

Aus Punkten werden Flächen: Vorschlag einer Methodik zur Abgrenzung von Gebieten mit hoher Fundpunktdichte

Von Irmela Herzog

Schlagwörter: Geographische Informationssysteme, Fundverteilungsanalysen, Interpolationsverfahren

Keywords: Geographical Information Systems, analysis of find scattering, interpolation

Mots-Clés: Systèmes d'information géographique (SIG), analyse de la répartition des découvertes, interpolation

Einleitung	198
Visualisierung von Fund- oder Fundstellendichten	199
Der Beispieldatensatz	199
Bewertungskriterien für Rechenverfahren zur Punktdichteschätzung	200
Zwei Verfahren, die die Bewertungskriterien erfüllen	201
Kerndichteschätzung (KDE)	202
Ansätze zur Ermittlung der KDE-Bandbreite	202
Komplexere Kernel-Funktionen	206
KDE- und LEC-Dichteschätzung im Vergleich	207
Die Wahl der optimalen Isolinie	207
Wie deutlich erkennbar ist die Grenzlinie?	209
Ablaufplan zur vorgeschlagenen Methodik	212
Zusammenfassung · Summary · Résumé	213
Literaturverzeichnis	214

Einleitung¹

Die Visualisierung von Fund- oder Fundstellendichten ist eine immer wiederkehrende Aufgabe in der Archäologie. Das Problem besteht darin, für eine gegebene Menge an undifferenzierten Punkten in einer Ebene (z. B. Siedlungen einer Periode) eine zusammenfassende Darstellung zu finden, die die Verteilung der Punkte möglichst gut wiedergibt. Dieser Aufsatz beschäftigt sich mit solchen Methoden zur Punktdichtevisualisierung. Darüber hinaus geht es darum, aufgrund der Dichteverteilung eine möglichst gute Abgrenzung der Punktmenge zu finden. Die Methodik wird am Beispiel von bandkeramischen Siedlungen in Nordrhein-Westfalen vorgestellt: Gesucht ist eine Abgrenzung der Kernsiedlungsgebiete. Entsprechende Karten finden sich in mehreren Publikationen (z. B. LÜNING/STEHLI 1989, 79; PROBST 1991, 249; RENFREW/BAHN 1996, 46). Während bei Lünig und Stehli das Verbreitungsgebiet der bandkeramischen Kultur ganz Deutschland südlich von Düsseldorf einschließt, zeichnet Probst ein kleinräumiger gegliedertes Siedlungsgebiet, das sich im Rheinland und nördlichen Rheinland-Pfalz an den Flüssen Rhein, Ruhr, Lahn und Mosel orientiert und sich nur im Lössgebiet westlich von Köln von den großen Flüssen löst und deutlich nach Belgien hineinreicht. Das von Renfrew und Bahn vorgestellte Siedlungsgebiet umfasst ebenfalls das Lössgebiet westlich von Köln sowie die Flusstäler von Lahn und Mosel, die Rheinschiene jedoch nur punktuell, und die Umgebung der Ruhr fehlt. Anhand des Vergleichs dieser drei Verbreitungskarten wird deutlich, dass verschiedene Autoren aus den vorhandenen Fundstellendaten sehr unterschiedliche Ergebnisse ableiten. Deshalb erscheint es sinnvoll, nach einer nachvollziehbaren und plausiblen Methode zu suchen, um von Fundpunkten auf Siedlungsflächen zu schließen. Allgemeiner gesprochen wird nach Rechenverfahren gesucht, die aus Punkten solche Flächen herstellen, innerhalb derer die Punktdichte ungefähr gleich ist, also immer etwa gleich viele Punkte pro Flächeneinheit vorliegen.

Das Archäologische Zentrum für umwelt- und kulturgeschichtliche Geoinformation Nordrhein-Westfalen (AZG) der Universität zu Köln hat ein Verfahren entwickelt, um aus Fundpunkten auf Siedlungsflächen zu schließen (ZIMMERMANN/WENDT 2003; ZIMMERMANN u. a. 2005). Eine alternative Methode, die auf der Kerndichteschätzung beruht, wurde von der Autorin dieses Aufsatzes vorgestellt (HERZOG 2007a; DIES. 2007b), wobei die Bewertung der Methode aufgrund von simulierten Datensätzen erfolgte. Der vorliegende Beitrag führt die Diskussion um die beste Methode zur Abgrenzung von Fundpunkten weiter, und zwar anhand eines konkreten archäologischen Beispiels, wobei die Möglichkeiten und Grenzen der Kerndichteschätzung im Zentrum stehen.

¹ Die Autorin dankt dem Direktor des LVR-Amtes für Bodendenkmalpflege im Rheinland, Prof. Dr. Jürgen Kunow, für die Anregung und Unterstützung zu dieser Veröffentlichung. Prof. Dr. Andreas Zimmermann und Dr. Thomas Frank von der Universität zu Köln sei für die Zusammenführung der in der Bodendenkmalpflege und am Kölner Institut verfügbaren LBK-Daten gedankt sowie für die Überlassung der Daten für diese Publikation. Ein besonderer Dank gilt Dr. Thomas Frank für Verbesserungsvorschläge und Rückfragen, die zur Weiterentwicklung der Me-

thodik und einer klareren Darstellung anregen. Dr. Axel Posluschny sei an dieser Stelle für Hinweise auf Publikationen zu dem hier diskutierten Thema und Anregungen gedankt. Prof. Dr. Frank Siegmund trug Verbesserungsvorschläge und Literaturhinweise bei, auch ihm ein herzlicher Dank. Frau Prof. Dr. Renate Gerlach, Julia Gerz und Andrea Schenk M. A. sei für Hinweise gedankt, die die Lesbarkeit des Textes erhöhten. Dr. Alden Yépez machte dankenswerterweise auf das Buch von DRENNAN u. a. (2006) aufmerksam.

Visualisierung von Fund- oder Fundstellendichten

Der Beispieldatensatz

Der Beispieldatensatz besteht aus den Fundpunkten der linearbandkeramischen Siedlungsstellen in Nordrhein-Westfalen, wie sie bereits bei ZIMMERMANN u. a. (2005, Abb.10) publiziert wurden, kombiniert mit aktuelleren Daten aus der Datenbank des LVR-Amtes für Bodendenkmalpflege im Rheinland. Beobachtungen von bandkeramischen Fundpunkten, die näher

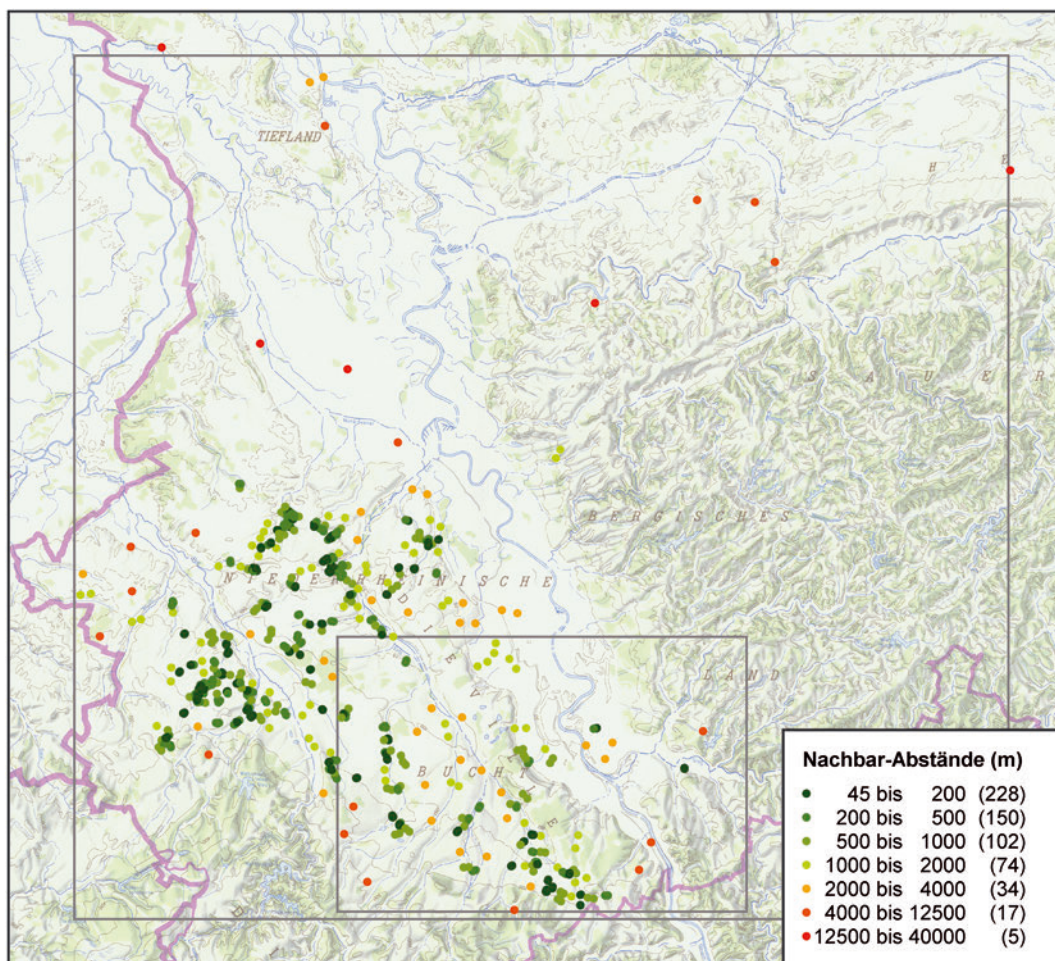


Abb. 1. Linearbandkeramische Fundstellen in Nordrhein-Westfalen. Die Farben der Punkte geben an, wie nah der betreffende Punkt an seinem nächsten Nachbarpunkt liegt. Der große graue Rahmen grenzt den Ausschnitt für *Abbildung 3* ab, der kleine für *Abbildung 4* (I. Herzog auf der Basis der Orohydrografischen Karte des Landesvermessungsamtes Nordrhein-Westfalen mit bandkeramischen Fundpunkten der Bonner Bodendenkmalpflege und des Instituts für Ur- und Frühgeschichte der Universität zu Köln).

