken und Richtungen in der Magnetisierung sind bei den Modellen I und II zu erkennen. Die Anomalien von Typ B sind breiter als die vom Typ C. Die einzelnen Scherben sind bei beiden Modellen zu erkennen.

#### **200 Scherben:**

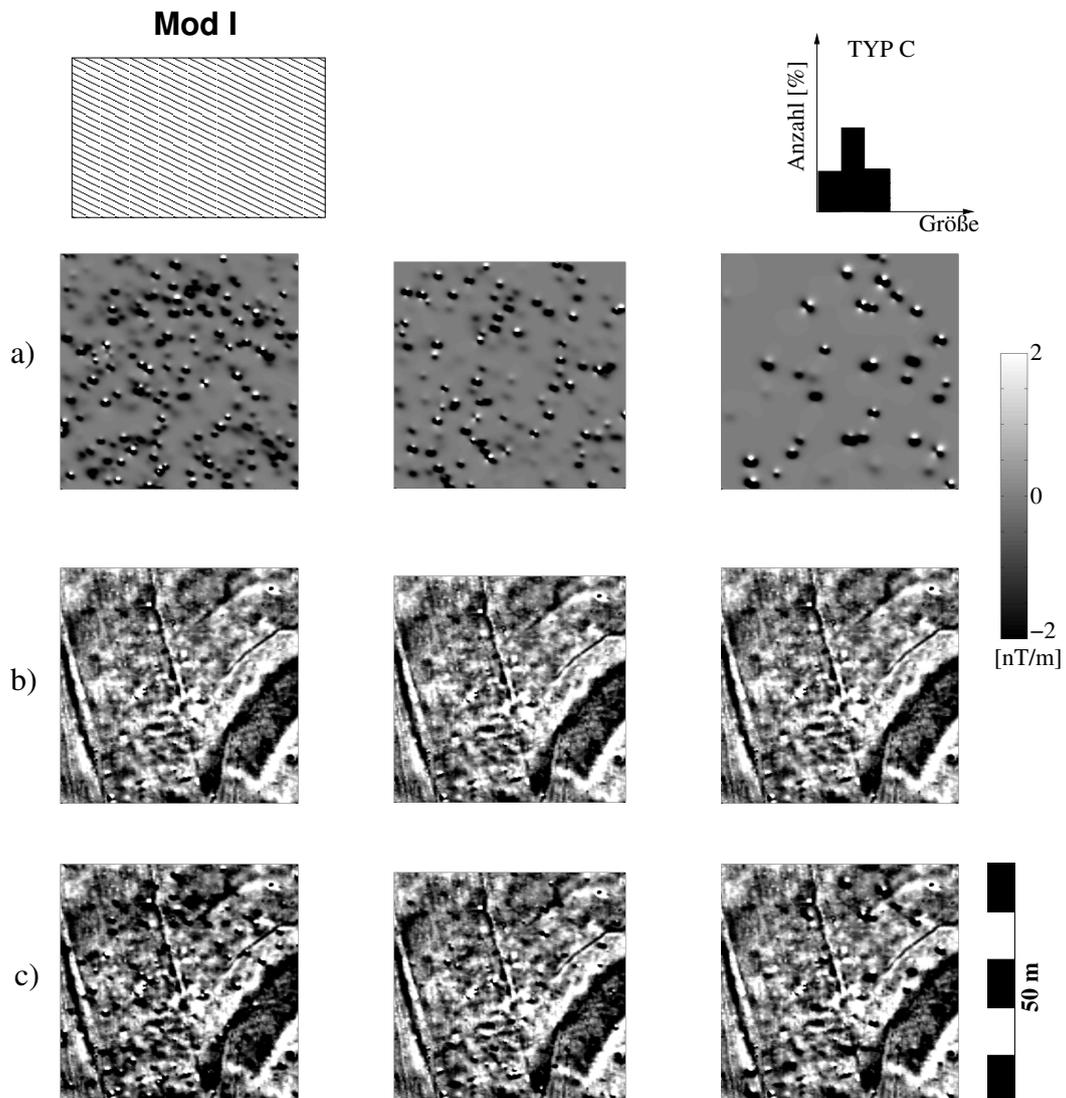
Bei Modell I sind die einzelnen Scherben, ihre unterschiedlichen Magnetisierungsstärken und -richtungen weiterhin zu erkennen. Bei Modell II hingegen können nur sehr wenige Anomalien einzelner Scherben erkannt werden. Die positiven (schwarzen) Anomalien prägen das gesamte Bild.

#### **400 Scherben:**

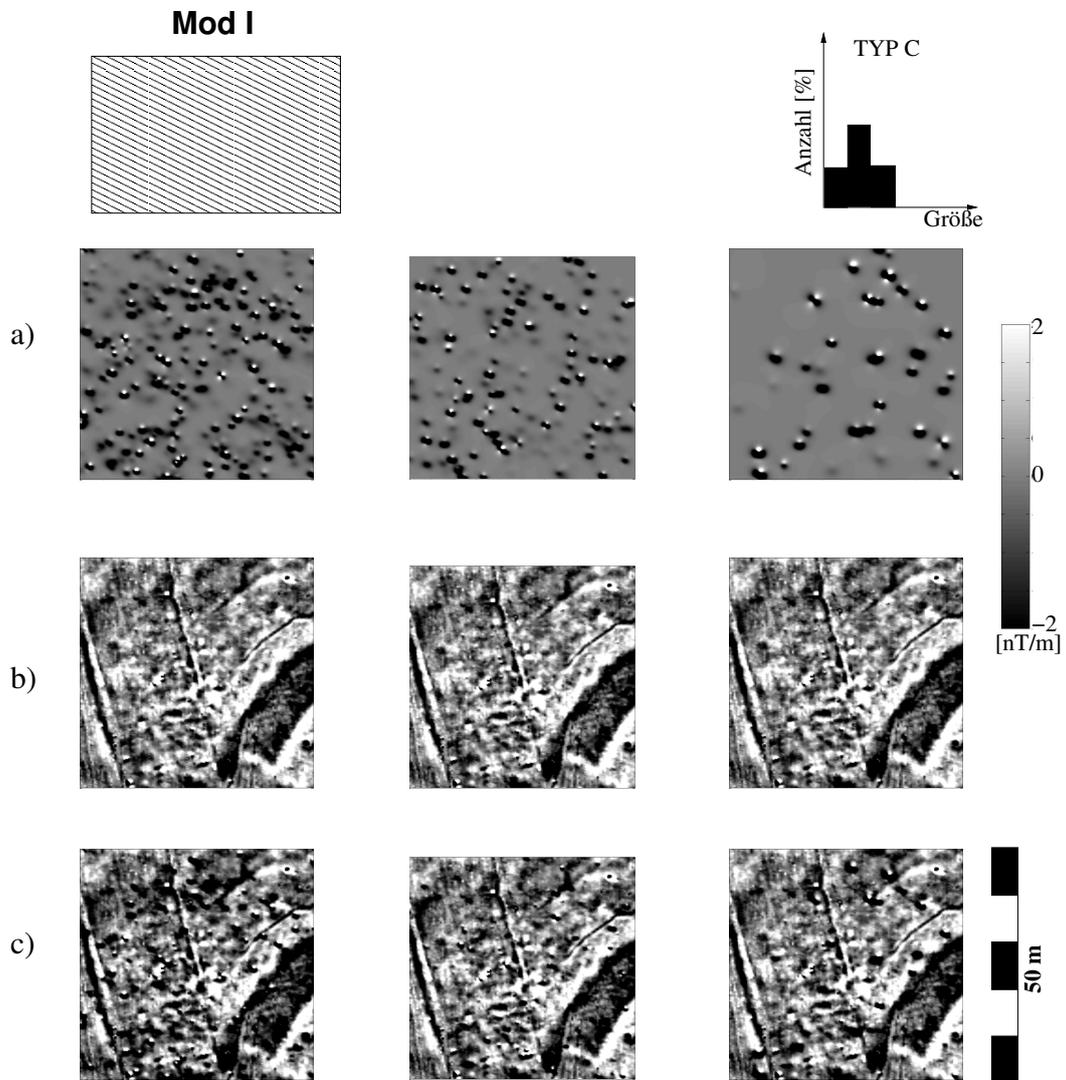
Bei Modell I sind kaum Veränderung gegenüber 200 Scherben mit demselben Modell zu verzeichnen, außer dass entsprechend mehr Scherbenanomalien zu sehen sind. Auf dem Magnetikplot von Modell II sind fast nur positive Anomalien zu sehen. Die Anomalien der einzelnen Scherben sind bis auf wenige Ausnahmen nicht erkennbar.

