

**Die Beschreibung der Korngestalt mit Hilfe
der Fourier-Analyse:
Parametrisierung der morphologischen
Eigenschaften von Sedimentpartikeln**

**The characterization of grain shape using
Fourier-Analysis:
Parameterization of morphological
properties of sedimentary particles**

Michael Diepenbroek

Michael Diepenbroek

Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung
Postfach 120161
Am Handelshafen
D-2850 Bremerhaven

Die vorliegende Arbeit ist die inhaltlich unveränderte Fassung einer Dissertation,
die 1992 dem Fachbereich Geowissenschaften der Freien Universität Berlin
vorgelegt wurde.

INHALTSVERZEICHNIS

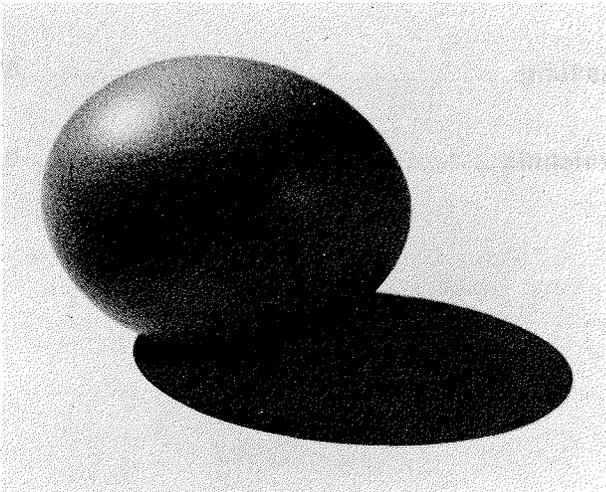
Summary	I
Einleitung	1
1. Die Korngestalt	
1.1. Definition der Korngestalt.....	2
1.2. Bedeutung der Korngestalt.....	2
1.3. Beschreibung der Korngestalt.....	4
1.4. Die verschiedenen Ansätze zur Beschreibung der Korngestalt	
1.4.1. Geometrische Methoden.....	7
1.4.2. Visuelle Methoden.....	8
1.4.3. Komplexe Beschreibungen der Korngestalt.....	8
1.4.3.1. Analyse von Umrißlinien.....	8
1.4.3.1.1. Verteilungen von Umrißelementen.....	10
1.4.3.1.2. Die fraktale Dimension der Umrißlinie.....	11
1.4.3.1.3. Fourier-Transformation der Umrißlinie.....	12
1.4.3.2. Analyse von Querschnittsflächen.....	13
1.5. Zusammenfassende Bewertung der verschiedenen Ansätze.....	13
2. Die Fourier-Analyse	
2.1. Einführung.....	15
2.2. Allgemeine Darstellung der Fourier-Analyse.....	15
2.3. Anwendung der Fourier-Analyse auf Umrißlinien von Partikeln.....	17
2.3.1. Ermitteln des Schwerpunkts.....	19
2.3.2. Berechnung der Polarkoordinaten.....	20
2.3.3. Das Zentrierproblem.....	21
2.3.4. Berechnung der Fourierkoeffizienten.....	23
2.3.5. Fehlerquellen.....	24
2.3.5.1. Mehrfachradien (double values).....	24
2.3.5.2. Fehler durch die Digitalisierung (Pixelrauschen).....	25
2.3.5.3. Aliasing.....	28
2.3.5.4. Verzerrung der Partikelumrisse durch optische Geräte.....	28
2.3.6. Wahl der Frequenzbreite und Anzahl der Umrißpunkte.....	28

3.	Die Kornrundung	
3.1.	Bedeutung der Rundung	
3.1.1.	Rundung und Transport	30
3.1.2.	Der Einfluß der Rundung auf das dynamische Verhalten von Partikeln.....	31
3.1.3.	Der Zusammenhang zwischen der Rundung und den Packungseigenschaften von Partikeln.....	32
3.2.	Bisherige Arbeiten	33
3.3.	Wie rund ist rund - ein neues Konzept.....	38
3.3.1.	Die Krümmungen.....	38
3.3.2.	Die Positionen.....	38
3.3.3.	Rundung und Sphärizität - das Problem der ultimatsten Gestalt.....	39
3.3.4.	Abschließende Bemerkung.....	41
3.4.	Die Ableitung der Rundung aus dem Fourier-Spektrum	
3.4.1.	Zusammenhang zwischen Rundung und Fourier-Spektrum	41
3.4.2.	Berechnung der Rundung	
3.4.2.1.	Summation des normalisierten Amplitudenspektrums.....	45
3.4.2.2.	Elimination des Sphärizitätseinflusses.....	46
3.4.2.3.	Der Digitalisierereffekt (Pixelrauschen).....	48
3.4.2.4.	Die Rundungsskala	48
3.5.	Tests und Anwendungsfälle	
3.5.1.	Beispiele experimenteller Abrasion von Geröllen - Kuenen.....	48
3.5.2.	Die visuellen Rundungsvergleichstabellen von Krumbain und Russel-Taylor.....	50
3.5.3.	Gerölle im Fluß- und Küstentransport, Kalabrien/Italien.....	52
3.5.4.	Alluviale Gerölle des Death Valley/Californien - Der Einfluß der Projektionsebene von Geröllen auf den Rundungswert.....	55
3.6.	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.....	60
4.	Die Kornform	
4.1.	Definition und Bedeutung der Kornform.....	61
4.2.	Kornformparameter und die Erfassung der Kornform.....	62
4.3.	Ableiten der Kornform aus dem Fourier-Spektrum	
4.3.1.	Berechnen der Hauptachsen einer Projektion	64
4.3.2.	Berechnen der Form aus mehreren Projektionsebenen	65
4.4.	Anwendungsfälle	
4.4.1.	Gerölle im Fluß- und Küstentransport, Kalabrien/Italien.....	66
4.4.2.	Alluviale Gerölle des Death Valley/Californien	68

4.5.	Schätzen der Form aus der maximalen Projektionsfläche.....	70
4.6.	Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse.....	76
5.	Die Klassifizierung der Korngestalt mit Fourier-Spektren	
5.1.	Bedeutung und Überblick zu den bisherigen Arbeiten.....	77
5.2.	Provenance und Transport in den Amplitudenspektren.....	78
5.3.	Abschließende Bemerkung.....	81
6.	Vom Analogbild zum Binärbild - die Bildverarbeitung.....	82
6.1.	Die Hardware.....	82
6.2.	Überblick zu den bildverarbeitenden Verfahren.....	83
6.3.	Digitalisierung der Bildvorlagen.....	83
6.4.	Schwellwertbildung zur Binärbilderzeugung.....	83
6.5.	Umriß und Linienverfolgung.....	84
6.6.	Umrißverzerrung - Der Einfluß der Optik.....	85
6.7.	Periphere Hilfsmittel und Techniken.....	85
6.7.1.	Leuchttisch.....	86
6.7.2.	Leuchtkasten zur photographischen Erfassung beliebiger Geröllprojektionen.....	86
6.7.3.	Rechnergesteuerter XY-Tisch.....	87
6.7.4.	Mikroskop.....	88
6.7.5.	Manuelles Digitalisieren mit der Maus oder auf dem Digitalisiertisch.....	88
	Zusammenfassung.....	89
	Literaturverzeichnis.....	91

Danksagungen

Ich danke Prof. Dr. Hillert Ibbeken für die Anregung der Idee zu dieser Arbeit sowie für die Unterstützung beim Aufbau der Bildverarbeitung. Dr. Heinz Burger half mit mathematischem Fachwissen. Bernhard Medger und seine Mitarbeiter führten die feinmechanischen Arbeiten für den XY-Tisch aus. Die Geländekampagne im Death Valley/Californien wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft und die California State University in Hayward ermöglicht. Dr. Detlef Warnke vom Geological Department in Hayward gab organisatorische Unterstützung. Bei den Vorarbeiten der Kampagne und den Arbeiten im Gelände halfen Alexander Bartholomä, Götz Hirschberg und Petra Bausch. Mit Alexander Bartholomä verbinden mich überdies drei Jahre fruchtbarer Zusammenarbeit in allen Fragen der EDV.



Summary

In 1880 Sorby recognized shape as a property of sedimentary particles. Since then many workers have attempted to describe this property. The meaning of shape is complex. In one respect, particle shape reflects part of the history of origin and alteration of particles; on the other hand it influences the dynamics and chemical behaviour of particles as well as the packing of particle aggregates.

Because particle shape is irregular, their quantification immediately causes difficulties. For practical reasons measurement of shape has usually been restricted to a few, simple geometrical elements. The shortcomings inherent in such restrictions has led to a plethora of methods and sometimes to vehement discussions. These methodological shortcomings have prevented a wider application of existing procedures in sedimentological investigations. For example, there exists almost as many empirical as methodological papers addressing roundness, which is a main aspect of grain shape.

In the early seventies modern image analysis techniques ended the practical difficulties associated with shape measurement. Powerful computers made it possible to quantify particle shape using numerous parameters. Subsequent investigations concentrated on the classification of particle shape with complex descriptors. One such descriptor, the Fourier-Transformation of particle outlines, has proved to be very useful. As a result, investigations into the significance of the complex information describing sedimentological relationships and processes have been neglected. There have been only few attempts to derive poignant parameters from the complex descriptors that reflect these relationships and processes. The aim of the present paper is to address these topics.

Various techniques, from simple histograms of radii or chords to fractal 'harmonics', have been used for the quantitative description of particle outlines. All of them, except the Fourier-Transformation, have serious disadvantages in one way or another. The Fourier-Analysis used in this study guarantees a complete, concise, and scale-, rotation-, and reflexion-invariant description of particle outlines.

From the amplitude spectra, which result from the Fourier-Transformation, the parameters of form and roundness are derived. To evaluate roundness, a new concept was developed, which is oriented more precisely to the physical processes effective during sediment transport. Not only are the curvatures of the morphological elements of the particle, but also the position of these elements essential criteria to be evaluated. Prominent parts of a particle are more easily abraded than protected ones. Both curvatures and the position of curvatures are compared to an ellipsoid, which is assumed to be the ultimate shape attained during the process of rounding. The ellipsoid, at the same time, represents the aspect of form or sphericity. The distinction between roundness and sphericity is retained because there is no evidence that sphericity changes significantly during transport, except through selection.

The separation into the shape components form and roundness is first done by calculating an ellipse that is approximated to the particle's outline. Then, the ellipse's amplitude spectrum is subtracted from the particle's spectrum. The remaining amplitudes contain the information on roundness, while the ellipse is used for the calculation of the main axes that are relevant for the form of the particle. With the ellipse approximation, measurement of form or sphericity is adjusted to leading concepts on these parameters as given by Krumbein (1941) and Sneed & Folk (1958). At present, the ellipse approximation is attainable only with image analysis techniques. In order to obtain all three main axes of a particle, a device is necessary that allows for the digitization of optional projection planes. If only the maximum projection planes are available, then the missing short axes can be estimated by using the grain size distribution of the sample. The procedure, detailed in this study, can be improved with further investigations.

The methods for measuring form and roundness were tested with both experimental particles and alluvial, fluvial and beach pebbles.

The results from the roundness investigations demonstrate that it is henceforth possible to detect differences in roundness in the range of one percent of the total scale by only a few hundred measurements. It was also shown that roundness results are dependant on the projection plane used for measurement. Further investigations are necessary to assess the cause of this phenomena.

The measurements of form prove that the form properties of particle populations can be accessed more clearly with the ellipse approximation. When using conventional devices the roundness properties of particles interfere with the accurate measurement of form. This artefact is removed when using the ellipse approximation.

A critical review of previous papers on particle shape analysis is also presented. Most authors claim that the amplitude spectra holds information on the provenance of sediments. This assumption, however, is not confirmed by the results in these papers. The present empirical investigation proves that the amplitude spectrum is characterized to a large part by abrasion. The provenance information diminishes during successive transport. Only harmonic two, which reflects the elongation and hence the aspect of sphericity, is not affected. To use the Fourier Transformation of particle outlines as a provenance guide, the phase angles are needed as an additional information.

The essential information contained in the amplitude spectra is that of form and roundness and - using this information - these shape properties are quantified in a way that will give them greater significance in sedimentological investigations.

EINLEITUNG

Seit Sorby (1880) die Gestalt als Merkmal von Sedimentpartikeln erkannte, widmeten sich viele Arbeiten der Beschreibung und der Bedeutung dieses Merkmals. Wegen der Irregularität von Korngestalten bereitete die Beschreibung und insbesondere die Quantifizierung des Merkmals von Anfang an Schwierigkeiten. Vor allem aufgrund praktischer Erwägungen beschränkten sich die meisten Verfahren auf die Messung weniger und einfacher geometrischer Elemente. Die Defizite, die zwangsläufig mit einer solchen Beschränkung verbunden sind, führten zu zahlreichen methodischen Vorschlägen und teilweise auch heftigen Diskussionen. Nicht zuletzt verhinderten die methodischen Defizite die breite Verwendung der Verfahren in sedimentologischen Untersuchungen. So gibt es z.B. zum Thema Rundung beinahe genauso viele methodische wie empirische Arbeiten.

Mit dem Aufkommen moderner Bildverarbeitungsverfahren zu Anfang der siebziger Jahre wurden die praktischen Hindernisse beseitigt. Leistungsstarke Rechner ermöglichten nun die Quantifizierung von Partikelgestalten mit einer Vielzahl von Parametern. Die entstehenden Arbeiten konzentrierten sich auf die Klassifizierung von Korngestalten mit komplexen Beschreibungen. Als besonders brauchbar erwies sich dafür die Fourier-Transformation von Partikelkonturen. Untersuchungen über die Bedeutung der komplexen Information für sedimentologische Zusammenhänge und Prozesse traten dabei jedoch ebenso in den Hintergrund wie das Bemühen, aus der komplexen Beschreibung prägnante Parameter abzuleiten, die eben diese Zusammenhänge und Prozesse gezielt abbilden. Einen Beitrag dazu soll die hier vorliegende Arbeit leisten.

Das erste Kapitel beschäftigt sich zunächst mit der Bedeutung der Korngestalt. Anschließend werden die Möglichkeiten zur Beschreibung der Korngestalt charakterisiert und bewertet. Im zweiten Kapitel erfolgt dann eine detaillierte Beschreibung der Fourier-Analyse als Mittel zur Quantifizierung von Partikelkonturen. Das dritte Kapitel befaßt sich mit der Ableitung der Kornrundung aus den Fourier-Koeffizienten. Dieser Abschnitt nimmt in der Arbeit relativ viel Platz ein, weil das Thema Rundung nicht nur methodisch sondern auch konzeptionell völlig neu bearbeitet wird. Das vierte Kapitel beschreibt die Berechnung der Kornform aus den Fourier-Koeffizienten. Hier wird der Versuch unternommen, die Methode an die Konzeption der wichtigsten Kornformparameter anzupassen. Im fünften Kapitel werden die bisherigen Arbeiten zur Klassifizierung von Kornpopulationen einer kritischen Prüfung unterzogen. Die Untersuchungen werden durch empirische Beispiele ergänzt. Im sechsten Kapitel schließlich werden die für diese Arbeit verwendeten bildverarbeitenden Methoden und die technischen Hilfsmittel beschrieben.

1. DIE KORNGESTALT

1.1. Definition der Korngestalt

Die Gestalt (griech. morphé; engl. shape) umfaßt alle Eigenschaften der räumlichen Begrenzung eines Partikels. Meloy (1977) bezeichnet diese Eigenschaften als morphologische Charakteristika eines Partikels. Ähnlich sieht Barrett (1980) die Gestalt als externe Morphologie des Partikels. Der Begriff Morphologie bedeutet Lehre von der ganzheitlich-dynamischen Gestalt und ist insofern treffend, als damit der genetisch-dynamische Bezug von Partikeln betont wird, d.h. wesentlich sind besonders solche Eigenschaften der räumlichen Begrenzung, welche die Entwicklung, Veränderung und Beweglichkeit der Partikel wiedergeben.

In der Literatur wird der Begriff Gestalt unterschiedlich benutzt und nur in wenigen Arbeiten finden sich explizite Begriffsdefinitionen: Wadell (1932), Valetton (1955) und Smalley (1967) beziehen die Gestalt nur auf das Achsenverhältnis eines Partikels. Schneiderhöhn (1954) und Sneed & Folk (1958) dagegen bezeichnen das Achsenverhältnis mit dem Begriff Form. Barrett (1980) sieht die Form - neben der Rundung und der Oberflächentextur - als eine von drei Eigenschaften der Gestalt. Auch Füchtbauer (1988, S. 78) führt diese drei Eigenschaften an, vertauscht jedoch die Begriffe Gestalt und Form. Köster (1964, S. 142) und Griffiths (1967) schließlich gebrauchen die Begriffe Gestalt und Form synonym und meinen damit lediglich das Achsenverhältnis der Partikel. In dieser Arbeit ist die Gestalt der umfassendere Begriff und die Form eine wesentliche Eigenschaft der Gestalt.

1.2. Bedeutung der Korngestalt

Partikel spielen nicht nur in der Sedimentologie, sondern auch in anderen Wissenschaftsbereichen und besonders in vielen industriellen Prozessen eine wichtige Rolle. Ein Großteil industrieller Produkte liegt auf der einen oder anderen Fertigungsstufe in Pulverform vor. Hinzu kommt, daß auch land- und bauwirtschaftlich genutzte Böden im wesentlichen Partikelaggregate sind.

Merkmale eines Partikels sind neben den Materialeigenschaften die Größe und die Gestalt. Die Gestalt ist in mehrfacher Hinsicht bedeutsam. Ein wesentlicher Teil der Bedeutung entsteht daraus, daß die räumliche Begrenzung eines Partikels gleichzeitig die Kontaktfläche zur Umgebung des Partikels darstellt. Diese Fläche ist physikalischen und chemischen Kräften ausgesetzt, deren Wirkung außer von den beteiligten Materialien und Kräfteigenschaften von den Gestalteeigenschaften der Partikel bestimmt wird (Abb. 1-1).

Als erstes ist der Einfluß der Gestalt auf das dynamische Verhalten von Partikeln in Flüssigkeiten und Gasen zu nennen. Wenn ein Partikel von einem Fluid umströmt wird, entsteht um den Partikel herum eine gestaltspezifische Druckverteilung. Die resultierenden Kräfte bestimmen die mögliche Bewegung des Partikels. An einer flachen Scheibe z.B., die mit der maximalen Projektionsfläche schräg zur Strömungsrichtung gestellt wird, entsteht eine asymmetrische Druckverteilung. Diese erzeugt ein Drehmoment, welches die Scheibe mit ihrer maximalen Projektion senkrecht zur Strömung

Die Korngestalt

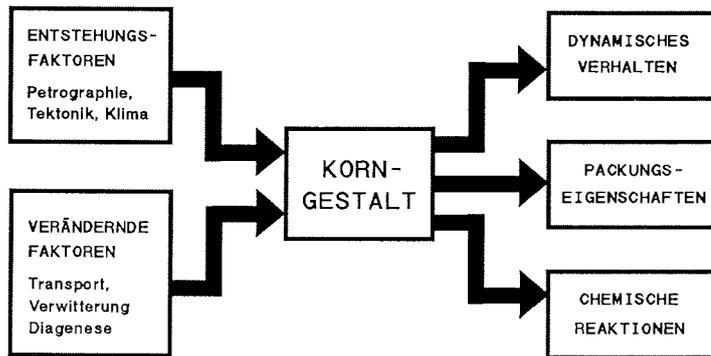


Abb. 1-1. Die Bedeutung der Korngestalt.

zu stellen sucht. Da die maximale Projektionsfläche der Strömung den größten Widerstand bietet, haben niedersphärische Partikel im Vergleich zu kugeligen Partikeln höhere Sinkgeschwindigkeiten und zeigen auch ein anderes Transportverhalten (ausgenommen der glaziale Transport, der in dieser Arbeit nicht behandelt wird). Weitere Modifikationen erfährt das dynamische Verhalten von Partikeln durch Ecken, Kanten, Einbuchtungen, Oberflächenrauigkeiten etc.. Neben der Korngröße ist die Korngestalt daher ein wesentlicher Faktor für den selektiven Transport von Sedimenten.

Wichtig ist die Gestalt desweiteren bei chemischen Prozessen. Reaktionen zwischen Festkörpern und Fluiden laufen an den Partikeloberflächen ab. Wenn die Oberflächen im Vergleich zum Volumen der Partikel groß sind, dann ist die Reaktionsgeschwindigkeit höher als bei kleinen Verhältnissen von Oberfläche zu Volumen. Hinzu kommt, daß besonders der feinststrukturelle Bereich der Oberfläche die für die Auflösung oder den Aufbau der Partikel notwendige Energie beeinflusst. Bemerkbar macht sich die Beschaffenheit der Oberfläche bei Umkristallisationen während der Diagenese und bei der Gesteinsverwitterung. Auffälliges Beispiel ist die weitgehende Resistenz von polierten Kornoberflächen gegen chemische Verwitterung.

Auch die Packungseigenschaften von Partikelaggregaten sind zum Teil von der Gestalt der Partikel abhängig. Von den Packungseigenschaften ist zunächst die Packungsart zu nennen. Diese kann regel- oder unregelmäßig sein. Zu beobachten ist, daß irreguläre Partikel eher regellos gepackt sind, während bei gut sortierten und gerundeten Sedimenten kubische oder hexagonale Packungen auftreten können. Anisotrope Gefüge können durch die Einregelung flacher Partikel entstehen, entweder bei der Ablagerung oder durch Druckverformung. Eine weitere Packungseigenschaft ist die Festigkeit, die bei nichtkohäsiven Sedimenten stark von der Gestalt abhängig ist. Die für die Festigkeit maßgebenden Reibungskräfte zwischen den Partikeln sind bei irregulären Partikeln mit rauhen Oberflächen besonders hoch. Andererseits entstehen bei der Ablagerung wegen der verminderten Beweglichkeit solcher Partikel Packungen mit höheren Porositäten, d.h. auch die Packungsdichte wird von der Gestalt beeinflusst.

Die Korngestalt

Neben dem physiko-chemischen Einfluß kommt der Gestalt eine bedeutende Rolle als Informationsträger zu. Geprägt wird die Information durch die Entstehungs- und Veränderungsprozesse im Herkunftsgebiet und während des Transports (Abb. 1-1).

Die Entstehung von klastischen Sedimenten ist komplex, wobei die relative Bedeutung einzelner Faktoren von Fall zu Fall verschieden ist. Wesentliche Faktoren sind die Petrographie, die Tektonik und das Klima im Herkunftsgebiet. Sind die Gesteine im Herkunftsgebiet einem tektonischem Druck ausgesetzt, entsteht ein Trennflächengefüge (Klüfte, Störungen, Schicht- und Schieferungsflächen). Dieses spiegelt neben der Art und dem Ausmaß der Beanspruchung auch die Gesteinseigenschaften wieder. An den Trennflächen setzen Verwitterungserscheinungen an. Die Art und Wirkung der Verwitterung ist sowohl klimatisch als auch gesteinsbedingt.

Durch die Verwitterung gehen die mineralischen Bindungen verloren und es entsteht ein Lockergestein, welches durch Wind, Wasser oder Eis abtransportiert wird. Die während des Transports wirksame Abrasion verändert die Gestalt der einzelnen Partikel. Dies geschieht entweder durch Bruch in mehrere Teile, Abplatzen kleinerer Teile oder durch mahlenden Abrieb. Zwischenzeitliche Verwitterungszeiten beschleunigen den Prozess. Bei der Ablagerung des Sediments setzen diagenetische Prozesse ein. Dabei kann es zu Deformationen, Frakturen oder Drucklösungserscheinungen (Stylolithen) an Partikeln kommen.

Wenn die Gestalt material- oder herkunftstypisch ist, kann sie ein wesentliches Merkmal zur Identifikation von Partikeln sein. Veränderungsprozesse wie Abrasion, Verwitterung und Diagenese hinterlassen ebenfalls Spuren, die Rückschlüsse auf den Prozess ermöglichen. Die Informationen zur Entstehung und Veränderung der Partikel überlagern sich jedoch, d.h. jeder neu ansetzende Prozess schafft neue Information und zerstört die alte. Häufig ist die Überprägung derart gravierend, daß nur der jeweils letzte Prozess an der Gestalt ablesbar ist. Manche Informationen, wie z.B. die Achsenverhältnisse sind jedoch relativ unempfindlich gegenüber Veränderungsprozessen, so daß die Möglichkeit besteht aus der Korngestalt auch weitergehende Aussagen zur Geschichte von Partikeln abzuleiten.

1.3. Die Beschreibung der Korngestalt

Um die Korngestalt für sedimentologische Untersuchungen nutzen zu können, müssen die wesentlichen Eigenschaften der Gestalt charakterisiert oder quantifiziert werden. Hier stellt sich nun die Frage nach dem Wie der Gestaltbeschreibung, d.h. welche Parameter sind für die Beschreibung der Korngestalt geeignet.

Als Sorby in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts das erste Mal Quarzkörner unter einem Mikroskop untersuchte, war er überrascht von der Vielfalt und Komplexität der möglichen Formen (Sorby, 1880, S. 58). Sorby versuchte dieser Vielfalt mit verbalen Beschreibungen und einer einfachen Klassifizierung zu begegnen. Die Bemühungen der Folgezeit, bessere und vor allem quantitative Beschreibungen zu finden, faßte Rose (1961, S. 130) mit den Worten zusammen: "Perhaps one of the most abortive searches yet made is for a means of defining the shape of a particle."

Die Korngestalt

In der Tat ist das Problem nicht einfach und die Schwierigkeiten wachsen mit dem 'Grad an Irregularität' der Partikel. In vielen Arbeiten wird daher versucht, irreguläre Gestalten durch symmetrische Formen zu ersetzen, die leichter beschreibbar sind. Klassische Parameter, die in dieser Weise bestimmt werden, sind Form und Rundung. Beide Parameter beschreiben wesentliche Eigenschaften der Korngestalt. Die Form bestimmt sich aus der Länge, Breite und Höhe eines Partikels und ist bedeutsam für das hydrodynamische Verhalten von Partikeln. Die Rundung ist abhängig von der Krümmung der Partikeloberfläche; die Krümmung wird in den meisten konventionellen Methoden mit Radien von Kreisen gemessen, welche in die (als solche erkannten) Ecken hineingelegt werden. Die Rundung gibt Aufschluß über die im Transport wirksame Abrasion. Ein weiterer klassischer Parameter ist die Oberflächentextur. Sie beschreibt die Feinstruktur der Oberfläche und ist sensibel für das Transport- oder Ablagerungsmilieu. Die Oberflächentextur wird auch heute noch ausschließlich verbal klassifiziert.

Die Parameter Form, Rundung und Oberflächentextur sind in Bezug auf den Maßstab der beschreibenden Elemente hierarchisch geordnet (Griffiths, 1967; Barrett, 1980). Auch Meloy (1977, S. 235) unterscheidet bei der morphologischen Beschreibung einen Makro-, Meso- und Mikrobereich. Daraus folgert Clark (1981), daß komplexere, feiner gestufte Abfolgen von Parametern - sogenannte 'shape descriptors' - möglicherweise besser für die Quantifizierung der Korngestalt geeignet sind. Einer dieser "Gestaltbeschreiber" ist das aus der Fourier-Analyse resultierende Amplitudenspektrum für Partikelumrisse (Schwarcz & Shane, 1969; Ehrlich & Weinberg, 1970). Tatsächlich lassen sich mit Fourier-Spektren viel subtilere Unterschiede zwischen den Korngestalten feststellen, als dies mit den klassischen Parametern möglich wäre. Auch ist die mit der Fourier-Analyse verbundene Methodik wesentlich effektiver. Angesichts dieser Situation stellten Ehrlich et al. (1980, S. 476) den Sinn klassischer Parameter wie Form und Rundung schließlich gänzlich in Frage.

Die Bedeutung der "Klassiker" begründet sich jedoch weder durch die Vollständigkeit oder Genauigkeit, mit der sie die Korngestalt beschreiben, noch durch die Effektivität, mit der sie erfaßt werden können, sondern durch ihren Bezug zum geologischen Geschehen.

Der geologische Bezug von Fourier-Spektren ist demgegenüber anders geartet. Da sich mit den Spektren die Gestalt beliebig genau beschreiben läßt, können sie als Signatur eines Partikels verwendet werden. Damit erhält man die Möglichkeit Populationen von Partikelgestalten als solche zu identifizieren und von anderen Populationen zu unterscheiden.

Dennoch wurde der Einwand erhoben, daß sich spezifische Parameter wie Form und Rundung erübrigen, da die für diese Parameter notwendige Information bereits in den Fourier-Spektren enthalten ist (Ehrlich et al., 1980, S. 476). Daß dies tatsächlich so ist, konnte bereits von Schwarcz & Shane (1969) gezeigt werden.

Informationen in derart komplexer Form verlangen jedoch nicht nur besondere interpretatorische Fähigkeiten von dem jeweiligen Bearbeiter, sondern häufig ist es mit der komplexen Beschreibung auch unmöglich, den relativen Einfluß einzelner Faktoren darzustellen.

Ziel kann es daher nicht sein, die klassischen Parameter durch Fourier-Spektren zu ersetzen. Vielmehr sollten komplexe Gestaltsbeschreibungen, wie die Fourier-Spektren,

Die Korngestalt

als Partikelsignaturen dienen und darüberhinaus als Informationsspeicher genutzt werden, aus denen dann weitere geologisch sinnvolle Parameter abgeleitet werden können.

Damit komplexe Gestaltbeschreibungen in diesen Sinne brauchbar sind, müssen sie eine Reihe von allgemeinen Forderungen erfüllen:

- Zunächst sollte die Gestaltbeschreibung bis zu einem gewissen Grad einzigartig sein, d.h. Signaturen sollten nur dann identisch sein, wenn auch die Gestalt der entsprechenden Partikel identisch ist. Einfache Charakteristika, wie z.B. die Achsen eines Partikels reichen zur Spezifizierung nicht aus, da verschiedene Gestalten, wie eine Kugel oder ein Würfel, in der Beschreibung identisch wären. Je mehr Parameter eine Beschreibung enthält, desto spezifischer wird sie.
- Die Genauigkeit der Signatur hat jedoch auch Grenzen (schon allein wegen der Datenreduktion). Sinnvoll ist eine prägnante Beschreibung, die mit wenigen, möglichst voneinander unabhängigen Parametern die geologisch relevante Information in den Korngestalten erfaßt.