als 50 m beisammen lagen, wurden zusammengefasst. So ergaben sich 610 Fundpunkte. Problematisch ist, dass diese Fundstellen vermutlich keine repräsentative Stichprobe der bandkeramischen Siedlungen im Untersuchungsgebiet darstellen, weil nicht alle Gebiete gleich intensiv untersucht wurden und die Auffindungsbedingungen regional variieren. Doch selbst wenn die Stichprobe nur in Teilgebieten repräsentativ ist, sollte sich abzeichnen, ob die Daten mit dem Modell eines abgegrenzten Gebietes überhaupt übereinstimmen. Denkbar wäre ja auch, dass die Besiedlung sich um einen oder mehrere Zentralorte konzentriert und die Siedlungsdichte sukzessive mit der Entfernung vom Zentralort abnimmt. Ein solches Besiedlungsmuster lässt sich beispielsweise für die Hallstattsiedlungen im Mairdreieck nachweisen (HERZOG 2009). Bei einer an einem Zentralort orientierten Verteilung der Fundpunkte ist eine Abgrenzung der Siedlungsareale schwierig, und ein Rückschluss von gut untersuchten Gebieten auf andere, weniger gut untersuchte Bereiche wird ein komplexes Unterfangen.

Um die Verteilung der bandkeramischen Fundpunkte zu untersuchen, wurde für jeden Siedlungspunkt der Abstand zum nächsten Nachbarn berechnet und dieser Wert in einer thematischen Karte dargestellt (*Abb. 1*). Mit dieser einfachen Methode sieht man sehr deutlich, dass es Bereiche unterschiedlicher Punktdichten im Untersuchungsgebiet gibt, doch ein Ausdünnen der Besiedlung zum Rand hin ist nicht nachweisbar, trotz vereinzelter Punkte mit größerem Abstand am Rand der Punktwolke (vgl. Nearest neighbour analysis, z. B. CONOLLY/LAKE 2006, 164–166). Alternativ könnte man hier ein anderes, etwas aufwendigeres Verfahren zur Untersuchung der Fundstellenverteilung wählen (siehe HERZOG 2009): Dabei wird das Histogramm der Triangulationslinien-Längen erstellt und diese Verteilung mit mehreren Simulationsergebnissen für unterschiedliche Besiedlungsmuster verglichen.

Bewertungskriterien für Rechenverfahren zur Punktdichteschätzung

Rechenmethoden zur Visualisierung von Punktdichten haben eine lange Tradition in der Archäologie. Eine Übersicht über verschiedene Verfahren zu diesem Zweck findet sich bei HERZOG (2007a; DIES. 2007b). Darüber hinaus entwickeln Archäologen weitere neue Varianten der bisher bekannten Methoden zur Dichteberechnung (z. B. DRENNAN u. a. 2006; GAUTHIER 2008). Zwei Verfahren zur Visualisierung von Funddichten werden im Folgenden kurz dargestellt, um anhand dieser Beispiele Bewertungskriterien für solche Methoden zu entwickeln: Estelle Gauthier verwendet Dana Tomlins „Map Algebra“, um Punktdichten zu visualisieren (GAUTHIER 2008). Dazu wird ein Gitter über die Fundpunkte gelegt, für jedes Gitterquadrat werden die Punktzahlen ermittelt und danach gewichtete Mittelwerte dieser Punktzahlen aufgrund der Werte in den Nachbarquadraten errechnet. Da immer nur ein quadratischer Bereich um eine Gitterzelle herum betrachtet wird, erscheinen die Dichtezentren annähernd quadratisch; bei einer anderen Orientierung des verwendeten Koordinatensystems werden somit deutlich andere Ergebnisse erzielt. Das erste Beurteilungskriterium ist daher, dass das Ergebnis des Dichteschätzverfahrens unabhängig von der Lage der Koordinatenachsen sein sollte. Weiter hängt das bei Gauthier angewendete Verfahren von der Größe der Gitterquadrate sowie von der Gewichtung der Nachbarzellen ab. Hierbei sind sehr viele Parameter zu wählen, mit denen man das Ergebnis steuern kann. Vorgaben, wie diese Parameter zu wählen sind, fehlen in der Publikation dieses Verfahrens (und in den meisten anderen Texten, die Dichteschätzmethoden vorstellen), sodass bei solchen Verfahren häufig sehr viele Dichtebilder erzeugt werden, von denen dann eines auszuwählen ist; hierbei werden die Auswahlkriterien selten beschrieben.

Deshalb ist ein weiteres Bewertungskriterium, dass das Dichteschätzverfahren mit möglichst wenigen Einstellparametern auskommen sollte. DRENNAN u. a. (2006) rechnen auch mit

gezählten Punkten in einem Gitter; das Gitter ist jedoch so feinmaschig, dass die Nachteile einer solchen Herangehensweise nicht stark ins Gewicht fallen. Die Dichte wird aufgrund der Punktzahlen im Zählgitter nach folgender Methode geschätzt (DRENNAN u. a. 2006, 140–141): Die Punkthäufigkeiten werden interpoliert; solche Interpolationsverfahren kommen normalerweise zur Anwendung, wenn mit Hilfe der Höhen einzelner bekannter Punkte die nicht genau gemessenen Höhenwerte anderer Punkte geschätzt werden sollen (siehe z. B. CONOLLY/LAKE 2006, 94–100). Bei der „inverse distance“-Interpolation werden alle umliegenden bekannten Höhenpunkte innerhalb eines Suchradius für den Schätzwert berücksichtigt und dabei abhängig vom Abstand gewichtet: je geringer der Abstand vom Schätzwert, desto höher das Gewicht. Drennan und seine Koautoren wenden dieses Interpolationsverfahren auf die Punktzahlen in den Quadratgittern an und wählen den Suchradius so groß, dass bei der Berechnung eines Dichtewerts an einem Punkt die Werte von allen Gitterquadranten des gesamten Untersuchungsgebietes berücksichtigt werden. Betrachtet werden „inverse distance“-Exponenten zwischen 4 und 0,001, wobei die Glättung der so berechneten virtuellen Oberfläche bei dem kleinsten Exponenten am größten ist. Die Autoren gehen davon aus, dass mit zunehmender Glättung größere Organisationseinheiten (also höhere Skalenniveaus) sichtbar werden (DRENNAN u. a. 2006, 139). Der Nachteil dieser Methode ist neben der Abhängigkeit von der Orientierung und Größe der Gitterquadrate die Tatsache, dass sich das Ergebnis im Westen des Untersuchungsgebietes ändert, wenn das Gebiet im Osten erweitert wird. Ein weiteres Bewertungskriterium für Verfahren zur Dichteschätzung ist demnach, dass der Dichteschätzwert an einem Punkt nicht durch sehr weit entfernt liegende Punkte beeinflusst werden sollte.

Zwei Verfahren, die die Bewertungskriterien erfüllen

Zwei Verfahren sind bekannt, welche die drei bisher diskutierten Qualitätskriterien (Unabhängigkeit von der Lage der Koordinatenachsen, wenige Steuerungsparameter, lokale Wirksamkeit) erfüllen: Dies ist zum einen die am AZG entwickelte Methode, die hier mit der Abkürzung LEC (Largest Empty Circle/größter leerer Kreis) bezeichnet wird (ZIMMERMANN/WENDT 2003; ZIMMERMANN u. a. 2005), zum anderen die von Baxter und Beardah (BAXTER u. a. 1997) in die Archäologie eingeführte Dichteschätzung KDE (Kernel Density Estimation/Kern-dichteschätzung). Während KDE in den einschlägigen internationalen Lehrbüchern (z. B. WHEATLEY/GILLINGS 2002, 186–187; CONOLLY/LAKE 2006, 175–177; LLOYD 2007, 183–186) als Standardverfahren dargestellt wird, wird in Deutschland die Anwendung des LEC-Ansatzes bevorzugt (z. B. SAILE 2003, 261; EICHFELD 2005, 54; MEURERS-BALKE/KALIS 2006; MISCHKA 2007, 230; POSLUSCHNY 2007).