### **6.3.2 Anwendung des Bearbeitungsschemas**

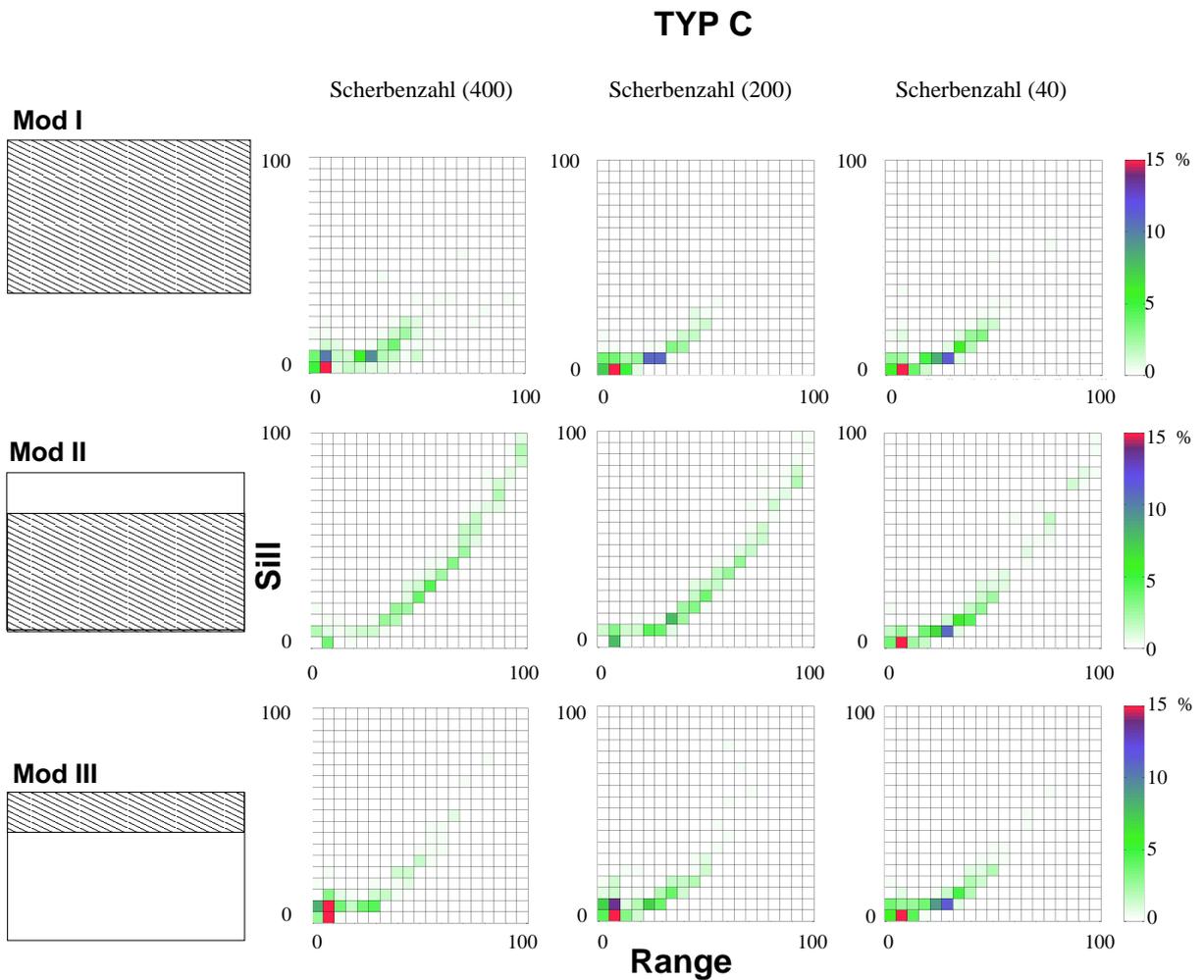
Die aus der Variogramm- und Powerspektrumanalyse gewonnenen Parameter werden mit Hilfe der Häufigkeitsdiagramme miteinander verglichen. Dadurch kann am besten



**Abbildung 6.6:** Simulationen mit Modell II und Typ B. a) Simulationen mit verschiedener Scherbenanzahl, von links nach rechts: 400, 200 und 40. b) der reale Datensatz, der zu den simulierten addiert wurde. c) Gemischte Plots. Bei simulierten und gemischten Daten mit einer Scherbenanzahl von 40 sind die Anomalien einzelner Scherben klar erkennbar. Mit Erhöhung der Scherbenanzahl werden die Simulationen und die gemischten Plots unruhiger.



**Abbildung 6.7:** Simulationen mit Modell I und Typ C. a) Simulationen mit verschiedenen Scherbenanzahlen, von links nach rechts: 400, 200 und 40. b) Magnetik-Plot, der zu den simulierten Daten addiert wurde. c) Gemischte Plots. Bei simulierten und gemischten Daten sind die Anomalien einzelner Scherben klar erkennbar. Mit Erhöhung der Scherbenanzahl wird der Magnetik-Plot unruhiger und die kleinen Anomalien mit positiven und negativen Anteilen treten in den Vordergrund.