Schließlich sollte gewährleistet sein, daß gleiche Gestalten in der Beschreibung identisch sind. Drei notwendige Bedingungen sind hier zu nennen (vgl. Clark, 1981, S. 305):

- Die Skaleninvarianz garantiert die Unabhängigkeit der Beschreibung von der Größe der Partikel. Die Gestaltbeschreibung wird damit dimensionslos.
- Eine weitere Bedingung ist die Rotationsinvarianz der Beschreibung, d.h. ein Partikel, welcher in der Ebene gedreht wird, liefert immer die gleichen Werte.
- Schließlich ist auch ein möglicher Einfluß von Links- oder Rechtshändigkeit auszuschließen. Die Signaturen von Bild und Spiegelbild eines Partikels sollten sich nicht unterscheiden (Reflexionsinvarianz).

Von allen genannten Qualitäten bereitet die Forderung nach Prägnanz der Gestaltbeschreibung die größten Schwierigkeiten. Dies gilt nicht nur für komplexe Beschreibungen wie z.B. mit Fourier-Spektren, sondern auch für alle aus solchen Beschreibungen abgeleiteten Parameter.

Bei dem Problem der Prägnanz ist zunächst zu bedenken, daß die Gestalt eines einzelnen Partikels in den seltensten Fällen interessant sein dürfte, sondern fast immer die Charakteristika einer Gruppe zu untersuchen sind. Da die Korngestalt Resultat stochastischer Prozesse ist, kann man annehmen, daß ein großer Teil der in einer einzelnen Gestalt enthaltenen Information auf unbedeutende Variationen zurückgeht, welche im geologischen Sinne nicht erklärbar sind. Gesucht werden also die invarianten Elemente einer Gestalt oder - um ein einfaches Bild zu gebrauchen - es muß der "Lärm" vom "Signal" getrennt werden. Es ist diese Reduktion auf das Notwendige und Wesentliche, welche die Prägnanz einer Beschreibung ausmacht und welche letztendlich erheblich zur Qualität von Untersuchungsergebnissen beiträgt. Leider ist es nur selten möglich, die Prägnanz einer Beschreibung oder eines einzelnen Parameter auf theoretischem Wege zu zeigen, so daß der Nachweis meistens nur über gezielte Experimente und empirische Untersuchungen erbracht werden kann, was entsprechend aufwendig ist.

Die Korngestalt

So läßt sich denn auch für einige Ansätze zur Gestaltbeschreibung nur wenig über die Prägnanz sagen, da häufig die empirischen Untersuchungen fehlen.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten der Herangehensweise an die Gestaltbeschreibung. Dabei sollen die verschiedenen Ansätze kurz charakterisiert werden; angefangen bei den einfachen geometrischen und visuellen Methoden bis zu den komplexen Gestaltbeschreibungen mit Spektralverfahren. In den Kapiteln zu Form und Rundung finden sich dann noch genauere Darstellungen einzelner Methoden. Insbesondere zur Rundung wird wegen der konzeptionellen Neubearbeitung des Themas ein detaillierter Methodenüberblick gegeben.

Ebenfalls ausgeklammert von der weiteren Darstellung wird der feinstrukturelle Bereich der Korngestalt, welcher auch mit den neueren, hier vorgestellten Verfahren nicht quantitativ erfaßt werden kann.

Im übrigen gibt es eine größere Menge an Review-Arbeiten. Detaillierte Arbeiten aus neuerer Zeit stammen von Barrett (1980) und Clark (1981).

Für die Klassifizierung der vielen unterschiedlichen Arbeiten bietet sich kein eindeutiges Schema an. Mit den vorhandenen Kriterien ließen sich auch andere Einteilungen vornehmen; dies ist nur eine Frage der Ordnung zwischen den Kriterien. So mag denn die hier benutzte Einteilung an manchen Stellen etwas willkürlich erscheinen. Dennoch ist eine Klassifizierung der Einzelarbeiten für vergleichende Betrachtungen in jedem Fall sinnvoll.

1.4. Die verschiedenen Ansätze zur Beschreibung der Korngestalt

1.4.1. Geometrische Methoden

Zu den ersten Versuchen, die Korngestalt zu beschreiben, gehört - neben der rein verbalen Beschreibung - die einfache Messung mit Lineal und Zirkel. Dies wird im folgenden als geometrischer Ansatz bezeichnet, wenngleich in anderen Verfahren auch geometrische Elemente zu finden sind.

Da der Aufwand für Messungen per Hand von Anfang an Grenzen setzte, konzentrierte man sich auf einige wenige Aspekte der Korngestalt. Wichtige Parameter sind Form und Rundung. Die dazu entwickelten, zahlreichen Methoden lassen sich auf die Messung weniger geometrischer Elemente zurückführen: Für die Form die Hauptachsen, also Länge, Breite und Dicke und für die Rundung die Kurvenkrümmungen auf der Kornoberfläche bzw. dem Kornumriß. Die Menge der Arbeiten ist teilweise daraus zu erklären, daß man stets bestrebt war, aus den gemessenen Werten einen einzigen, möglichst bedeutungsvollen Index zu berechnen. Für die Beschreibung der Form benötigt man jedoch minimal zwei Parameter. Für die Rundung ist schwierig zu entscheiden, welche Kurvenkrümmungen in die Berechnung eingehen sollen - alle, nur die konvexen Anteile oder nur die schärfste Ecke. Zudem steht man vor dem Problem, daß eine Bezugsgröße gefunden werden muß, um die Größen- und Forminvarianz zu gewährleisten.

Die Korngestalt

Geometrische Methoden sind nicht nur aufwendig, sondern auch subjektiv. Die Hauptachsen sind nicht immer eindeutig meßbar und auch die Entscheidung darüber, was als Ecke gilt, kann unterschiedlich ausfallen.

1.4.2. Visuelle Methoden

Wegen der Aufwendigkeit geometrischer Verfahren, wurden visuellen Vergleichstafeln entwickelt. In den Tafeln sind mehrere Gruppen von Partikeln dargestellt, die sich hinsichtlich der zu erfassenden Eigenschaft mehr oder weniger deutlich voneinander unterscheiden. Die einzelnen Klassen lassen sich entweder verbal charakterisieren oder mit Zahlenwerten belegen.

Im Vergleich zu geometrischen Methoden können zwar mit den Vergleichstafeln größere Mengen von Partikeln verarbeitet werden, die Messungen sind jedoch in starkem Maße vom Bearbeiter abhängig und daher ungenauer.

1.4.3. Komplexe Beschreibungen der Korngestalt

Gemeint sind Verfahren, die die Korngestalt mit mehreren Parametern quantifizieren. Überwiegend wird dabei der Anspruch erhoben, daß durch die Kombination von Parametern die Korngestalt in Gänze charakterisiert wird, die Beschreibung also als Partikelsignatur (vgl. Kap. 1.3.) benutzt werden kann.

Durchgängig wird bei allen Verfahren die Beschreibung auf den Querschnitt eines Partikels beschränkt. Zwar gibt es auch dreidimensionale Ansätze (Gotoh & Finney, 1975; Behrens, 1977). Dabei vervielfachen sich jedoch die Beschreibungsparameter und bislang konnte noch nicht gezeigt werden, ob dieses Maß an Information tatsächlich notwendig ist. Auch ist die dreidimensionale Erfassung mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden.

Bei den zweidimensionalen Verfahren kann man unterscheiden zwischen solchen, die sich auf die Analyse der Partikelkontur, der Umrißlinie stützen und solchen, die den Partikelquerschnitt als Fläche quantifizieren. Dies soll im folgenden ausgeführt werden.

1.4.3.1. Analyse von Umrißlinien

Umrißlinien werden zumeist durch eine Reihe von diskreten Punkten repräsentiert. Für die Aufbereitung der Umrißdaten bieten sich eine Reihe von Möglichkeiten an (Abb. 1-2, a-f):

- Die Umrißlinie wird mit unterschiedlichen Rastern belegt (a).
- Zwischen aufeinanderfolgenden Punkten werden Sehnen gleicher Länge gezogen und anschließend die Richtungsänderungen ermittelt. Der Umriß wird damit als Abfolge von Winkelbeträgen dargestellt (b).

Die Korngestalt

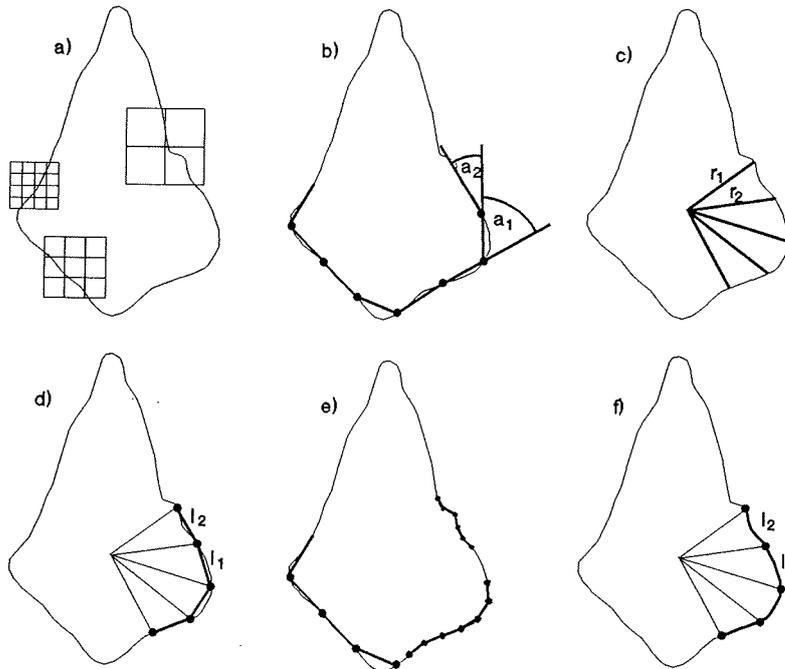


Abb. 1-2. Möglichkeiten der Darstellung von Umrißlinien. a) Belegung mit Rastern, b) Gradientenabfolge, c) Radienabfolge, d) Sehnenabfolge - Winkel konstant, e) Sehnenabfolge - Sehnenlänge konstant, f) Abfolge von Umrißsegmenten - Winkel konstant.

- Die Umrißpunkte werden in Polarkoordinaten umgerechnet (zur Frage des Polpunkts s. Kap. 2.3.1.). Die Abfolge der Radien repräsentiert dann den Umriß (c).
- Liegen die Punkte als Polarkoordinaten vor, können zwischen Punkten mit gleichen Winkelabständen zueinander die Sehnenlängen bestimmt werden. Auf diese Weise geht der Umriß in eine Abfolge von Sehnenlängen über (d).
- Hält man anstelle des Winkelabstands die Länge der Sehnen konstant, so resultieren ebenfalls Sehnenabfolgen. Die eigentliche Information entsteht dann daraus, daß die Sehnenlänge variiert wird (e).
- Schließlich können noch zwischen Punkten mit gleichen Winkelabständen zueinander die Längen der entsprechenden Umrißabschnitte ermittelt werden. Damit erhält man eine Abfolge von Umrißlängen (f).

Für die weitere Analyse bestehen ebenfalls mehrere Möglichkeiten:

- Rasterpunkte und Sehnenabfolgen können als Datengrundlage für den fraktalen Ansatz genommen werden.
- Für Radien, Gradientenbeträge, Sehnen- oder Umrißlängen lassen sich Verteilungen berechnen. Dies ist der "Verteilungs"-Ansatz.
- Naheliegender ist aber auch, solche Abfolgen durch eine Funktion zu ersetzen.

Für den funktionalen Ansatz bietet sich als klassische Möglichkeit die Fourier-Transformation an. Daneben wurden weitere Funktionen vorgeschlagen. Die Hartley-Transformation (Bracewell, 1989) setzt den Umriß in fast gleicher Weise um wie die Fourier-Transformation und ist rechentechnisch einfacher. Noch weniger Rechenschritte sind für die schnelle Fourier-Transformation notwendig (Cooley & Tukey, 1965; Meloy, 1977b). Ähnlich wie die Fourier-Transformation arbeitet die Walsh-Transformation (Meloy, 1977a). Im Gegensatz zu dieser liefert die Walsh-Transformation keine Sinus-, sondern Rechteckfunktionen. Ebenfalls von Meloy (1977a) wurde die Anwendung von Hadamard-, Rademacher- und Haar-Funktionen diskutiert. Wie die Walsh-Transformation erscheinen auch diese Funktionen für die Gestaltbeschreibung geeignet. Da jedoch empirische Untersuchungen bislang gänzlich fehlen und die genannten Transformationen der Fourier-Transformation im Prinzip entsprechen, wird auf sie im weiteren nicht mehr eingegangen werden.

1.4.3.1.1. Verteilungen von Umrißelementen

Bei dieser Vorgehensweise werden für einzelne Umrißelemente, wie z.B. Sehnenlängen, Radien etc., Verteilungen aufgestellt. Von diesen Verteilungen können dann im weiteren die Momente berechnet werden.

Der wohl erste Vorschlag in diese Richtung wurde von Wentworth (1919) gemacht. Wentworth war der Meinung, daß die Standardabweichung der Radien ein wichtiges Kriterium für die Rundung sein könnte. Dies läßt sich aber durch den Vergleich eines n-zackigen Sterns mit einer Ellipse leicht widerlegen. Bei diesem Beispiel sind sich die Radienverteilungen sehr ähnlich. Die Information über die Lage der Umrißpunkte zueinander geht bei diesem Ansatz völlig verloren.

Piper (1970) schlug vor, die Winkeländerungen zwischen aufeinanderfolgenden Sehnen zu berechnen (vgl. Abb. 1-2,b). Er argumentierte, daß die Verteilung der Änderungsbeträge und die Varianz der Beträge Hinweise auf die Kornrundung geben. Die Verteilungen sind jedoch stark von der Länge der Sehnen abhängig, was ihren Wert mindert.

Wegen dieser Abhängigkeit läßt sich aber auch eine Erweiterung des Ansatzes formulieren. Berechnet man mehrere Verteilungen mit einer Reihe von unterschiedlichen Sehnenlängen, so erhält man eine, in der Skalierung abgestufte "Mehrkomponenten-Beschreibung" der Korngestalt (Clark, 1981, S. 311). Die Verteilungen sind skalen-, rotations- und reflektionsinvariant. Darüberhinaus gibt es keine Beschränkungen bezüglich der Art der Umrißlinien, wie z.B. bei der radialen Fourier-Transformation (vgl. Kap. 1.4.3.1.3.).

Von Nahin (1974) wurden Verteilungen von Sehnenlängen zwischen Punkten gleichen Winkelabstands diskutiert (Abb. 1-2,d). Indem man den Winkelabstand variiert, ist es auch hier möglich, verschiedene Verteilungen zu erzeugen.

Leider wurde keines der genannten Verfahren bislang praktisch erprobt. Zudem ist grundsätzlich zu bemerken, daß bei der Klassifizierung der Radien, Winkel und Sehnen die Information über den tatsächlichen Verlauf der Umrißlinie verloren geht, was sich besonders bei den Radien nachteilig bemerkbar macht.

1.4.3.1.2. Die fraktale Dimension der Umrißlinie

Die fraktale Ansatz zur Partikelbeschreibung geht auf ein Buch von B. Mandelbrot (1977) zurück. Mandelbrot diskutiert darin das Problem der Beschreibung komplexer Strukturen, wie z.B. Wolken, Gebirge, Küsten- oder tektonische Bruchlinien und macht Vorschläge zu mathematischen Lösungsverfahren. Da die Charakterisierung einer Küstenlinie prinzipiell dieselben Probleme aufwirft wie ein Partikelumriß, liegt es nahe, solche Verfahren auch auf die Partikelbeschreibung anzuwenden.

Wesentlich bei dem fraktalen Ansatz ist der Begriff der fraktalen Dimension, welcher auf der Selbstähnlichkeit der zu untersuchenden Struktur basiert. Das bedeutet: Analysiert man eine Struktur bei unterschiedlichen Größenmaßstäben, so stößt man immer wieder auf dieselben Grundelemente.

Auf einfache Weise erhält man die fraktale Dimension, indem man die Umrißlinie mit Rastern unterschiedlicher Maschenweite überdeckt (vgl. Abb. 1-2,a). Die Zahl der von der Umrißlinie durchlaufenen Quadrate hängt von dem Umriß und der Maschenweite ab. Plottet man für jedes Raster die jeweilige Maschenweite gegen die Zahl der "nichtleeren" Quadrate, so liegen die sich ergebenden Punkte annähernd auf einer Geraden. Den Steigungskoeffizienten dieser Geraden bezeichnet die fraktale Dimension.

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der fraktalen Dimension beruht auf der Umrißlänge (Kaye, 1978). Ein Maß für die Länge bekommt man, wenn man die Sehnen zwischen den einzelnen Umrißpunkten aufsummiert. Hält man bei einem Umlauf die Länge der Sehnen konstant (Abb. 1-2,e), so ist die Umrißlänge direkt abhängig von der Wahl der Sehnenlänge. Trägt man die Sehnenlänge gegen die Umrißlänge auf, so erhält man die fraktale Dimension. Bereits früher wurde von Davis & Dexter (1972) ein ganz ähnliches Verfahren vorgeschlagen - allerdings nicht im Zusammenhang mit Fraktalen.

Partikelumrisse sind keine echten Fraktale. Die Selbstähnlichkeit gilt bestenfalls für begrenzte Maßstabsbereiche. So können Gerölle z.B. gut gerundet sein und gleichzeitig rauhe oder auch polierte Oberflächen haben. Daher ändert sich die fraktale Dimension mit dem Maßstab und man gelangt schließlich zur multifraktalen Beschreibung (Kaye, 1978, S. 5; Orford & Whalley, 1983, S. 660).

Mit einer solchen Beschreibung läßt sich jedoch nicht die Grobstruktur der Korngestalt erfassen (Clark, 1987, S. 244). Wenn die Sehnenlängen die Größenordnung des Partikels erreichen, entstehen Fehler - einerseits durch die Wahl des Anfangspunktes für den Umlauf, andererseits dadurch, daß Anfangspunkt und Endpunkt der letzten Sehne weit auseinanderliegen können.

Clark (1987) definiert für die Grobstruktur sogenannte "fractal harmonics". Ausgehend von der Idee, daß sich z.B. in einem Dreieck gleichseitige Dreiecke und bei einem Viereck gleichseitige Vierecke unterschiedlichster Sehnenlänge einschreiben lassen, macht er die "Amplitude" abhängig von dem Bereich, in dem die Sehnenlänge variieren kann, ohne daß die geometrische Figur sich ändert.

Wie bei dem "Verteilungs"-Ansatz geht auch bei dem fraktalen Ansatz die Information über den tatsächlichen Verlauf der Umrißlinie verloren. Zudem bewegt sich der Ansatz noch ausschließlich in der Theorie. Besondere Vorteile gegenüber den weiter unten ausgeführten Spektralverfahren sind bislang nicht erkennbar.

1.4.3.1.3. Fourier-Transformation der Umrißlinie

Mit Hilfe der Fourier-Transformation wird der Partikelumriß in eine Reihe harmonischer Schwingungen unterschiedlicher Frequenz, Amplitude und Phasenverschiebung zerlegt. Für die Analyse muß der Umriß zunächst als periodische Funktion dargestellt werden. Zwei Verfahren lassen sich hier unterscheiden. Zum einen läßt sich der Umriß als Abfolge von Radien repräsentieren (Abb. 1-2,c). Dies ist die auf Schwarcz & Shane (1969) und Ehrlich & Weinberg (1970) zurückgehende Radial-Technik. Zum anderen kann man bei konstanter Sehnenlänge die Gradientenänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Sehnen messen (Abb. 1-2,b). Der Umriß stellt sich dann als Abfolge von Gradientenänderungen dar. Eine solche Abfolge wird auch als 'angular bend function' bezeichnet. Erstmals wurde dieses Verfahren von Sebestyn (1959) und ausführlicher dann von Zahn & Roskies (1972) beschrieben. Bei der 'angular bend function' wirkt nachteilig, daß die resultierenden Fourierkoeffizienten erheblich von der verwendeten Sehnenlänge abhängig sind. Wählt man die Sehnenlänge zu groß, bleiben feinere Gestaltanteile unberücksichtigt - wählt man sie hingegen zu klein, werden die Gradienten bzw. die Fourierkoeffizienten stark von dem Digitalisierungsraster beeinflusst. Auch die Interpretation der Spektren ist von der Sehnenlänge abhängig. Hier einen befriedigenden Kompromiß zu finden ist schwierig. Andererseits besitzt die 'angular bend function' gegenüber der Radial-Technik den Vorteil, daß mit ihr alle Arten von Partikeln dargestellt werden können. Bei der Radial-Technik kann für jeden Winkel nur ein einziger Radius berücksichtigt werden. Bei stark eingebuchteten Partikeln tritt daher ein Informationsverlust ein, der gravierend sein kann (Abb. 1-3). Bei manchen Pulvern, Partikelaggregaten oder einigen Fossilien etwa kann die Zahl der Mehrfachradien so groß sein, daß die für die Beschreibung verbleibende Information nicht mehr ausreicht. Da Sedimentpartikel jedoch fast ausschließlich "mono-radial" sind (Full & Ehrlich, 1982), werden sedimentologische Untersuchungen von dieser methodischen Einschränkung kaum beeinflusst.

Beide Fourierverfahren geben eine vollständige und prägnante Beschreibung der Umrißlinie. Mit den resultierenden Spektren können die originalen Umrißlinien beliebig genau rekonstruiert werden. Bei beiden ist die Beschreibung skalen- rotations- und reflexionsinvariant. Lediglich in der "Verschlüsselung" der Umrißinformation gibt es Unterschiede, was sich insbesondere dann auswirkt, wenn aus den Spektren spezifische, auf die jeweilige Anwendung bezogene Parameter oder Aussagen abgeleitet werden sollen.

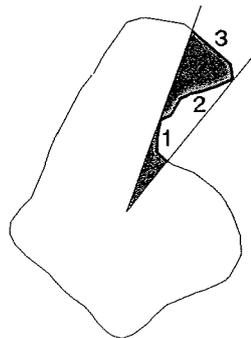


Abb. 1-3. Entstehung von Mehrfachradien (double values) bei der Radialtechnik. Im schattierten Winkelausschnitt ist der Umriß dreifach repräsentiert.

Die Korngestalt

Welches der beiden Verfahren also im konkreten Fall angewendet wird, hängt einerseits von der Art der zu untersuchenden Partikel und andererseits von dem Zweck der Untersuchung ab.

Die 'angular bend function' bietet die besseren Voraussetzungen zur Beschreibung von Fossilien. Randzähnelungen und ausgezogene Hinterenden bei Ostracoden z.B. sind mit einer Gradientenabfolge gut zu erfassen. Bei der Radialdarstellung treten diese morphologisch wichtigen Teile nur wenig hervor und machen sich - wie einige Tests zeigten - daher auch in den Spektren kaum bemerkbar (mündlicher Austausch m. F. Helmdach, Berlin). Es gibt zwar einige wenige Arbeiten, in denen zur Fossilbeschreibung die Radial-Technik benutzt wird (z.B. Healy-Williams & Williams, 1981), überwiegend jedoch wurde das Verfahren bei Sedimentpartikeln angewendet. Empirische Untersuchungen sind in größerer Zahl vorhanden (s. Ehrlich et al. 1980).

Vergleichende Untersuchungen zwischen beiden Verfahren wurden bislang nicht veröffentlicht.

1.4.3.2. Analyse von Querschnittsflächen

Treten im Querschnitt eines Partikels Löcher auf, dann reicht die Umrißlinie für die Beschreibung nicht aus. In solchen Fällen ist es vorteilhaft, die gesamte Querschnittsfläche zu erfassen. Sedimentpartikel mit Lochstruktur sind zwar sehr selten (Beispiele sind Perforationen an Geröllen durch Bohrmuscheln oder vulkanische Gesteine mit Gaseinschlüssen), der Vollständigkeit wegen sollen jedoch die auf der Querschnittsfläche aufbauenden Verfahren auch erwähnt werden.

Medalia (1970) berechnet die Flächenmomente des Querschnitts und ersetzt den Partikelquerschnitt dann durch eine Gestalt mit gleichen dynamischen Eigenschaften wie der originale Querschnitt. Interessant ist dieses Verfahren besonders, weil Medalia als äquivalente Gestalt eine Ellipse vorschlägt. Aus dem Achsenverhältnis der Ellipse berechnet er im weiteren die Anisometrie und aus dem Verhältnis der Flächen von dem Partikel und der Ellipse die "bulkiness" des Partikels.

Von Metzler et al (1967) wurde vorgeschlagen, die Querschnittsflächen mit zweidimensionalen Walsh-Funktionen zu beschreiben. Rechteckfunktionen bieten sich insofern an, als die Information, welche verarbeitet werden soll, binär ist - Partikel, Matrix. Problematisch ist jedoch, daß die Koeffizienten sowohl von der Größe des Matrixumfeldes als auch von der Orientierung des Partikels im analysierten Feld abhängig sind.

Empirische Arbeiten sind zu den Flächenverfahren im Bereich der Sedimentologie nicht vorhanden.

1.5. Zusammenfassende Bewertung der verschiedenen Ansätze

Die verschiedenen Verfahren zur Gestaltbeschreibung lassen sich nicht eindeutig klassifizieren. In dieser Arbeit werden zunächst die konventionellen, geometrisch-visuellen Beschreibungen von den hier komplex genannten Beschreibungen unterschieden.

Die Korngestalt

Geometrisch-visuelle Methoden waren lange Zeit die einzige Möglichkeit, Sedimentpartikel morphometrisch zu erfassen. Zwar mögen Lineal und Zirkel in einigen Fällen noch ihre Berechtigung finden, in allgemeinen jedoch ist die Methodik zu aufwendig und zu ungenau.

Die in neuerer Zeit entstandenen Verfahren zur komplexen Gestaltbeschreibung sind dagegen genau und bei Einsatz der EDV auch effizient. Die rechnerische Basis bei allen Verfahren sind die Umriß- oder Flächenkoordinaten des Partikelquerschnitts, wobei die Verfahren, welche Flächenkoordinaten benutzen, in Zahl und Bedeutung weit zurückliegen.

Hat man die Koordinaten erst einmal ermittelt, ist die weitere Verarbeitung einfach. Selbst so exotische Maße wie die Rundungs-Werte nach Szadecky-Kardoss (1933) liessen sich mit wenig Aufwand realisieren. Unter den neueren Verfahren findet sich jedoch kein "Nachbau" älterer Methoden, sondern es entstanden mehrere neue Ansätze, die sich grob als funktionaler Ansatz und als "Verteilungs"-Ansatz bezeichnen lassen. Zu den Verfahren mit funktionalem Ansatz gehören im wesentlichen die Fourier-Transformationen. Bei dem "Verteilungsansatz werden von einigen Umrißelementen, wie z.B. Radien oder Sehnen, Verteilungen aufgestellt. Die z.Z. sehr aktuellen fraktalen Methoden haben sehr viel Ähnlichkeit mit einigen "Verteilungs"-Methoden. Eine eigenständige neue Qualität der Beschreibung ist durch die Fraktal-Verfahren bislang nicht entstanden.

Sieht man die verschiedenen Ansätze zur Partikelbeschreibung lediglich im Zusammenhang mit dem einen oder anderen konkreten Anwendungsfall, so hat jeder Ansatz seine Berechtigung und eine prinzipielle Entscheidung darüber, welchem der Vorzug zu geben ist, fällt schwer. Mißt man jedoch die Qualität der Gestaltbeschreibung an allgemeinen Forderungen, wie Vollständigkeit, Prägnanz, Skalen-, Rotations- und Reflexionsinvarianz (vgl. Kap. 1.3.), so sind die Verfahren mit funktionalem Ansatz im Vorteil. Sowohl bei den "Verteilungs"- als auch bei den Fraktal-Methoden geht die Information über den tatsächlichen Verlauf eines Partikelumriß verloren. Bislang läßt sich nicht entscheiden, ob sich trotz dieses Nachteils die geologisch relevante Information vollständig erfassen läßt. Bei den Fourier-Verfahren wird dies durch die Möglichkeit der genauen Rekonstruktion der Umrißlinie gewährleistet.

Geht man von der Umrißlinie als Datenbasis aus, lassen sich bei allen Ansätzen zwei Arten der Verarbeitung der Umrißkoordinaten unterscheiden: Die eine stellt den Umriß als Abfolge von Sehnen und Gradienten, die anderen als Abfolge von Radien dar. Bei den Fourier-Verfahren unterscheidet man entsprechend die Gradienten- von der Radien-Technik.

Die Gradienten-Technik bietet den Vorteil, daß mit ihr alle Arten von Umrissen verarbeitet werden können. Zu dieser Technik gibt es nur wenige Arbeiten.

Die aus der Radien-Technik resultierenden Spektren sind im geometrischen Sinn leichter zu interpretieren. Auch gibt es mittlerweile eine größere Anzahl empirischer Arbeiten, welche von dieser Technik Gebrauch machen. Für die hier vorliegende Arbeit wurde die Radien-Technik verwendet.

2. DIE FOURIER-ANALYSE

2.1 Einführung

Zu Anfang des 19. Jhdts entwickelte Joseph Fourier (1768-1830) ein mathematisches Verfahren, welches es ermöglichte, periodische Funktionen als Summe einzelner harmonischer Schwingungen darzustellen - die Fourier-Transformation. Das Verfahren gewann in der Folgezeit große Bedeutung in den Naturwissenschaften. Für die Physik wurde es zu einem unerläßlichen Instrument, denn mit Hilfe der Fourier-Transformation läßt sich eine Vielzahl physikalischer Phänomene vergleichsweise einfach darstellen. Zur Beschreibung von Korngestalten wurde es erstmalig von Schwarcz & Shane (1969) und Ehrlich & Weinberg (1970) vorgestellt.