Dies hat die Autorin des vorliegenden Aufsatzes dazu bewogen, diese beiden Methoden zu vergleichen, und zwar auf der Grundlage von fünf recht unterschiedlichen simulierten Datensätzen (HERZOG 2007a). Der Vorteil von simulierten Datensätzen ist, dass die Dichteverteilung durch die Simulationsparameter genau festgelegt wird und dass diese ideale Dichteverteilung den errechneten Ergebnissen verschiedener Verfahren nicht nur optisch gegenübergestellt werden kann, sondern dass man durch die Ermittlung der Korrelation von idealer und errechneter Dichteverteilung auch ein Maß für die Güte der durch das getestete Verfahren erreichten Annäherung an das optimale Ergebnis erhält. Bei beiden Verfahren (KDE und LEC) hängen die Ergebnisse von der Wahl der Parameter ab, bei KDE ist der einzige Parameter die Bandbreite (s. u.), bei LEC sind es mehrere Parameter, welche die Interpolationsmethode (ordinary Kriging; WHEATLEY/GILLINGS 2002, 195–199; FORTIN/DALE 2005, 165–170; CONOLLY/LAKE 2006, 97–100) steuern. Die Auswertung der Dichteschätzungen für die fünf

simulierten Datensätze zeigte deutlich, dass KDE bei Wahl einer geeigneten Bandbreite eine deutlich bessere Anpassung der so geschätzten Punktdichten an das ideale Ergebnis liefert als die LEC-Methode, wobei nur wenige Versuche mit unterschiedlichen Interpolationsparametern durchgeführt wurden; meist kamen die von der Software vorgeschlagenen Standardwerte zur Anwendung.

Die Dichteschätzung ist jedoch nur der erste Schritt zur Abgrenzung der Siedlungsgebiete. In einem zweiten Schritt werden Isolinien berechnet, von denen diejenige ausgewählt wird, die das Siedlungsgebiet optimal eingrenzt. Aber auch hier werden im Folgenden verschiedene Ansätze diskutiert.

Kerndichteschätzung (KDE)

Kerndichteschätzung kann man am besten mit einem Bild erklären: Man schütte auf jeden Punkt in der Ebene einen gleich großen Sandhaufen (Kernel), dann ist die Punktdichte dort groß, wo viel Sand ist. Sind die Sandhaufen gleichmäßig verteilt und überlappen sie sich, so entsteht eine annähernd glatte Sandoberfläche. Das Ergebnis von KDE hängt vor allem von der Größe, weniger von der Form des Sandhaufens ab. Die Größe des Sandhaufens wird durch den Parameter Bandbreite bestimmt: In der Regel ist die Bandbreite proportional zum Durchmesser des Sandhaufens; eine Ausnahme bilden nur solche Sandhaufenformen, bei denen noch sehr weit vom Zentrum entfernt einzelne Sandkörnchen auftreten können wie z.B. bei der zweidimensionalen Normalverteilung.

Ansätze zur Ermittlung der KDE-Bandbreite

In einer Untersuchung mit fünf simulierten Daten erwiesen sich die aus der Fachliteratur bekannten Faustregeln zur Einstellung der Bandbreite als wenig brauchbar (HERZOG 2007a). Wie oben erwähnt, besteht für simulierte Daten die Möglichkeit, das ideale Ergebnis einer Dichteschätzung zu erzeugen, da ja die Dichteverteilung durch die Simulationsparameter vorgegeben ist. Für elf simulierte Datensätze wurde die optimale Bandbreite ermittelt, indem für verschiedene Bandbreiten die Korrelation der Dichteschätzung mit der idealen Dichteverteilung berechnet wurde. Die Bandbreite, welche die höchste Korrelation erzielt, wird als optimal angesehen.

Die optimale Bandbreite wurde nun mit anderen Kennzahlen verglichen, die sich aus dem Datensatz direkt, ohne Kenntnis der Simulationsparameter, errechnen lassen. Als Kennzahlen wurden der Median der Abstände zum jeweils nächsten Nachbarn sowie der Median und der Modalwert der LEC-Radiuswerte gewählt (Definitionen von Median bzw. Modalwert findet man in jedem einführenden Statistiklehrbuch, aber auch in WHEATLEY/GILLINGS 2002, 103). Der Modalwert wurde aus Histogrammen abgelesen, wobei in nicht so eindeutigen Fällen mehrere Histogramme mit unterschiedlichen Klassenbreiten zum Vergleich erstellt wurden. Um Histogramme und die damit verbundenen bekannten Probleme zu vermeiden, kann man eindimensionale Dichteschätzungen durchführen (wobei sich hier wieder die Frage nach der Bandbreite stellt) oder die Verteilungsfunktion betrachten. Für die elf simulierten Datensätze ergibt sich eine Korrelation zwischen Kennzahl und Bandbreite von mehr als 0,9, wobei der Modalwert der LEC-Radiuswerte mit 0,92 am schlechtesten und der Median der LEC-Radiuswerte mit 0,94 am besten abschneidet (*Abb. 2*).

Eine Korrelationsrechnung könnte jedoch zu verzerrten Ergebnissen führen, denn die Korrelationsgerade verläuft nicht notwendigerweise durch den Nullpunkt. Der Zusammen-

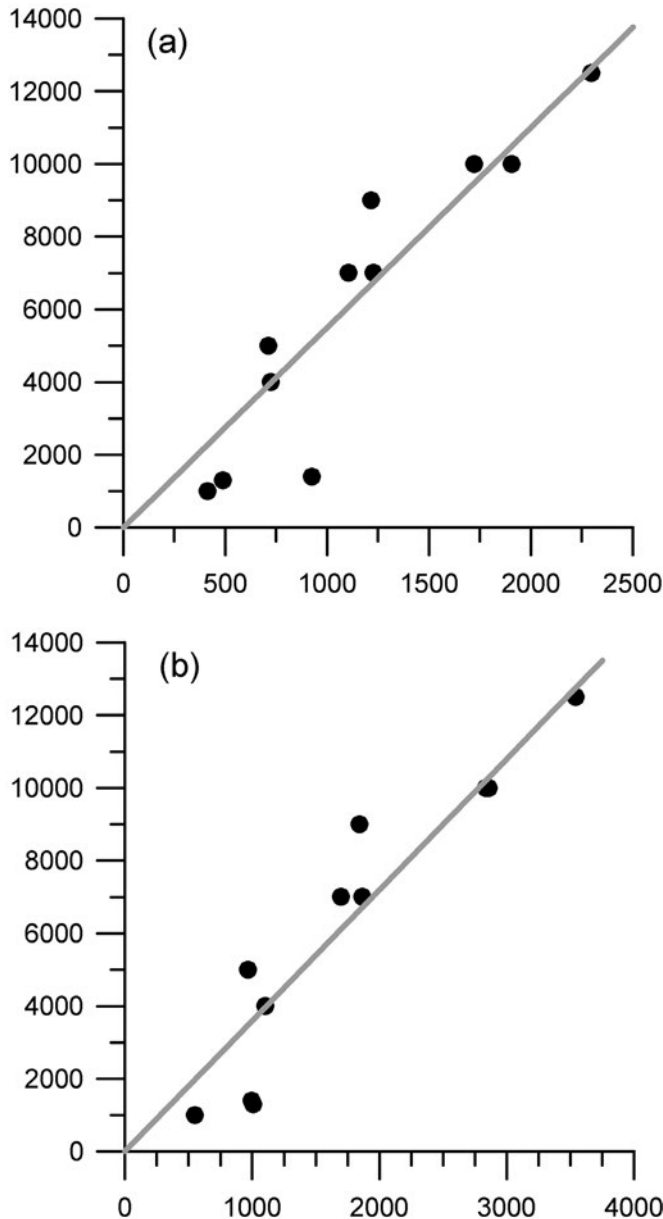


Abb.2. Der Zusammenhang zwischen (a) dem Median der nächsten Nachbarn bzw. (b) dem Median der LEC-Radien und der experimentell ermittelten optimalen Bandbreite für elf simulierte Datensätze, mit Regressionsgeraden durch den Nullpunkt (I. Herzog).

hang zwischen Kennzahl und Bandbreite darf sich nicht verändern, wenn man die Maßeinheit wechselt, etwa von Meter auf Kilometer. Durch geeignete Wahl der Maßeinheit kann für jedes der elf Beispiele erreicht werden, dass Bandbreite und Kennzahl der Null beliebig nahe kommen, und daher muss die Korrelationsgerade in diesem Fall durch den Nullpunkt verlaufen. Als Qualitätsmaß für die Annäherung der mit einem geeigneten Faktor multiplizierten Kenn-