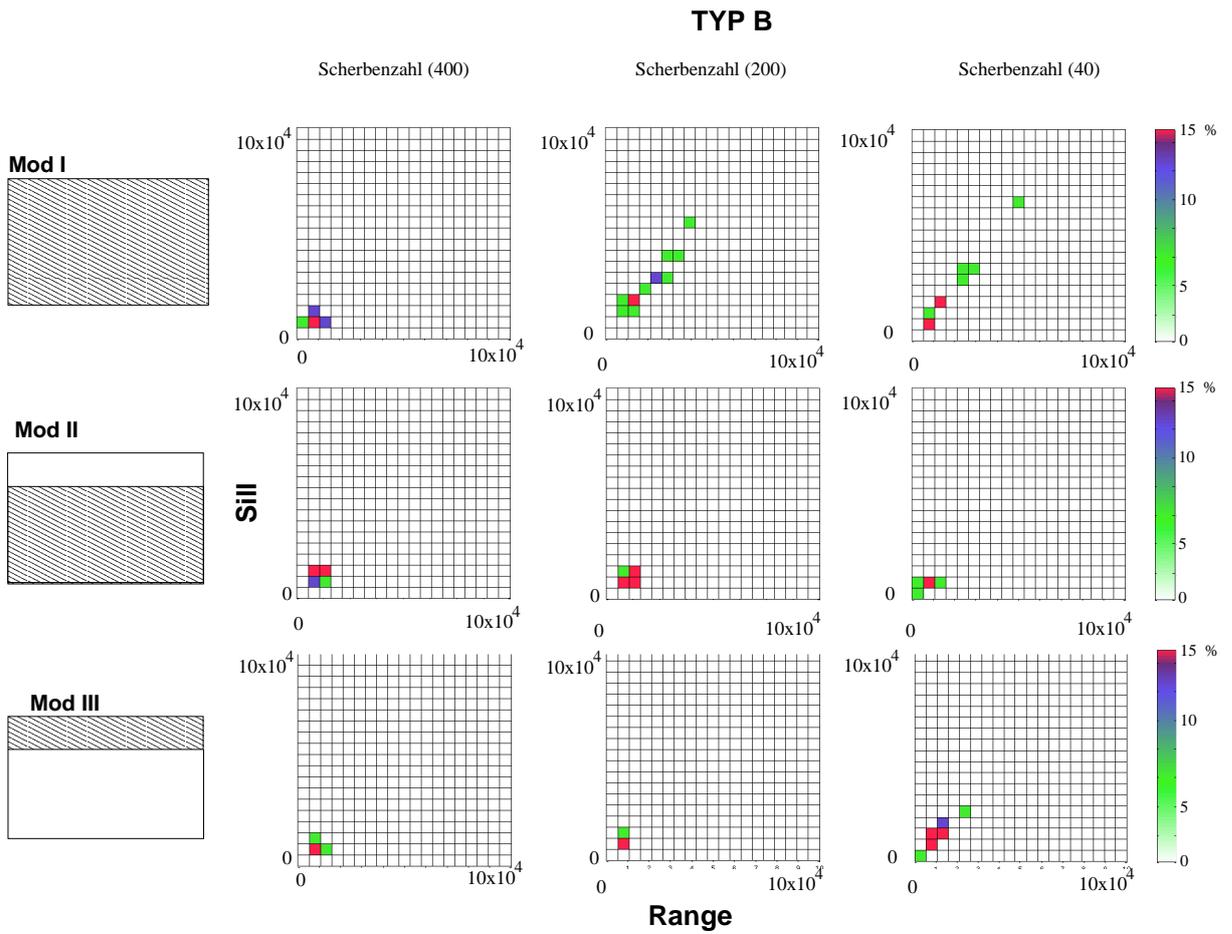


**Abbildung 6.8:** Ergebnisse der Variogrammanalyse für die verschiedenen Modelle I, II, III und verschiedener Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) mit Typ C.

der Schwerpunkt der Parameter betrachtet und deren Sensitivität überprüft werden. In diesem Abschnitt werden somit die einzelnen Analysemethoden betrachtet und zum Schluss miteinander verglichen. Da die Plots der Simulationen mit dem Verteilungsmuster Typ A und Typ C sehr ähnlich sind, wird nur Typ C hier weiterverfolgt.

### Parameter der Variogramm-Analyse

Mit Hilfe der Häufigkeitsdiagramme werden Range- und Sillwerte der gemischten Magnetik-Plots (Simulation mit unterschiedlichen Untergrundmodellen, Größenmustern und Scherbenanzahlen) untersucht.



**Abbildung 6.9:** Ergebnisse der Variogrammanalyse für die verschiedenen Modelle I, II, III und variierte Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) für Typ B sind hier dargestellt.

**Typ C:**

In Abbildung 6.8 werden Ergebnisse für Typ C dargestellt. Die Ergebnisse der Variogramm-Analyse für die verschiedenen Modelle I, II, III und die variierte Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) mit Typ C sind hier dargestellt. Modelle I und III sind in ihren Range- und Sill-Werten sehr ähnlich. Die Erhöhung der Scherbenanzahl kann in den Häufigkeitsdiagrammen nicht erkannt werden. Modell II unterscheidet sich hingegen davon: 1) Die Werte streuen sehr. 2) Mit wachsender Scherbenanzahl verschiebt sich der Schwerpunkt des Wertebereichs.

**Typ B:**

In Abbildung 6.9 werden die Häufigkeitsdiagramme vom Typ B dargestellt. Modell II und III sind in ihren Range- und Sillwerten sehr ähnlich. Diese ändern sich in einem kleinen Wertebereich und lassen Unterschiede kaum erkennen. Modell I verhält sich hingegen anders: 1) Die Wertebereiche mit den Scherbenanzahlen 200 und 40 sind zerstreuter und mit wachsender Scherbenanzahl verschiebt sich der Schwerpunkt. 2) Die Werte der Simulation mit 400 Scherben ähnelt den Modellen II und III mit der gleichen Scherbenanzahl.

**Parameter der Fourier-Analyse**

Die aus dem Powerspektrum gewonnenen Parameter der Modelle I, II und III werden in Häufigkeitsdiagrammen verglichen. Das Ziel dabei ist, die Unterschiede der Anomalien mit diesen Parametern zu verdeutlichen. Außerdem wird die Wirkung der Anzahl der Scherben bzw. der unterschiedlichen Untergrundmodelle untersucht.