2.2. Allgemeine Darstellung der Fourier-Analyse

In Wissenschaft und Technik hat man es häufig mit periodischen Erscheinungen zu tun, d.h. mit Erscheinungen, welche sich nach bestimmten räumlichen oder zeitlichen Abschnitten, der Periode 'T', wiederholen. Eine einfache periodische Funktion ist die Sinusfunktion

$$R \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

wobei 'R' die Amplitude ist, 't' die unabhängige Veränderliche und 'φ' der Winkel, um den die Schwingung - oder Phase - gegen den Anfangswert verschoben ist. 'ω' ist die Kreisfrequenz, die mit der Periode 'T' durch

$$\omega = 2\pi / T$$

zusammenhängt. Aus solchen Funktionen lassen sich additiv auch kompliziertere Funktionen zusammensetzen, wobei sich die einzelnen Funktionen lediglich in der Frequenz unterscheiden müssen (Abb. 2-1).

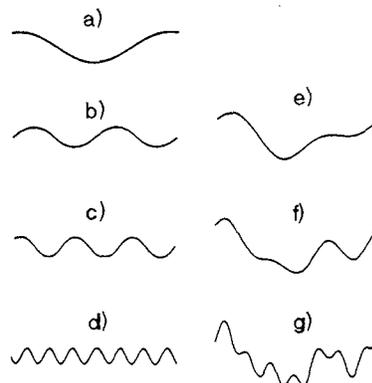


Abb. 2-1. Überlagerung von Sinuskurven.
a) Frequenz 1: $R=0.5$, $\varphi=0^\circ$, b) Frequenz 2:
 $R=0.3$, $\varphi=0^\circ$, c) Frequenz 3: $R=0.3$, $\varphi=45^\circ$,
d) Frequenz 7: $R=0.25$, $\varphi=180^\circ$, e) Summe der
Frequenzen 1 und 2, f) Summe der Frequenzen
1-3, g) Summe der Frequenzen 1-3 und 7.

Die Fourier-Analyse

Natürlich stellt sich sofort die umgekehrte Frage, ob es möglich ist, eine gegebene periodische Funktion in eine Summe endlich oder unendlich vieler Sinusfunktionen, in eine sogenannte trigonometrische Reihe der Form

$$\begin{aligned} f(t) &= R_0 + R_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) + R_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2) + R_3 \cdot \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots \\ &= R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} R_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \end{aligned} \quad (2.1)$$

zu entwickeln.

Die Frage läßt sich für eine große Klasse von Funktionen positiv beantworten. Es müssen dazu nur die Amplituden ' R_n ' und die Phasenverschiebungswinkel ' φ_n ' für die einzelnen Sinusfunktionen - die harmonischen Komponenten - gefunden werden. Das Verfahren, was dieses leistet, ist die harmonische oder Fourier-Analyse.

Entwickelt man die obige trigonometrische Reihe weiter in ihre Normalform

$$f(x) = R_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx) \quad (2.2)$$

mit $x = \omega t$ als unabhängige Veränderliche, so sind die gesuchten Größen die Fourierkoeffizienten ' R_0 ', ' a_n ' und ' b_n '. Wenn die Funktion als eine Reihe von Meßpunkten mit gleichen Abständen zueinander gegeben ist, erhält man diese Koeffizienten mittels der Gleichungen

$$R_0 = 1/2\pi \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (2.3)$$

$$a_m = 1/\pi \int_0^{2\pi} f(x) \cos m x dx \quad (2.4)$$

$$b_m = 1/\pi \int_0^{2\pi} f(x) \sin m x dx \quad (2.5)$$

Der Zusammenhang der Koeffizienten mit den Amplituden ' R_n ' ergibt sich aus

$$R_m = (a_m^2 + b_m^2)^{1/2} \quad (2.6)$$

und die Phasenverschiebungswinkel werden über die Beziehung

$$\varphi_m = \tan^{-1}(b_m/a_m) \quad (2.7)$$

berechnet.

2.3. Anwendung der Fourier-Analyse auf Umrißlinien von Partikeln

Der Umriß eines Partikels ist ein geschlossener Kurvenzug. Dieser kann als periodische Funktion aufgefaßt werden und ist damit als Fourierreihe darstellbar. Dazu muß der Umriß eines gegebenen Partikels zunächst "entrollt" werden, d.h. die durch die Digitalisierung gewonnenen kartesischen Koordinaten müssen in Polarkoordinaten umgerechnet werden (Abb. 2-2).

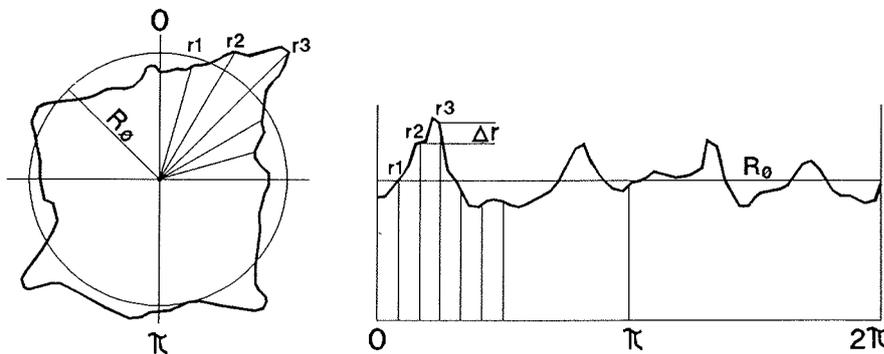


Abb. 2-2. Polarkoordinatendarstellung der Umrißlinie. R_0 ist die Nullfrequenz und entspricht dem mittleren Radius.

Hier stellt sich die Frage nach der Lage des polaren Ursprungs. Da die Größe der Fourierkoeffizienten von der Lage dieses Punktes abhängig ist, sollte dies ein Punkt sein, der für alle Partikel in gleicher Weise festzulegen ist, d.h. eine gewisse Universalität besitzt. Nur so kann die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet sein. Die Universalität des Punktes ist einerseits durch die Wahl des Punktes selbst gegeben, andererseits aber auch dadurch, daß alle Bearbeiter dieselbe Wahl treffen.

Für manche Anwendungen, z.B. bei einigen Fossilarten, ist es einfach, einen allgemein verbindlichen Punkt auf dem Umriß zu finden; bei Sandkörnern oder Geröllen ist dies nicht so. Auch ist es günstiger, einen Punkt innerhalb des Umrisses zu finden, denn die Radien sollten den Umriß nur ein einziges mal treffen. Mehrfachradien für einen Winkelausschnitt führen dazu, daß Teile des Umrisses nicht erfaßt werden können (Abb. 1-3).

Schwarz & Shane (1969, p. 218ff) benutzen daher als polaren Ursprung den Punkt innerhalb des Partikels, der die kleinste Varianz in den Radien erzeugt. Als weitere Möglichkeit schlagen sie den Schwerpunkt des Partikelquerschnitts vor. Wegen des minimalisierenden Effekts auf die Fourierkoeffizienten hat sich in der Praxis der Schwerpunkt durchgesetzt. Zudem sind die Ergebnisse einfacher zu interpretieren.

Ist der Polpunkt festgelegt, erfolgt die Umrechnung in Polarkoordinaten, welche jedoch nicht direkt benutzt werden können, da die Koordinaten für die Fourier-Analyse gleiche Winkelabstände zueinander haben müssen. Aus der Menge der ursprünglichen Umrißpunkte wird also ein neuer Satz Koordinaten mit gleichen Winkelabständen

den zueinander berechnet. Anschließend werden wie oben beschrieben die Fourierkoeffizienten, bzw. die Amplituden und Phasenverschiebungswinkel ermittelt.

Benutzt werden im weiteren nur die Amplituden, obgleich eine vollständige Beschreibung des Partikelumrisses nur mit Amplituden und Phasenverschiebungen möglich ist. Geht es um das Erkennen verschiedener Korngestaltpopulationen sind die Phasenverschiebungen nach den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit wahrscheinlich unverzichtbar. Darüberhinausgehende Untersuchungen sind bislang nicht erschienen.

Für die Beschreibung von Form und Rundung eines Partikels werden - ebenfalls nach den Ergebnissen dieser Arbeit - lediglich die Amplituden benötigt.

Den Amplituden für die einzelnen Frequenzen lassen sich konkrete geometrische Eigenschaften eines gegebenen Partikelumrisses zuordnen. Der Koeffizient ' A_0 ', die Nullfrequenz (im weiteren als R_0 bezeichnet), ist äquivalent mit dem mittleren Radius eines Partikels. Alle weiteren Frequenzen lassen sich über die Nullfrequenz

normieren, so daß sich Partikel unterschiedlicher Größe miteinander vergleichen lassen. Die Länglichkeit eines Partikels drückt sich in der Amplitude für die Frequenz 2 aus; die Dreieckigkeit in der Amplitude für die Frequenz 3; die Viereckigkeit in der Amplitude für die Frequenz 4 usw. (Abb. 2-3). Der Umriß des Partikels wird so gleichsam in eine Reihe von Gestaltkomponenten zerlegt. Die Amplituden der niedrigen Frequenzen erfassen dabei die groben Gestaltanteile und die der hohen Frequenzen die feineren Details des Partikels.

Für die Höhe der Amplituden ist maßgebend, inwieweit die benutzten Frequenzen mit dem Partikelumriß korrespondieren. Je länglicher z.B. ein Partikel ist, desto höher ist die Amplitude für die Frequenz 2. Hohe Amplituden im oberen Frequenzbereich deuten auf einen Umriß mit vielen Details und scharfen Ecken,

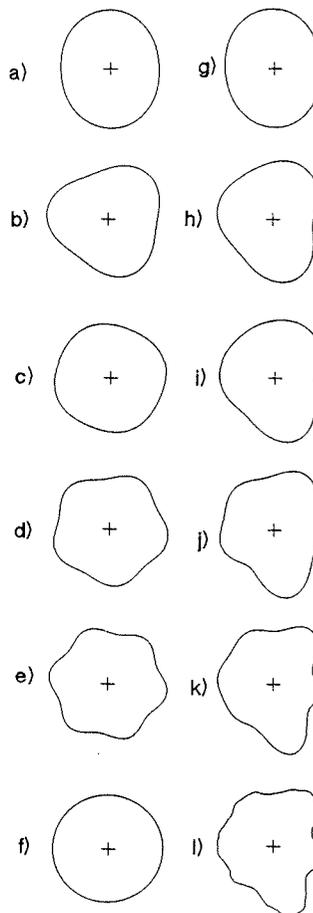


Abb. 2-3. Zerlegung der Umrißlinie in Gestaltkomponenten. f) Mittlerer Radius R_0 , l) Partikelumriß, a-e) Darstellung von R_0 + Einzelfrequenzen, a) R_0 + Frequenz 2, b) R_0 + Frequenz 3, c) R_0 + Frequenz 4, d) R_0 + Frequenz 5, e) R_0 + Frequenz 6, g-k) R_0 + kumulative Summen der Einzelfrequenzen, g) R_0 + Frequenz 2, h) R_0 + Frequenz 2 und 3, i) R_0 + Frequenz 2-4, j) R_0 + Frequenz 2-5, k) R_0 + Frequenz 2-6.

Die Fourier-Analyse

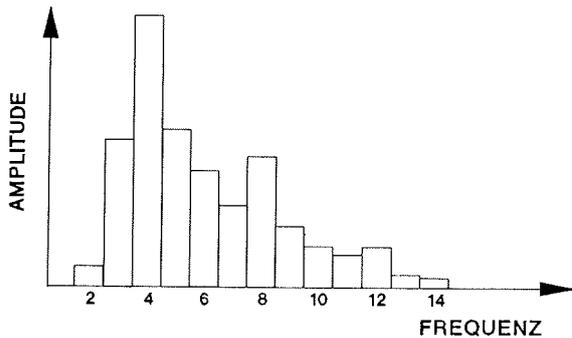


Abb. 2-4. Amplitudenspektrum

während niedrige Amplituden in diesem Frequenzbereich auf einen sanft geschwungenen Umriß hinweisen.

Alle Amplituden zusammengenommen bilden das Amplitudenspektrum eines Partikels (Abb. 2-4). Im Spektrum sind alle notwendigen Informationen über die Gestalt eines Partikels gespeichert. Es gibt jedoch bei der Berechnung und Auswertung von Spektren Schwierigkeiten und Fehlerquellen, die ähnlich auch in einer konventionellen Spektralanalyse vorkommen können. So tritt das Problem des 'aliasing' auf, d.h. der Rückkoppelung höherer, durch die Digitalisierung nicht auflösbarer Frequenzen auf niedrigere Frequenzen. Eng verbunden damit ist die Frage nach der Zahl der in die Analyse eingehenden Umrißpunkte und die nach dem benutzten Frequenzbereich. Auch das Auffinden des Polpunkts und die Interpolation des Polarkoordinatensatzes aus den ursprünglichen Koordinaten sowie die Berechnung der Fourierkoeffizienten haben ihre Besonderheiten, die ebenfalls darzustellen sind.

2.3.1. Ermitteln des Schwerpunkts

Den Schwerpunkt eines Partikelquerschnitts erhält man auf einfache Weise über die Umrißkoordinaten. Für die Berechnung werden die Koordinaten dabei als Punkte gleicher Masse angenommen. Die Schwerpunktkoordinaten sind dann:

$$x_s = 1/N \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{und} \quad y_s = 1/N \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.8)$$

Dies ist jedoch nicht mehr als eine erste Schätzung. Ein genaueres Ergebnis bekommt man über die Integration der Umrißkoordinaten. Ein praktisches Verfahren dazu wurde von Ehrlich & Weinberg (1970) vorgestellt. In diesem Verfahren werden die einzelnen Flächensegmente mit Trapezen approximiert, wobei die Verbindung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten als gerade Linie genommen wird (Abb. 2-5). Jedes Trapez stellt ein Moment dar, welches in der Größe von der Fläche des

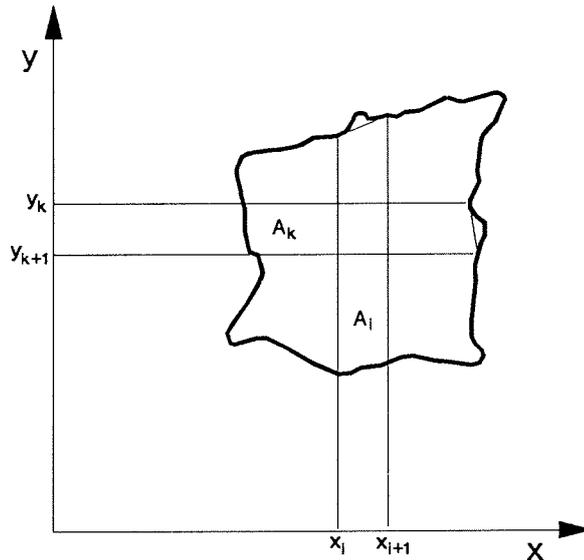


Abb. 2-5. Ermitteln des Schwerpunktes. A_i und A_k sind Trapezflächen bezüglich der x- bzw. y-Achse.

Segments abhängig ist. Die Schwerpunktkoordinaten errechnen sich dann aus der Summe der Einzelmomente geteilt durch die Gesamtfläche des Partikelquerschnitts.

$$x_s = \frac{\sum_{i=1}^N Mx_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad \text{und} \quad y_s = \frac{\sum_{i=1}^N My_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (2.9)$$

' A_i ' ist die Fläche und ' Mx_i ', bzw. ' My_i ' sind die Momente des i'ten Segments.

Die Fläche des i'ten Segments und die Einzelmomente bekommt man über die Gleichungen

$$A_i = (y_{i+1} + y_i)(x_i + x_{i+1})/2 \quad (2.10)$$

$$Mx_i = (x_{i+1}^2 + x_{i+1}x_i + x_i^2)(y_i - y_{i+1})/6 \quad (2.11)$$

$$My_i = (y_{i+1}^2 + y_{i+1}x_i + y_i^2)(x_i - x_{i+1})/6 \quad (2.12)$$

2.3.2. Berechnung der Polarkoordinaten

Die ursprünglichen karthesischen Umrisskoordinaten werden mittels der Beziehungen

$$\alpha_n = \tan((y_n - y)/(x_n - x)) \quad \text{und} \quad r_n = ((y_n - y)^2 + (x_n - x)^2)^{1/2} \quad (2.13)$$

in Polarkoordinaten umgewandelt. Aus diesen Koordinaten wird ein neuer Satz von 64 Koordinaten berechnet. Notwendige Bedingung ist, daß diese gleiche Winkelabstände zueinander haben. Sie werden daher aus den ursprünglichen Umrißkoordinaten interpoliert. Da die Richtung eines neu zu berechnenden Radius vorgegeben ist, benötigt man lediglich seine Länge. Diese erhält man aus dem Schnittpunkt zwischen dem Radius (gegeben als Punkt-Richtungs-Gleichung) und der Geraden zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umrißkoordinaten (Zweipunkte-Gleichung). Für die Winkel von Radius (α_m) und Umrißkoordinaten (β_i, β_{i+1}) muß gelten

$$\beta_i \leq \alpha_m \leq \beta_{i+1}$$

Der Schnittpunkt errechnet sich aus

$$y_m = \frac{(x_i - x_{pol})(y_{i+1} - y_{pol}) - (y_i - y_{pol})(x_{i+1} - x_{pol})}{(y_{i+1} - y_i)/\tan(\alpha_m) - (x_i + x_{i+1})} \quad (2.14)$$

und

$$x_m = y_m / \tan(\alpha_m) \quad (2.15)$$

wobei x_{pol}, y_{pol} die Koordinaten des Polpunkts sind.

Die neuen Koordinaten können dann wie oben beschrieben in Polarkoordinaten umgerechnet werden.

Für die hier dargestellte Interpolation wird eine gerade Linie zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten vorausgesetzt. Clark & Clark (1976) benutzten für die Interpolation eine Spline-Funktion. Es gibt jedoch keine Garantie, daß der tatsächliche Umriss damit besser approximiert würde als mit einer linearen Interpolation, die überdies rechenstechnisch einfacher zu handhaben ist. Letztlich dürfte die Lage der interpolierten Koordinaten mehr von der Aufrasterung der Partikelkontur bestimmt sein als durch die Art der Interpolation zwischen den Rasterpunkten.

2.3.3. Das Zentrierproblem

Mit der Wahl des Schwerpunktes als polarem Ursprung ist ein besonderes Problem verbunden. Dies zeigt der folgende Gedankengang: Die Umrißpunkte müssen für die Fourier-Analyse gleiche Winkelabstände zueinander haben, was bedeutet, daß aus der ursprünglichen Menge der Umrißkoordinaten ein neuer Satz Koordinaten mit gleichen Winkelabständen berechnet werden muß. Die neuen Koordinaten jedoch haben in aller Regel einen zum ursprünglichen Polpunkt verschobenen Schwerpunkt. Rechnet man die Koordinaten auf den neuen Schwerpunkt um, verschieben sich die Winkelabstände zwischen den Koordinaten. Das Problem ist erst dann gelöst, wenn für die ursprünglichen Koordinaten ein Polpunkt gefunden wird, der gleichzeitig der Schwerpunkt der neu berechneten Koordinaten ist. Einen Hinweis auf einen solchen "validen" Polpunkt bekommt man über die Amplitude für die Frequenz 1. Diese Frequenz gibt Aufschluß über das Maß der Dezentrierung des Partikels. Wenn die Am

Die Fourier-Analyse

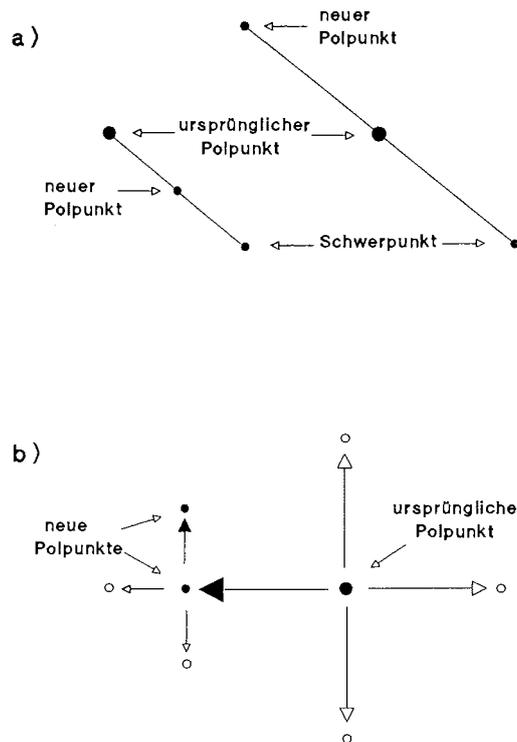


Abb. 2-6. Zentrieralgorithmen.
Erklärung siehe Text.

plitude für diese Frequenz gegen Null geht, ist der Umriß zentriert. Nach Full & Ehrlich (1982) kann man das Ergebnis der Zentrierung akzeptieren, wenn die Amplitude unter 0.007 liegt, ein Wert der auch für diese Arbeit benutzt wurde.

Full & Ehrlich (1982) schlagen für die Zentrierung einen Algorithmus vor, der aus mehreren iterativen Prozeduren besteht. Der wesentliche Kern des Algorithmus geht auf Boons, Evans & Hennigar (1982) zurück und sieht folgendermaßen aus: Wenn sich zwischen ursprünglichem Polpunkt und Schwerpunkt des Neuberechneten Koordinatensatzes eine Abweichung > 0.007 Pixeleinheiten ergibt, dann wird ein neuer Polpunkt an das Ende einer Linie gesetzt, die ausgehend vom Schwerpunkt durch den ursprünglichen Polpunkt verläuft und zweimal so lang ist, wie die Strecke zwischen ursprünglichem Polpunkt und Schwerpunkt (Abb. 2-6,a). Mit dem neuen Polpunkt werden die Koordinaten und der Schwerpunkt ein weiteres Mal berechnet. Die Prozedur wird solange durchlaufen, bis ein "valider" Polpunkt gefunden ist. Full & Ehrlich (1982, S. 50) berichten, daß dies - zumindest für Quarzkörner - fast immer nach 10 Iterationen der Fall ist. Umfangreiche eigene Tests ergaben jedoch, daß die Mehrzahl der Partikel sich mit diesem Verfahren nicht zentrieren lassen. Diese Diskrepanz mag verständlich sein, denn das Ergebnis der Zentrierung ist nicht nur vom verwendeten Algorithmus abhängig, sondern auch von der benutzten Methode zur Schwerpunktberechnung, der Anzahl der selektierten Koordinaten für die Analyse und schließlich von der Art der untersuchten Partikel selbst.

Das Fehlen einer geeigneten Zentriermethode machte die Entwicklung eines eigenen Verfahrens notwendig. Dieses Verfahren beruht auf zwei sequentiell gekoppelten, iterativen Prozeduren. Die erste Prozedur läßt sich wie folgt beschreiben: Zunächst wird für den ersten Satz interpolierter Koordinaten die Amplitude für die Frequenz 1 berechnet (die direkte Überprüfung der Frequenz 1 ist zwar mit mehr Rechnerzeit verbunden, ist aber auch absolut verläßlich). Übersteigt die Amplitude den Wert 0.007, dann wird ein neuer Polpunkt so gesetzt, daß er in der Mitte zwischen vorgehendem Polpunkt und Schwerpunkt der selektierten Koordinaten liegt. Die Prozedur wird solange wiederholt, bis die Amplitude unter 0.007 fällt, maximal aber nach 10 Iterationen. Für wenig irreguläre Partikel erzielt man mit dieser Prozedur gute Ergebnisse. Bei zerklüfteten Partikeln mit vielen Einbuchtungen oder aber bei einigen sehr länglichen Partikeln ist der Durchlauf einer zweiten Prozedur notwendig: Um den letzten Polpunkt herum werden nacheinander in vier Richtungen neue Polpunkte gesetzt (Abb. 2-6,b). Gibt es in der Umgebung einen Punkt für den die Berechnung der Frequenz 1 eine kleinere Amplitude ergibt als die des letzten Polpunkts, wird dieser zum neuen Ausgangspunkt. Wenn nicht, wird der Abstand der neu zu setzenden Polpunkte zum letzten Polpunkt um einen bestimmten Faktor verkleinert. Die Prozedur wird maximal 30 mal durchlaufen. Da der Polpunkt gleichsam in das Ziel geschoben wird, lassen sich mit dieser Methode nahezu alle Arten von Partikel zentrieren. Die bisherigen Untersuchungen an ca. 45.000 Geröllen und Quarzkörnern ergaben, daß lediglich 2-3 Partikel von 10.000 nicht zentriert werden können. Eine visuelle Überprüfung zeigte, daß diese "Durchfaller" überwiegend nadelförmige LS- oder IS-Projektionen von Geröllen waren. Bei solchen Umrissen bewirken geringste Polpunktverschiebungen erhebliche Änderungen des Schwerpunkts. Wahrscheinlich können solche extremen Umrisse ebenfalls zentriert werden, wenn man die Zahl der Iterationen für die zweite Prozedur erhöht.

2.3.4. Berechnung der Fourierkoeffizienten

Für die Berechnung der Fourierkoeffizienten werden die Integrale in den Gleichungen (2.3) bis (2.5) zunächst weiter aufgelöst:

$$R_0 = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} r_i(\varphi) d\varphi \quad (2.16)$$

$$a_m = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} r_i(\varphi) \cos m\varphi d\varphi \quad (2.17)$$

$$b_m = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^M \int_{\varphi_i}^{\varphi_{i+1}} r_i(\varphi) \sin m\varphi d\varphi \quad (2.18)$$

' $r_i(\varphi)$ ' ist die Polarkoordinatengleichung für das i 'te Segment. Es wird dabei angenommen, daß der Winkel ' φ_i ' eine lineare Funktion des Winkel zwischen zwei aufeinanderfolgenden Umrißpunkten ist. Mit

$$r_i(\varphi) = \frac{((r_{i+1} - r_i)\varphi + r_i\varphi_{i+1} - r_{i+1}\varphi_i)}{(\varphi_{i+1} - \varphi_i)} \quad (2.19)$$

können die Fourierkoeffizienten schließlich aus den folgenden, von Ehrlich & Weinberg (1970, S. 208) angegebenen Gleichungen bestimmt werden:

$$R_0 = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M (r_{i+1} + r_i)(\varphi_{i+1} - \varphi_i) \quad (2.20)$$

$$a_m = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \frac{(r_{i+1} - r_i)(\cos\varphi_{i+1} - \cos\varphi_i)}{(\varphi_{i+1} - \varphi_i)m^2} - \frac{r_{i+1}\sin m\varphi_{i+1} - r_i\sin m\varphi_i}{m} \quad (2.21)$$

$$b_m = \frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^M \frac{(r_{i+1} - r_i)(\sin\varphi_{i+1} - \sin\varphi_i)}{(\varphi_{i+1} - \varphi_i)m^2} + \frac{r_{i+1}\cos m\varphi_{i+1} - r_i\cos m\varphi_i}{m} \quad (2.22)$$

Die Amplitude für die m'te Frequenz ist nach (2.6)

$R_m = (a_m^2 + b_m^2)^{1/2}$ und der Varianzanteil der m'ten Frequenz an der Gesamtvarianz beträgt $S_m^2 = (a_m^2 + b_m^2)/2$. Die Gesamtvarianz eines durch 'M' Punkte gegebenen Umrisses ist nach der Parseval'schen Gleichung

$$S^2 = \sum_{i=1}^M (r_i - R_0)^2 = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^{M/2} R_m^2 + a_{M/2}^2 \quad (2.23)$$

2.3.5. Fehlerquellen

Neben dem oben angesprochenen Fehler, der durch die Abweichung von Polpunkt und Schwerpunkt der Koordinaten entsteht, gibt es eine Reihe weiterer Effekte, die sich ungünstig auf die Ergebnisse auswirken können.

2.3.5.1. Mehrfachradien (double values)

Eine Beschränkung der radialen Fourier-Analyse besteht darin, daß die vom Schwerpunkt ausgehenden Radien den Umriß eines Partikels nur ein einziges Mal schneiden dürfen, d.h. die Radien müssen eindeutig sein. Dies ist oft nicht der Fall. Dafür gibt es zwei Ursachen:

Zum einen haben besonders irreguläre Partikel häufig vorstehende Nasen, Einbuchtungen etc., was dazu führt, daß für ganze Segmente der Umriß mehrfach repräsentiert ist (vgl. Abb. 1-3). Es steht dann im Ermessen des jeweiligen Bearbeiters, ob ein

Die Fourier-Analyse

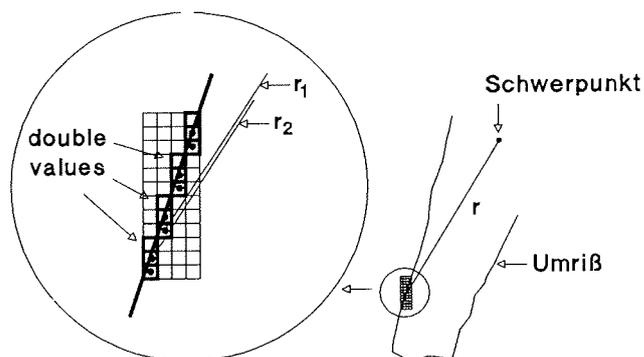


Abb. 2-7. Das Aufrastern der Umrißlinie als Ursache für 'double values'.

solcher Partikel trotz Wegfalls bestimmter Umrißabschnitte hinreichend durch die Fourier-Analyse erfaßt wird. Nach Meinung von Full & Ehrlich (1982, S. 51) gehen erst bei mehr als 5% Mehrfachwerten wesentliche Informationen über die Partikelgestalt verloren. Dieser Wert ist sicher nicht zu hoch gesetzt. Er erscheint zwar etwas willkürlich, andererseits ist es weder möglich, den entstehenden Fehler zu quantifizieren, noch ist es möglich, jeden Partikelumriß einer (dann immer noch subjektiven) visuellen Kontrolle zu unterwerfen. Es bleibt also nur die formale Begrenzung auf ein bestimmtes %-Limit.