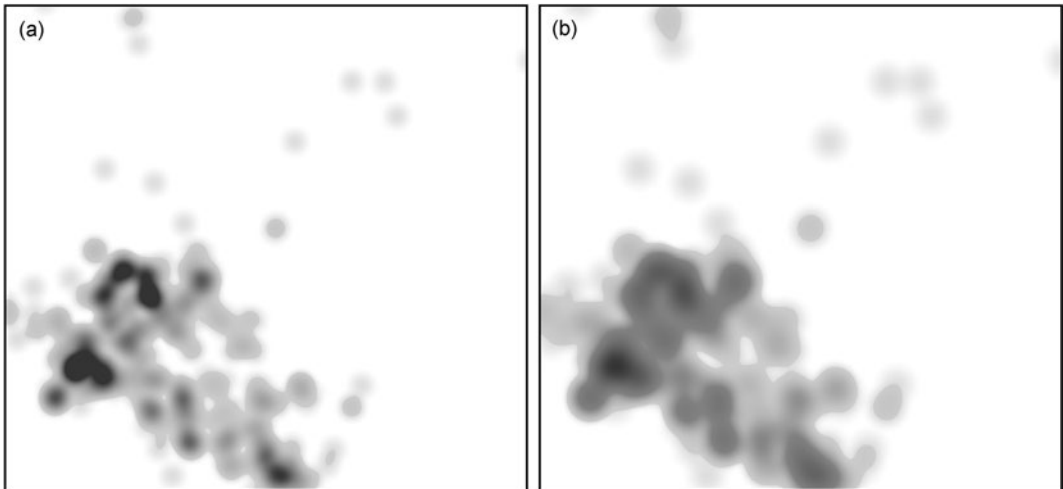


Abb. 3. Kerndichteschätzung der Fundstellendichte für den Datensatz aus *Abbildung 1* innerhalb des großen grauen Rahmens mit einer Bandbreite von (a) 5 km und (b) 7 km (I. Herzog).

zahl an die Bandbreite dient der Chi²-Abstand (CONOLLY/LAKE 2006, 123–127): Je kleiner dieser Wert, desto besser die Schätzung durch die Kennzahl. Nach diesem Kriterium liefert der LEC-Modalwert das beste Ergebnis mit einem Chi²-Abstand von 0,08, gefolgt von dem LEC-Median (Abstand 0,14) und dem Median der Entfernungen zum nächsten Nachbarn (Abstand 0,19). Wenn man die Berechnung der Chi²-Abstände jedoch auf die sieben simulierten Datensätze beschränkt, deren zugrunde liegende Modellvorstellung mit der für die Bandkeramik-Daten am besten übereinstimmt, dann ändert sich die Rangfolge. Am besten schneidet die Distanz zum nächsten Nachbarn ab, danach folgt der LEC-Median, und der LEC-Modalwert liefert mit deutlichem Abstand das schlechteste Ergebnis. Insgesamt ist die Menge der untersuchten Datensätze zu klein, und die Unterschiede in der Korrelation und der Chi²-Abstände sind zu gering, als dass man daraus schließen könnte, welche Kennzahl zu bevorzugen ist.

Die Steigung der Korrelationsgeraden gibt an, mit welchem Faktor die Kennzahl zu multiplizieren ist, um die optimale Bandbreite zu schätzen. Der Faktor beträgt beim Median der Abstände zum jeweils nächsten Nachbarn 6,1 und beim Median der LEC-Radien 3,9. Wenn man jedoch berücksichtigt, dass die Regressionsgerade durch den Nullpunkt verlaufen soll, so werden geringere Steigungswerte berechnet: 5,5 für den Median der Abstände zum nächsten Nachbarn sowie 3,6 für den Median der LEC-Radien. Die Steigungsberechnung wurde unter Auslassung von je einem Datensatz (Jackknifing) wiederholt, um die Stabilität der Ergebnisse abzuschätzen. Dann bewegten sich die Steigungswerte für die LEC-Radien zwischen 3,50 und 3,67, der Steigungswert für den Median der Abstände zum jeweils nächsten Nachbarn liegt im Intervall von 5,33 bis 5,70.

Für den weiter oben vorgestellten Beispieldatensatz der bandkeramischen Fundstellen beträgt der Median der Abstände zum jeweils nächsten Nachbarn 320 m, woraus sich eine Bandbreite von etwa 1760 m ($= 320 \times 5,5$) schätzen lässt. Der Median der LEC-Radien hat den Wert 1226 m, nach dem oben Gesagten lässt sich daraus eine Empfehlung für eine Bandbreite von 4414 m ($= 1226 \times 3,6$) ablesen. Dies ist ein Indiz dafür, dass die Verteilung der bekannten bandkeramischen Fundpunkte komplexer ist als die der simulierten Daten. Damit wird die Wahl der passenden Bandbreite schwierig. HÄRDLE u. a. (2004) empfehlen, die Bandbreite auf-

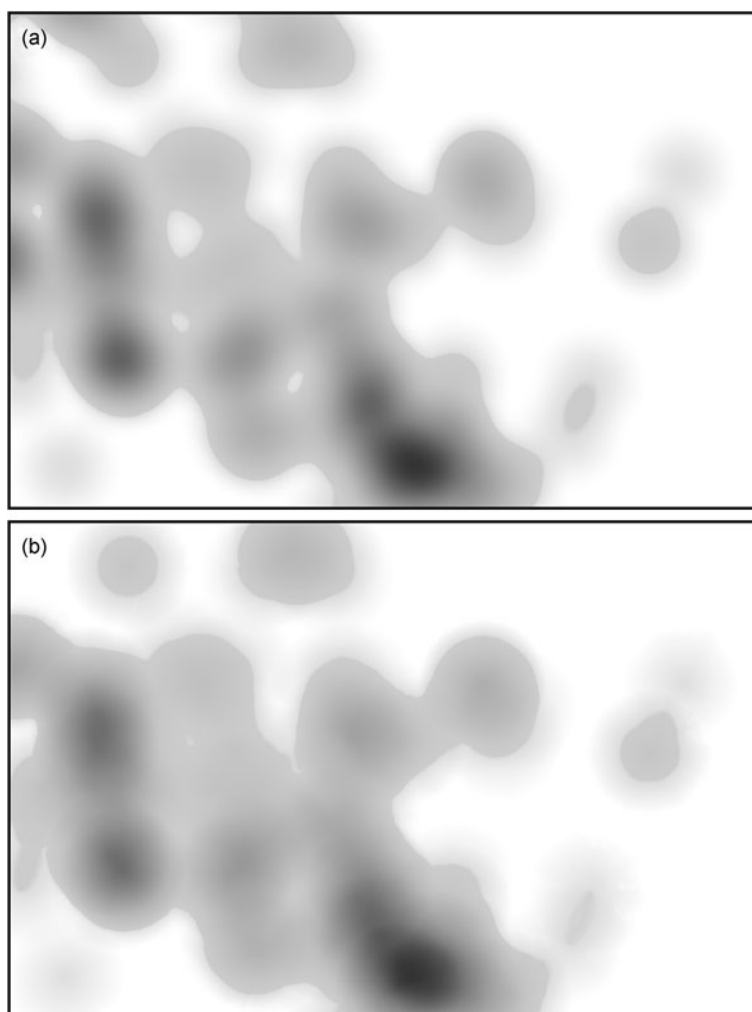


Abb.4. Südöstlicher Ausschnitt (kleiner grauer Rahmen) aus *Abbildung 1*. (a) KDE-Ergebnisse mit einer Bandbreite von 5 km, wobei in (b) der Kostenaufwand für Fußgänger zur Bewältigung unterschiedlicher Hangneigungen berücksichtigt wurde (I. Herzog).

grund des optischen Eindrucks des Dichteschätzungsergebnisses zu wählen. Tatsächlich ist das Bild für eine Bandbreite von 5 km immer noch recht unruhig. Eine Wahl von 7 km scheint dem Datensatz besser angepasst zu sein (*Abb. 3*). Diese Argumentation geht von der Modellvorstellung aus, dass es Siedlungsareale mit ungefähr gleicher Siedlungsdichte gibt, die sich von den weitgehend siedlungsleeren Gebieten abgrenzen lassen. Außerdem wird angenommen, dass die besiedelten Gebiete eher große zusammenhängende Bereiche bilden als kleine Siedlungsschwerpunkte und dass die Grenze zwischen unbesiedelten und besiedelten Bereichen eher in langen Bögen verläuft als in einer ausgeprägten Zickzacklinie. Durch die Erhöhung der Bandbreite von 5 auf 7 km werden eher große zusammenhängende Bereiche mit einem einfacheren Grenzverlauf erkennbar.

Vielleicht wäre für diesen Datensatz eine lokal angepasste Bandbreite die am besten geeignete Lösung (LLOYD 2007, 184–185): Dabei werden Areale mit hoher Punktdichte weniger geglättet als solche mit nur wenigen Punkten. Lloyd schlägt vor, zunächst die Punktdichte mit der Standardbandbreite zu berechnen und dann die lokale Bandbreite aufgrund dieser Dichteschätzung zu wählen.

Komplexere Kernel-Funktionen

In der bisherigen Darstellung wurde angenommen, dass der Sandhaufen (Kernel) rotations-symmetrisch ist, sodass seine Größe durch einen Parameter, nämlich die Bandbreite, eindeutig bestimmt wird. Denkbar wären jedoch auch Sandhaufen mit elliptischen statt kreisförmigen Grundrissen. In der archäologischen Anwendung sind z. B. bei Siedlungen in einem Flusstal die Siedlungsräume durch den Fluss einerseits und die Höhenzüge andererseits begrenzt, so dass man die Einflusszone einer Siedlung eher oval am Flusstal entlang als kreisförmig modellieren würde. In der statistischen Fachliteratur werden meist solche allgemeineren Sandhaufen betrachtet, deren Form durch Orientierung und Länge der Hauptachse sowie der Länge der Nebenachse der Ellipse festgelegt wird. Damit geht jedoch ein wesentlicher Vorteil der Kerndichteschätzung verloren, denn nun ist das Ergebnis nicht mehr durch nur einen Parameter steuerbar.