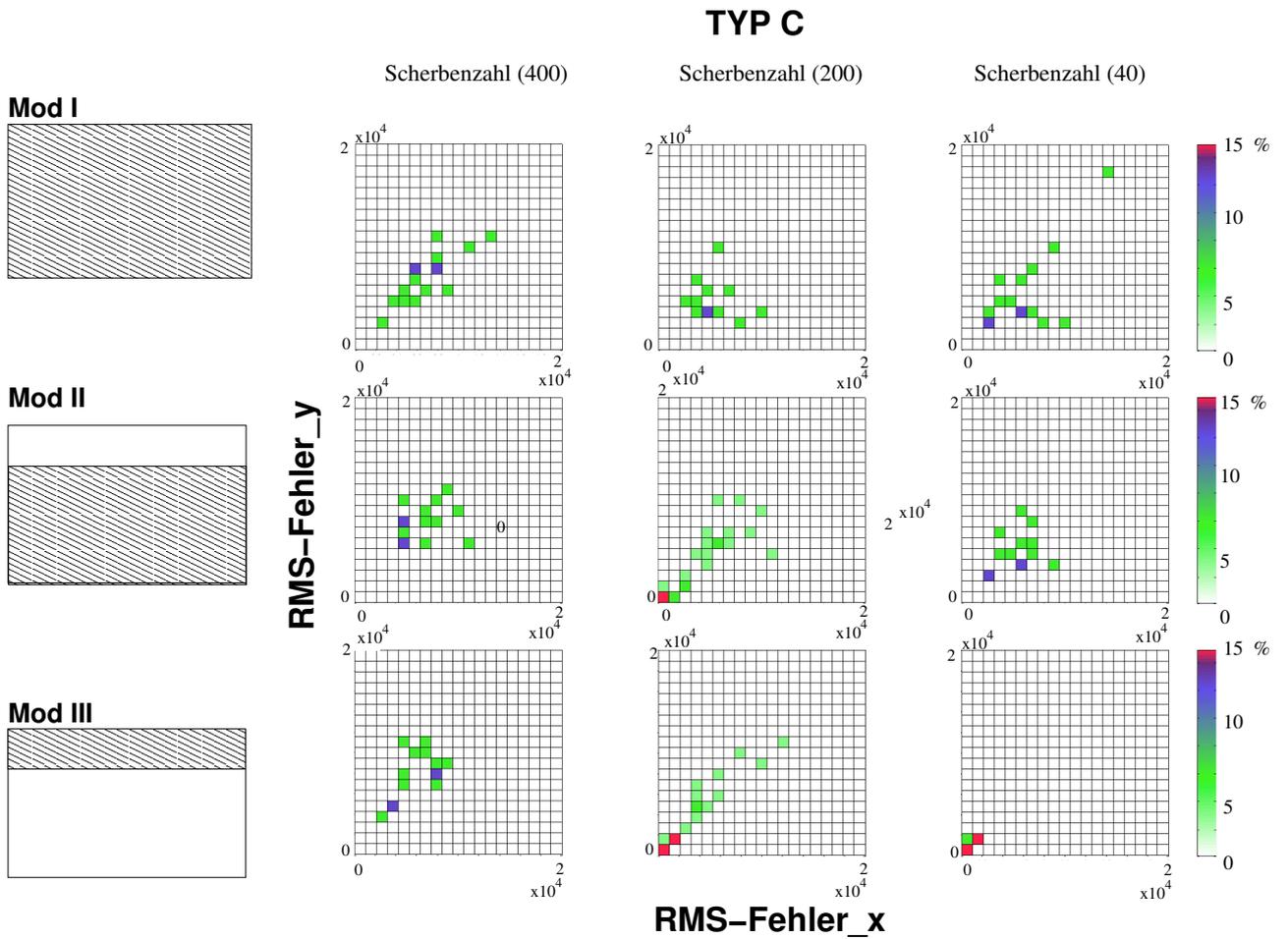
**Typ C:**

In Abbildungen 6.10 sind die Ergebnisse der Powerspektrumanalyse aller Untergrundmodelle (I, II, III) mit variierender Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) vom Typ C dargestellt. Die RMS-Fehler<sub>x</sub>- und RMS-Fehler<sub>y</sub>-Werte ändern sich bei gleichem Modell mit variierender Scherbenanzahl. Bei Modell I und III vergrößern sich die Werte mit steigenden Scherbenanzahlen. Bei Modell III ist diese Tendenz nicht erkennbar. Der Schwerpunkt des Wertebereichs liegt bei kleinen Werten.

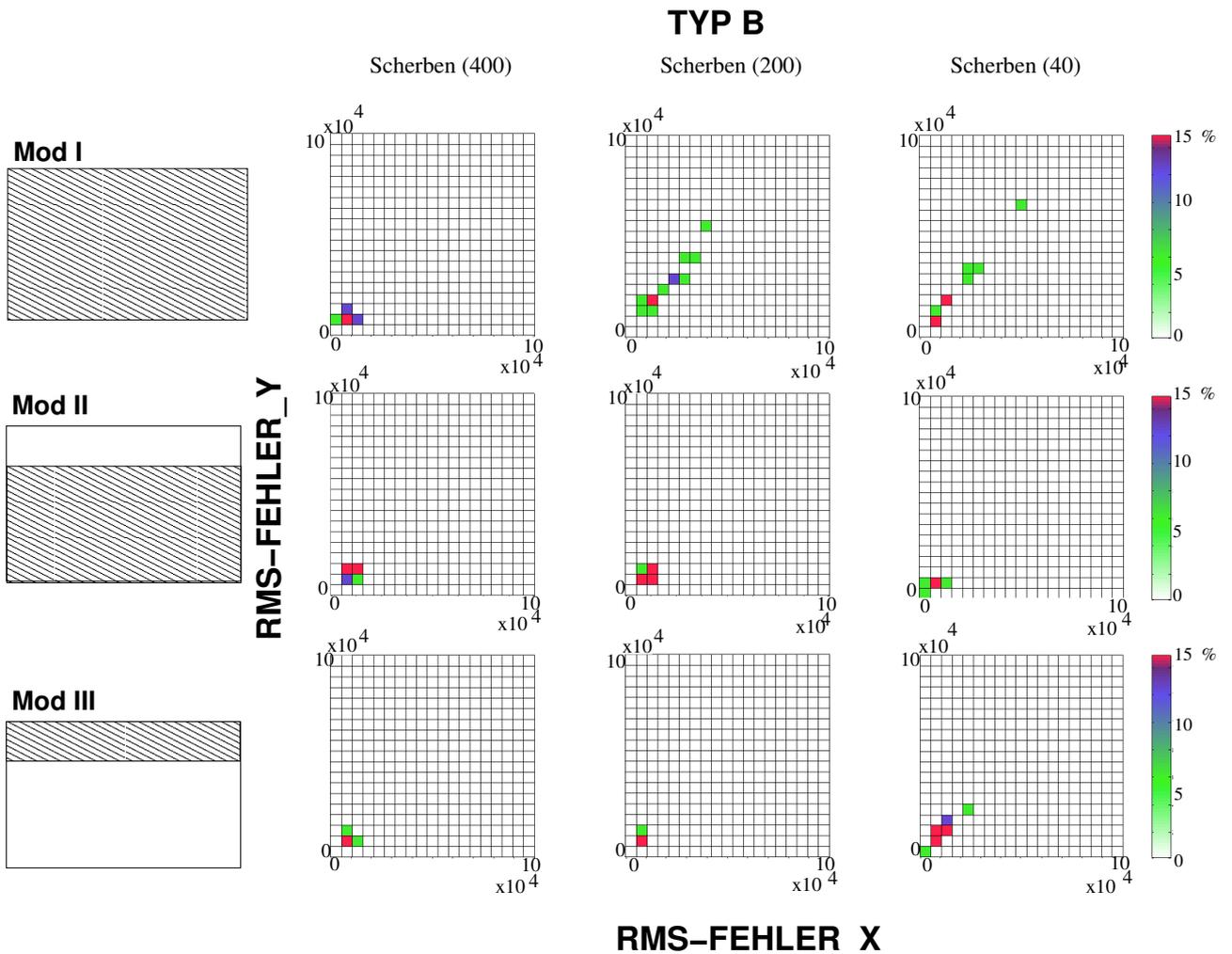
Eine systematische Änderung mit gleicher Scherbenanzahl bei variierenden Modellen ist nicht erkennbar.