Die andere Ursache für die Mehrfachwertigkeit entsteht durch das Aufrastern der Partikelkontur. Betroffen sind meist nur einzelne Punkte. Bei extrem länglichen Partikeln jedoch können auch ganze Abschnitte von Mehrfachwerten durchsetzt sein (Abb. 2-7). Solche Mehrfachwerte können mit geeigneten Algorithmen leicht herausgefiltert werden, ohne daß der Umriß verfälscht würde.

2.3.5.2. Fehler durch die Digitalisierung (Pixelrauschen)

Mit der Digitalisierung wird die ursprünglich "analoge" Partikelkontur zu einer Abfolge von diskreten Punkten innerhalb eines Rasters. Entsprechend der Feinheit des verwendeten Rasters wird die Kontur dabei mehr oder weniger gut aufgelöst (Abb. 2-8). In absoluten Werten beträgt der Fehler maximal 0.5 Rastereinheiten oder Pixel und die Standardabweichung der Real- von den Pixelkoordinaten wird von Bendat & Piersol (1971) mit ca. 0.29 Rastereinheiten angegeben.

Die Auswirkungen auf das Amplitudenspektrum sind abhängig von der Auflösung durch das Raster; je schlechter die Auflösung desto größer der entstehende Fehler bzw. der Rauschanteil der auf die Rasterung zurückzuführen ist. Der Effekt wird auch als Pixelrauschen bezeichnet.

Boon, Evans & Hennigar (1982, S. 595) haben den Einfluß der Digitalisierung an Glas- kugeln getestet. Da die Amplitudenwerte bei reinen Kreisen theoretisch Null sind, er

Die Fourier-Analyse

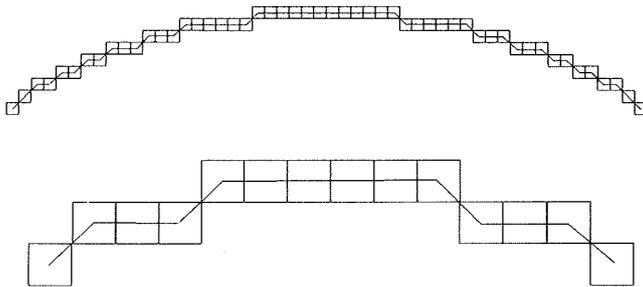


Abb. 2-8. Darstellung eines Kreisbogens mit Rastern unterschiedlicher Auflösung.

hält man darüber ein brauchbares Fehlermaß. Bei einer Auflösung von durchschnittlich 250 Pixeln für die Kugelumrisse ergaben sich für die Frequenzen 14-24 Amplitudenwerte zwischen 0.0003 und 0.0009.

Besser noch läßt sich der Fehler quantifizieren, wenn man verschiedene Raster benutzt. Ein solcher Test, mit Auflösungen zwischen 100 und 1100 Pixeln pro Umriß, ergab zunächst, daß der Fehler in allen Frequenzen in etwa gleich ist, d.h. die Amplituden ändern sich bei einem Sprung von einer Auflösung zur nächsten um durchschnittlich denselben Betrag (Abb. 2-9). Plottet man im nächsten Schritt die Änderungsbeträge gegen die reziproke Anzahl der Pixel pro Umriß erhält man eine lineare Fehlerfunktion mit einem ausgezeichneten Korrelationskoeffizienten ($> > 99\%$) (Abb. 2-10):

$$R_{\text{npts}} = 0.17/\text{npts} \quad (2.24)$$

' R_{npts} ' ist die durchschnittliche Zunahme der Amplituden durch die Rasterung. Da die Streuung der Änderungsbeträge innerhalb des Frequenzbandes erheblich ist, kann

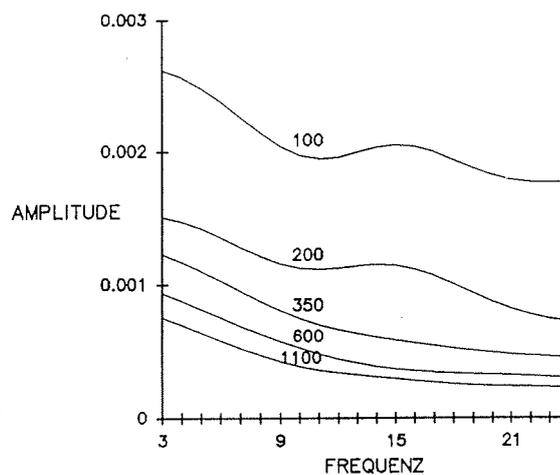


Abb. 2-9. Amplitudenspektren einer Kreisscheibe, deren Umriß mit mit einer unterschiedlichen Anzahl von Rasterpunkten digitalisiert wurde (100, 200, 350, 600, 1100). Mit steigender Auflösung sinken die Amplitudenwerte gleichmäßig ab. Für die Darstellung wurden die Spektren leicht geglättet.

Die Fourier-Analyse

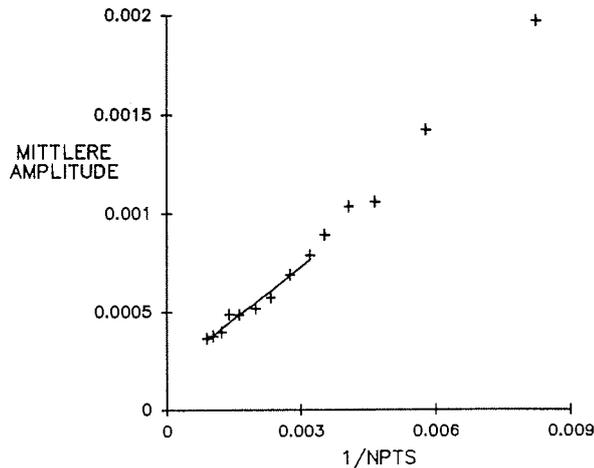


Abb. 2-10. Zunahme der durchschnittlichen Amplitudenwerte bei sinkender Bildauflösung, dargestellt als reziproke Anzahl der Pixel pro Umriss ($1/npts$). Die Regression wurde auf Auflösungen > 500 Pixel ($1/npts = 0.002$) beschränkt - Erklärung siehe Text.

man keine Fehlervorhersagen für einzelne Frequenzen machen. Es läßt sich jedoch über (2.23) der Varianzanteil in den Spektren, der auf die Digitalisierung zurückzuführen ist, in Abhängigkeit von der Pixelzahl schätzen; das jedoch auch nur bis zu einer gewissen unteren Auflösungsgrenze. Hat man es nicht mit Kreisen, sondern mit beliebigen Umrissen zu tun, dann ist die Fehlervarianz jenseits einer bestimmten Grenze nicht mehr kalkulierbar. Ein Test mit unterschiedlich gerundeten Geröllen ergab zunächst für alle Rundungsgrade einen gleichmäßigen Anstieg der Fehlervarianzen mit abnehmender Bildauflösung. Ab einer Auflösung von ca. 500 Punkten sind die Varianzänderungen dann sehr viel unstabiler und zudem von dem Rundungsgrad abhängig (Abb. 2-11): Bei den gut gerundeten Geröllen steigt die Varianz sprunghaft an und bei den eckigen Geröllen kommt es tendenziell zu einer Abnahme der Varianz, was auf die mangelnde Auflösung der scharfen Ecken durch die Rasterpunkte zu-

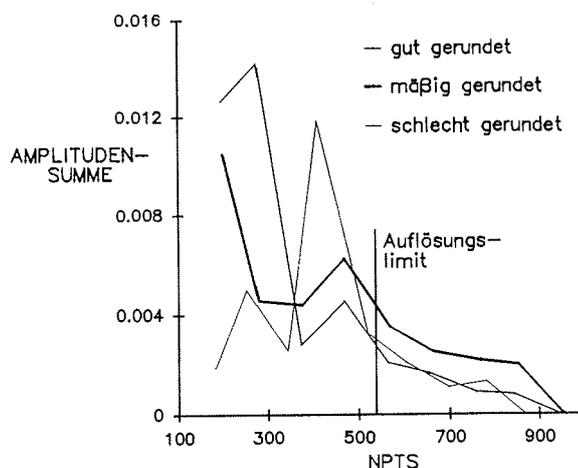


Abb. 2-11. Anstieg der Amplituden-summen bei abnehmender Bildauflösung. Die Summen wurden für Partikel mit unterschiedlicher Rundung berechnet. Bei Auflösungen der Umrisslinie mit weniger als 500 Pixeln ist der Anstieg nicht mehr kalkulierbar.

Die Fourier-Analyse

rückzuführen ist. Fehlerschätzwerte sollten daher auf Auflösungen > 600 Pixel beschränkt werden. Im übrigen ist es empfehlenswert, für die Digitalisierung eine möglichst hohe und eng begrenzte Auflösung zu wählen.

Die z.Z. gängigen Bildverarbeitungssysteme erlauben eine Aufrasterung der Bildvorlage mit 512×512 Pixeln. Damit kann ein Umriß mit maximal ca. 1500 Punkten erfaßt werden. In der praktischen Anwendung liegt der Durchschnittswert bei ca. 750.

2.3.5.3. Aliasing

Bevor man die Breite des Frequenzbandes und die Zahl der in die Fourier-Analyse eingehenden Punkte festlegt, sollte man den Effekt des 'aliasing' berücksichtigen. Dieser entsteht durch die Rückkoppelung hoher, nicht auflösbarer Frequenzanteile in niedrigere Frequenzbereiche. Die höchste Frequenz, die mit einer Zahl von 'M' Umrißpunkten aufgelöst werden kann, ist $M/2$, die sogenannte Nyquist-Frequenz ' w_N '. Die "Alias"-Frequenzen für eine Frequenz $w < w_N$ sind: $2w_N + w, 4w_N + w, \dots$. Wenn in diesen Frequenzen Varianzanteile vorhanden sind, schlagen sich diese in der Frequenz ' w ' nieder. Da die Amplituden mit steigender Frequenz logarithmisch abnehmen, kann man den Effekt des 'aliasing' über die Zahl der Umrißpunkte 'M' bzw. über die Nyquist-Frequenz steuern. Wählt man die Nyquist-Frequenz so, daß sie deutlich über der höchsten für die Analyse verwendeten Frequenz liegt, so ist der Effekt weitestgehend bedeutungslos.

2.3.5.4. Verzerrung der Partikelumrisse durch optische Geräte

Durch den Chip der Videokamera entsteht eine lineare X/Y-Verzerrung der Partikelumrisse, die über einen einfachen Faktor korrigiert werden kann (vgl. Kap. 6.5.). Daneben entstehen weitere, nichtlineare Verzerrungen über die Optik der Kamera, sowie mögliche, in das System einbezogene Geräte wie z.B. ein Mikroskop. Eine Korrektur jedoch müßte sich auf bestimmte optische Einstellungen beschränken. Verzerrungen mit modernen Optiken sind zudem sehr gering.

2.3.6. Wahl der Frequenzbreite und Anzahl der Umrißpunkte

Die Wahl der Bandbreite ist hauptsächlich eine Frage nach der höchsten, sinnvoll verwendbaren Frequenz. Diese sollte aufgrund des 'aliasing'-Effekts deutlich unter der Nyquist-Frequenz liegen, welche wiederum von der Anzahl der in die Fourier-Analyse eingehenden Punkte abhängt. Wegen des Digitalisierungseffekts hat es andererseits wenig Sinn die Nyquist-Frequenz, bzw. die Punktzahl allzu hoch zu setzen. Der Digitalisierungseffekt wirkt sich in allen Frequenzen etwa gleichbleibend aus. Man kann daher schätzen, daß bei einer Zahl von minimal 400 ursprünglichen Pixelkoordinaten etwa ab der Frequenz 50 der Großteil der vorhandenen Varianz von der Rasterung erzeugt wird. Berücksichtigt man noch den 'aliasing'-Effekt, dann wird klar,

Die Fourier-Analyse

warum kaum ein Bearbeiter mehr als 30 Frequenzen benutzt. Durchgesetzt hat sich in der Praxis die Verwendung der Frequenzen 1-24.

Boon, Evans & Hennigar (1982, S. 595) gehören zu den Bearbeitern, die diesen Frequenzbereich benutzen. Die Autoren wählen einen Satz von 96 Koordinaten für die Fourier-Analyse, um den 'aliasing'-Effekt zu begrenzen. Mazzullo & Ehrlich (1983), Kennedy & Ehrlich (1984), Mazzullo & Magenheimer (1987) - um nur einige zu nennen - arbeiten ebenfalls mit den Frequenzen 1-24, benutzen aber einen Satz von nur 48 Koordinaten für die Analyse. Nach Full & Ehrlich (1982, S. 47) ist das 'aliasing' erwünscht, um die in den höheren Frequenzen vorhandene Information nutzbar zu machen. Solange es jedoch zum 'aliasing' bzw. zum Digitalisierungseffekt keine detaillierten Untersuchungen gibt, kann man den Wert dieser Information bezweifeln.

Für die hier vorliegende Arbeit wurden die Frequenzen 1-24 und ein Satz von 64 Punkten benutzt. Die Nyquist-Frequenz liegt dann bei 32, womit die kleinstmögliche "Alias"-Frequenz 40 ist. Damit ist der Rückkoppelungseffekt auf Frequenzbereiche beschränkt, die in den Amplituden um mehr als eine Zehnerpotenz kleiner sind. Auch der Digitalisierungseffekt ist bei einer Auflösung von durchschnittlich 750 Pixeln äußerst gering.

DIE KORNRUNDUNG

3.1. Bedeutung der Rundung

3.1.1. Rundung und Transport

Die Frage nach dem Zusammenhang der Rundung mit der Transportgeschichte von Sedimenten ist in erster Linie eine Frage nach den Faktoren, welche den Rundungszustand eines Partikels bestimmen.

Zu nennen sind zunächst die Gegebenheiten des Herkunftsgebietes (vgl. Kap. 1.2.): Tektonik, petrographische oder mineralogische Beschaffenheit und Klima kontrollieren den Zerfall des Source-Gesteins und bestimmen so die anfänglichen Korngestalten und damit auch den anfänglichen Rundungszustand der Partikel (Abb. 3-1).

Dieser Zustand verändert sich durch den weiteren Einfluß der Verwitterung, besonders aber durch den Transport. Bei der Transportbewegung werden die Partikeloberflächen ungleichmäßig beansprucht, was zum Abrieb der Ecken und Kanten führt - die Partikel werden zugerundet. Da alle klastischen Sedimente ein Mehr oder Weniger an Transport erfahren, ist die Rundung eine allgemeine Eigenschaft von Sedimentpartikeln. Damit stellt sich die Frage, inwieweit es möglich ist, von dem Rundungszustand auf die Transport- bzw. Abrasionsgeschichte zu schließen, d.h. inwieweit die Rundung Aussagen über Art, Dauer und Richtung des Transports zuläßt.

Allgemein nimmt die Rundung mit der Transportdistanz zu, wobei die Zunahme nicht linear ist. Daubrée (1879) konnte feststellen, daß die Rundung anfänglich sehr schnell und danach nur noch sehr langsam zunimmt. Diese Beobachtung wurde in der Folgezeit vielfach bestätigt (vgl. Mills, 1979). Wentworth (1922), Krumbein (1941b) und Plumley (1948) formulierten logarithmische Beziehungen zwischen Rundung und die Transportdistanz. Kuenen (1956) betonte, daß eine solche Beziehung sinnvoll ist, da Partikel im anfänglichen Transport relativ viel Abrieb haben und dann die Abrasionsmengen zunehmend kleiner werden. Desweiteren gilt, daß die Abrasion mit

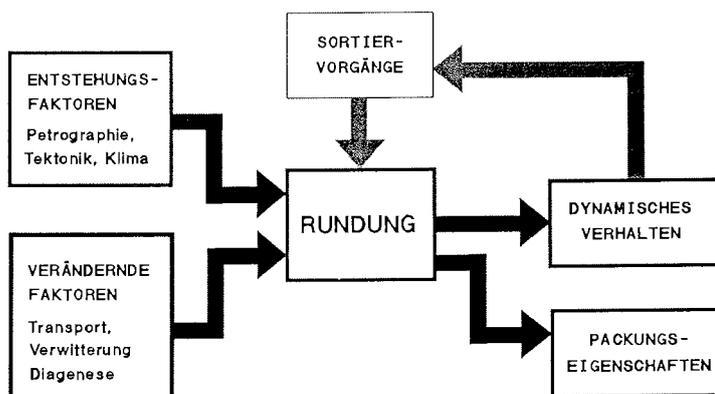


Abb. 3-1. Bedeutung der Rundung.

Die Kornrundung

der Korngröße abnimmt und sehr stark von der Gesteins- oder Mineralart abhängig ist.

Dennoch werden die mathematischen Beschreibungen von Plumley oder Krumbein der Komplexität der Beziehung nicht gerecht. Der Abrasionsprozeß wird nicht nur von der Transportart und der Petrographie und Korngröße der Partikel bestimmt, sondern ist in hohem Maße auch von der Transportgeschwindigkeit sowie den im Transport assoziierten Korngrößen und von der Art des Transportuntergrundes abhängig. Hinzu kommen Sortiereffekte während des Transports, die wiederum durch den Transportuntergrund und die Rundung der Partikel beeinflusst werden (Beal & Shepard, 1956; Kuenen, 1956, 1957).

Auch Verwitterungseinflüsse können eine große Rolle spielen. Gerölle zerfallen durch physikalische Verwitterung und verlieren so ihren Rundungszustand. Oberflächliche Verwitterungen können aber auch das Gegenteil bewirken. So wurde z.B. mehrfach experimentell gezeigt, daß Sandpartikel im fluvialen Transport extrem langsam zugerundet werden (u.a. Daubrée, 1879; Marshall, 1929). Kuenen (1959, S. 189) schätzt, daß ein gut gerundetes Quatzkorn mehrere Millionen Kilometer Flußtransport erfordert. Alternierende Transport- und Verwitterungszeiten jedoch verkürzen die notwendige Distanz ganz erheblich.

Ähnliche Effekte können entstehen, wenn das Sediment mehrmals "recycled" wurde. Da die Abrasion kumulativ wirkt, nimmt die Rundung mit jedem Sedimentationszyklus zu - es sei denn, andere Einflüsse, wie Verwitterung, bewirken das Gegenteil.

Aus alledem wird deutlich, daß die Rundung nur im Zusammenhang mit weiteren sedimentologischen Parametern brauchbare Aussagen zur Transportgeschichte ermöglicht (Krumbein, 1941b, S. 70). Jedoch auch dann sind quantitative Beschreibungen, wie Angaben über zurückgelegte Transportdistanzen, wahrscheinlich nur aus aktuo-geologischen Untersuchungen zu erhalten. Untersuchungen an fossilen Ablagerungen geben bestenfalls die richtigen Größenordnungen wieder (Pettijohn, 1957, p. 554). Erschwerend sind hier häufig Veränderungen durch diagenetische Prozesse (vgl. Kap. 1.2.).

Dennoch ist die Rundung als Dokument der Abrasionsgeschichte von Sedimenten unverzichtbar. Eingebettet in einen größeren Untersuchungsrahmen, kann sie erheblich zum Verständnis von Reifungsprozessen beitragen (vgl. Bartholomä, 1992). In einigen Fällen wurde die Rundung auch zur Diskriminierung unterschiedlicher Environments benutzt (Waskom, 1958; Sames, 1966; King & Buckley, 1968; Potter & Pettijohn, 1977, S. 280; Park & Pilkey, 1981). Laming (1966) setzte die Rundung erfolgreich zur Rekonstruktion von Schüttungsrichtungen im New Red Sandstein in Devonshire ein und bestätigte damit die Annahme von Pettijohn (1957, S. 554), daß die Rundung als Paläo-Strömungsanzeiger genutzt werden kann.

3.1.2. Der Einfluß der Rundung auf das dynamische Verhalten von Partikeln

Ging es im vorgehenden Abschnitt darum, wie die Transportbewegung den Rundungszustand eines Partikels verändert, so befaßt sich dieser Abschnitt damit, wie - umgekehrt - die Rundung die Transportbewegung beeinflusst.

Die Kornrundung

Dieser Einfluß läßt sich im wesentlichen dadurch erklären, daß bei einem unrunder Partikel an den Ecken und Kanten viel eher Turbulenzen entstehen als bei einem runden Partikel. Die Turbulenzen erzeugen einen höheren Strömungswiderstand und dieser wiederum sorgt dafür, daß sich die Sinkgeschwindigkeit der Partikel verringert.

Die Sinkgeschwindigkeit ist wichtig für den selektiven Transport von Sedimenten. Im wesentlichen bestimmt sie, ob und wie ein Partikel transportiert wird. Die so entstehenden Sortiervorgänge während des Transports sind größtenteils für die Korngrößen- und Kornformzusammensetzung eines Sediments verantwortlich. Umgekehrt erleichtert die Kenntnis selektiver Transportmechanismen die Interpretation fossiler Ablagerungen. Auch für technische Prozesse spielt die Sinkgeschwindigkeit eine große Rolle, so z.B. bei der Fluidisierung von Pulvern (Wirbelschichtverfahren) und von Spülflüssigkeiten bei Tiefbohrungen (drillmud) (Allen, 1985, S. 44).

Der Zusammenhang zwischen Kornform und Sinkgeschwindigkeit wurde in vielen Arbeiten experimentell untersucht (z.B. McNown & Malaika, 1950; Briggs et al, 1962; Komar & Reimers, 1978). Nur wenige Arbeiten jedoch beschäftigen sich mit dem Einfluß der Rundung auf die Sinkgeschwindigkeit. Dies liegt hauptsächlich an den Mängeln der verfügbaren Rundungsmeßverfahren und zum Teil auch an den Schwierigkeiten bei der Ermittlung des nominalen Durchmessers, denn Fehler bei der Korngrößenbestimmung überlagern die Ergebnisse sehr stark. So erhielten Baba & Komar (1981) bei Experimenten mit Quarzkörnern im Größenbereich 0,1 - 1 mm nur einen undeutlichen Zusammenhang zwischen der Sinkgeschwindigkeit und der Rundung. Goossens (1987) hingegen konnte nachweisen, daß bei Korngrößen $> 0,1$ mm die Sinkgeschwindigkeit mit abnehmender Rundung sowohl in Wasser als auch in Luft zunimmt. Der Einfluß der Rundung entspricht dabei in der Größenordnung dem der Sphärizität.

3.1.3. Der Zusammenhang zwischen der Rundung und den Packungseigenschaften von Partikeln

Auch die Packungseigenschaften von Partikelaggregaten werden durch die Rundung beeinflusst (vgl. Kap. 1.2.).

Eine wichtige Eigenschaft ist die Festigkeit einer Packung, welche von zwei Kräftekomponenten charakterisiert wird: Kohäsion und Reibung. Die Kohäsionskräfte entstehen durch Zementation und Kapillarwasser. Bei nichtkohäsiven Sedimenten wird die Festigkeit von der Reibung bestimmt. Die in einer Packung vorhandenen Reibungskräfte sind von den Kontaktflächen zwischen den Partikeln abhängig. Diese Kontaktflächen werden zum einen durch die Packungsdichte und zum anderen durch die Rundung und die Oberflächentextur bestimmt. Je dichter die Packung und je unrunder und rauher die Partikel, desto größer ist die Festigkeit. Scharfkantige Partikel sind darüberhinaus gut geeignet, entweder durch kriechende Bewegung, Drucklösung oder plastische Verformung, die Reibungsflächen und damit die Festigkeit zu vergrößern.

Reibungskräfte spielen auch bei der Ablagerung von Sedimenten eine Rolle, insbesondere für die Anfangsporosität. Beim Auftreffen eines Partikels auf die Sedimentoberfläche wird die kinetische Energie des Partikels teilweise in Reibungswärme um-

gesetzt und teilweise durch nichtelastische Kollisionen auf andere Partikel übertragen. Die Kollisionsbewegungen führen dazu, daß sich die Packung verdichtet (Kolbuszewski, 1950). Da bei ungerundeten Partikeln ein größerer Teil der Aufschlagsenergie in Reibungswärme umgesetzt wird, resultieren mit solchen Partikeln lockere Packungen, also größere Porositäten.

Mit der Porosität verändert sich auch die Permeabilität (Engelhardt & Pitter, 1951). Die Oberflächen von ungerundeten Partikeln erzeugen zudem im Porenraum einen höheren Strömungswiderstand, was die Permeabilität verringert.

Der Einfluß der Rundung auf die Packungseigenschaften von Sedimenten wurde bislang lediglich qualitativ beschrieben, obgleich diese Eigenschaften nicht nur bei sedimentologischen, sondern auch bei ingenieurgeologischen und geomorphologischen Fragestellungen (Bodenmechanik) eine bedeutende Rolle spielen.

3.2. Bisherige Arbeiten

Rundungskonzepte gaben in der Vergangenheit Anlaß zu kontroversen Diskussionen. Zahlreiche Methoden wurden vorgeschlagen (seit Mackie (1893) durchschnittlich alle 4 Jahre eine neue) und dennoch fehlt bis heute eine allgemein akzeptierte Lösung des Problems. Dies liegt einerseits an konzeptionellen Mängeln andererseits aber auch an den besonderen Schwierigkeiten, die mit der Rundungsmessung verbunden sind. Viele Methoden sind Kompromisse zwischen Konzept und Praktikabilität der Messung. Eine wesentliche Vereinfachung besteht darin, die Messung nicht am Partikel sondern an einer Projektionsebene des Partikels vorzunehmen. Implizit sind sich alle Bearbeiter einig, daß dadurch die Resultate nicht ernstlich verfälscht werden, obgleich der Nachweis dafür bislang gänzlich fehlt. Auch die Untersuchungen dieser Arbeit erbrachten diesbezüglich kein eindeutiges Ergebnis (vgl. Kap. 3.5.4.).

Die konzeptionell wichtigen Ideen für die Rundungsmessung gehen auf Wentworth (1919) und Wadell (1932) zurück. Wentworth führte die Kurvenkrümmung an den Ecken und Kanten als Rundungskriterium ein. Da die "Schärfe" einer Ecke relativ zur Größe des Partikels zu sehen ist, schlug er vor, den Krümmungsradius der schärfsten Ecke auf der Partikeloberfläche im Verhältnis zum längsten Durchmesser des Partikels zu messen, wobei der Durchmesser durch die gemessene Ecke laufen soll (Wentworth, 1919, S. 517) (Tabelle 3.2.1). Wentworth gibt keine Begründung für die besondere Lage der Bezugsgröße an, tatsächlich jedoch berücksichtigt er damit die Position der gemessenen Ecke (vgl. 3.3.2.). Da eine solche Messung, die zudem auch noch an der Partikeloberfläche und nicht an einer Projektion durchgeführt wird, sehr aufwendig ist, nahm Wentworth (1922) später davon Abstand. Das Verfahren setzt zudem voraus, daß das Endprodukt des Abrasionsprozesses eine Kugel ist. Dies würde bedeuten, daß sich Rundung und Sphärizität während des Transports gleichermaßen ändern.

Wadell (1932) dagegen war der Meinung, daß die Rundung unabhängig von der Sphärizität eines Partikels zu messen ist. Er setzte deshalb die gemessenen Krümmungsradien in Bezug zum größten, in den Partikelumriß einzuschreibenden Kreis. Wadell schlug weiter vor, nicht nur die schärfste, sondern alle Ecken in die Messung einzubeziehen. Um die Kurvenkrümmung zu erhalten, werden Radien von Kreisen

Die Kornrundung

Tabelle 3.2.1: Geschichte und kurze Bewertung von Methoden zur Rundungsmessung

AUTHOR	METHOD	CHARACTERISTICS	PROBLEMS
Wentworth (1919)	$\frac{d_s}{L_s}$	regards position of measured corner on the particle, definite ultimate shape (sphere)	only one corner, influence of sphericity, extremely laborious
Wentworth (1922)	$\frac{d_s}{(L+1)/2}$	Reduction to maximum projection plane measurement	only one corner, influence of sphericity, laborious
Wadell (1932)	$\frac{((\sum d_i)/n)}{D_i}$	curvatures of all corners averaged, influence of sphericity reduced	only convex parts, no definite ultimate shape, laborious
Szadeczky-Kardoss (1933)	Relation: $\%C_p, \%C_v, \%C_c$	curvatures of the complete outline are evaluated	semi-quantitative, no single roundness value, very laborious
Russel & Taylor (1937)	visual chart 5 classes	[Wadell], quick procedure	subjective (operator error), no discrimination of higher roundness grades
Krumbein (1941a)	visual chart 9 classes at equal steps	[Wadell], quick procedure, closely spaced discrimination	subjective (operator error), difficult assignment of deviating forms
Cailleux (1947)	$\frac{d_s}{L}$	[Wentworth]	strong influence of sphericity, only one corner, laborious
Pettijohn (1949)	visual chart 5 classes, geometrical scale	[Wadell], quick procedure,	subjective (operator error), no discrimination of higher roundness grades
Powers (1953)	visual chart 6 classes, geometrical scale	[Wadell], quick procedure, sensitive to lower roundness grades	subjective (operator error) no discrimination of higher roundness grades
Kuenen (1956)	$\frac{d_s}{l}$	[Wentworth], influence of sphericity reduced	only one corner, laborious
Szwarcz & Shane (1969)	Fourier analysis: 'roughness' - root-mean-square-difference (RMS) between calculated and observed radii on outline	rapid procedure, objective, influence of sphericity is compensated, regards position of curvatures	no definite ultimate shape, insufficient discrimination of higher roundness grades

Die Kornrundung

Tabelle 3.2.1: (Fortsetzung)

Ehrlich & Weinberg (1970)	Fourier analysis: 'roughness' $\Sigma (a_i^2 + b_i^2)^{-1/2}$	rapid procedure, objective	no definite ultimate shape, insufficient discrimination of higher roundness grades influence of sphericity
Dobkins & Folk (1970)	$\frac{d_s}{D_i}$	[Wentworth] & [Wadell], influence of sphericity reduced	only one corner, laborious
Swan (1974)	$\frac{(d_{s1} + d_{s2})}{(D_i/2)}$	[Wentworth] & [Wadell], influence of sphericity reduced	only two corners, laborious
Mazzullo & Haines (1988)	Fourier analysis	rapid procedure	no definite ultimate shape, high mean errors, no discrimination of higher roundness grades, influence of sphericity

Explanation of abbreviations

n	number of corners	L	Long-axis
d_s	diameter of sharpest corner	I	Intermediate-axis
d_i	diameter of i-th corner	C_p	curvature of plane parts
D_i	diameter of largest inscribed circle	C_v	curvature of convex parts
L_s	longest diameter through measured corner	C_c	curvature of concave parts
a_i, b_i	Fourier coefficients		
[Wadell]	based on Wadell's concept	[Wentworth]	based on Wentworth's concept

Die Kornrundung

gemessen, welche in die Ecken hineingelegt werden. Die maximal zu erfassende Kurvatur ist auf die des größten eingeschriebenen Kreises limitiert. Dadurch wird eine obere Begrenzung der Rundungswerte garantiert.