Wenn schon eine nichtrotations-symmetrische Kernelform gewählt wird, dann sollte sich dieser Kernel dem jeweiligen Gelände anpassen, sodass z. B. die Hangneigung und die Flussläufe berücksichtigt werden. In diesem Modell wird der Sandhaufen als Einflussbereich einer Fundstelle gedeutet. In unmittelbarer Umgebung einer Fundstelle ist der Einfluss groß und lässt mit zunehmender Entfernung nach. Dies kann man mit Hilfe von Kostenoberflächen (siehe dazu z. B. WHEATLEY/GILLINGS 2002, 159–162; CONOLLY/LAKE 2006, 215–225) realistischer modellieren als mit dem traditionell (der Einfachheit halber) untersuchten, kreisförmigen Einflussbereich. *Abbildung 4* zeigt ein Beispiel für eine solche Modellierung, die allein auf der Hangneigung beruht. Problematisch ist, dass hier das moderne Geländereief den Berechnungen zugrunde liegt, das in den letzten Jahrhunderten und gerade auch in moderner Zeit erhebliche Veränderungen erfahren hat.

Eine Geländerekonstruktion ist aufwändig und musste deshalb für diesen Aufsatz entfallen. Die Fokussierung auf den südöstlichen Bereich des Arbeitsgebiets erfolgte, um die Tagebaubereiche auszuschließen, in denen die alte Geländeoberfläche tiefgreifend zerstört wurde. Das KDE-Ergebnis für eine Bandbreite von 5 km in *Abbildung 4a* ignoriert das Geländereief, während in *Abbildung 4b* der Einflussbereich um eine Siedlung die Punkte umschließt, die ein Fußgänger mit dem Energieaufwand für eine Flachstrecke von 5 km erreichen kann. Dabei verringert sich der Einfluss vom Zentrum der Siedlung bis zum Rand des Einflussbereichs sukzessive. Ein Vergleich der beiden Ergebnisse zeigt Unterschiede im Detail, so z. B. eine bessere Anbindung des nordwestlichen Zipfels der größten Siedlungskonzentration in diesem Ausschnitt. Insgesamt ist jedoch für das Rheinland auf Grundlage des heutigen Geländereiefs und bei Modellierung des Kostenaufwands für Fußgänger – aber nicht für Fahrzeuge – nur ein geringer Unterschied im Ergebnis zwischen der das Relief berücksichtigenden und der Standard-KDE-Methode zu erwarten. Doch in einem stärker durch das Relief geprägten Gebiet, wie etwa den Alpen, liefert nur eine kostenangepasste Dichteschätzung zuverlässige Ergebnisse. Eine genauere Beschreibung des geländeabhängigen KDE-Verfahrens erfolgt in einer separaten Publikation.

KDE- und LEC-Dichteschätzung im Vergleich

Das am AZG entwickelte LEC-Verfahren kann nicht in einfacher Weise mit den im Institut für Ur- und Frühgeschichte der Universität zu Köln verwendeten geografischen Informationssystemen (IDRISI, MapInfo/Vertical Mapper) erzeugt werden. Auch das KDE-Verfahren wird nicht direkt von dieser Software-Ausstattung unterstützt, die von Vertical Mapper 3.1 angebotene „Kernel Smoothing“-Funktion liefert keine KDE-Ergebnisse. Andere Softwarepakete (z. B. R, siehe BADDELEY 2008; ArcGIS Spatial Analyst) bieten KDE an, waren aber zu Beginn der hier vorgestellten Untersuchungen der Autorin nicht verfügbar. Deshalb wurde ein Programm geschrieben, das KDE- und LEC-Ergebnisse direkt herstellt (HERZOG 2007a; DIES. 2007b), wobei die Option für lokal angepasste Bandbreiten bisher nicht enthalten ist.

Folgende Vorteile können für KDE aufgeführt werden: Bei simulierten Daten ergab sich eine deutlich bessere Anpassung der so geschätzten Dichteverteilung an das ideale Ergebnis als mit dem oben beschriebenen LEC-Verfahren. Ursache für das schlechtere Abschneiden der LEC-Methode ist unter anderem, dass manchmal Gebiete mit hoher Punktdichte in einer Richtung durch einen Bereich ohne Punkte erweitert werden (vgl. z. B. ZIMMERMANN u. a. 2005, Abb. 12, wo die aus der Lage römischer Fundstellen abgeleitete Fläche mehr als die Hälfte der rechtsrheinischen Gemeinde Königswinter abdeckt, obwohl in dieser Gemeinde keine römischen Fundpunkte verzeichnet sind). Wenn die Fundstellen auf unterschiedlichen Skalenniveaus jeweils andere Verteilungsmuster aufweisen, so besteht die Möglichkeit, ähnlich wie bei dem von DRENNAN u. a. (2006) beschriebenen Verfahren, durch die Wahl einer entsprechenden Bandbreite die Verteilung innerhalb eines Skalenniveaus herauszuarbeiten. Außerdem kann KDE in einfacher Weise erweitert und an die Datenlage angepasst werden: Neben der oben vorgestellten Anpassung der Sandhaufenform an das Gelände können auch Fundpunkte unterschiedlicher Größenordnungen berücksichtigt werden, z. B. Siedlungen mit unterschiedlichen Häuseranzahlen, indem Sandhaufen entsprechender Größe modelliert werden.

Die Wahl der optimalen Isolinie

Bei der vom AZG vorgeschlagenen Methode wird nach der Dichteschätzung die „optimale Isolinie“ ausgewählt, um die Siedlungsgebiete abzugrenzen. Zur Auswahl der Isolinie wird das Kriterium „Flächenzuwachs“ verwendet. Wie von HERZOG (2007a) beschrieben, hat dieses Kriterium den Nachteil, dass auch bei zufällig verteilten Siedlungspunkten eine Grenze gefunden wird, die 70–85 % der Punkte einschließt. Deshalb wurde nach alternativen Möglichkeiten zur Identifikation der Grenzlinie gesucht. Zu erwarten ist, dass es an einer Grenzlinie eine deutliche Änderung in der mittleren Zahl der Punkte pro Flächeneinheit gibt. Es liegt daher nahe, diese Kennzahl pro Streifen zwischen zwei aufeinander folgenden Isolinien zu berechnen und nach Werten zu suchen, bei denen sich die Kennzahl sprunghaft ändert. Mit solchen Homogenitätsuntersuchungen konnten in Einzelfällen gute Ergebnisse erzielt werden. Problematisch wird es jedoch, wenn in einem Streifen zwischen zwei Isolinien nur wenige oder gar keine Punkte zu finden sind, weil durch die kleine Anzahl kein statistisch zuverlässiges Ergebnis zu erzielen ist. Um die Daten auf Homogenität zu testen, wurden 53 Isolinien für das KDE-Ergebnis mit Bandbreite 7 km erstellt (Abb. 6). *Abbildung 5a* zeigt für jeden Streifen zwischen zwei benachbarten Isolinien die eingeschlossene Fläche pro Punkt (y-Achse), wobei die Isolinienstreifen nach abnehmender Dichte sortiert sind. Die x-Achse gibt die Anzahl der insgesamt von der Isolinie eingeschlossenen Punkte wieder. Man kann von diesem Diagramm ablesen, wie mit zunehmender Punktzahl und abnehmender Dichte die Fläche pro Punkt ansteigt. Der letzte Übergang von 47 km² pro Punkt auf eine Fläche von 1617 km² pro Punkt

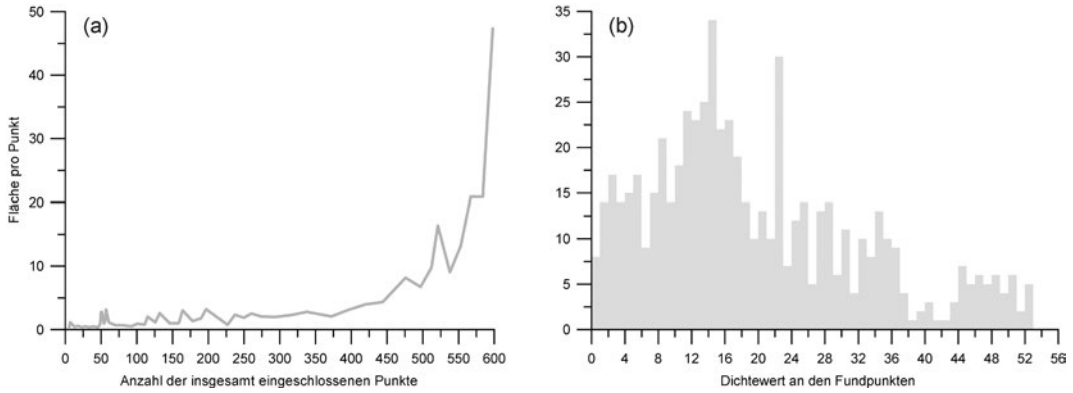


Abb. 5. Grafiken zur Identifikation der optimalen Isolinie. (a) Kurve, die die Anzahl der von einer Isolinie eingeschlossenen Punkte mit der Fläche pro Punkt vergleicht. (b) Histogramm der Dichteverteilung an den Punkten (I. Herzog).