**Typ B:**

In Abbildung 6.11 sind die Ergebnisse der Powerspektrumanalyse für die verschiedenen Modelle (I, II, III) und Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) mit Typ B dargestellt. Die RMS-Fehler<sub>x</sub>- und RMS-Fehler<sub>y</sub>-Werte ändern sich sowohl bei gleichem Modell



**Abbildung 6.10:** Ergebnisse der Powerspektrumanalyse für die verschiedenen Modelle I, II, III und variierte Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) für Typ C.



**Abbildung 6.11:** Ergebnisse der Powerspektrumanalyse für die verschiedenen Modelle I, II, III und variierte Gesamtanzahl der Scherben (400, 200 und 40) für Typ B.

mit variierenden Scherbenanzahl als auch bei gleicher Scherbenanzahl mit variierenden Untergrundmodellen kaum, bzw. eine systematische Änderung ist nicht erkennbar. Das ist mit dem starken Einfluss der großen Anomalien aus dem tieferen Bereich zu erklären. Dadurch sind beispielsweise die Wertebereiche von Modell II und III sehr ähnlich.

# Kapitel 7

## Abschließende Betrachtungen und Ausblick

Der in dieser Arbeit entwickelte Klassifizierungsansatz benutzt eine zweidimensionale Analyse, bei der die zu untersuchende Fläche in Teilflächen zerlegt wird. Dieser Ansatz dient der Klassifikation von Plänen geophysikalischer Kartierungen. Ziel dieser Klassifikation ist die Identifikation von Siedlungsflächen, die weniger durch klar erkennbare Gebäudereste, sondern mehr durch diffuse, kleinräumige Anomalienmuster gekennzeichnet sind. Dabei besteht ein qualitativer Zusammenhang zwischen dem Muster der Amplitudenverteilung und Häufigkeiten von Tonscherben auf der Oberfläche und im Untergrund. Von drei angewandten geophysikalischen Prospektionsverfahren -Geomagnetik, EM38, flächenhafte Suszeptibilitätsmessungen- stellte sich die Geomagnetik als das geeignetste Verfahren heraus. Die besiedelten Gebiete mit hohem Scherbenanteil liefern in der Geomagnetik ein deutlich unruhigeres Bild als die unbesiedelten mit niedriger Scherbenanzahl. Eine Korrelation zwischen Scherbenanzahl und geomagnetischen Signaturen konnte qualitativ festgestellt werden. Die zentrale Fragestellung, die in dieser Arbeit verfolgt wurde, war, die qualitative Korrelation zwischen Geomagnetik und Scherbenanzahl auch quantitativ zu erfassen und die Scherbenkartierung durch ein Bearbeitungsschema zu ersetzen. Das Ziel dabei ist es, die Feststellung des Bebauungsgrades zu objektivieren bzw. zu automatisieren.

Es musste der Frage nachgegangen werden, ob die aus den Messungen zu extrahierenden Parameter für eine Unterscheidung der Trainingsgebiete bzw. Texturen geeignet sind. Geomagnetische Flächen mit unterschiedlichem Besiedlungsgrad (U1: unbesiedelt, U2: besiedelt mit geologischen Strukturen, B: unbesiedelt) wurden exemplarisch als Trainingsgebiete ausgesucht. Die Trainingsgebiete sollten möglichst homogen in ihren Texturen sein. Inhomogenitäten in Texturen der Trainingsgebiete erschweren die Klassifikation. Mit verschiedenen Fenstergrößen wurden die Parameter aus Fourier- und Variogramm-Analyse untersucht:

Variogramm-Analyse: Drei Parameter (Nugget, Range, Sill) wurden nach ihrer Eignung zur Unterscheidung der Trainingsgebiete untersucht. Die zwei Trainingsgebiete 'besiedelt' (B) und 'unbesiedelt' (U1) können in ihren Range- und Sillwerten voneinander unterschieden werden. Die unbesiedelte Fläche mit geologischen Strukturen (U2) von U1 und B zu unterscheiden, erwies sich als schwierig.

Spektralanalyse: Drei Parameter (Skalierungsfaktor, Exponent und RMS-Fehler) wurden nach ihrer Sensibilität auf eine Unterscheidung der Trainingsgebiete untersucht. Skalierungsfaktor und Exponent stellten sich als nicht geeignet heraus. Der RMS-Fehler erwies sich als am besten geeigneter Parameter. Die Werte der RMS-Fehler für drei Trainingsgebiete erfassen deren Unterschiede quantitativ.

Simulationsrechnungen, bei denen die Scherbenanzahl und der Tiefenbereich, in dem die Scherben vorkommen, variiert werden, konnten die Klassifizierungsparameter verifizieren. Die Korrelation zwischen Scherbenanzahl und Geomagnetik wurde zunächst qualitativ untersucht. Es zeigen sich gute Korrelationen von Scherbenzählungen und Klassifikationsparametern. Anhand von Test-Klassifikationen müssen die optimale Fenstergröße ermittelt und dann die Klassifikationen mit unbekanntem Flächen durchgeführt werden. Die Fläche, von der Scherbenzählungen vorlagen, wurde mit dem Bearbeitungsschema klassifiziert:

1. Die Analyse mit einer Fenstergröße, die derjenigen der Scherbenzählungen entspricht, scheint keine qualitative Korrelation zuzulassen, weder mit Spektral-Parametern noch mit dem Variogramm. Es überwiegen unklassifizierbare Bereiche, was die Interpretation erschwert.
2. Die Analyse mit einer Fenstergröße von 12,5 m erzielt eine Verbesserung hinsichtlich der räumlichen Korrelation. Allerdings gehen einige Details wie z.B. Übergänge von besiedelten zu unbesiedelten Bereichen verloren.
3. Eine optimale Fenstergröße für die spektrale Analyse liegt bei 6,25 m Fenstergröße. Die wichtigen Details, die mit größeren Fenstergrößen nicht geliefert wurden, konnten erfasst werden. Dazu zählen Übergänge von besiedelten zu unbesiedelten Bereichen und die räumliche Korrelation zu den Scherbenzählungen.

Die Variogrammparameter liefern mit dieser Fenstergröße zwar auch eine gute Korrelation mit den Scherbenzählungen, allerdings wird nicht die gleiche Detailtreue erreicht wie bei der Spektralanalyse.

4. Ab einer Fenstergröße von 3,12 m versagt die Spektralanalyse auf Grund der nicht mehr ausreichend großen Fenster. Mit einer Fenstergröße von 1,5 m erreicht die

Variogrammanalyse ihr bestes Ergebniss mit hoher Detailtreue und hoher räumlicher Korrelation zur Scherbenzählung.

Die hier dargestellte qualitative Korrelation zwischen Scherbenanzahl aus Scherbenzählung und der aus dem Bearbeitungsschema ermittelten Bebauungsgrad konnte mit Hilfe statistischer Methoden quantifiziert werden. Dabei ist eine grobe Abschätzung über die Scherbenanzahl gelungen. Eine exakte quantitative Aussage ist jedoch nicht möglich. Die Abweichungen sind darauf zurückzuführen, dass das hier entworfene Bearbeitungsschema nicht nur auf Scherbenanomalien, sondern auch auf Anomalien von anderen Siedlungsspuren reagiert.