Wadell's Konzept fand bislang den breitesten Zuspruch. Das Verfahren ist jedoch sehr aufwendig und in Bezug auf die Entscheidung, was als Ecke gilt, auch subjektiv. Auf der Grundlage dieses Konzeptes entstanden daher eine Reihe von visuellen Rundungsvergleichstafeln. Die erste wurde von Russel & Taylor (1937) veröffentlicht. Fünf Rundungsklassen wurden darin unterschieden. Pettijohn (1957) verschob die von Russel und Taylor vorgegebenen Klassengrenzen, so daß diese eine geometrische Reihe bilden. Powers (1953) setzte eine weitere Klasse (sehr eckig) hinzu. Seine Skala ist besonders für den unteren Rundungsbereich geeignet. Krumbein (1941a) unterteilte die Wadell-Skala in neun gleichgroße Klassen. In jeder Gruppe sind neun Partikel abgebildet. Die von Krumbein gewählte Einteilung erlaubt eine relativ detaillierte Klassifizierung und ist zudem für die statistische Weiterverarbeitung gut geeignet.

Außer den angesprochenen Wadell-Tafeln, gibt es noch eine Reihe weiterer Vergleichstafeln, so von Guggenmoos (1934), Eißele (1957) und Reichelt (1961). Eine vollständige Auflistung gibt Köster (1964).

Mit den visuellen Vergleichstafeln läßt sich die Rundung schneller ermitteln, als durch geometrische Meßverfahren. Die Klassifizierung ist jedoch von dem jeweiligen Bearbeiter abhängig, wodurch erhebliche Fehler entstehen (Rosenfeld & Griffiths, 1953; Folk, 1955).

Auch das von Wentworth (1919) vorgestellte Verfahren der Messung der schärfsten Ecke wurde von mehreren Bearbeitern übernommen. Die Weiterentwicklung konzentrierte sich hier auf die Modifikation der Bezugsgröße zur gemessenen Ecke. Während Wentworth später selbst die intermediäre Achse vorschlug (Wentworth, 1922), wurde von Cailleux (1947) die längste Achse als Bezugsgröße benutzt. Diese Methode wurde zwar im europäischen Raum vielfach verwendet, ist jedoch auch stark kritisiert worden, da die Rundungswerte sehr von der Sphärizität der Partikel abhängig sind. Kuenen (1956) ging daher auf die intermediäre Achse als Bezugsgröße zurück und Dobkins & Folk (1970) schließlich verwendeten den Radius des größten eingeschriebenen Kreis, was einer Kombination der Verfahren von Wadell und Wentworth gleichkommt. Ähnlich modifizierte auch Swan (1974) das Wentworth-Verfahren, indem er die zwei schärfsten Ecken in Relation zum größten eingeschriebenen Kreis setzte.

Während die Wentworth- und Wadell-Methoden die Krümmung der konvexen Teile des Partikelumriß messen, wird mit der von Szadeczky-Kardoss (1933) entwickelten Methode der gesamte Umriß bewertet. Die Kurvenkrümmungen werden aber nicht qualitativ erfaßt, sondern es werden die prozentualen Anteile der geraden, konvexen und konkaven Umrißabschnitte ermittelt. Die Rundung wird daher mit dieser Methode auch nicht als einzelner Wert dargestellt. Es wurde zwar versucht, aus den Prozentanteilen weitere Parameter abzuleiten, die Interpretation jedoch ist etwas umständlich (Mrazek, 1972).

Die erste, auf der Fourier-Analyse basierende Methode zur Rundungsmessung wurde von Schwarcz & Shane (1969) beschrieben. Als Rundungsmaß benutzten Schwarcz & Shane die mittlere quadratische Abweichung zwischen den mit den Fourier-Koeffizienten berechneten Radien und den tatsächlichen Umrißradien (RMS - root mean

square difference). Da die Fourierreihe bei besser gerundeten Partikeln schnell gegen den tatsächlichen Umriß konvergiert, können die höheren Rundungsgrade mit dieser Methode nicht ausreichend diskriminiert werden. Dem Einfluß der Sphärizität versuchten die Autoren mit einem empirischen Korrekturfaktor zu begegnen, wobei sie gleichzeitig annahmen, daß der Einfluß der Sphärizität auf die Fourier-Koeffizienten mit steigender Rundung abnimmt. Im übrigen betonen Schwarcz & Shane, daß die Methode nur bedingt mit der Rundungsbewertung nach Wadell vergleichbar ist und führen daher den Begriff "Rauhigkeit" ('roughness') ein. Der Unterschied äußert sich z.B. darin, daß ein Dreieck mit der Fourier-Methode einen anderen Rundungswert erhält, wie ein Sechseck. Diese Diskrepanz wurde von ihnen nicht auf die Position der Ecken bezogen (vgl. Kap. 3.4.1.), sondern auf die mangelhafte Auflösung der Ecken durch die in die Fourier-Analyse eingehenden Umrißpunkte, was jedoch in diesem Zusammenhang irrelevant ist. Dennoch ist die Arbeit von Schwarcz & Shane eine Pionierarbeit. Die angesprochenen Probleme wurden von den nachfolgenden Bearbeitern nur noch teilweise aufgenommen.

Ehrlich & Weinberg (1970) lösten sich mit dem von ihnen beschriebenen 'roughness'-Koeffizienten gänzlich von dem konventionellen Rundungsbegriff. Die 'roughness' errechnet sich aus der Summe der Amplituden für die einzelnen Frequenzen, wobei der benutzte Frequenzbereich variabel ist. Obgleich von der Rundung verschieden, wurde die 'roughness' von Ehrlich & Weinberg und nachfolgenden Autoren wie z.B. Dowdeswell (1982) in einem ähnlichen Sinn wie die Rundung interpretiert.

Czarnecka & Gillott (1980) modifizierten die 'roughness', indem sie zusätzlich als Faktoren die Länge des Umrisses und das Verhältnis von kleinstem zu größten Radius mit einbeziehen. Damit kompensieren sie zumindest teilweise den Sphärizitäts-Einfluß.

Mazzullo & Haines (1988) schließlich fanden über die Digitalisierung der visuellen Rundungsvergleichstafeln von Krumbein (1941a) eine signifikante Korrelation zwischen den höheren 'harmonics' und der in den Tafeln ausgewiesenen Rundung. Sie schlugen daher kurzerhand als Rundungsmaß die 'harmonic' 19 vor (Abb. 3-2). Einzelne Frequenzen besitzen jedoch nur wenig Aussagekraft (Boon, Evans & Hennigar,

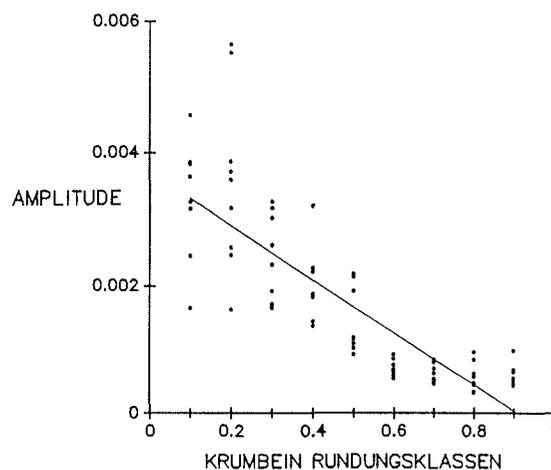


Abb. 3-2. Amplitudenwerte der Frequenz 19 für die Partikelumrisse aus der Rundungsvergleichstafel von Krumbein (1941a). Die höheren Rundungsgrade können mit der Frequenz nicht diskriminiert werden und bei den schlechteren Rundungsgraden ist die Streuung der Werte sehr hoch.

1982, S. 595). Um verlässliche Mittelwerte zu bekommen, braucht man große Probenmengen und auch dann ist eine Unterscheidung höherer Rundungsgrade nicht möglich. Der Einfluß der Sphärizität wird nicht problematisiert.

Zusammenfassend läßt sich zu den Fourier-Methoden sagen, daß die Ableitung der Rundungsinformation aus dem Fourier-Spektrum bislang nicht zufriedenstellend realisiert wurde, und zwar wahrscheinlich deshalb, weil auch die konventionellen Rundungskonzepte erhebliche Mängel aufweisen. Darauf soll im folgenden Abschnitt näher eingegangen werden.

3.3. Wie rund ist rund - ein neues Konzept

Die von Wentworth (1919), Wadell (1932) oder Szadecky-Kardoss (1933) vorgestellten Konzepte zur Rundung sehen als wesentliches Kriterium zur Rundungsbewertung ausschließlich die Krümmung der Oberfläche. Damit werden jedoch die durch den Abrasionsprozeß verursachten Veränderungen an den Partikeln nur unvollständig beschrieben. Um zu einer besseren Rundungsbewertung zu kommen, sind drei Kriterien notwendig: Die Krümmungen, die relative Position dieser Krümmungen auf dem Umriß und die Beziehung der Partikelgestalt zur seiner ultimativen Gestalt, d.h. der Gestalt, die sich trotz fortgesetzter Abrasion nicht mehr verändert.

3.3.1. Die Krümmungen

Mit den Wadell- und Wentworth-Methoden werden lediglich die konvexen Anteile des Umrisses gemessen. Geht man jedoch davon aus, daß eine optimal gerundete Gestalt ausschließlich konvexe Flächen besitzt, dann signalisieren die planen oder konkaven Umrißanteile den Rundungszustand eines Partikels ebenso wie die konvexen Anteile. Es sollten daher alle Krümmungen des Umrisses in die Rundungsberechnung miteinbezogen werden. Nur Szadecky-Kardoss (1933) haben dies in ihrer Methode berücksichtigt - die Bewertung der Krümmungen erfolgt allerdings nur semiquantitativ.

3.3.2. Die Positionen

Die Bedeutung dieses Kriteriums für die Rundungsbewertung wurde von Pettijohn (1957, S. 58) erkannt. Dieser teilte die konvexen Anteile eines Umrisses grob in zwei Gruppen ein: Die primären Ecken, welche zwischen den mehr oder weniger gut zu unterscheidenden "Flächen" eines Partikels liegen und die sekundären Ecken, welche die kleineren Unebenheiten auf den "Flächen" darstellen.

Kuonen (1956) konnte experimentell zeigen, daß die primären Ecken im Transport den stärksten Abrieb erfahren, weil diese die geringste Stabilität haben und die höchsten Kollisionsraten mit dem Transportuntergrund oder mit anderen Partikeln aufweisen. Zuerst werden die vorstehenden, exponierten Ecken zugerundet, während die "Flächen" dazwischen noch bis in die höheren Rundungsstadien erhalten bleiben können (Landon, 1930, S. 440; Russel & Taylor, 1937, S. 238; Kuonen, 1956, S. 343).

Die Kornrundung

Daraus folgt, daß die Wahrscheinlichkeit, ob eine bestimmte Ecke im Abrasionsprozeß verschwindet, nicht nur durch die Krümmung sondern auch durch die Position bestimmt wird. Für die Rundungsbewertung bedeutet dies, daß die Krümmungen auf dem Umriß entsprechend ihrer Position gewichtet werden müssen.

3.3.3. Rundung und Sphärizität - das Problem der ultimatén Gestalt

Die ultimate oder Endgestalt eines Partikels ist die Gestalt, gegen die ein Partikel im Abrasionsprozeß konvergiert. Hat ein Partikel eine solche Gestalt erreicht, dann ist er optimal gerundet und verändert sich nur noch in der Größe. Die Frage ist nun: Wie sieht eine solche "stabile" Endgestalt aus?

Wentworth (1919) nahm an, daß sich im Abrasionsprozeß alle Partikel zu Kugeln entwickeln und betrachtete folglich nur Kugeln als optimal gerundet. Krumbein (1941b) war der Meinung, daß die Sphärizität - ähnlich wie die Rundung - mit Transportbeginn zunächst schnell und dann nur noch sehr langsam zunimmt. Eine Zunahme der Sphärizität im Transport konnte jedoch bislang noch nicht eindeutig nachgewiesen werden. Russel & Taylor (1937), Plumley (1948) und Sneed & Folk (1958) erhielten im fluvialen Transport keine Sphärizitätszunahme, obwohl die Transportdistanzen mehrere hundert Meilen betragen (b. Russel & Taylor 1100). Grogan (1945) konnte bei Untersuchungen am Strand eine leichte Zunahme der Sphärizität feststellen; Landon (1930) und Pettijohn & Lundahl (1943) - ebenfalls Strand - registrierten dagegen eine leichte

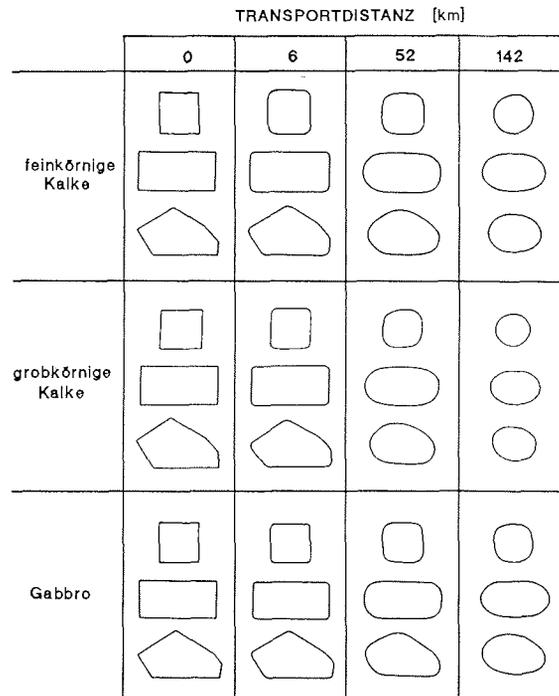


Abb. 3-3. Geröllumrisse aus einem von Kuenen (1956) durchgeführten Experiment zur Abrasion im fluvialen Transport. Für das Experiment wurden drei Gesteine unterschiedlicher Härte benutzt. Nach 142 km Transport haben die meisten Gerölle eine ellipsoidale Gestalt angenommen. Die grobkörnigen Kalke - als weichestes Gestein - haben darüberhinaus eine beträchtliche Größenreduktion erfahren, während die Gabbros - als härtestes Gestein - die ellipsoidale Gestalt noch nicht vollständig erreicht haben. [modifiziert nach Kuenen, 1956, S. 341]

Die Kornrundung

Abnahme. Kuenen (1964) konnte keinen Einfluß der Abrasion auf die Achsenverhältnisse von Strandgeröllen feststellen und auch die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen keine systematischen, durch die Abrasion verursachten Veränderungen der Kornform bzw. der Sphärizität. Man kann daher annehmen, daß Sphärizitätsänderungen während des Transports auf selektive Mechanismen zurückzuführen sind.

Wenn also die Sphärizität durch die im Transport wirksame Abrasion keine systematische Änderung erfährt, dann ist es auch sinnvoll - entsprechend der Forderung von Wadell (1932) - Sphärizität und Rundung unabhängig voneinander zu bewerten.

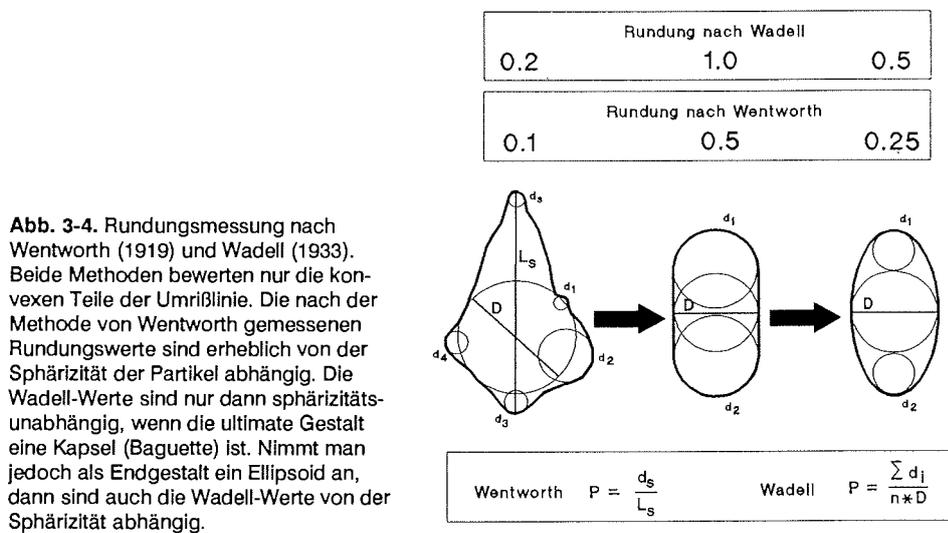


Abb. 3-4. Rundungsmessung nach Wentworth (1919) und Wadell (1933). Beide Methoden bewerten nur die konvexen Teile der Umrißlinie. Die nach der Methode von Wentworth gemessenen Rundungswerte sind erheblich von der Sphärizität der Partikel abhängig. Die Wadell-Werte sind nur dann sphäritätsunabhängig, wenn die ultimate Gestalt eine Kapsel (Baguette) ist. Nimmt man jedoch als Endgestalt ein Ellipsoid an, dann sind auch die Wadell-Werte von der Sphärizität abhängig.

Wadell schlug als Endgestalt u.a. kapselartige Gestalten (Baguettes) vor. In vielen Arbeiten jedoch finden sich eher Hinweise auf ein Ellipsoid als Endgestalt (Landon, 1930, S.437; Eißele, 1957; Köster, 1964, S. 148; Flemming, 1965; Cui & Komar, 1984; Goossens, 1987). Auch Kuenen (1956, 1960) und Kuenen & Perdok (1962) bekamen bei ihren Experimenten keine Kapseln sondern Ellipsoide als Endgestalten. Abb. 3-3 zeigt verschiedene Abrasionsstadien in einem dieser Experimente (Kuenen, 1956): Bereits nach 52 km Transport ist bei den quaderförmigen Geröllen die Kapselgestalt erkennbar. Nach weiteren 90 km jedoch haben nahezu alle Gerölle die ellipsoide Gestalt angenommen, was zeigt, daß die Kapsel nicht "stabil" ist und daher als Endgestalt nicht in Frage kommt. Das wiederum bedeutet aber, daß die nach den Methoden von Wadell oder Wentworth gemessenen Rundungswerte nach anfänglichem Anstieg wieder absinken (Abb. 3-4). Allgemein gilt für diese Methoden, daß mit steigender Elongation oder Exzentrizität des Ellipsoids der Rundungswert abfällt. Mit b^2/a als dem Krümmungsradius an den Scheiteln einer Ellipse entspricht der Rundungsabfall dem Halbachsenverhältnis b/a der Ellipse.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Methode vermeidet diesen Fehler, indem der Rundungszustand eines Partikel immer in Relation zu seiner ellipsoiden Endgestalt be-

Die Kornrundung

wertet wird. Die Rundung umgekehrt auf die initiale Gestalt zu beziehen ist nicht möglich, da die anfängliche Gestalt und damit die anfängliche Rundung der Partikel sehr unterschiedlich ist - auch wenn sie dieselbe Endgestalt haben. Ein Dodekaeder z.B. muß nur 25% seines Gewichts durch Abrasion verlieren, um sich zu einem Ellipsoiden zu entwickeln; ein Kubus oder Quader bereits 48% und ein Tetraeder gar 70%. Als verbindliche Bezugsgröße bleibt nur das Ellipsoid. Daher ist die ultimate Gestalt ein wesentlicher Aspekt bei der Rundungsbewertung.

3.3.4. Abschließende Bemerkung

Die bislang gängige Vorstellung, daß ein Dreieck denselben Rundungsgrad besitzt wie ein Sechseck oder gar ein Zwölfeck wird in der obigen Darstellung aufgegeben. Der Rundungsgrad 0,0 - aufgrund unendlich kleiner Krümmungsradien an den Ecken - war ohnehin nur eine Fiktion. Tatsächlich sind die Anfangsrundungen, wie viele empirische Untersuchungen zeigen, sehr unterschiedlich. Indem man die Krümmungen über ihre relative Lage gewichtet, schafft man eine Bewertung, welche mehr dem physikalischen Prozess - und auch mehr der natürlichen Vorstellung - entspricht. Ebenso findet das vielfach diskutierte Problem der Bezugsgröße mit der Einführung eines Ellipsoid als Endgestalt des Rundungsprozesses eine zufriedenstellende Lösung.

3.4. Die Ableitung der Rundung aus dem Fourier-Spektrum

3.4.1. Zusammenhang zwischen Rundung und Fourier-Spektrum

Um den Zusammenhang zwischen der Rundung und den Fourier-Spektren zu zeigen sind folgende Fragen zu klären:

1. Welche Frequenzen sind für die Bewertung der Rundung notwendig?
2. Wie reagieren die Spektren auf die unterschiedlichen Krümmungen?
3. Wie wirkt sich die relative Position der Krümmungen auf die Spektren aus?
4. Wie macht sich der Einfluß der Sphärizität in den Spektren bemerkbar?

zu 1 und 2: Frequenzen und Krümmungen

In den meisten bisherigen Arbeiten wurde davon ausgegangen, daß die höheren 'harmonics', etwa ab der Frequenz 10, die 'roughness' oder auch die Rundung widerspiegeln. Für eine Rundungsbewertung, welche die unter 3.3. genannten Kriterien berücksichtigt, ist dieser Frequenzbereich nicht ausreichend. Mit den höheren Frequenzen werden nur die feineren Umrißdetails erfaßt. Gut gerundete Partikel jedoch besitzen nur noch grobe Gestaltanteile und werden daher am besten durch den niedrigen Frequenzbereich repräsentiert. Für die Konstruktion eines gut (aber nicht optimal) gerundeten dreieckigen Umrisses braucht man z.B. nur die 'harmonic' 3. Tatsächlich konvergieren die Fourierreihen bei gut gerundeten Partikeln bereits nach

Die Kornrundung

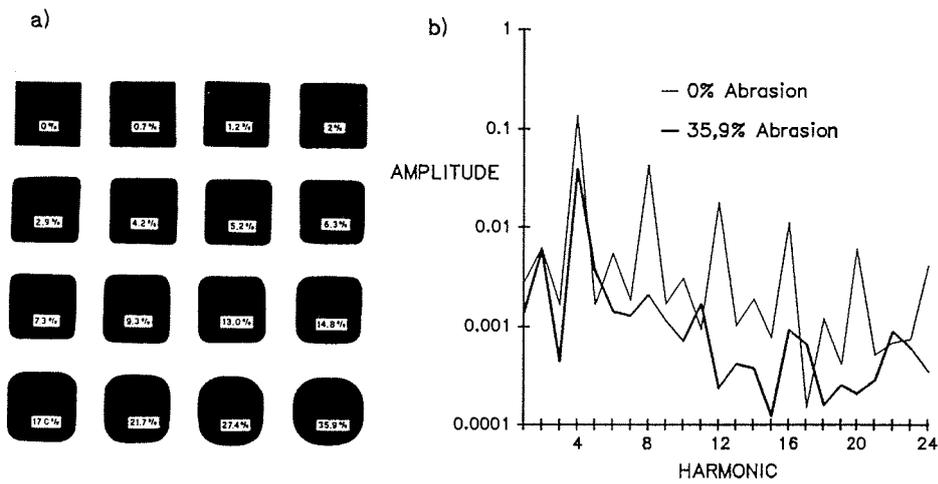


Abb. 3-5. a) Abrasionstadien an Kuben. Die Zahlen in den Kuben geben den prozentualen Gewichtsverlust an. [aus Kuenen, 1960, S. 439] b) Amplitudenspektren des initialen Kubus (0% Abrasion) und eines gut gerundeten Kubus (35,9% Abrasion).

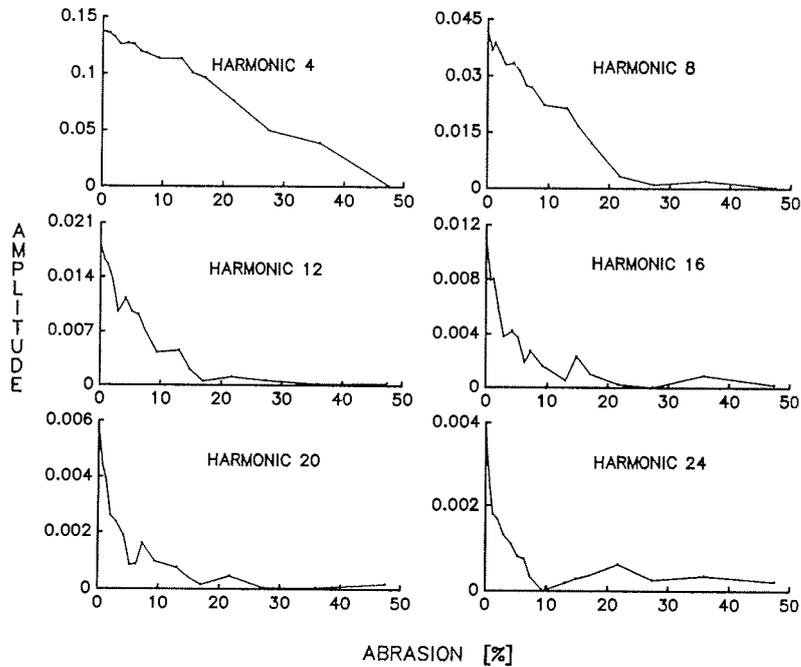


Abb. 3-6. Amplitudenabfall mit zunehmendem Abrasionsgrad. Höhere Frequenzen diskriminieren nur die anfänglichen Abrasionsstadien.

Die Kornrundung

etwa 10 Frequenzen gegen den Partikelumriß.

Um zu zeigen, welcher Frequenzbereich für die Rundungsbewertung notwendig ist, wurden Fourier-Spektren für eine Reihe von unterschiedlich gerundeten Kuben berechnet. Die Reihe wurde von Kuenen (1960, S. 439) veröffentlicht und gibt verschiedene Abrasionsstadien wieder - vom Würfel bis zur Kugel. Die Umrisse der Kuben sowie zwei Amplituden-Spektren sind in den Abbildungen 3-5, a und b zu sehen. In dem Spektrum für den initialen Kubus (0% Abrasion) kann man zunächst einen Echo-Effekt feststellen, welcher durch den quadratischen Umriß erzeugt wird - nur diejenigen 'harmonics', welche Vielfache der vierten Frequenz sind, haben signifikante Amplitudenwerte. Im zweiten Spektrum (35,9% Abrasion) ist dieser Effekt auf die vierte Frequenz beschränkt. Bei einem Dreieck als Grundform wäre der Effekt in allen Vielfachen der Frequenz 3 zu sehen. Dies macht deutlich, daß eine Rundungsbewertung mit einzelnen Frequenzen nicht möglich ist.

Abbildung 3-6 zeigt für die maßgeblichen Frequenzen die Abhängigkeit der Amplitudenwerte vom Grad der Abrasion bzw. von der Krümmung an den Ecken der Umrisse. Die Amplituden für die 'harmonic' 4 korrelieren danach mit dem Abrasionsgrad über den gesamten Bereich der Abrasion. Mit steigender Frequenz wird der unterschiedene Bereich kleiner und die hohen Frequenzen schließlich diskriminieren nur noch die anfänglichen Abrasionsstadien. Da die 'harmonic' 4 lediglich ein gut gerundetes Quadrat repräsentiert, kann mit dieser Frequenz allein nicht entschieden werden, ob ein Umriß scharfe oder gerundete Ecken besitzt - trotz der guten Korrelation. Für die korrekte Bewertung der verschiedenen Abrasionsstadien und damit auch für die Bewertung der Krümmungen ist der gesamte Frequenzbereich notwendig.

zu 3: Position der Krümmungen

Der Zusammenhang zwischen der relativen Position der Krümmungen und den Fourier-Spektren entsteht durch die Differenzen zwischen aufeinanderfolgenden Radien. An den exponierten Stellen eines gegebenen Umrisses sind die Differenzen am größten, was zu einem Anstieg der Amplituden bei denjenigen Frequenzen führt, die mit solchen exponierten Teilen korrespondieren. Im Beispiel mit den Kuben waren dies alle Vielfachen der Frequenz 4.

Um den Positionseffekt zeigen zu können, wurden zwei Umrisse modelliert. Die Krümmung an den Ecken - und damit die Wadell-Rundung - ist bei beiden identisch, nur in dem einen Fall sind die Ecken mehr exponiert (Abb. 3-7). In den Fourier-Spektren ist zunächst wieder der Echo-Effekt durch die quadratische Grundform zu sehen. Zu erkennen ist aber auch, daß die Amplituden für den Umriß mit den exponierteren Ecken durchgängig höher sind; darin ist die Gewichtung der Krümmungen an den Ecken zu sehen.

Das Zusammenspiel von Krümmung und Position zeigt auch das folgende Beispiel. Die Umrisse in der Abbildung 3-8 wurden ausschließlich mit den Frequenzen 4 und 8 konstruiert. Einen Umriß erhält man aus dem anderen, indem man die Phasen beider Frequenzen gegeneinander verschiebt. Bei dem ersten Umriß ist die Krümmung an den Ecken zwar stärker gekrümmt, dafür sind die Ecken des zweiten Umrisses mehr exponiert. Der Rundungsgrad ist nach der hier entwickelten konzeptionellen Vorstellung bei beiden Umrissen gleich.