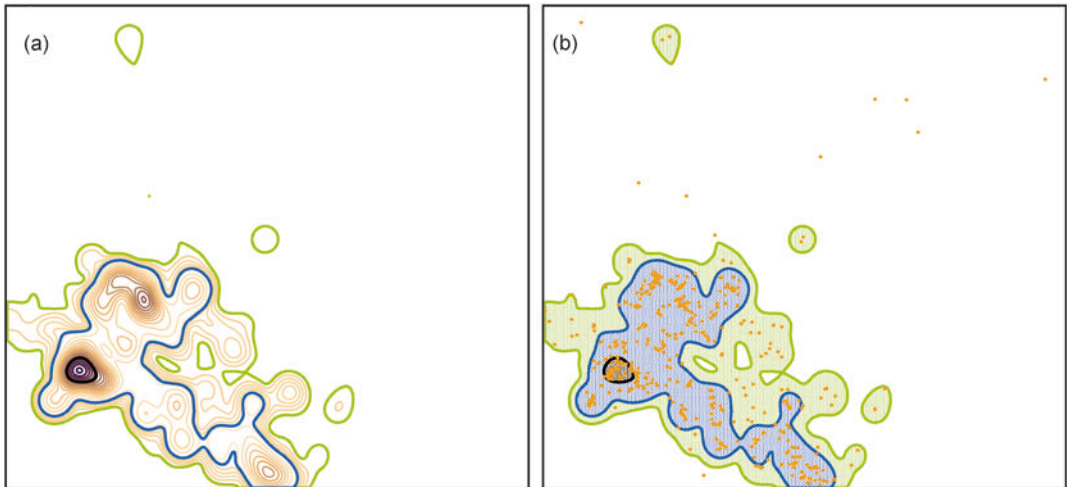


Abb. 6. Isolinien der Kerndichteschätzung von *Abbildung 3b*. (a) 53 Isolinien gleicher Abstände, aus Darstellungsgründen wird innerhalb der blauen Isolinie nur jede dritte Isolinie gezeigt, ausgewählte Linien sind farbig markiert. (b) Die ausgewählten, durch Isolinien abgegrenzten Gebiete mit Punktverteilung (I. Herzog).

wurde in dieser Grafik weggelassen, weil sonst die kleineren Veränderungen nicht mehr sichtbar wären. Diese Übergangslinie ist ein Kandidat für die äußere Grenze des Siedlungsgebietes, sie umschließt 598 der 610 Punkte auf einer Gesamtfläche von 3181 km² (*Abb. 6* grüne Isolinie). Zu beachten ist aber auch die Linie, die 521 Punkte und eine Fläche von 1514 km² umfasst, weil danach ein Einbruch im Homogenitätsdiagramm zu verzeichnen ist, gefolgt durch einen steilen Anstieg (*Abb. 6* blaue Isolinie).

Eine weitere Alternative, die es häufig erlaubt, Zonen unterschiedlicher Punktdichten zu identifizieren, ist die Analyse der Verteilung der Dichtewerte an den Fundpunkten (HERZOG 2009). Dazu werden Histogramme der Dichte an den Punkten untersucht, lokale Minima ent-

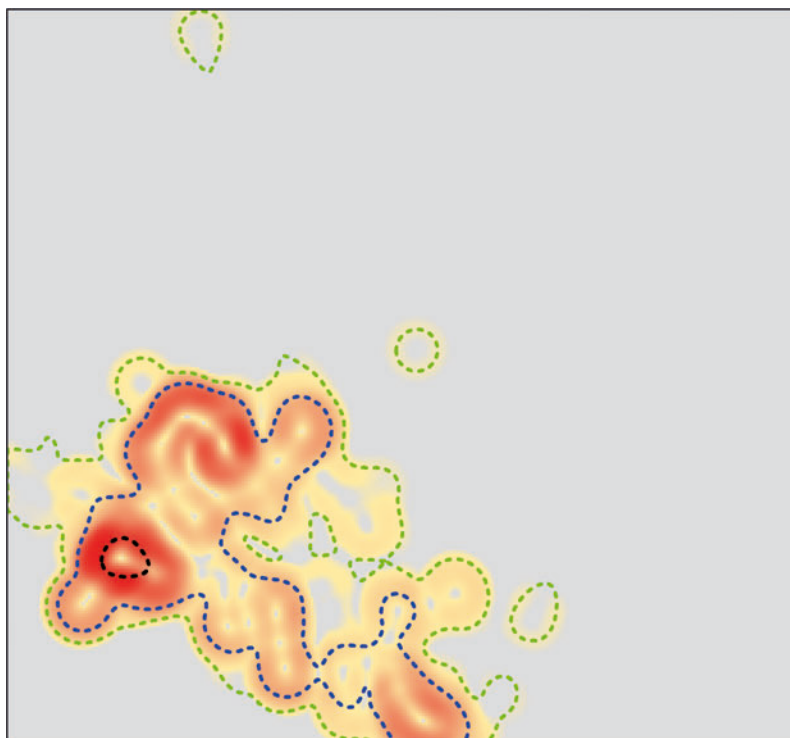


Abb.7. Die Steigungsverteilung in der KDE-Dichtekarte (Steigungswerte von grau über gelb nach rot zunehmend) im Vergleich mit den vorher in *Abbildung 6* besonders herausgestellten, jetzt gepunktet dargestellten Isolinien.

sprechen den Werten für Grenzlinien zwischen Gebieten unterschiedlicher Dichte. Bei simulierten Daten konnten mit dieser Methode gute Ergebnisse erzielt werden. *Abbildung 5b* zeigt das Histogramm der Dichteverteilung für den Beispieldatensatz. Es gibt ein lokales Minimum bei dem Wert 6, das sich auch bei allen probeweise durchgeführten Veränderungen der Klassenbreite zeigte. Diesem Wert entspricht die bereits nach dem Homogenitätskriterium identifizierte Isolinie, die 521 Punkte umschließt. Ein weiteres lokales Minimum ist nicht genau lokalisierbar im Bereich zwischen 38 und 43, wobei die Isolinie mit dem Wert 38 das Gebiet größter Punktdichte umschließt (*Abb. 6* schwarze Isolinie).

Wie deutlich erkennbar ist die Grenzlinie?

Da in der archäologischen Forschung Rechenmethoden zur Identifikation von Grenzen recht selten angewendet werden, aber in der Ökologie Verfahren hierfür entwickelt wurden und regelmäßig zum Einsatz kommen (JACQUEZ u. a. 2000; FORTIN / DALE 2005, 184–211), liegt die Idee nahe zu prüfen, ob die in der Ökologie verwendeten Ansätze auch bei archäologischen Daten eingesetzt werden können. Eine Standardmethode ist Wombling (WOMBLE 1951). Dabei wird nach Orten gesucht, an denen sich die Daten besonders stark ändern, also der Unterschied zwischen den Eigenschaften zweier nahe beieinander liegender Punkte besonders hoch