Darüber hinaus konnte der Bebauungsgrad der Teilgebiete der Vorstadt von Sarissa ermittelt werden.

# Literaturverzeichnis

- ABMAYR, W. 1994. *Einführung in die digitale Bildverarbeitung*. Teubner Verlag, Stuttgart.
- AGRARWAL, R. G., & KANASEWICH, E. R. 1971. Automatic trend analysis and interpretation of potential field data. *Geophysics*, **36**, 339–348.
- AKIN, H., & SIEMES, H. 1988. *Praktische Geostatistik*. Springer Verlag, Berlin.
- ANDERSON, T. W. 1969. *An introduction to multivariate statistical analysis*. John Wiley & Sons inc., New York.
- ATICK, J. J., & REDLICH, A. N. 1992. What does the retina know about natural scenes? *Neural Computation*, **4**, 196–210.
- BADELLEY, B. 1997. *The correlation structure of natural images and the calibration of spatial representations*. *Cogn. Sci.* 21 351-72.
- BASTANI, M., & PEDERSEN, L. B. 2001. Automatic Interpretation of magnetic dike parameters using the analytical signal technique. *Geophysics*, **66**, 551–561.
- BELL, A. J., & SEJNOWSKI, T. J. 1997a. Edges are the 'independent components' of natural scenes. In 'Advances in neural information processing systems 9' (eds. Mozer, M. C., Jordan, M. J. and Petsche, T.). *Cambridge: MIT Press*, 883–887.
- BELL, A. J., & SEJNOWSKI, T. J. 1997b. The 'independent components' of natural scenes are edge filters. *Vision Res.*, **37**, 3327–3338.
- BILGILI, F. 2000. *Kombinierte Anwendung von Georadar, Geoelektrik und Geomagnetik zur Untersuchung eines archäologischen Bauwerkes*. Diplomarbeit, Institut für Geophysik, CAU zu Kiel.
- BLAKELY, R. J., & HASSANZAHED, S. 1981. Estimation of depth to magnetic source using maximum entropy power spectra with application to the Peru-Chile Trench, in 'Nazca Plate: Crustal Formation and Andean Convergence'. *Geological Society of America Memoir*, **154**, 667–682.

- BLAKELY, R. J., & SIMPSON, R. W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics*, **51**, 1494–1498.
- BURTON, G. J., & MOORHEAD, I. R. 1987. Color and spatial structure in natural scenes. *Applied Optics*, **26**, 157–170.
- CONNARD, G., COUCH, R., & GEMPERLE, M. 1983. Analysis of aeromagnetic measurements from the Cascade Range in central Oregon. *Geophysics*, **48**, 376–390.
- COOLE, W. W., & LOHNES, P. R. 1971. *Multivariate data analysis*. John Wiley & Sons inc., New York.
- CORDELL, L., & GRAUCH, V. J. S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico. *SEG*, 181–197.
- DEUTSCH, C. W., & JOURNAL, A. G. 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press.
- DUDA, R., HART, P., & STORK, D. 2001. *Pattern Classification, 2nd edition*. Wiley.
- ERKUL, E., RABELL, W., & STÜMPPEL, H. 2004. Entwicklung eines mobilen Multi-Sensor-Systems. *Abstract, 64. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft*, 152–153.
- FIELD, D. J. 1987. Relations between the statistics of natural images and response properties of cortical cells. *Journal of the Optical Society of America*, **A 4**, 2379–2394.
- FIELD, D. J. 1994. What ist the goal of sensory coding. *Neural Computation*, **6**, 559–601.
- FUKUNAGA, K. 1990. *Introduction to statistical pattern recognition*. Academic Press, New York.
- GÖKTEN, E. 1983. Şarkışla (Sivas) güney-güneydoğusunun stratigrafisi ve jeolojik evrimi. *Türkiye jeoloji Kurumu Bülteni*, **26**, 167–176.
- GREGOTSKI, M. E., JENSEN, O., & ARKANI-HAMED, J. 1991. Fractal stochastic modeling of aeromagnetic data. *Geophysics*, **56**, 1706–1715.
- GREINWALD, S., & THIERBACH, R. 1997. *Elektrische Verfahren zur praktischen Anwendung in der Umweltekundung, M. Beblo (Hrsg)*. Ernst und Sohn.
- GUTENBERG, B., & RICHTER, C. F. 1954. *Seismicity of the Earth and Associated Phenomenon*. 2nd ed., Princeton University Press, Princeton.

- HABERÄCKER, P. 1989. *Digitale Bildverarbeitung*. Hanser Verlag, München Wien.
- HAHN, A., KIND, E. G., & MISHRA, D. C. 1976. Depth estimation of magnetic sources by means of Fourier amplitude spectra. *Geophysical Prospecting*, **24**, 287–308.
- HARALICK, R. M. 1979. Statistical and structural approaches to texture. *Proc. of the IEEE*, **67-5**, 786–804.
- HARALICK, R. M., SHANMUGAM, K., & DINSTEN, I. 1973. Textural features for image classification. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, **6-3**, 610–621.
- HERZFELD, U. C. 1999. Geostatistical interpolation and classification of remote sensing data from ice surface. *Int. Journal of Remote Sensing*, **20-2**, 307–327.
- HERZFELD, U. C., & HIGGINSON, C. A. 1996. Automated Geostatistical Seafloor Classification -Principles, Parameters, Features, Vectors and Discrimination Criteria. *Computer & Geosciences*, **22-1**, 35–52.
- HORTON, C. W., HEMPKINS, W. B., & HOFFMANN, A. A. J. 1964. A statistical Analysis of some aeromagnetic maps from the north-western canadian shield. *Geophysics*, **29**, 582–601.
- HURRI, J., HYVARINEN, A., KARHUNAN, J., & E., OJA. 1996. Image feature extraction using independent component analysis. *In Proc. NOR SIG'96, Espoo, Finland*.
- HÜSER, A., & JEAN, E. 2002. Survey im Bereich der Vorstadt von Kuşaklı (Untersuchungen in Kuşaklı (A. Müller-Karpe)). *Mitteilungen der Deutschen Orientgesellschaft*.
- ISAAKS, E. H., & SRIVISTAVA, R. M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press.
- JÄHNE, D. 2002. *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Verlag.
- JEAN, E. 1998. Untersuchungen in Kuşaklı 1997. *Mitteilungen der Deutschen Orientalischen Gesellschaft*, **130**, 154–160.
- JUNG, K. 1948. *Angewandte Geophysik*. Wolfenbütteler Verlagsanstalt, Hannover.
- KEAREY, P., & BROOKS, M. 1995. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Blackwell Science, Oxford.
- KEATING, P., & PILKINGTON, M. 2004. Euler deconvolution of the analytic signal and its application. *Geophysical Prospecting*, **52**, 165–182.