Die Kornrundung

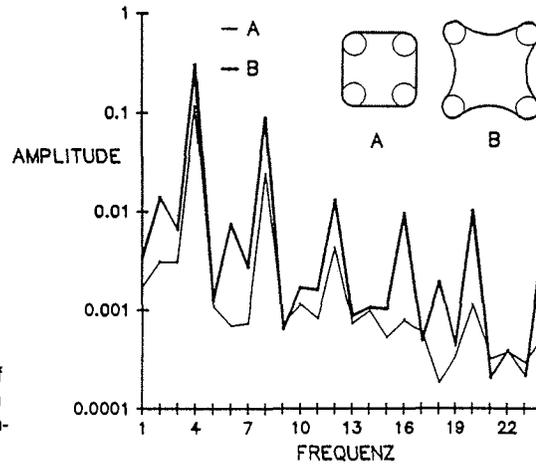
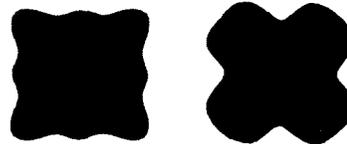


Abb. 3-7. Die Einfluß der Eckenposition auf die Amplitudenspektren. Der Umriss mit den exponierteren Ecken erzeugt fast durchgängig höhere Amplituden.

Abb. 3.8. Gewichtung der Krümmungen durch die Position. Die Umrisse werden ausschließlich mit den Frequenzen 4 und 8 erzeugt. Die Amplitudenwerte sind für beide Umrisse identisch. Durch unterschiedliche Phasenverschiebungswinkel entstehen zwei verschiedene Umrisse: Der eine mit schärferen, aber weniger exponierten Ecken, der andere mit mehr exponierten und runderen Ecken.



Dieses Beispiel macht außerdem deutlich, daß man für eine explizite Bewertung der Kurvenkrümmung die Phasenverschiebungswinkel braucht. Bezieht man hingegen die Position als weiteres Kriterium mit ein, genügt die Information aus den Amplituden.

zu 4: Einfluß der Sphärizität

Als letztes bleibt noch zu klären, wie sich die Sphärizität auf die Spektren auswirkt. Schwarcz & Shane (1969, Fig. 3) konnten feststellen, daß die Quadratsummen der Fourier-Koeffizienten erheblich zunehmen, wenn die Länglichkeit der Partikel zunimmt. Auch Czarnecka & Gillot (1977) registrierten einen solchen Zusammenhang.

Abbildung 3-9 zeigt die Amplitudenspektren eines rechteckigen Umrisses und einer dazu korrespondierenden Ellipse mit demselben Achsenverhältnis. Ähnlich wie bei dem quadratischen Umrissen ist auch hier in den Spektren ein Echo-Effekt zu sehen, der alle geradzahigen Frequenzen betrifft, d.h. der Länglichkeitseffekt ist durchaus nicht auf die Frequenz 2 beschränkt, wie in einigen Fällen behauptet wurde (Tilman, 1973; Dowdeswell, 1982, S. 1317). Ähnliche Resultate erhält man auch, wenn man die Spektren von realen Partikeln unterschiedlicher Länglichkeit untersucht, obwohl der Echo-Effekt - besonders im hohen Frequenzbereich - nicht so klar auf die geradzahigen Frequenzen beschränkt ist.

Die Kornrundung

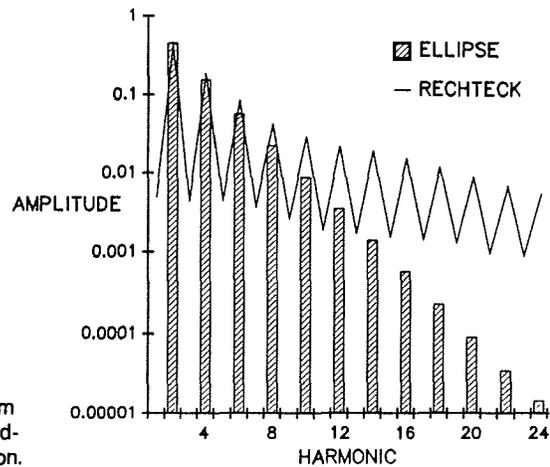


Abb. 3-9. Amplitudenspektren eines Rechtecks und einer Ellipse mit identischem Achsenverhältnis. Die Amplituden der geradzahlig Frequenzen folgen einer e-Funktion.

Schwarz & Shane (1969) und Czarnecka & Gillot (1977) versuchten den Sphäritätseffekt mit empirischen Faktoren zu kompensieren. Objektiver ist es, zu jedem Partikel eine Ellipse mit demselben Achsenverhältnis zu berechnen und dann deren Spektrum von dem Partikelspektrum zu subtrahieren. Ein solches Vorgehen eliminiert nicht nur den Sphäritätseinfluß, sondern macht es außerdem möglich, die Rundung eines Partikel eindeutig auf seine angenommene ultimate Gestalt zu beziehen.

3.4.2. Berechnung der Rundung

3.4.2.1. Summation des normalisierten Amplitudenspektrums

Da die Rundungsinformation sich über das gesamte Spektrum verteilt, müssen die Einzelinformationen in geeigneter Weise zusammengefaßt werden. Eine bloße Aufsummierung der Amplituden - wie von Czarnecka & Gillot (1977) vorgeschlagen - würde den kleineren Umrißdetails nicht genügend Gewicht geben, denn die Amplitudenwerte nehmen mit steigender Frequenz schnell ab (Abb. 3-10). Es ist deshalb sinnvoll, das Amplitudenspektrum zu normalisieren. Die Funktion dazu wurde aus dem gemittelten Spektrum für die Gerölle des kalabrischen Untersuchungsgebietes (vgl. Kap. 3.5.3.) abgeleitet. Mit

$$c_k = 0.56 e^{(0.2 k)} \quad (3.1)$$

wobei 'k' die Frequenz und 'c_k' der Gewichtungsfaktor ist, ergibt sich die Amplitudensumme aus

$$P_{pre} = \sum_{k=3}^n c_k(R_k) \quad (3.2)$$

Die Kornrundung

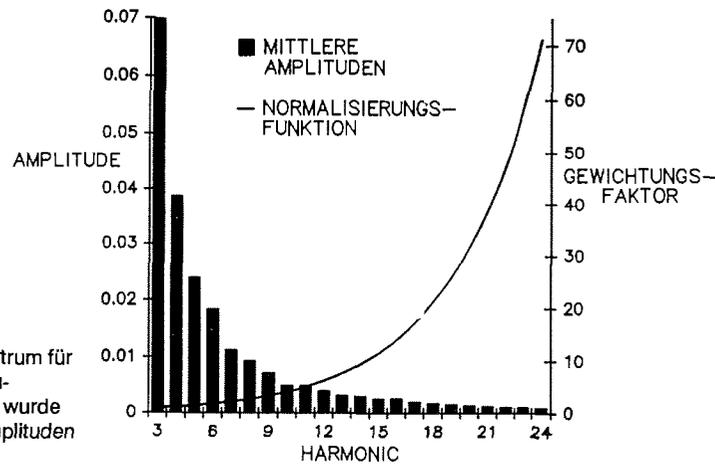


Abb. 3-10. Mittleres Amplitudenspektrum für die Gerölle des kalabrischen Untersuchungsgebietes. Aus dem Spektrum wurde eine Gewichtungsfunktion für die Amplituden abgeleitet.

' R_k ' ist die Amplitude der k-ten Frequenz und ' P_{pre} ' ein vorläufiger Rundungswert. Diese Gleichung gilt nur für Partikel mit einer Projektions-Sphärizität von 1 und muß daher für den allgemeinen Fall - Sphärizität ≤ 1 - erweitert werden.

3.4.2.2. Elimination des Sphärizitätseinflusses

Wie oben angedeutet, wird der Sphärizitätseinfluß eliminiert, indem von dem Spektrum eines Partikels das Spektrum der am besten approximierten Ellipse subtrahiert wird. Entsprechend 4.3.1. werden die Halbachsen der Ellipse aus der Amplitude für die 'harmonic' 2 berechnet. Die 'harmonic' 2 ist perfekt mit dem Halbachsenverhältnis 'b/a' der Ellipsen korreliert (vgl. Abb. 4-4). Ist das Halbachsenverhältnis bekannt, können die Radien und schließlich das Spektrum für die Ellipse berechnet werden.

Die Gleichung (2) wird entsprechend zu

$$P_{pre} = \sum_{k=3}^n c_k (R_k - R_{ek}) \quad (3.3)$$

erweitert. ' R_{ek} ' ist die Amplitude der k-ten Frequenz für die Ellipse.

In der Abbildung 3-11 sind die P_{pre} -Werte für Rechtecke mit verschiedenen Achsenverhältnissen dargestellt. Bis zu einem Längen-Breiten-Verhältnis von 3 ('harmonic' 2 $\approx 0,6$) ist die Eliminierung der Sphärizität akzeptabel. Bei größeren Achsenverhältnissen entstehen Unsicherheiten, da die Auflösung durch die selektierten Randpunkte an den beiden Enden des Umrisses mit steigendem Achsenverhältnis geringer wird (Abb. 3-12). Es kann daher sein, daß eine scharf gekrümmte Ecke mit den Randpunkten nicht mehr aufgelöst wird. In der Abb. 3-11 ist ein solcher Effekt etwa bei dem Wert 0,8 für die 'harmonic' 2 zu sehen. Partikel mit einem Achsenverhältnis > 3 sollten

Die Kornrundung

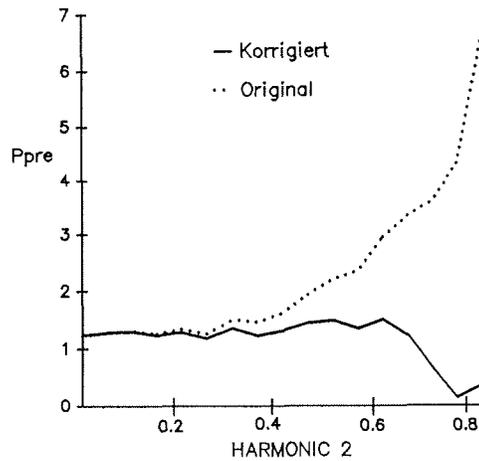
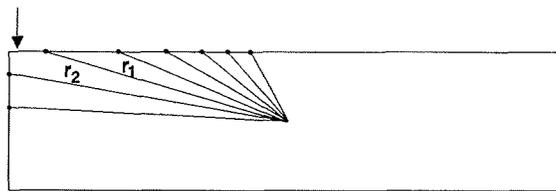


Abb. 3-11. Elimination der Sphärizität. Die beiden Graphen zeigen den Anstieg der P_{pre} -Werte für Rechtecke mit zunehmenden Achsenverhältnissen und die Korrektur der Werte durch Subtraktion der Amplitudenspektren korrespondierender Ellipsen.

Abb. 3-12. Zusammenhang zwischen dem Achsenverhältnis von Partikeln und der Eckenauflösung durch die Radien. Bei zunehmender Elongation der Partikel sinkt die Wahrscheinlichkeit, daß scharfe Ecken (Pfeil) durch die Radien erfaßt werden.



daher in einer Untersuchung nur bedingt berücksichtigt werden. Diese Restriktion dürfte zu vernachlässigen sein, denn extreme Achsenverhältnisse sind sehr selten. Bei den Untersuchungen an 20.000 kalabrischen Fluß- und Küstengeröllen hatten lediglich 5 Gerölle ein größeres Achsenverhältnis als 3 (Abb. 3-13). An Gesteinsarten waren Gneise, Schiefer, Granite, Pegmatite, Sandsteine und Kalksteine vertreten.

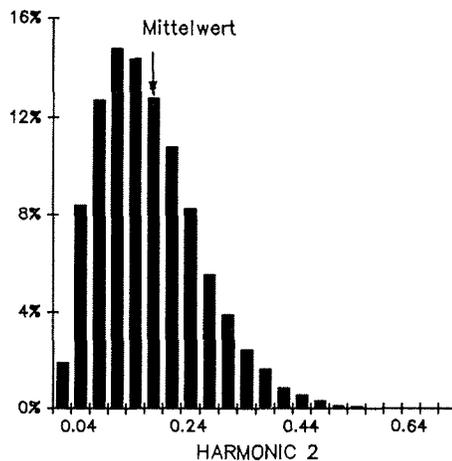


Abb. 3-13. Amplitudenverteilung der Frequenz 2 für Gerölle des kalabrischen Untersuchungsgebietes.

3.4.2.3. Der Digitalisierereffekt (Pixelrauschen)

Durch die Aufrasterung der Bildvorlage entsteht in den Spektren ein Fehler, der von der Auflösung des Bildes durch das Raster abhängig ist. Entsprechend 2.3.5.2. läßt sich dieser Fehler über die Beziehung

$$R_{npts} = 0.17/npts \quad (3.4)$$

schätzen. 'R_{npts}' ist die durchschnittliche Zunahme der Amplituden durch die Rasterung. Damit verändert sich die Gleichung (3.3) zu

$$P_{pre} = \sum_{k=3}^n c_k(R_k - R_{ek} - R_{npts}) \quad (3.5)$$

Da die Fehlerschätzwerte nur bis zu einer bestimmten unteren Auflösungsgrenze verläßlich sind, sollten die Umrisse für die Rundungsanalyse nur mit mehr als 600 Punkten digitalisiert werden.

3.4.2.4. Die Rundungsskala

Für perfekte Ellipsoide liefert die obige Gleichung (3.5) für 'P_{pre}' den Wert 0. Bei zunehmend schlechterer Rundung erhält man für 'P_{pre}' exponentiell ansteigende Werte und auch die Streuung der Werte nimmt zu (Als Vergleich dienen die Abstände zwischen den Rundungsklassen von mehreren visuellen Rundungsvergleichstafeln).

Um die Werte in eine eindeutig begrenzte Skala zu bringen und eine annähernde Normalverteilung der Werte zu gewährleisten, wird 'P_{pre}' über die Beziehung

$$P = e^{(-1.25 \cdot P_{pre})} \quad (3.6)$$

zum endgültigen Rundungswert 'P' reskaliert. Die Werte liegen damit zwischen 0 und 1.

Die Übereinstimmung mit den konventionellen, von Wentworth (1919) oder Wadell (1932) eingeführten Skalen, wurde bewußt gewählt, obwohl die Rundungswerte selbst sehr verschieden sein können.

3.5. Tests und Anwendungsfälle

3.5.1. Beispiele experimenteller Abrasion von Geröllen - Kuenen

Für die in 3.4.1. vorgestellte Kubenreihe wurden Rundungswerte berechnet und gegen den Gewichtsverlust durch Abrasion aufgetragen (Abb. 3-14). Die logarithmische Zunahme der Rundung korreliert ausgezeichnet mit den Abrasionsverlusten (>99%). Man beachte, daß jeder Punkt nur einen einzigen Kubus repräsentiert.

Ein weiteres der von Kuenen (1956) durchgeführten Experimente wurde bereits in

Die Kornrundung

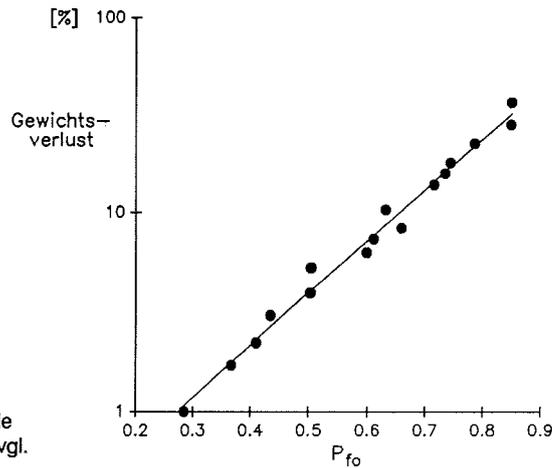


Abb. 3-14. Rundungswerte für die Kubenreihe von Kuenen (1960) (vgl. Abb. 3-5).

Kap. 3.3.3. (vgl. Abb. 3-4) beschrieben. Über eine Distanz von 142 km wurden drei verschiedene Gesteinsarten unterschiedlicher Härte zugerundet: Grobkörnige Kalke als das weicheste Gestein, gefolgt von feinkörnigen Kalken und von Gabbro als härtestem Gestein. Die letzten 90 km Transport erbrachten mit den konventionellen Meßverfahren keine Rundungszunahme mehr.

In der Abbildung 3-15 ist nun die Fourier-Rundung gegen die Transportdistanz aufgetragen. Die Ausgangsgestalten und entsprechend die anfängliche Rundung ist für alle Gesteinsarten identisch. Aufgrund der Härteunterschiede ergibt sich jedoch für jede Gesteinsart ein anderer Zunahmegradien.

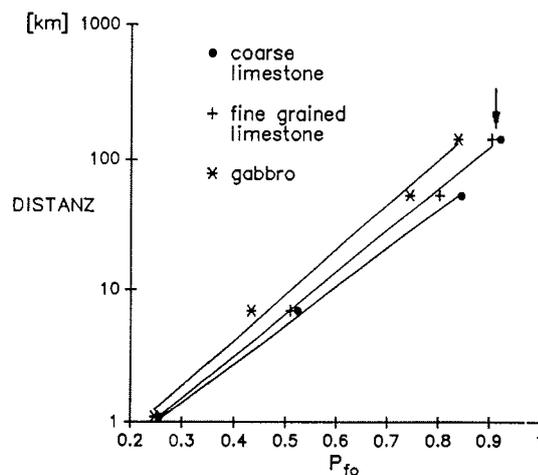


Abb. 3-15. Rundungswerte für experimentelle Gerölle von Kuenen (1956) (vgl. Abb. 3-4). Dargestellt sind drei Gesteinsarten und 4 Transportabschnitte (0, 6, 52 und 142 km). Die grobkörnigen Kalke - als weichstes Gestein - erreichen die ellipsoidale Endgestalt in weniger als der maximalen Transportdistanz. Der Gradient knickt daher ab (Pfeil). Aufgrund der Abbildungsqualität der Gerölle müssen Rundungswerte um 0.9 bereits als optimal angenommen werden.

3.5.2. Die visuellen Rundungsvergleichstafeln von Krumbein und Russel-Taylor

Ein Großteil der Rundungsanalysen der letzten Jahrzehnte wurde mit visuellen Vergleichstafeln durchgeführt. Es ist daher besonders interessant, die Fourier-Rundungswerte den Rundungsklassen in den Tafeln gegenüberzustellen.

Krumbein:

Die Krumbein-Tafel enthält neun Rundungsklassen mit jeweils 9 Konturen von künstlich geformten Partikeln (Krumbein, 1941a). Die Digitalisierung der Umriss ergab starke Abweichungen zwischen den Fourier-Rundungswerten und dem in den Tafeln ausgewiesenen Rundungsgrad (Abb. 3-16).

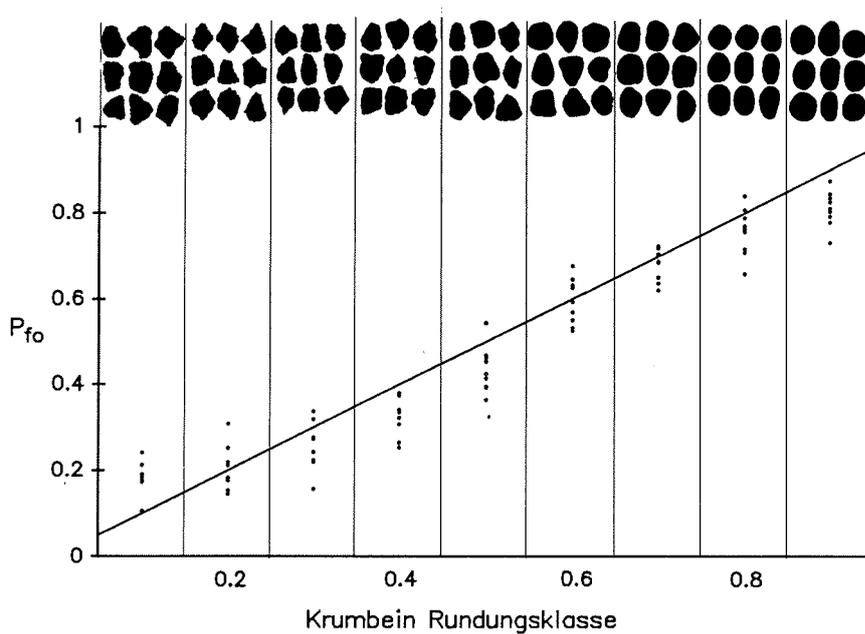


Abb. 3-16. Rundungswerte für die Partikelumrisse aus der visuellen Vergleichstafel von Krumbein (1941a). Die Gerade erleichtert den Vergleich der Werte.

Die Umrisse in den hohen Rundungsklassen wurden mit der Fourier-Methode beinahe durchgehend niedriger eingestuft. Hier macht sich der Unterschied zwischen der Kapsel und dem Ellipsoiden als Endgestalt bemerkbar.

Auffällig sind auch die unregelmäßigen Sprünge zwischen den Rundungsklassen und die Streuung der Werte. Dies ist darauf zurückzuführen, daß in den Tafeln die Position der Kurvaturen für die Rundungsbewertung keine Rolle spielt. Besonders deutlich wird dies bei den Rundungsklassen 1 und 2. Die Klasse 1 wird mit der Fourier-

Die Komrundung

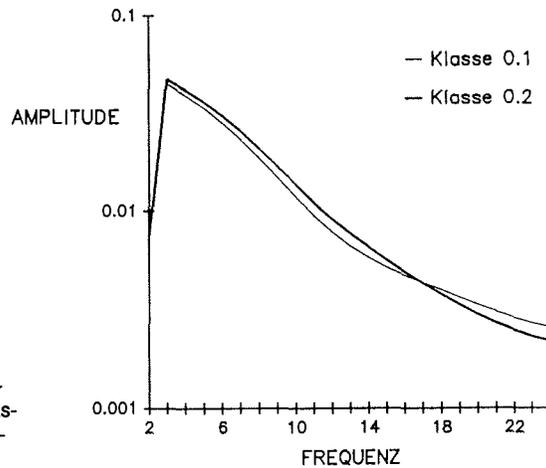


Abb. 3-17. Mittlere Amplitudenspektren der Partikelumrisse aus den Klassen 1 und 2 der visuellen Vergleichstafel von Krumbein (1941a).

Methode nur unwesentlich niedriger eingestuft, denn trotz schärferer Kurvenkrümmungen sind die Ecken durchschnittlich weniger exponiert als bei den Umrissen der Rundungsklasse 2. Wenn man die mittleren Spektren für beide Klassen berechnet, kann man feststellen, daß bei der Rundungsklasse 2 die Amplituden bis zur Frequenz 18 im Mittel höher sind. Erst bei den darüberliegenden Frequenzen kommen die schärferen Ecken der Klasse 1 zum Tragen (Abb. 3-17).

Russel-Taylor:

Die Vergleichstafel von Russel-Taylor (1937) beinhalten 5 Rundungsklassen mit jeweils 5 Umrissen. Auch hier kann man feststellen, daß sich die Klassen 1 und 2 in den Fourier-Werten nicht unterscheiden (Abb. 3-18).

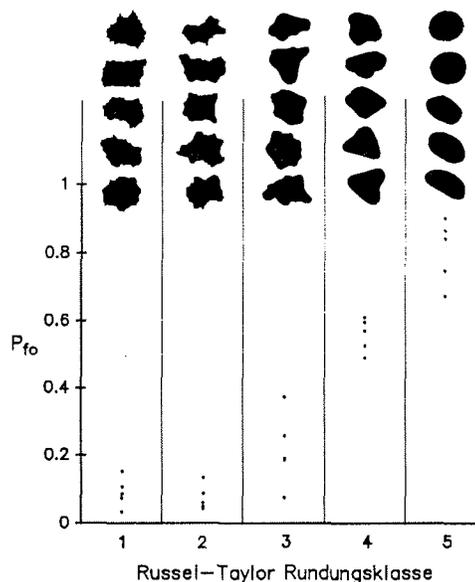


Abb. 3-18. Rundungswerte für die Partikelumrisse aus der visuellen Vergleichstafel von Russel & Taylor (1937).

Die Kornrundung

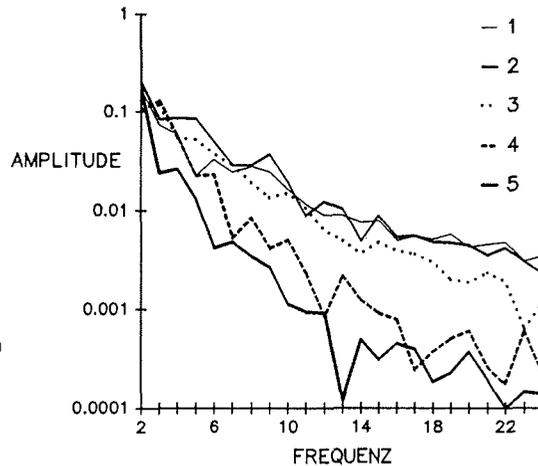


Abb. 3-19. Mittlere Amplitudenspektren für die einzelnen Klassen der Vergleichstafel von Russel & Taylor (1937). Die Klasse 1 hat im Vergleich zur Klasse 2 im niedrigen Frequenzbereich kleinere Amplitudenwerte und im hochfrequenten Bereich größere Werte. Dies deutet darauf hin, daß die Umrisse in der Klasse 1 schärfere, aber weniger exponierte Ecken haben.

Wiederum hat die Klasse 2 die exponierteren Ecken, was sich ähnlich wie bei der Krumbein-Tafel in den Spektren niederschlägt (Abb. 3-19)

Offensichtlich ist, daß Umrisse mit exponierten Ecken nicht aus Umrissen mit weniger exponierten Ecken entstehen können. Für das menschliche Auge vermengen sich daher in den Vergleichstafeln die zwei unterschiedlichen Kriterien für die Rundungsbewertung - Krümmung und Position der Krümmung. Dies erschwert den visuellen Vergleich und damit die Rundungsklassifizierung. Es ist deshalb sehr wahrscheinlich, daß der "Positionseffekt" in den Vergleichstafeln erheblich zum 'operator error' beiträgt.

3.5.3. Gerölle im Fluß- und Küstentransport, Kalabrien/Italien

Im Zusammenhang mit einer Untersuchung zur strukturellen Reifung von Fluß- und Küstengeröllen in Kalabrien/Italien wurde die Fourier-Methode zur Rundungsmessung erstmals empirisch getestet. Der fluviatile Abschnitt gehört zum Laverde südlich von Bianco und ist 6 km lang. Er beginnt an der 'fall line' und endet an der Flußmündung. Der Abschnitt entlang der Küste beginnt 400 m nördlich der Flußmündung und endet nach weiteren 5 km (Abb. 3-20). Da die Rundungsentwicklung entlang der Küste aufgrund selektiver Transporteinflüsse und unterschiedlicher Transportgeschwindigkeiten in den verschiedenen Küstenstreifen sehr komplex ist, beschränkt sich die Darstellung hier auf den 'shoreface'-Streifen. Detaillierte Beschreibungen finden sich bei Ibbeken und Schleyer (1991, S.147) und Bartholomä (1992).

Für die Rundungsmessung wurden Gerölle in den Fraktionen 25-50 mm ausgesucht. Drei Gesteinsgruppen unterschiedlicher Härte wurden unterschieden: Gneise mit einem hohen Gehalt an Phyllosilikaten (Gruppe GD), Gneise mit einem hohen Gehalt an

Die Komrundung

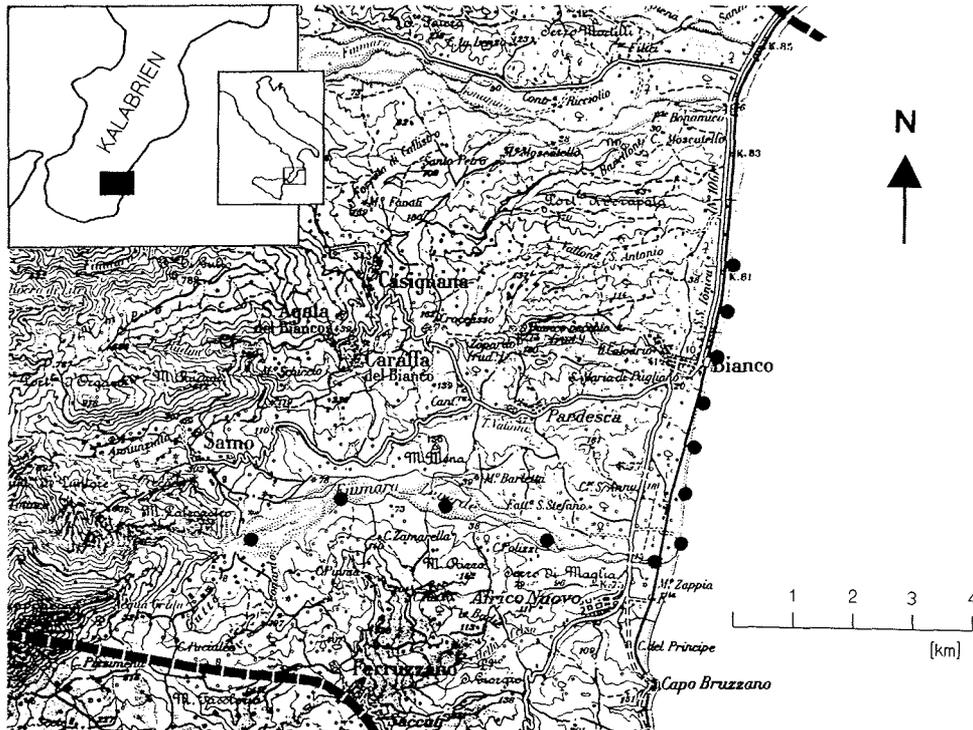


Abb. 3-20. Übersicht des kalabrischen Untersuchungsgebietes. Die schwarzen Punkte markieren die Lokalität der Proben entlang des Laverde und der Küste.