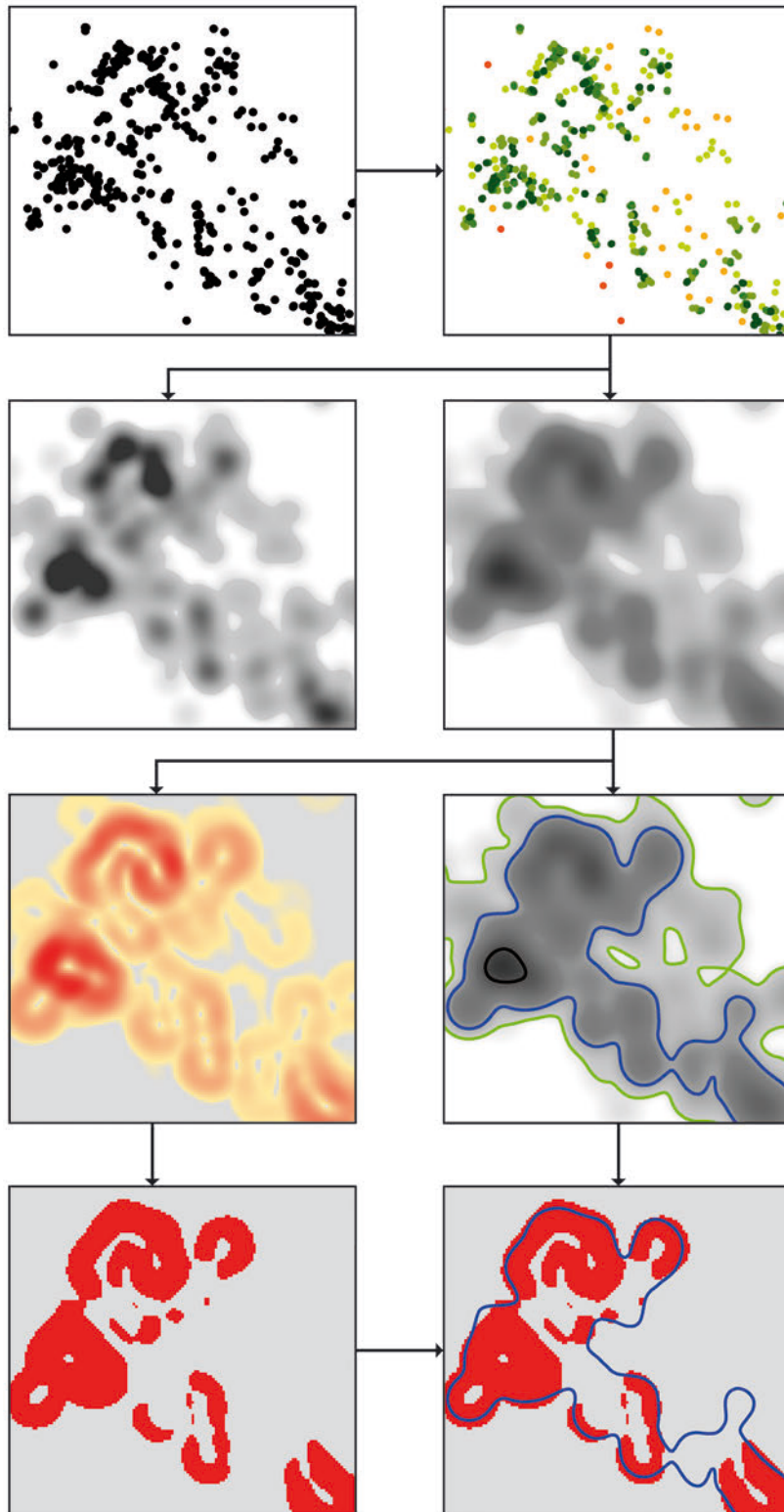


Abb. 8. Ablaufplan der empfohlenen Vorgehensweise zur Identifikation der Grenzlinie (I. Herzog).

ist. Womble berücksichtigt mehrere Eigenschaften der von ihm betrachteten Punkte, doch die Methode funktioniert natürlich auch, wenn nur ein Messwert an jedem Punkt vorliegt. In der hier vorgestellten Anwendung von Wombling sind dies die Ergebnisse der Dichteschätzung, die man sich als eine Geländeoberfläche vorstellen kann. Auf dieser Oberfläche finden sich Anhöhen dort, wo viele Punkte nahe beieinander liegen (auch das Kriging von LEC-Werten erzeugt ein solches „Geländemodell“ der Dichteverteilung). Die Hangneigung ist ein Maß dafür, wie stark sich die Höhenlagen zweier benachbarter Punkte auf der Geländeoberfläche unterscheiden; d. h. eine steile Hangneigung im KDE-Geländemodell bedeutet, dass hier ein Kandidat für einen Grenzpunkt vorliegt.

Das Praktische an dieser Vorgehensweise ist, dass geografische Informationssysteme in der Regel über die Möglichkeit verfügen, solche Hangneigungsberechnungen durchzuführen. Außerdem kann man diese Methode verwenden um zu prüfen, ob sich überhaupt zusammenhängende Grenzlinien ergeben. Bei ökologischen Fragestellungen wird meist die Faustregel verwendet, dass ein Punkt dann als Grenzpunkt angesehen wird, wenn der Steigungswert in den oberen 5–10 % des Wertebereichs liegt. Dies ist kritisiert worden, weil dieser Schwellenwert willkürlich gesetzt ist (JACQUEZ u. a. 2000) und so auch bei zufällig verteilten Punkten Grenzen gefunden werden. Bei simulierten Daten konnte zumindest für das KDE-Geländemodell sehr leicht durch präzise Beobachtung ein Schwellenwert festgelegt werden. Bei Datensätzen mit deutlichen Änderungen in der Punktdichte (z. B. Grenzen zwischen Gebieten mit einfacher und vierfacher Punktdichte pro Flächeneinheit) ergaben sich gute Übereinstimmungen zwischen den tatsächlichen und den so ermittelten Grenzen. Schwieriger wird die Situation, wenn es eine Zone mit doppelter Punktdichte zu identifizieren gilt. Dann kann nur ein Teil der Grenze zwischen den Zonen durch die eben beschriebene Methode rekonstruiert werden, hinzu kommen falsche Grenzverläufe an zufälligen Punkthäufungen.

Mit diesem vom „Wombling“ abgeleiteten Verfahren können zwei Ziele erreicht werden: Zum einen dient es der Überprüfung, ob überhaupt ein klarer Grenzverlauf erkennbar ist, d. h. ob die Auswahl einer optimalen Isolinie sinnvoll ist. Wenn sich eine annähernd zusammenhängende Grenze ergibt, kann die Isolinie der Dichteschätzung als Grenzlinie ausgewählt werden, die diesen Grenzverlauf am besten nachzeichnet. Vorteil dieses Ansatzes ist außerdem, dass deutlich wird, an welchen Stellen die Grenzlinie eindeutig und an welchen sie nur unklar erkennbar ist. Auf eine explizite Berechnung der Grenzlinie aufgrund der Dichteunterschiede, wie sie bereits MONMONIER (1973) beschreibt, wird deshalb verzichtet. *Abbildung 7* zeigt die Steigungen für die KDE-7-km-Dichteschätzung des in diesem Aufsatz betrachteten Beispieldatensatzes aus der Bandkeramik. Die blaue Isolinie verläuft im Nordwesten entlang deutlich erkennbarer Zonen hoher Steigung, auch im Südosten zeigt sich ein klar abgegrenztes Teilgebiet. In den meisten anderen Bereichen ist nur streckenweise eine klare Grenze aus den Steigungswerten ablesbar. Dieses Ergebnis steht in engem Zusammenhang mit der Auswertung von *Abbildung 1*: Für Gebiete, in denen viele nächste Nachbarn nahe und keine Punkte mit größerem Abstand eingestreut sind, lässt sich eine Grenze gut festlegen. Variiert die Punktdichte ohne erkennbare Regeln, ist eine solche Festlegung nur mit größerer Unsicherheit möglich.

Ablaufplan zur vorgeschlagenen Methodik

Zusammenfassend zeigt *Abbildung 8* einen Ablaufplan, der die empfohlene Vorgehensweise zur Identifizierung der Grenzlinie für Punktverteilungen mittels KDE darstellt; Grundlage bildet die Karte mit der Verteilung der Punkte. Zunächst wird für jeden Punkt der nächste Nachbar berechnet und damit eine erste Visualisierung der Punktdichte erzeugt, indem die Punkte je nach Nähe zum Nachbarn eingefärbt werden. Damit werden zwei Ziele verfolgt: Zum einen wird so überprüft, ob die Punktverteilung dem Modell einer abgrenzbaren Punktwolke überhaupt entspricht, zum anderen kann aufgrund des Medianwertes der Abstände zu den nächsten Nachbarn die Bandbreite für die KDE geschätzt werden. Im nächsten Schritt (2. Zeile des Ablaufplans) werden mehrere KDE-Ergebnisse mit unterschiedlicher Bandbreite errechnet. Es wird durch optischen Vergleich der Ergebnisse dasjenige ausgewählt, das der Modellvorstellung am ehesten entspricht (im Beispiel das rechte). Auf Basis der ausgewählten Kerndichteschätzung werden zwei unterschiedliche Zwischenergebnisse erstellt (3. Zeile des Ablaufplans): Das Hangneigungsbild, das zeigt, wo Grenzen zu erwarten sind (links) und die Isolinien, die Kandidaten für die Grenzlinien sind (rechts). Letztere wurden nach dem Homogenitätskriterium oder aufgrund der Dichteverteilung an den Punkten ausgewählt. Schließlich wird das Hangneigungsbild klassifiziert (4. Zeile), um die gut erkennbaren Grenzen deutlicher hervorzuheben. Nach JACQUEZ u. a. (2000) ist es üblich, alle Flächen mit einer Hangneigung im oberen Wertebereich (5 bis 10 % des gesamten Areals) als Grenzelemente anzusehen. Dieses Ergebnis wird mit dem Isolinien-Layer kombiniert. So lässt sich deutlich erkennen, wo die Isolinie zuverlässig den Bereich hoher Dichte abgrenzt.

Zusammenfassung · Summary · Résumé

ZUSAMMENFASSUNG Anhand der bandkeramischen Siedlungsdaten aus Nordrhein-Westfalen wird eine Methodik zur Abgrenzung von Gebieten hoher Fundpunktdichte vorgestellt. Dafür sind zwei Schritte erforderlich: Zunächst wird die Fundstellendichte berechnet, danach erfolgt die Auswahl der Grenze, die ein Gebiet homogener Fundpunktdichte einschließt. Zur Berechnung der Fundstellendichte gibt es mehrere Methoden, deshalb werden Qualitätskriterien hergeleitet, um solche Verfahren zu beurteilen. Diese Kriterien erfüllen zwei Methoden: die Kerndichteschätzung und die Methode des größten leeren Kreises. Die Vorgehensweise und Variationsmöglichkeiten bei der Kerndichteschätzung werden näher erläutert. Dann werden zwei Möglichkeiten vorgestellt, um die Grenzlinie zu finden. Die Plausibilität eines Grenzverlaufs wird mit einem vom Wombling abgeleiteten Verfahren untersucht.