- KIRSCH, R. 1995. *Umweltgeophysik in der Praxis: Untersuchungen von Altablagerungen und kontaminierten Standorten, unveröffentlicher Bericht*. Abteilung Ingenieur- und Umweltgeophysik des Instituts für Geophysik der CAU Kiel.
- KOHONEN, T. 1988. *An introduction to neural computing*. Pergamon Press NY, Neural Networks, Vol 1, 3-16.
- KOWALIK, W. S., & E., GLENN W. 1987. Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation. *Geophysical Prospecting*, **52**, 165–182.
- LAUGHLIN, S. B. 1981. A simple coding procedure enhances a neuron's information capacity. *Z. Naturforsch.*, **36c**, 910–912.
- LIPPMANN, R. 1987. *An introduction to computing with neural nets*. Vol. Vol. 4-2. IEEE ASSP Magazine.
- LORUP, E. J. 2000. Explorative Variographie: Kontinuität im Raum. [www.geo.sbg.ac.at/staff/lorup/lv/geostats2000/ExplorativeVariographie.htm](http://www.geo.sbg.ac.at/staff/lorup/lv/geostats2000/ExplorativeVariographie.htm).
- MAUS, S., & DIMITRI, V. 1996. Depth estimation from the scaling spectrum of potential fields. *Geophys. J. Int.*, **124**, 113–120.
- MAUS, S., SENGPHEL, K. P., RÖTTGER, B., SIEMON, B., & TORDIFFE, E. A. W. 1999. Variogram analysis of helicopter magnetic data to identify paleochannels of the Omaruru River, Namibia. *Geophysics*, **64-3**, 785–794.
- MAYER, H., HERZFELD, U. C., CAINE, N., & LOSLEBEN, M. V. 2002. Geostatistical Classification of Snow Surface Roughness and Results on Morphogenesis of Snow Surfaces in a Continental Alpine Environment. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, abstract H11D–0886.
- MELZER, T. 2003. Statistische Mustererkennung SS 2003. <http://www.prip.tuwien.ac.at/melzer/lehre/statpr/statpr.pdf>.
- MILITZER, H., SCHÖN, J., & STÖTZNER, U. 1978. *Geophysik im Ingenieur- und Bergbau*. Dt. Verlag für Grundstoffind.
- MIRANDA, F. P., MACDONALD, J. A., & CARR, J. R. 1992. Application of the semivariogram textural classifier (STC) for vegetation discrimination using SIR-B data of Borneo. *Int. Journal of Remote Sensing*, **13**, 2349–2354.
- MISHRA, D. C., & NAIDU, P. S. 1970. Two-dimensional power spectral analysis of aeromagnetic fields. *Geophysical Prospecting*, **22**, 345–353.

- MÜLLER-KARPE, A. 1998. Die hethitische Stadtruine Kuşaklı-Sarissa 1997. *alma mater philippina, Marburger Universitätsbund*, **1998**, 21–26.
- MÜLLER-KARPE, A. 2002. Kuşaklı -Sarissa . Kultort im Oberen Land. *Kunst- und Ausstellungshalle der BRD GmbH, Bonn*, 176–189.
- NIEMANN, H. 1983. *Klassifikation von Mustern*. Springer Verlag, Berlin.
- NILSSON, N. 1982. *Principles of artificial intelligence*. Springer Verlag, Berlin.
- PILKINGTON, M., & ROEST, W. R. 1998. Removing varying directional trends in aeromagnetic data. *Geophysics*, **63**, 446–453.
- PILKINGTON, M., GREGOTSKI, M. E., & TODOESCHUCK, J. P. 1994. Using fractal crustal magnetization models in magnetic interpretation. *Geophysical Prospecting*, **42**, 677–692.
- REED, T. B., & HUSSONG, D. 1989. Digital Image Processing Techniques for Enhancement and Classification of SeaMARC II Side Scan Sonar Imagery. *Journal of Geophysical Research*, **94-B6**, 7469–7490.
- RICHARDS, W. A. 1982. *Lightness scale from image intensity*. *Applied Optics*, 21.
- ROEST, W. R., VERHOEF, J., & PILKINGTON, M. 1992. Magnetic Interpretation using the 3D analytic signal. *Geophysics*, **57**, 116–125.
- ROSATTI, I., & CARDARELLI, E. 1997. Statistical pattern recognition techniques to enhance anomalies in magnetic surveys. *Journal of Applied Geophysics*, **37**, 55–66.
- RUDERMAN, D. L. 1997. Origins of scaling in natural images. *Vision Res.*, **37**, 3385–3398.
- RUDERMAN, D. L., & BIALEK, W. 1994. Statistics of natural images: Scaling in the woods. *Physical Review Letters*, **73**, 814–817.
- SAGERER, G. 1985. *Darstellung und Nutzung von Expertenwissen für ein Bildanalyse-system*. Springer Verlag, Berlin.
- SCOLLAR, I., WEIDNER, B., & SEGETH, K. 1986. Display of archaeological magnetic data. *Geophysics*, **51**, 623–633.
- SPECTOR, A., & GRANT, F. S. 1970. Statistical Models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, **35**, 293–302.

- SRINIVASAN, M. V., LAUGHLIN, S. B., & DUBS, A. 1982. Predictive coding: A fresh view of inhibition in the retina. *Proceedings of the Royal Society of London*, **B 216**, 427–459.
- STÜMPEL, H. 1996. Geophysikalische Prospektion (1995). *Mitteilungen der Deutschen Orientalischen Gesellschaft*, **128**, 85–93.
- STÜMPEL, H. 1998. Geophysikalische Prospektion (1997). *Mitteilungen der Deutschen Orientalischen Gesellschaft*, **129**, 134–142.
- STÜMPEL, H. 1999. Untersuchungen in Kuşaklı – Geophysikalische Prospektion (1998). *Mitteilungen der Deutschen Orientalischen Gesellschaft*, **129**, 144–153.
- STÜMPEL, H. 2001. Untersuchungen in Kuşaklı – Geophysikalische Prospektion (2000). *Mitteilungen der Deutschen Orientalischen Gesellschaft*, **129**, 144–153.
- SYKES, M. P., & DAS, U. 2000. Directional filtering for linear feature enhancement in geophysical maps. *Geophysics*, **65**, 1758–1768.
- THURSTON, J. B., & SMITH, R. S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip and susceptibility contrast using the SPI (TM) Method. *Geophysics*, **62**, 807–813.
- TOLHURST, D. J. 1992. Amplitude Spectra of Natural Images. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **12**, 229–232.
- TOU, R. C., & GONZALES, J. T. 1974. *Pattern recognition principles*. Addison-Wesley, London, Amsterdam.
- TURCOTTE, D. L. 1992. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- TURCOTTE, D. L. 1997. *Fractals and chaos in geology and geophysics*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- VAN HATEREN, J. H. 1992. Theoretical Predictions of spatiotemporal receptive field of fly LMCs and experimental validation. *Journal of Comparative Physiology*, **A 171**, 157–170.
- VAN SCHAAF, A. 1998. *Natural Image Statistics and Visual Processing*. Dissertation, Graduate School for Behavioural and Cognitive Neurosciences, Groningen, Holland.
- WATERMAN, D. 1986. *A guide to expert systems*. Addison-Wesley Publishing Company.
- WIENER, N. 1964. *Time Series*. MA: MIT Press, Cambridge.