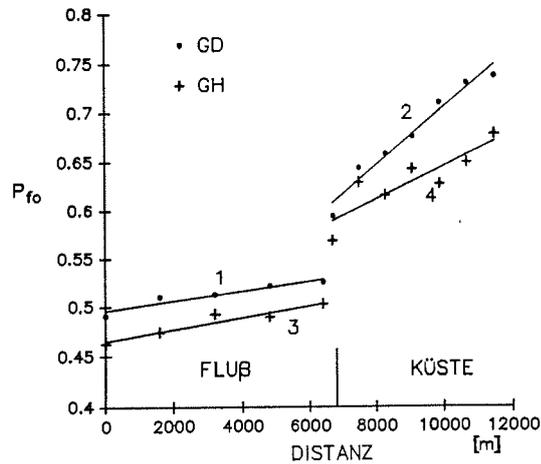
Quartz (GH) und eine Gruppe von pegmatitischen Geröllen (PGQ). In den fünf Fluß- und den sieben Küstenproben wurden insgesamt 3700 Gerölle gemessen. Die durchschnittliche Menge pro Probe und petrographischer Einheit betrug 150.

In der Abbildung 3-21 sind die Probenmittel für die Rundung gegen die Transportdistanz aufgetragen. In beiden Environments steigen die Rundungswerte an. Die Rundungszunahme im Flußtransport ist sehr gering (+0.03) und dennoch für beide Gesteinsarten signifikant (>99%). Im 'shoreface'-Streifen ist der Gradient deutlich steiler, wobei die Rundungszunahme bei der weicheren Gesteinsart etwa doppelt so hoch ist wie bei der härteren Gesteinsart. Der Sprung in den Rundungswerten vom Fluß zur Küste erklärt sich aus dem Wechsel vom unidirektionalen Flußtransport zum bidirektionalen Küstentransport. An dem Strand von Bianco überwiegt der Nordtransport. Durch die nach Süden gerichtete Transportkomponente werden bereits besser gerundete Gerölle zurückbewegt und vermengen sich mit "frischen" Geröllen aus dem Laverde.

Dieser Durchmischungsvorgang bestätigt sich in den Verteilungen der Rundungswerte für die Fluß- und Küstenproben: Im Fluß sind die Rundungswerte normal verteilt; die Küstenproben hingegen sind bei höherem Mittelwert positiv schief verteilt,

Die Kornrundung

Abb. 3-21. Rundungswerte für kalabrische Fluß- und Küstengerölle. Für die Untersuchung wurden zwei Gesteinsgruppen ausgewählt: Gneise mit einem hohen Gehalt an Phyllosilikaten (GD) und Gneise mit einem hohen Quarzgehalt (GH). Alle Regressionen haben signifikante Koeffizienten. Gemessen wurden 150 Gerölle pro Lokalität und Gesteinsgruppe.



d.h. ein "Pool" besser gerundeter Küstengerölle vermischt sich mit "frischen", weniger gerundeten Flußgeröllen (Abb. 3-22).

Die Rundungsverteilungen der Flußproben geben darüberhinaus einen ersten Beleg dafür, daß die Fourier-Methode annähernd normalverteilte Werte liefert.

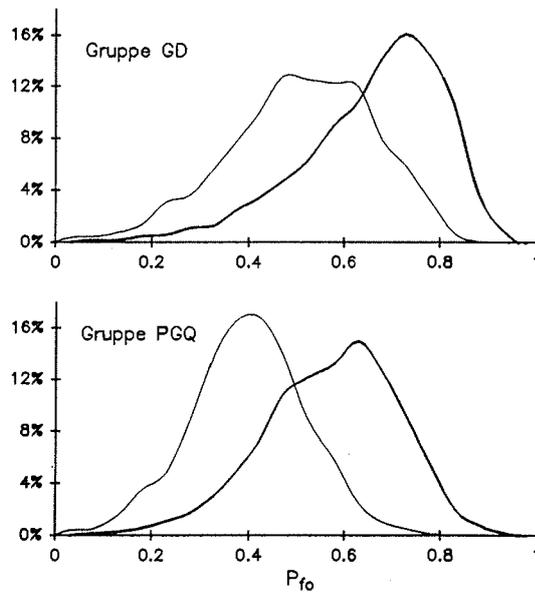


Abb. 3-22. Rundungsverteilungen für die Gesteinsgruppen GD und PGQ im Fluß (dünne Linie) und an der Küste (dicke Linie).

Die Kornrundung

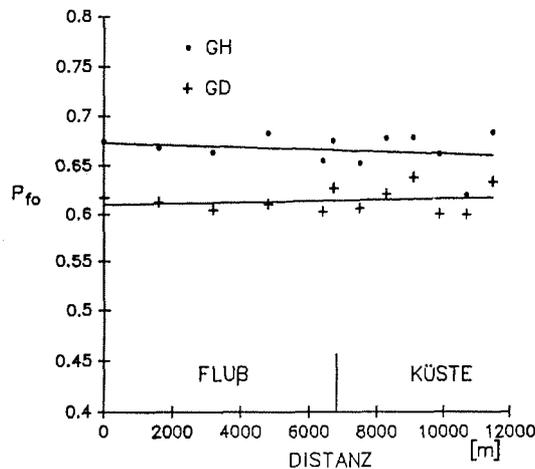


Abb. 3-23. Sphäritätswerte der Gesteinsgruppen GD und GH im Fluß- und Küstentransport.

Abbildung 3-23 zeigt die Sphäritätswerte für die kalabrischen Gerölle. Wie erwartet, gibt es lediglich kleine Schwankungen in den Mittelwerten; ein Trend ist nicht vorhanden. Damit bestätigt sich auch in den kalabrischen Daten, daß die Kornform durch den Abrasionsprozeß kaum verändert wird.

3.5.4. Alluviale Gerölle des Death Valley/Californien - Der Einfluß der Projektionsebene von Geröllen auf den Rundungswert

Auf dem Hanapauh Fan im Death Valley/Californien wurden alluviale Gerölle zweier Gesteinsarten unterschiedlicher Härte untersucht: Argillite, die größtenteils aus der präkambrischen Pahump-Gruppe stammen und die etwas härteren Quartzite des jungpräkambrischen Stirling Quartzite und der kambrischen Wood Canyon Formation (vgl. Labotka et al. 1980). Die gemessenen Korngrößen umfassen die Fraktionen 16-40 mm.

Die ersten Proben wurden ca. 2000 m oberhalb des 'fanhead' genommen; die weiteren Probenpunkte liegen im 'main channel', der im jetzigen Stadium tief in die Fanoberfläche eingeschnitten ist (Abb. 3-24). Neben der Untersuchung von Rundungstrends dienten die Gerölmessungen der Frage, welchen Einfluß die Projektionsebene auf die Rundungsbewertung hat. Im Death Valley wurde erstmals ein Verfahren erprobt, mit dem es möglich ist, Gerölle in allen Projektionen photographisch zu erfassen (vgl. 6.5.2.).

In Abbildung 3-25 ist die Zunahme der Rundung entlang der 5600 m langen Strecke dargestellt, wobei für die Messung zunächst nur die maximalen Projektionsflächen verwendet wurden. Danach gibt es bei den Argilliten einen signifikanten Rundungsanstieg von ca. 0.36 auf 0.42. Bei den härteren Quartziten steigt die Rundung von ca. 0.35 auf 0.38. Die Rundungsentwicklung ist hier sehr unregelmäßig und der Gradient

Die Kornrundung

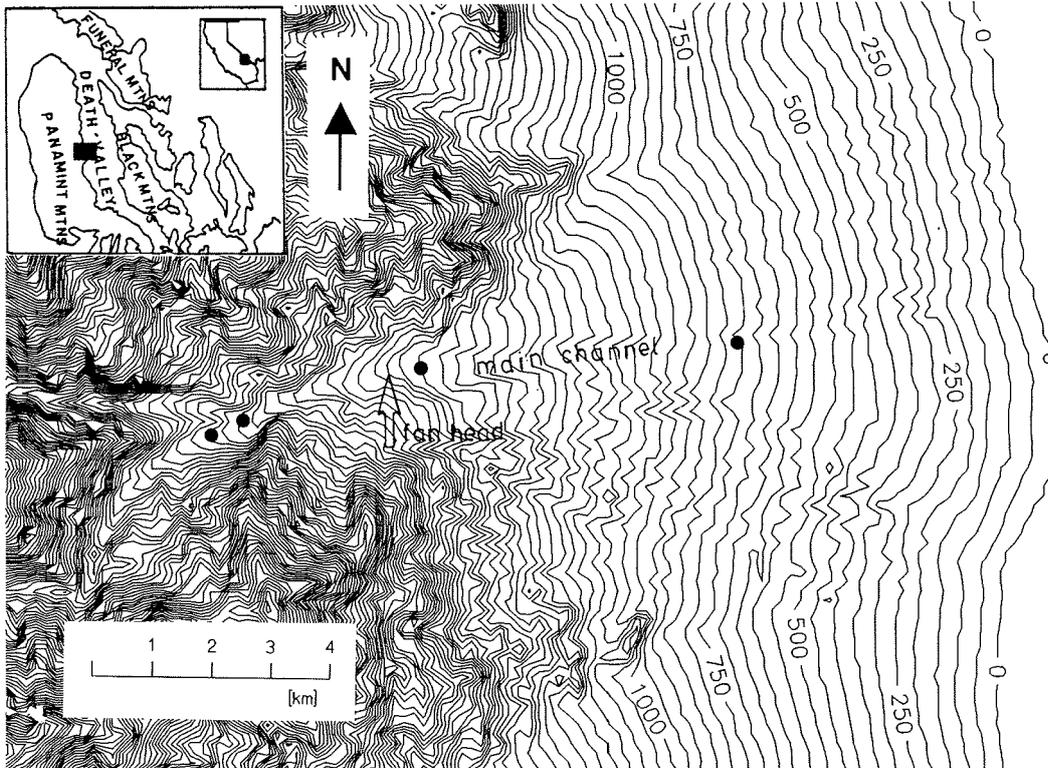


Abb. 3-24. Der Hanapauh Fan im Death Valley/Californien. Die schwarzen Punkte markieren die Probenlokalitäten.

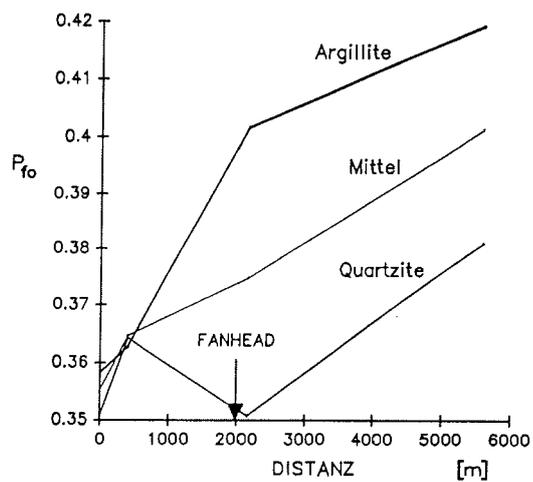


Abb. 3-25. Rundungswerte für die alluvialen Gerölle des Hanapauh Fan. Durchschnittlich 150 Gerölle pro Gesteinsart und Lokalität wurden gemessen.

Die Kornrundung

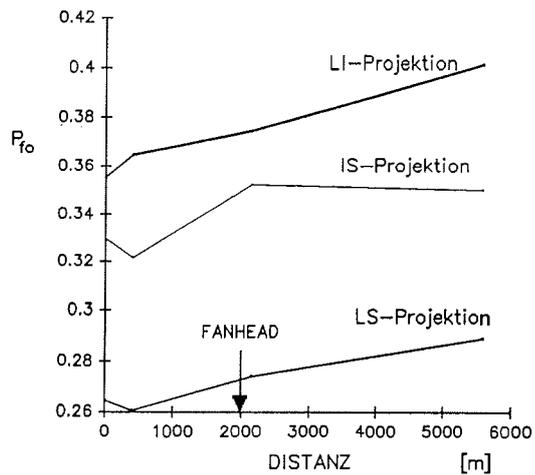


Abb. 3-26. Rundungswerte für die Gerölle des Hanapauh Fan, gemessen in verschiedenen Projektionsebenen. Die Werte zeigen, daß der Trend in den verschiedenen Projektionsebene gleich ist; das Niveau jedoch ist unterschiedlich.

- wie erwartet - geringer. Mittelt man die Rundungswerte beider Gesteine, so ergibt sich ein fast linearer Trend. Dieser dürfte jedoch nur scheinbar sein. Die Abrasionsbeispiele von Kuenen (1956) belegen, daß die Rundungszunahme über längere Distanzen logarithmisch ist.

Wie sehen nun die Rundungswerte der anderen Projektionsebenen aus?

Abbildung 3-26 zeigt die Rundungsentwicklung auf dem Fan für die drei Projektionen. Es ist zwar bei allen etwa der gleiche Trend zu festzustellen, jedoch das Niveau ist unterschiedlich. Bei der getrennten Darstellung nach Gesteinen wiederholt sich das

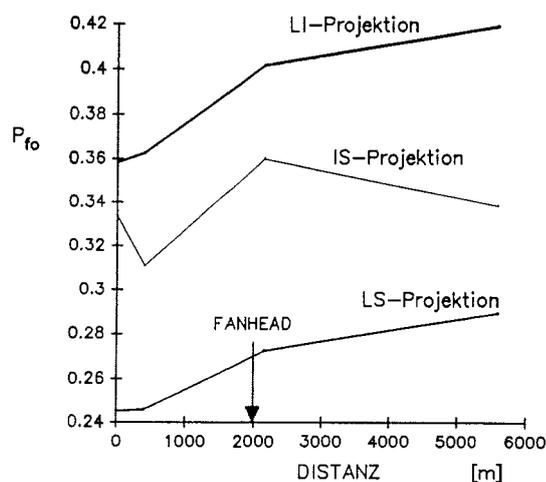


Abb. 3-27. Rundungswerte für die Argillite des Hanapauh Fan, gemessen in verschiedenen Projektionsebenen.

Die Kornrundung

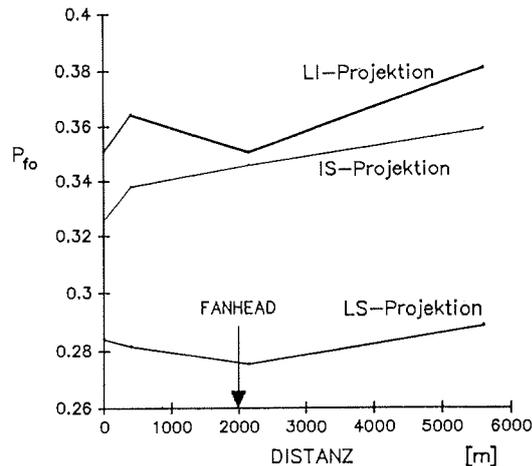


Abb. 3-28. Rundungswerte für die Quarzite des Hanapauh Fan, gemessen in verschiedenen Projektionsebenen.

Bild (Abb. 3-27 und 3-28). Die Mittelwerte (Tabelle 3.5.4.1) weichen durchschnittlich mehr als einen halben Rundungsgrad (0,05) voneinander ab, während die Standardabweichungen etwa konstant bleiben.

Für die Mittelwertunterschiede kommen nur zwei Gründe in Betracht:

Entweder hat die Projektion der Gerölle einen signifikanten Einfluß auf die Rundung oder die Elimination der Sphärizität aus den Spektren ist nicht perfekt. Letzteres bietet sich an, denn die größten Mittelwertunterschiede treten zwischen der maximalen Projektion und der Projektion von längster und kürzester Achse (LS-Projektion) auf.

Die nähere Untersuchung der ellipsenkorrigierten Spektren zeigt jedoch, daß dies nicht so ist. Die Amplitudensummen für die LS-Projektion sind im niedrigen Frequenzbereich vergleichsweise geringer; im hohen Frequenzbereich jedoch größer (Tabelle 3.5.4.2). Es sind also die feinen Umrißdetails, die die Rundungswerte bei den LS-Projektionen mindern, was bedeuten würde, daß in den LS-Projektionen schärfere Ecken und Kanten auftreten. Eine mögliche Erklärung wären vorhandene Anisotropien in den Geröllen. Ob dies tatsächlich so ist oder ob noch andere Ursachen in Frage kommen, kann mit den bislang zur Verfügung stehenden Daten noch nicht entschieden werden.

Auf die Gesamtskala gesehen sind die Mittelwertunterschiede nicht sehr hoch aber dennoch für manche Untersuchungen gravierend.

Tabelle 3.5.4.1

HANAPAUH FAN, DEATH VALLEY / Fourier-Rundung

PROJ.	ARGILLITE			QUARTZITE			GESAMT		
	MITTEL	STDABW	ANZAHL	MITTEL	STDABW	ANZAHL	MITTEL	STDABW	ANZAHL
1	.391	.141	867	.358	.130	1022	.376	.137	1889
2	.320	.147	867	.297	.135	1022	.306	.140	1889
3	.364	.147	867	.343	.130	1022	.353	.139	1889

Tabelle 3.5.4.2

HANAPAUH FAN, DEATH VALLEY / Ellipsenkorr. Amplitudensummen

PROJ.	HARMONIC 3-9			HARMONIC 10-24			HARMONIC 3-24		
	MITTEL	STDABW	ANZAHL	MITTEL	STDABW	ANZAHL	MITTEL	STDABW	ANZAHL
1	.203	.076	1889	.041	.021	1889	.245	.088	1889
2	.198	.091	1889	.053	.028	1889	.251	.107	1889
3	.201	.082	1889	.044	.024	1889	.245	.095	1889

3.6. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Rundung ist eine allgemeine Eigenschaft von Sedimentpartikeln. Als Dokument der Abrasionsgeschichte ermöglicht sie Aussagen über den Transport eines Sediments und trägt zum Verständnis von Reifungsprozessen bei. Darüberhinaus beeinflusst sie das dynamische Verhalten und die Packungseigenschaften von Partikeln.

Konzeptionelle und methodische Mängel bestehender Meßverfahren bewirkten bislang eher skeptische Zurückhaltung beim Einsatz und der Bewertung dieses Parameters.

Das hier vorgestellte Verfahren benutzt für die Rundungsbewertung den gesamten Umriss eines Partikels. Es berücksichtigt sowohl die Krümmungen als auch die relativen Positionen der Krümmungen. Beide Kriterien werden in Beziehung zu einem zum Partikel approximierten Ellipsoid gesetzt. Das Ellipsoid wird als maximal gerundete Endgestalt im Abrasionsprozeß gesehen und stellt einen einheitlichen Bezugskörper für alle Arten von Partikel und alle Rundungsstadien dar. Zudem gewährleistet das Ellipsoid die klare Trennung von Rundung und Sphärizität.

Das Verfahren wurde mehrfach erprobt. Tests an experimentellen Geröllen von Kuenen (1956, 1960) ergaben, daß das Verfahren in der Lage ist, selbst hohe Rundungsgrade bei sehr kleinen Stückzahlen eindeutig zu erkennen - im Gegensatz zur konventionellen Rundungsmessung.

Mit der Anwendung des Verfahrens auf die visuellen Rundungsvergleichstafeln von Russel-Taylor (1937) und Krumbein (1941a) konnte gezeigt werden, daß die Nichtberücksichtigung der Eckenpositionen in den Tafeln zum vielzitierten 'operator error' beiträgt.

Die Untersuchungen an kalabrischen Fluß- und Küstengeröllen zeigten, daß mit der Fourier-Methode der Nachweis selbst kleinster Rundungsunterschiede bei geringen Probenmengen möglich ist. Die Rundungsverteilungen der Gerölle sind ein Beleg für die annähernde Normalverteilung der Rundungswerte.

Die Untersuchungen an alluvialen Geröllen des Death Valley ergaben, daß die Rundungsmessung weitgehend unabhängig von der benutzten Projektionsebene ist. Die trotzdem vorhandenen, geringen Unterschiede in den Mittelwerten erfordern weitere gezielte Tests.

4. DIE KORNFORM

4.1. Definition und Bedeutung der Kornform

Die Form ist der Gestaltaspekt, der sich auf die Achsen, d.h. Länge, Breite und Höhe eines Partikels bezieht.

Die Achsenverhältnisse von Partikeln werden wesentlich durch die Petrographie bzw. Mineralogie und durch die Art des Zerfalls im Ausgangsgestein bestimmt (Abb. 4-1). Formänderungen aufgrund abrasiver Tätigkeit während des Transport sind nur gering, nicht systematisch und deswegen zu vernachlässigen (vgl. Kap. 3.3.3.). Es liegt also nahe, die Form als herkunftstypisch und damit als Provenancesignal zu betrachten (Krynine, 1946; Bokman, 1952). Die Typisierung ist jedoch bei weitem nicht ausreichend (Flemming, 1965; Ehrlich et al. 1980, S. 476). Hinzu kommt, daß sich der Formenvorrat zwischen Herkunftsgebiet und Ablagerungsort durch selektive Transportmechanismen verändert. Als Provenancesignal ist die Form daher wenig brauchbar (Blatt & Christie, 1963; Ibbeken & Schleyer, 1991, S. 147).

Geologisch bedeutend ist die Kornform wegen ihres Einflusses auf den selektiven Transport. Dieser Einfluß entsteht zum einen aus dem Zusammenhang der Form mit der Sinkgeschwindigkeit von Partikeln (McNown & Malaika, 1951; Komar & Reimers, 1978; Goossens, 1987); zum anderen ist auch die "Rollbarkeit" ("pivotability") stark von der Form abhängig (Kuenen, 1960; Li & Komar, 1986). Beides führt dazu, daß sowohl die Transportart (rollend, schiebend, suspendiert) als auch die Transportgeschwindigkeit entsprechend der Form der Partikel verschieden ist. Besonders auffällig sind die Sortiervorgänge an Geröllstränden (u.a. Evans, 1939; Bluck, 1967; Humbert, 1968; Bartholomä, 1992). Im Verbund mit anderen Parametern wurde die Kornform daher auch zur Diskriminierung unterschiedlicher Environments benutzt (Sames, 1966; King & Buckley, 1968; Mazzullo & Haines, 1988b).

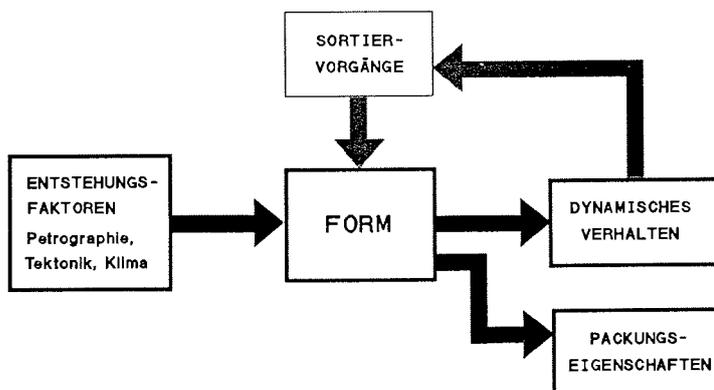


Abb. 4-1. Die Bedeutung der Kornform.

Die Kornform

Bedeutung erhält die Kornform schließlich wegen ihres Einflusses auf die Packungseigenschaften von Partikeln. Insbesondere ist die Packungsdichte abhängig von der Sphärizität und der Orientierung der Einzelpartikel. Sind alle Partikel mit ihrer Längsachse parallel zueinander ausgerichtet, dann ist die Dichte identisch zu einer Kugelpackung. Bei Packungen ohne Vorzugsrichtungen der Einzelkörner ergeben sich höhere Porositäten, wobei die Dichte entsprechend der Sphärizität abnimmt (Allen, 1985, S. 31ff).

4.2. Kornformparameter und die Erfassung der Kornform

In diesem Abschnitt soll kein umfassender Überblick zu den bis dato vorgeschlagenen Kornformparametern gegeben werden. Zusammenfassungen liefern Dobkins & Folk (1970) und Barrett (1980). Die folgende Darstellung dient lediglich der Frage, wie die Meßgrundlage - die Achsenmessung - gestaltet sein muß, um der Konzeption der wichtigsten Kornformparameter zu genügen.

Zu den Parametern:

Geologisch bedeutsame Kornformparameter sind die von einigen Autoren entwickelten Sphärizitätsmaße. Krumbein (1941a) stellte die sogenannte 'intercept sphericity' vor. Krumbein hatte damit versucht, den zuvor von Wadell (1932) eingeführten Sphärizitätsindex, der sich aus dem Volumen des Partikels und dem Volumen der umschreibenden Kugel berechnet, durch einfache Achsenmessungen zu approximieren. Während in den Wadell-Index noch Form und Rundung eingehen, ist die 'intercept sphericity' ein reines Formmaß. Grundlegend in dem Konzept von Krumbein ist die Annahme, daß Sedimentpartikel annähernd durch Ellipsoide beschrieben werden können.

Auf einer solchen Annahme beruhen auch der 'Corey shape factor' (Corey, 1949, zit.n. Flemming, 1965) und die von Sneed & Folk (1958) entwickelte 'maximum projection sphericity'. Wegen ihrer ausgezeichneten Korrelation mit der Sinkgeschwindigkeit von Sedimentpartikeln eignen sich diese beiden Parameter besonders für Untersuchungen zum Sedimenttransport.

Daß die Formbeschreibung von Sedimentpartikeln durch Ellipsoide mehr als nur eine Modellvorstellung ist, konnte desweiteren von Koster et al. (1980) und Cui & Komar (1984) gezeigt werden. Die Autoren stellten eine gute Übereinstimmung zwischen den nominalen Durchmessern von Geröllen und dem nominalen Durchmessern von äquivalenten Ellipsoiden fest.

Zusammenfassend kann man sagen, daß das Ellipsoid ein sinnvoller und mittlerweile allgemein akzeptierter Bezugskörper für die Formbeschreibung ist (Cui & Komar, 1984; Goossens, 1987). Dies sollte bei Achsenmessungen an Partikeln berücksichtigt werden. Tatsächlich jedoch gibt es zwischen der gängigen Methodik zur Achsenmessung und der Konzeption des Ellipsoiden Diskrepanzen.

Das Messen der Kornform:

Nach der bislang üblichen Methode werden die drei längsten, senkrecht zueinander stehenden Durchmesser gemessen. Unbestreitbarer Vorteil bei diesem Verfahren ist die Einfachheit der Durchführung, besonders bei Geröllen (Ibbeken & Denzer, 1988). Bei einer solchen Messung vermengen sich indes Elemente der Rundung mit denen der Form, denn häufig genug sind es vorstehende Ecken und Kanten, welche die Länge eines Durchmessers bestimmen. Sehr problematisch ist die Methode schließlich bei dreieckigen Umrissen, die ungefähr gleichseitig sind (Abb. 4-2).

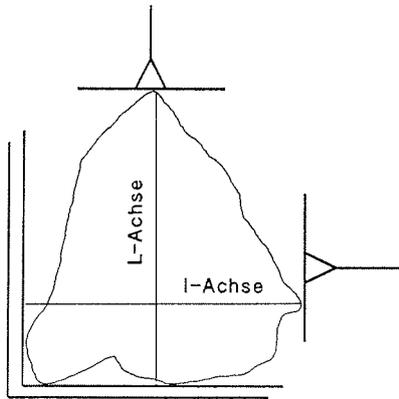


Abb. 4-2. Achsenmessung im Meßkasten (Ibbeken & Denzer, 1988). Bei dem hier gezeigten Geröll wird die Messung stark von der Rundung beeinflusst.

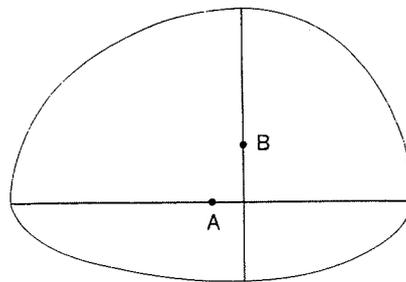


Abb. 4-3. "Schiefes" Ellipsoid. Die Achsenmittelpunkte fallen bei diesem Ellipsoid auseinander. [modifiziert nach Flemming, 1965, S. 383]

Daneben gibt es seit Flemming (1965) auch Arbeiten, die sich mit der Ellipsoid-Approximation beschäftigen. Flemming selbst wählte als Bezugsformen sogenannte 'schiefe' Ellipsoide', bei denen die Halbachsen gegeneinander verschoben sein können (Abb. 4-3). Die 'schiefen' Ellipsoide haben sehr viel Ähnlichkeit mit den von Lenk-Chevitch (1957) als typisch beschriebenen, gut gerundeten Fluß- und Strandgeröllen. Dennoch gehen auch in das 'schiefe' Ellipsoid noch Rundungselemente ein.

Medalia (1970) ersetzt den Umriß eines Partikels durch eine äquivalente Ellipse, indem er die Flächenmomente des Partikelquerschnitts berechnet. Sein Ansatz bleibt theoretisch. Gotoh & Finney (1975) schließlich beschreiben eine 2-D-Fourier-Transformation von Partikeloberflächen und die anschließende Approximation durch Ellipsoide. Gotoh und Finney zielen mit ihrer Approximation jedoch nicht auf die Achsenverhältnisse ab, sondern auf die Volumina und Oberflächen der Partikel. Auch ist die Erfassung von Partikeloberflächen selbst bei den derzeitigen technischen Möglichkeiten sehr aufwendig.

Die im folgenden beschriebene Methode zur Formerfassung benutzt Partikelumrisse in verschiedenen Projektionen und ist auf die Rundungsmessung abgestimmt, d.h. das für einen Partikel berechnete Ellipsoid dient auch als Bezugskörper bei der Rundungsberechnung.

Selbstverständlich ist ein Verfahren, welches mit projizierten Umrissen arbeitet, einem anderen, welches die gesamte Oberfläche in die Aproximation miteinbezieht, in Hinsicht auf Genauigkeit immer unterlegen, denn ein projizierter Umriss ist letztlich nur eine Beprobung der Oberfläche. Dennoch dürften die entstehenden Fehlervarianzen bei dem einfachen Verfahren nicht so groß sein, daß sie den Gebrauch des aufwendigeren Verfahrens rechtfertigen. Dieser Aufwand ist allenfalls bei Untersuchungen an Einzelstücken sinnvoll.