SUMMARY A methodology for delimiting regions of high find spot density is presented and applied to Linear Pottery settlement data from North Rhine-Westphalia. The approach consists of two steps: First the site density is calculated, afterwards the dividing line is selected that delineates regions of homogeneous find density. Several methods are available for site density calculation, for this reason quality criteria are developed to evaluate these approaches. These criteria are fulfilled by two methods, kernel density estimation and the largest empty circle method. The basic principles and some extensions of kernel density estimation are explained. Afterwards, two methods are presented to identify the dividing line. A procedure derived from Wombling is used to investigate the plausibility of the border found. (D. W.-W.)

RÉSUMÉ On présente ici une méthodologie basée sur les données des habitats rubanés de la Rhénanie-du-Nord-Westphalie ayant pour but de délimiter les territoires à haute densité de points de trouvaille. Deux étapes sont nécessaires pour y parvenir: On calcule tout d'abord la densité des sites, puis l'on choisit la ligne qui délimite un territoire avec une densité homogène de points de trouvaille. Plusieurs méthodes existant pour le calcul de la densité des sites, on a développé des critères qualitatifs en vue de leur évaluation. Deux méthodes répondent à ces critères: l'estimation par noyau et la méthode du « plus grand cercle vide ». Le procédé et les variations possibles de l'estimation par noyau sont expliqués plus en détail. Puis, l'on présente deux possibilités de déterminer la limite territoriale dont la plausibilité est examinée à l'aide d'une méthode dérivée du wombling. (Y. G.)

Literaturverzeichnis

- BADDELEY 2008**
A. BADDELEY, Analysing spatial point patterns in R. Workshop Notes, Febr. 2008 (Clayton South 2008). <http://www.csiro.au/files/files/piph.pdf> (21. 06. 2009).
- BAXTER u. a. 1997**
M. J. BAXTER/C. C. BEARDAH/R. V. S. WRIGHT, Some archaeological applications of kernel density estimates. *Journal Arch. Scien.* 24, 1997, 347–354.
- CONOLLY/LAKE 2006**
J. CONOLLY/M. LAKE, Geographical information systems in archaeology (Cambridge 2006).
- DRENNAN u. a. 2006**
R. D. DRENNAN/D. W. QUATTRIN/CH. E. PETERSON, Distributional patterns: resources, communities, and politics. In: R. D. Drennan (Hrsg.), *Prehispanic chiefdoms in the Valle de la Plata*, Vol. 5. Regional settlement patterns. Univ. Pittsburgh Mem. Latin Am. Arch. 16 (Pittsburgh, Bogotá 2006) 99–154.
- EICHFELD 2005**
I. EICHFELD, Die vorrömische Eisenzeit im Landkreis Rotenburg (Wümme). Eine landschaftsarchäologische Untersuchung mit Hilfe von GIS. *Arch. Ber. Landkr. Rotenburg (Wümme)* 12 (Oldenburg 2005).
- FORTIN/DALE 2005**
M.-J. FORTIN/M. DALE, Spatial analysis. A guide for ecologists (Cambridge 2005).
- GAUTHIER 2008**
E. GAUTHIER, Consumption and circulation of prehistoric products in Europe: Characterization of spatial evolutions by using map algebra. Spatial analysis and modelling of ancient social-economic systems. In: A. Posluschny/K. Lambers/I. Herzog (Hrsg.), *Layers of perception. Proceedings of the 35th Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference*, Berlin, Germany, April 2–6, 2007. *Koll. Vor- u. Frühgesch.* 10 (Bonn 2008) 375.
- HÄRDLE u. a. 2004**
W. HÄRDLE/M. MÜLLER/S. SPERLICH/A. WERWATZ, Multivariate kernel density estimation. In: *Nonparametric and semiparametric models. An introduction* (Berlin, Kaiserslautern, Madrid 2004). <http://fedc.wiwi.hu-berlin.de/xplore/ebooks/html/spm/spmhtmlnode18.html> (21. 6. 2009).
- HERZOG 2007a**
I. HERZOG, Testing GIS methods by means of simulation. Detecting and describing find spot densities. In: W. Börner/S. Uhlirz (Hrsg.), *Workshop 11, Archäologie und Computer. Kulturelles Erbe und Neue Technologien*, 18.–20. 10. 2006. PDF-Datei auf CD-Rom, Phoibos-Verlag (Wien 2007).
- HERZOG 2007b**
I. HERZOG, Simulationsexperimente zur Analyse von Siedlungsdichten. In: St. Burmeister/H. Derks/J. von Richthofen (Hrsg.), *Zweiundvierzig (Festschr. Michael Gebühr zum 65. Geburtstag)*. *Internat. Arch. – Stud. Honoraria* 28 (Rahden/Westf. 2007) 3–14.
- HERZOG 2009**
I. HERZOG, Analyse von Siedlungsterritorien auf der Basis mathematischer Modelle. In: D. Krause/O. Nakoinz, *Kulturraum und Territorialität: Archäologische Theorien, Methoden, Fallbeispiele*. *Kolloquium des DFG-SPP 1171 Esslingen* 17.–18. Januar 2007. *Internationale Archäologie 8 – Arbeitsgemeinschaft, Symposium, Tagung, Kongress Bd. 13* (Rahden/Westf. 2009) 71–86.
- JACQUEZ u. a. 2000**
G. M. JACQUEZ/S. MARUCA/M.-J. FORTIN, From fields to objects: A review of geographic boundary analysis. *Journal Geogr. Systems* 2000,2, 221–241.

- LLOYD 2007
CH. D. LLOYD, Local models for spatial analysis (Boca Raton 2007).
- LÜNING/STEHLI 1989
J. LÜNING/P. STEHLI, Die Bandkeramik in Mitteleuropa: von der Natur- zur Kulturlandschaft. Spektrum Wiss., April 1989, 78–90.
- MEURERS-BALKE/KALIS 2006
J. MEURERS-BALKE/A. J. KALIS, Landwirtschaft und Landnutzung in der Bronze- und Eisenzeit. In: J. Kunow/H.-H. Wegner (Hrsg.), Urgeschichte im Rheinland. Jahrb. Rhein. Ver. Denkmalpflege u. Landschaftsschutz 2005 (Köln 2006) 267–276.
- MISCHKA 2007
D. MISCHKA, Methodische Aspekte zur Rekonstruktion prähistorischer Siedlungsmuster. Landschaftsgenese vom Ende des Neolithikums bis zur Eisenzeit im Gebiet des südlichen Oberrheins. Freiburger Arch. Stud. 5 (Rahden/Westf. 2007).
- MONMONIER 1973
M. S. MONMONIER, Maximum-difference barriers: An alternative numerical regionalization method. Geogr. Analysis 5,3, 1973, 245–261.
- POSLUSCHNY 2007
A. POSLUSCHNY, From landscape archaeology to social archaeology. Finding patterns to explain the development of Early Celtic “Princely Sites” in Middle Europe. In: J. T. Clark/E. Hagemeister (Hrsg.), Digital discovery. Exploring new frontiers in human heritage. CAA 2006 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 34th Conference, Fargo, United States, April 2006 (Budapest 2007) 131–141.
- PROBST 1991
E. PROBST, Deutschland in der Steinzeit. Jäger, Fischer und Bauern zwischen Nordseeküste und Alpenraum (München 1991; Sonderausgabe München 1999).
- RENFREW/BAHN 1996
C. RENFREW/P. BAHN, Archaeology. Theories, methods and practice (London 1996).
- SAILE 2003
TH. SAILE, Settlement dynamics in the Wetterau. In: J. Kunow/J. Müller (Hrsg.), Symposium Landschaftsarchäologie und geographische Informationssysteme, Archäoprognose Brandenburg I. Forsch. Arch. Land Brandenburg 8 (Wünsdorf 2003) 259–269.
- WHEATLEY/GILLINGS 2002
D. WHEATLEY/M. GILLINGS, Spatial technology and archaeology. The archaeological applications of GIS (London, New York 2002).
- WOMBLE 1951
W. H. WOMBLE, Differential systematics. Science Vol. 114, 1951, 315–322.
- ZIMMERMANN/WENDT 2003
A. ZIMMERMANN/K.-P. WENDT, Wie viele Bandkeramiker lebten 5060 v. Chr.? Techniken Geographischer Informationssysteme zum Schätzen von Bevölkerungsdichten. Arch. Inf. 26,2, 2003, 491–497.
- ZIMMERMANN u. a. 2005
A. ZIMMERMANN/J. RICHTER/TH. FRANK/K. P. WENDT, Landschaftsarchäologie II: Überlegungen zu Prinzipien einer Landschaftsarchäologie. Ber. RGK 85, 2004, 37–95.

Anschrift der Verfasserin
Irmela Herzog