## Danksagung

Meinem Doktorvater Prof. Dr. Rabbel danke ich herzlich für die Vergabe des Themas und die Betreuung dieser Arbeit, für die vielen konstruktiven Vorschläge und für seine Geduld. Nach jeder Besprechung mit ihm fühlte ich mich ein Stück sicherer und er half mir immer wieder, den roten Faden zu finden.

Priv. Doz. Dr. Bohlen danke ich für seine Bereitschaft, Korreferent dieser Arbeit zu werden und für die sorgfältige Durchsicht.

Diese Arbeit wurde durch ein Stipendium der Friedrich-Ebert-Stiftung (FES) finanziert. Ohne diese Unterstützung wäre es für mich sehr schwer gewesen, diese Arbeit zügig abzuschließen. Ein Stipendium der Friedrich-Ebert-Stiftung bedeutet nicht nur finanzielle Unterstützung, sondern in allen Bereichen des Lebens stand die Stiftung mir mit Rat und Tat zu Seite.

Mein besonderer Dank geht an Dr. Christof Müller. Von seiner Neugier, Freude am Entdecken und spontanen Hilfsbereitschaft hat die vorliegende Arbeit sehr viel profitiert. Nachdem ich sein Interesse an meiner Arbeit weckte, war ich nicht mehr 'Einzelgängerin' und hatte ihn, um mich über die Arbeit auszutauschen. Ich war und bin immer noch begeistert von seiner Einstellung, dass Wissenschaft u.a. Spaß am 'Lernen' und besonders 'Lehren' bedeutet.

Vielen Dank an Dr. Harald Stümpel besonders für die wertvollen Ideen am Anfang dieser Arbeit und die Betreuung der geophysikalischen Messungen in der Türkei. Bei Herrn Prof. Dr. Müller-Karpe möchte ich mich herzlich für seine archäologischen Hinweise und Unterstützung bei der Durchführung der Messungen in Kuşaklı bedanken.

Nils Märcklin danke ich für sein Korrekturlesen und den 'Notdienst' aus Norwegen während meine nächtlichen Schichten, besonders bei Latex-Problemen.

Susi, die für mich viel mehr eine Freundin als eine Kollegin ist, hat mich mit ihren konstruktiven Kritiken besonders in der Zusammenschreib-Phase 'wachgerüttelt'. Danke, Susi!

Thies, obwohl du immer viel um die Ohren hattest, hattest du immer mal Zeit, vorbeizuschauen, zuzuhören und aufzumuntern. Danke schön.

Bedanken möchte ich mich auch bei Filiz D., durch sie lernte ich die FES kennen. Bei Bewerbungen für Stipendien (Hauptstudium und Promotion) unterstützte sie mich und machte mir besonders am Anfang großen Mut.

Allen Bewohnern des dritten Stockwerkes danke ich für die schöne Arbeitsatmosphäre und mehr: Said, mit seinem mediterrane Temperament, war für mich ein bisschen Heimat und irgendwie Erfrischung. Hauke, den ich voreilig als 'kühlen Norddeutschen' abstempelte, zeigte, wie warm und herzlich die Norddeutschen eigentlich sind. Im Zimmer 312 von Ulrike und Matthias gab es, egal, wann man reinspazierte, immer ein Tässchen Tee und viele gute Tipps. Außerdem gab es von Matthias einen 'Englisch-Kurs für Geophysiker aus Mediterran-Raum'. Mit meinem gebrochenen Kurdisch konnte ich dem sprachdurstigen Matthias nicht viel weiterhelfen, aber mit Türkisch machte er gute Fortschritte. Und allen anderen, Ercan, Tina, Gudela und Ali, danke ich für die Herzlichkeit und Freundlichkeit.

Danke Michael K., dass Du trotz der großen Entfernung (Wien-Kiel) mir geduldig zugehört und mein Jammern ertragen hast. Und Danke an Nadja und Beatrix, die mich trotz meines 'ständigen' Stress nicht losgelassen haben, einfach bei mir und mit mir waren!

Danke an die FreundInnen: Nurcan Kemal, Serap Markus, Manu, Theatasi-Theater-Gruppe, ai-Türkei-Gruppe und vielen Anderen.

Ich möchte mich auch bei meinen Eltern und besonders meinen Geschwistern (Ali Asker, Fadime, Zarife, Nesimi und Cafer) bedanken. Zor doktora süreci kardeşlikten arkadaşlığa geçiş sürecimizdi.

Meinen Dank an meinen Freund, Lebensgefährten, Veli kann ich schwer in Worte fassen, im Türkischen geht es vielleicht besser. Sevgili Veli, Doktoram birlikteliğimizin şimdiye kadarki sürecine damgasını çok belirgin şekilde vurdu. Yaşamımız bu çalışma etrafında döndü bir de canımızdan çok sevdiğimiz Tijda Xezal'imiz. Bana güvenin, inanılmaz sabrın, yaşama olumlu yaklaşımın ile tüm doktora sürecinde kafanla, yüreğinle hep benimle idin. İyi ki vardın, yanımda idin ve iyi ki varsın ...

# LEBENS LAUF

## Zur Person

FILIZ BILGILI

geboren am 09. Oktober 1969

in Pülümür/ Türkei

Staatsangehörigkeit türkisch,

ledig, ein Kind (Tijda Xezal, geb. 19.04.2002)

## Promotion

Sept. 2000 - Febr. 2005 Promotionstipendiatin der Friedrich-Ebert-Stiftung und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Geowissenschaften, Abteilung Geophysik, der Universität Kiel

## Studium

Jan. 2000 **Diplomthema:** "Kombinierte Anwendung von Georadar, Geoelektrik und Geomagnetik zur Untersuchung eines archäologischen Bauwerkes"

Dez. 1996 - Jan. 2000 Stipendiatin der Friedrich-Ebert-Stiftung (Studienförderung)

Apr. 1996 - Jan. 2000

**Hauptstudium** an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel mit Schwerpunkt Angewandte Geophysik

Apr. 1996 Anerkennung des türkischen Diploms als deutsches Vordiplom

Mai 1995 - Apr. 1996 Deutschkurs an der Universität Köln

Sept. 1989 - Sept 1994 **Studium, (B. Sc.)** an der Universität Istanbul/Türkei, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Fachbereich Geophysik. Thema des türkischen Diploms: "Die Bestimmung der Krustendicke in Ostanatolien mit Hilfe der  $\sin x/x$  Methode "

## Schulbildung

Sept. 1988 **ÖYS** (Prüfung für die Zulassung zu einem Studium in der Türkei)

Sept. 1976 - Juni 1987 **Hochschulreife:** Bursa Atatürk Lisesi/Türkei

## Interessen

Theater (Improvisation), Musik (Singen), Lesen

Kiel, 7. Juni 2005

## **Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, da ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer, als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt übernommenen Gedanken sind kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder veröffentlicht.

Kiel, den 7. Juni 2005

Filiz Bilgili