4.3. Ableiten der Kornform aus dem Fourier-Spektrum

4.3.1. Berechnen der Hauptachsen einer Projektion

Im Amplituden-Spektrum gibt die 'harmonic' 2 die Länglichkeit eines Partikels wieder. Um den Zusammenhang zwischen der Länglichkeit von Partikeln und der 'harmonic' 2 näher bestimmen zu können, wurden Fourier-Spektren für eine Reihe von Ellipsen mit unterschiedlichem Halbachsenverhältnissen berechnet. Es zeigte sich, daß die 'harmonic' 2 perfekt mit dem Halbachsenverhältnis 'b/a' der Ellipsen korreliert (Abb. 4-4). Die Regressionsgleichung lautet

$$b/a = 1 - 1.74 R_2 + 0.86 R_2^2 \quad (4.1)$$

'R₂' ist die Amplitude für die Frequenz 2. Entsprechend werden die Achsenverhältnisse für reale Partikel berechnet.

Mit $q = a/b$ und 'R₀' als dem mittleren Radius ergeben sich dann die Halbachsen a', b'

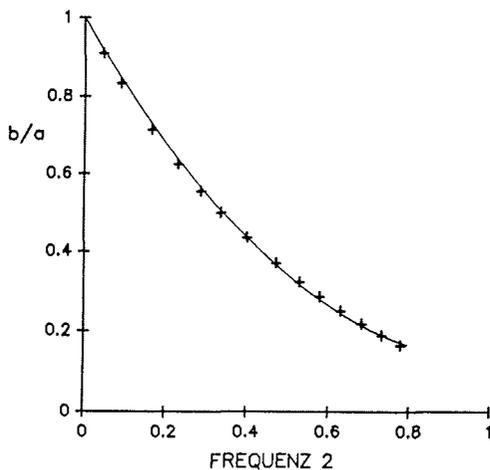


Abb. 4-4. Korrelation der Halbachsenverhältnisse von Ellipsen mit der Amplitude für die Frequenz 2.

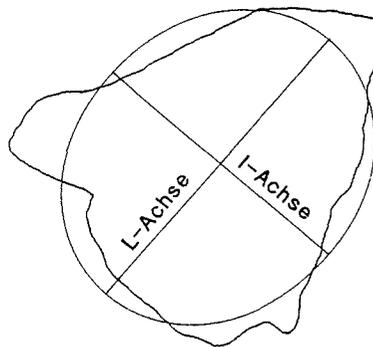


Abb. 4-5. Achsenbestimmung durch Aproximieren des Partikelumrisses mit einer Ellipse. Die Flächen von Partikelquerschnitt und Ellipse sind identisch.

Die Kornform

der zum Partikel äquivalenten Ellipse aus

$$a' = R_0 \sqrt{q} \quad \text{und} \quad b' = R_0 / \sqrt{q} \quad (4.2)$$

wobei $\pi \cdot a' \cdot b' = \pi \cdot R_0^2$ vorausgesetzt wird, d.h. die Querschnittsfläche des Partikels ist gleich der Fläche der zum Partikel äquivalenten Ellipse. $2a'$ ist die lange und $2b'$ die kurze Achse eines Querschnitts. Abbildung 4-5 zeigt das Ergebnis einer solchen Ellipsen-Approximation für den Umriß aus Abbildung 4-2.

4.3.2. Berechnen der Form aus mehreren Projektionsebenen

Ein vollständiges Bild von der Form eines Partikels erhält man, wenn man die Achsen in verschiedenen Projektionsebenen mißt (Abb. 4-6). Ausgehend von der maximalen Projektionsfläche dreht man die Partikel einmal um 90° und bekommt so die fehlende dritte Achse. Eine Belichtungseinrichtung, die es erlaubt, Gerölle in unterschiedlichen Projektionen zu photographieren, wird in 6.5.2 vorgestellt.

Eine mögliche Fehlerquelle liegt in der Positionierung der Partikel. Ein Geröll kann mit der Hand positioniert werden. Dabei entstehen nur geringe Fehler, da Hand und Auge sehr sensibel Fläche und Gewicht austarieren (vgl. Kap. 4.4.1.). Problematisch wird die Positionierung im Sand- und Siltbereich. Streut man Partikel auf einer Unterlage aus, richten sich die maximalen Projektionsflächen durchschnittlich parallel zur Unterlage aus, denn der Schwerpunkt der Partikel ist bestrebt, die tiefstmögliche Lage einzunehmen. Hat man gut gerundete, ellipsoidähnliche Partikel, dürften die Abweichungen der maximalen Projektionsebene von der horizontalen Lage gering sein. Bei irregulären oder schlecht gerundeten Partikels jedoch kann die stabile Lagerung stärkere Kippungen der maximalen Projektionsebene bewirken (Abb. 4-7). Es kommt zu Verkürzungen der Achsen.

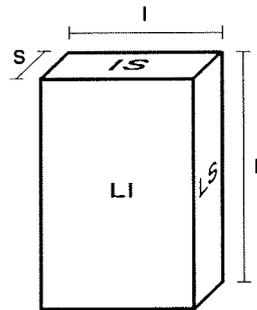
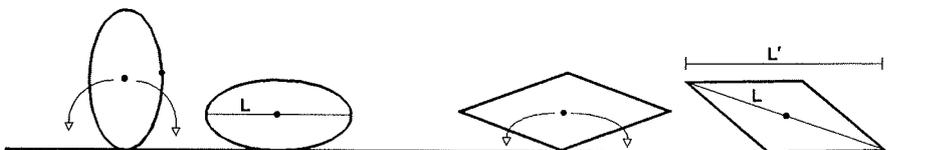


Abb. 4-6. Darstellung der Achsen und Projektionsebenen an einem Quader. L, I und S = lange, intermediäre und kurze Achse.

Abb. 4-7. Zusammenhang der Achsenmessung mit der stabilen Lage von Partikeln. Bei irregulären oder eckigen Partikeln kann es zu optischen Verkürzungen der Achsen kommen - L -> L'.



Die Kornform

Fehllagerungen können bei sehr feinen Korngrößen auch durch elektrostatische Kräfte entstehen. Die entstehenden Effekte sind von der Unterlage und dem Kristallaufbau der Partikel abhängig.

Bei kleinen Korngrößen tritt zudem die grundsätzliche Schwierigkeit auf, daß die Partikel nur mit viel Aufwand in andere Projektionslagen gedreht werden können. Dieses Problem war der Anstoß für die Konzeption des weiter unten beschriebenen Schätzverfahrens.

4.4. Anwendungsfälle

4.4.1. Gerölle im Fluß- und Küstentransport, Kalabrien/Italien

Bei den kalabrischen Geröllen wurde die Form sowohl mit einer konventionellen Methode als auch mit der Ellipsen-Aroximation gemessen (zur Lokalität des Untersuchungsgebietes vgl. Kap. 3.5.3). Hier bietet sich ein Vergleich beider Verfahren an.

Das konventionelle Verfahren wurde mit einem von Ibbeken & Denzer (1988) entwickelten Meßkasten durchgeführt. Das Prinzip ist in der Abbildung 4-2 zu sehen.

Für die Ellipsen-Aproximation standen nur die Umriss der maximalen Projektionsebene zur Verfügung (im Zusammenhang mit der Rundungsmessung). Aus dieser Projektion wurden die langen (L) und die intermediären (I) Achsen der Geröllen ermittelt.

Abb. (4-8) zeigt exemplarisch die Achsenverteilungen aus beiden Verfahren für die

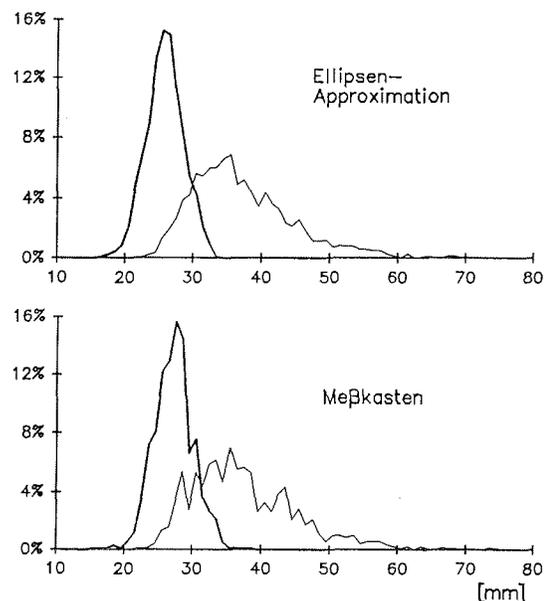


Abb. 4-8. Achsenverteilungen kalabrischer Gerölle der Fraktion 20-25 mm. Oben die Verteilungen aus der Ellipsen-Aroximation, unten die aus dem Meßkasten-Verfahren resultierenden Verteilungen. L-Achse (fette Linie), I-Achse (dünne Linie). Die Populationseigenschaften lassen sich mit dem Ellipsen-Verfahren genauer darstellen.

Die Kornform

Tabelle 4.4.1.1

FLUß UND KÜSTE, BIANCO-KALABRIEN / Geröllachsen nach Achsenverhältnis L/I

	L/I < 1.5		L/I ≥ 1.5		GESAMT		t-WERT
	MITTEL	STDABW	MITTEL	STDABW	MITTEL	STDABW	
L	44.09	17.53	54.32	22.39	46.33	19.17	2.11
L-ellipse	44.49	17.49	54.70	22.11	46.73	19.07	
I	35.21	13.08	33.26	12.24	34.78	12.92	6.39*
I-ellipse	34.47	13.46	32.10	12.20	33.95	13.23	
LI	1.25	.18	1.64	.34	1.33	.27	21.55*
LI-ellipse	1.29	.17	1.73	.38	1.39	.29	
ANZAHL	15808		4443		20251		* Sign. > 99%

Tabelle 4.4.1.2

FLUß UND KÜSTE, BIANCO-KALABRIEN / Geröllachsen nach Gesteinen

	PGQ		GH		GI		GD	
	MITTEL	STDABW	MITTEL	STDABW	MITTEL	STDABW	MITTEL	STDABW
L	42.47	17.95	47.74	19.01	47.73	18.32	48.41	20.24
L-ellipse	42.78	17.78	48.30	18.96	48.17	18.18	48.85	20.18
I	33.11	12.94	35.68	12.20	35.32	12.10	35.48	13.44
I-ellipse	32.14	12.88	34.80	12.26	34.62	13.79	34.73	13.46
LI	1.28	.23	1.34	.27	1.36	.29	1.37	.29
LI-ellipse	1.34	.25	1.40	.29	1.41	.32	1.42	.32
ANZAHL	6932		1516		3540		6790	

Gesteinsgruppe der dunklen Gneise in der Fraktion 20-25 mm. Auffallend ist zunächst, daß die Verteilungen mit der Ellipsen-Aproximation weniger Schwankungen aufweisen. Die grobe Form der Verteilungen ist zwar bei beiden gleich aber offensichtlich werden die Populationeigenschaften durch das Ellipsen-Verfahren besser erfaßt. Die Erklärung dafür ist, daß die Messung bei dem Ellipsen-Verfahren nicht durch den Rundungszustand der Gerölle überlagert ist.

Auch zwischen den Mittelwerten gibt es Abweichungen. Die Tabellen 4.4.1.1 und 4.4.1.2 zeigen Zusammenfassungen der Achsendaten. Die I-Achsen werden danach mit dem Ellipsen-Verfahren durchschnittlich um 2,5 % kleiner und die L-Achsen um

Die Kornform

0,8 % größer eingestuft. Dadurch sind die Achsenverhältnisse mit der Ellipsen-Approximation um 4,5 % größer. Die Abweichungen in den Mittelwerten sind unabhängig von der Gesteinsart und dem Achsenverhältnis der Gerölle.

In den Standardabweichungen stimmen beide Verfahren bemerkenswert gut überein.

4.4.2. Alluviale Gerölle des Death Valley/Californien

Die Death Valley Gerölle wurden ausschließlich mit dem Ellipsen-Verfahren gemessen. Mit der in 6.5.2. beschriebenen Belichtungseinrichtung wurden alle drei Projektionsebenen der Gerölle erfaßt. Da für die Formbestimmung nur zwei Projektionen notwendig sind, ist damit die Kornform in drei verschiedenen Projektionskombinationen darstellbar. Die Daten eignen sich daher gut zur Überprüfung der Achsenmessungen in den einzelnen Projektionen.

Abbildung 4-9 zeigt die Verteilungen der langen (L), intermediären (I) und kurzen (S) Achsen aus jeweils zwei verschiedenen Projektionen. Die Form der Verteilungen

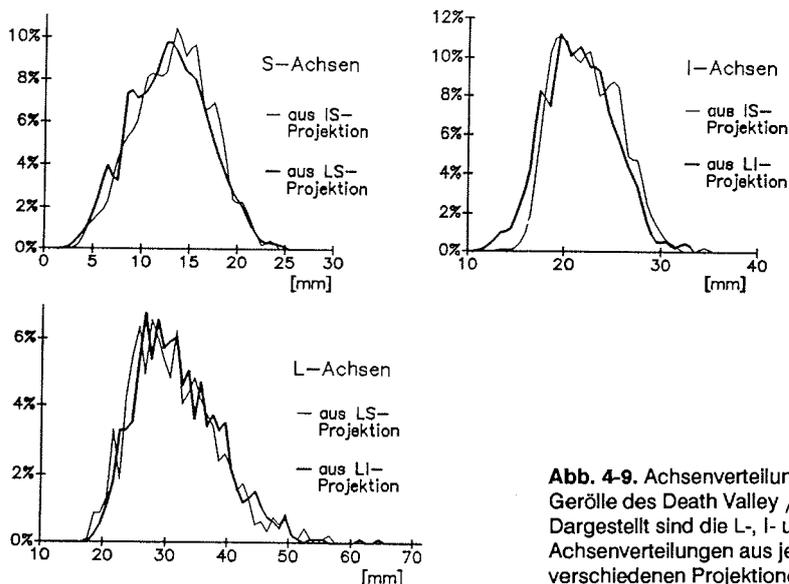


Abb. 4-9. Achsenverteilungen alluvialer Gerölle des Death Valley / Californien. Dargestellt sind die L-, I- und S-Achsenverteilungen aus jeweils zwei verschiedenen Projektionen.

stimmt bei den einzelnen Paaren gut überein; sie sind aber gleichzeitig gegeneinander verschoben. Tabelle 4.4.2.1 zeigt eine Zusammenfassung der Mittelwerte und Standardabweichungen. Auffallend ist, daß die Mittelwerte der I- und S-Achsen aus der IS-Projektion im Vergleich zu den Mittelwerten der anderen Projektionen höher liegen. Hier kommt der Fehler bei der Positionierung der Gerölle in der Belichtungseinrichtung zum Ausdruck. Abbildung 4-10 verdeutlicht den Fehler beispielhaft für die S-Achsen aus der LS- und der IS-Projektion. Wenn die Gerölle um einen gewissen Winkelbetrag aus der optimalen Lage herausgekippt sind, so erscheinen die S-Achsen in der

Die Kornform

Tabelle 4.4.2.1

HANAPAUH FAN, DEATH VALLEY / Achsen nach Projektion

ACHSE	PROJ.	MITTEL	STDABW	t-WERT
L	LI	46.18	19.08	
L	LS	45.18	19.23	2.05
I	LI	32.20	12.77	
I	IS	33.70	13.39	4.51 *
S	LS	19.25	9.38	
S	IS	19.93	9.57	2.82 *
ANZAHL	3092			• Sign. >99%

Tabelle 4.4.2.2

HANAPAUH FAN, DEATH VALLEY / Corey shape factor (CSF) und Oblate-Prolate-Index (OP) nach Projektion

PROJ.	CSF			OP		
	MITTEL	STDABW	t-WERT	MITTEL	STDABW	
1) LI + LS	.512	.172	1+2) 3.91*	-.23	7.20	
2) LI + IS	.529	.168	2+3) 1.68	.09	7.04	
3) LS + IS	.522	.160	1+3) 2.37	-2.26	10.90	
ANZAHL	3092		* Sign. >99%			

Tabelle 4.4.2.3

HANAPAUH FAN, DEATH VALLEY / Corey shape factor (CSF) und Oblate-Prolate-Index (OP) nach Gestein

GESTEIN	CSF			OP			ANZAHL
	MITTEL	STDABW	t-WERT	MITTEL	STDABW		
ARGILLITE	.445	.170		-1.34	7.61	1437	
QUARTZITE	.571	.151	30.81*	.73	6.68	1655	
ANZAHL	3092		• Sign. >99%				

Die Kornform

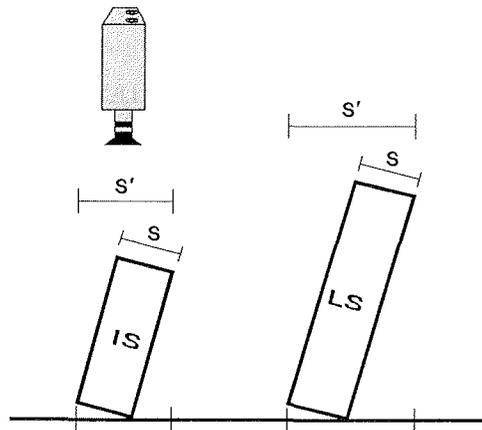


Abb. 4-10. Optische Vergrößerung der Achsen durch fehlerhafte Positionierung der Gerölle.

IS- größer als in der LS-Projektion. Allgemein kommt es je nach Projektion und Achse zu Verkürzungen oder Verlängerungen der gemessenen Achsen. Rein rechnerisch ist der Fehler bei der LI-Projektion, d.h. der maximalen Projektion, am geringsten und bei der IS-Projektion am größten. Sollte die Positionierung der Gerölle nur per Hand möglich sein, ist es daher empfehlenswert, die LI- und die LS-Projektion für die Formbestimmung zu benutzen.

Sieht man von dem Positionierungsfehler ab, ist die Übereinstimmung in der Achsenbewertung gut. In Tabelle 4.4.2.2 sind für die drei möglichen Kombinationen von Projektionsebenen der 'Corey Shape Factor' und der 'Oblate-Prolate-Index' dargestellt. Tabelle 4.4.2.3 schließlich zeigt die Werte für die beiden im Death Valley untersuchten Gesteinsarten. Die Gesteine werden durch die Werte eindeutig voneinander unterschieden.

4.5. Schätzen der Form aus der maximalen Projektionsfläche

Sind die Achsen der maximalen Projektionsflächen bekannt, läßt sich mit Hilfe der Siebkorngröße des Probenmaterials die fehlende kurze Achse (S-Achse) schätzen. Selbstverständlich ist dies nicht für einzelne Partikel möglich, aber doch pauschal für eine größere Population.

Ludwick & Henderson (1968) untersuchten den Zusammenhang zwischen Kornform und Siebkorngröße und stellten fest, daß die Verteilungen der intermediären Achsen (I-Achsen) bei Quadratlochsieben von der Form der Partikel abhängig sind - je niedersphärischer die Partikel, desto höher liegt der Mittelwert der I-Verteilung.

Die Arbeit von Ludwick & Henderson zielt auf den Siebfehler ab, der durch die Form entsteht. Umgekehrt läßt sich der "Siebfehler" für die Schätzung von S-Achsen nutzen. Dazu muß der Zusammenhang zwischen Quadratlochsieb und Kornform präzisiert werden, d.h. wie sehen die zu einer Siebgröße gehörenden, möglichen Kornformen aus.

Die Kornform

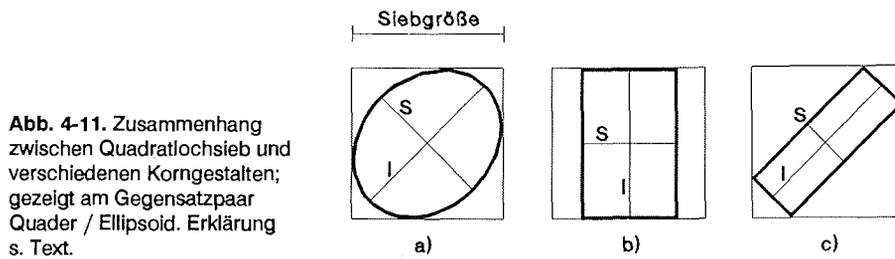


Abb. 4-11. Zusammenhang zwischen Quadratlochsieb und verschiedenen Korngestalten; gezeigt am Gegensatzpaar Quader / Ellipsoid. Erklärung s. Text.

Geometrische Überlegungen zeigen, daß das Formenfeld nicht nur durch die Achsenverhältnisse sondern durch die gesamte Gestalt der Partikel beeinflußt wird. Dieser Einfluß läßt sich gut an dem Gegensatzpaar Ellipsoid/Quader demonstrieren (Abb. 4-11,a-c).

Für reine Ellipsoide folgen die S-Achsen der Funktion

$$S = ((\text{Siebgröße} \cdot 2 - I^2))^{1/2} \quad (4.3)$$

Bei den Quadern lassen sich zwei Fälle unterscheiden: Wenn die intermediäre Achse gleich der Siebgröße ist gilt

$$I \geq S \geq \text{Siebgröße} / 2 - I \quad (4.4)$$

d.h. die S-Achsen können über einen großen Bereich variieren.

Ist die intermediäre Achse größer als die Siebgröße, dann ist

$$S = \text{Siebgröße} / 2 - I \quad (4.5)$$

Abbildung 4-12 zeigt die mittels dieser Gleichungen entstehenden Formenfelder zwi-

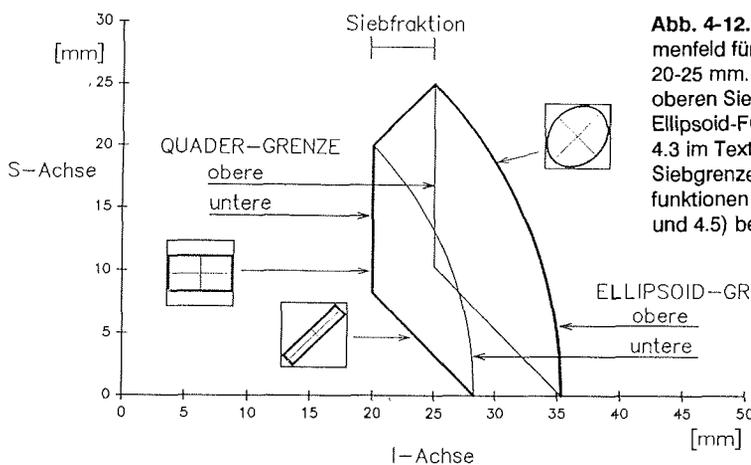


Abb. 4-12. Theoretisches Formenfeld für Gerölle der Fraktion 20-25 mm. Das Feld wird an der oberen Siebgrenze durch die Ellipsoid-Funktion (Gleichung 4.3 im Text) und an der unteren Siebgrenze durch die Quaderfunktionen (Gleichungen 4.4. und 4.5) begrenzt (fette Linie).

Die Kornform

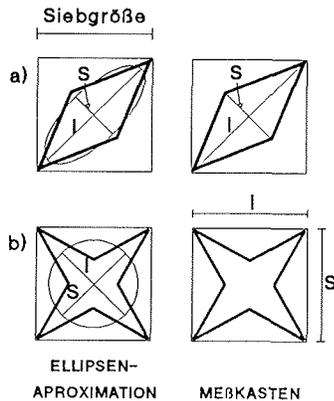


Abb. 4-13. Zusammenhang zwischen Quadratlochsieb, Achsenmessung und Korngestalt. a) Bei rhombenähnlichen Partikeln ist die Achsenbestimmung mit dem Meßkasten nicht eindeutig. Werden die Achsen diagonal gemessen, liegt der Partikel außerhalb der Feldbegrenzung. Bei der Ellipsen-Aproximation tritt dieses Problem nicht auf. b) Sperrige Partikel bleiben - wie das Beispiel eines Sterns zeigt - mit dem Meßkasten-Verfahren in der Feldbegrenzung. Mit dem Ellipsoid-Verfahren werden solche Partikel als zu klein eingestuft.

schen unterer und oberer Siebgröße. Die durch die unteren Quader- und die obere Ellipsoidfunktion aufgespannte Feldbegrenzung ist das angenommene Formenfenster für eine Siebfraktion.

Sofern die Achsen über die Ellipsoid-Aproximation ermittelt werden, sind kaum Gestalten denkbar, welche über die obere Feldbegrenzung hinausgehen. Werden die Partikel hingegen mit konventionellen Methoden gemessen, ist das schon eher möglich - z.B. wenn man als Achsen die Diagonale von rhombenähnlichen Gestalten mißt (Abb. 4-13,a).

Auch an der unteren Grenze sind Überschreitungen denkbar, z.B. durch Partikel mit sehr exponierten Ecken (Abb. 4-13,b). Mit der Ellipsoid-Aproximation werden derartige Partikel in den Achsen als zu klein eingestuft - mit konventionellen Methoden bleiben die Partikel in der Feldbegrenzung.

Die theoretischen Überlegungen werden durch die empirischen Daten der Death Valley- und Kalabrien-Gerölle bestätigt. Abb. 4-14 zeigt die bivariate Verteilung der mit

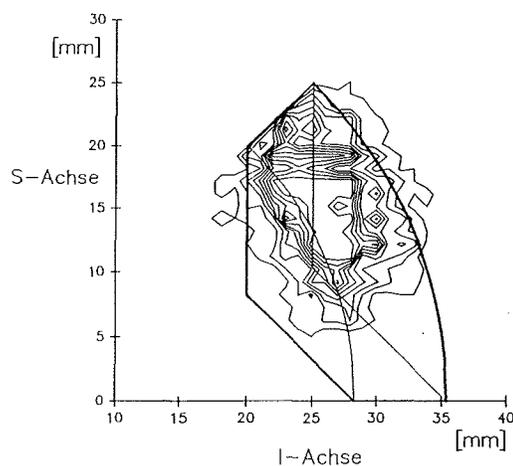


Abb. 4-14. Bivariate Verteilung der I- und S-Achsen kalabrischer Gerölle in der Fraktion 20-25 mm.

Die Kornform

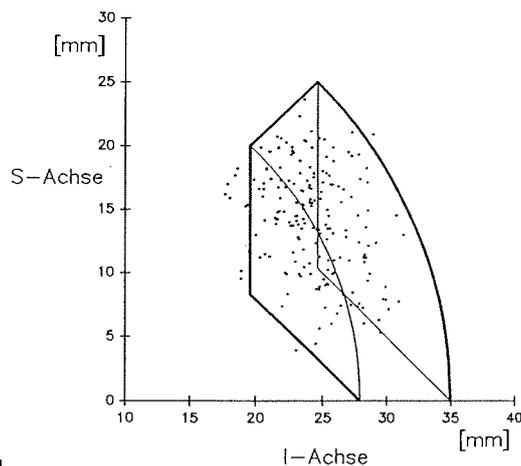


Abb. 4-15. Bivariate Verteilung der I- und S-Achsen alluvialer Gerölle des Death Valley in der Fraktion 20-25 mm.

der konventionellen Methode gemessenen I- und S-Achsen kalabrischer Gerölle der Fraktion 20-25 mm. Die Verteilung liegt ziemlich exakt innerhalb des angenommenen Formenfensters. Die links von der unteren Siebgränze vorkommenden Gerölle sind auf Siebfehler zurückzuführen. Für die Feldüberschreitungen an der oberen Gränze gibt es zwei Erklärungen: Zum einen der bereits angesprochene Rhombeneffekt; zum anderen sind auch Meßfehler denkbar. Was davon im einzelnen zutrifft, ist nicht mehr zu rekonstruieren. Insgesamt liegen nur 2,3% der Gerölle außerhalb des Fensters, davon 0,9% unterhalb der Quadergränze und 1,4% oberhalb der Ellipsoidgränze.

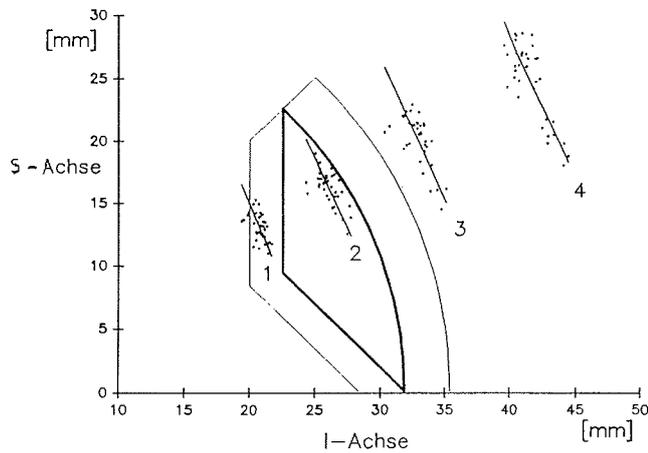
Auch die Death Valley Gerölle der Fraktion 20-25 mm liegen mit großer Mehrheit innerhalb des Fensters (Abb. 4-15). Das Vorkommen von Geröllen links von der unteren Siebgränze ist entweder auf Siebfehler zurückzuführen oder entsteht durch die oben angesprochenen Gerölle mit sperrigen Ecken, die dann mit der Ellipsen-Approximation kleiner eingestuft werden. Bei der untersuchten Korngröße (20-25 mm) sind Siebfehler wahrscheinlich. Leider läßt sich dies aufgrund des zu geringen Probenmaterials bei den größeren Geröllen nicht weiter untersuchen. Der Prozentsatz der unterhalb der Quadergränze liegenden Gerölle beträgt 5,5%. An der oberen Ellipsoidgränze gab es - wie erwartet - nur ein einzigen Übertritt.

Mittelt man die Achsenwerte über eine größere Zahl von Partikeln, verengt sich das Fenster auf den Bereich zwischen den mittleren Ellipsoid- und Quaderfunktionen. In der Abbildung 4-16 sind die Mittelwerte der I- und S-Achsen von den 35 kalabrischen Proben gegeneinander aufgetragen. In allen Fraktionen ist eine negative Korrelation zwischen I- und S-Achsen vorhanden, d.h. ein Anstieg in der I-Achse ist mit einer Verringerung des S-Wertes verbunden.

Die weitere Eingrenzung der S-Achsen ist noch mit Schwierigkeiten verbunden. Eine Möglichkeit, den Bereich zwischen Ellipsoid und Quader näher zu differenzieren, ergibt sich über die Rundung. Tatsächlich sind I-Achsen und Rundung miteinander korreliert, d.h. mit steigender Rundung nimmt die Größe der I-Achsen zu (Abb. 4-17). Bei der Fraktion 20-25 mm bewirkt ein Rundungsunterschied von 0,3 eine Zunahme der

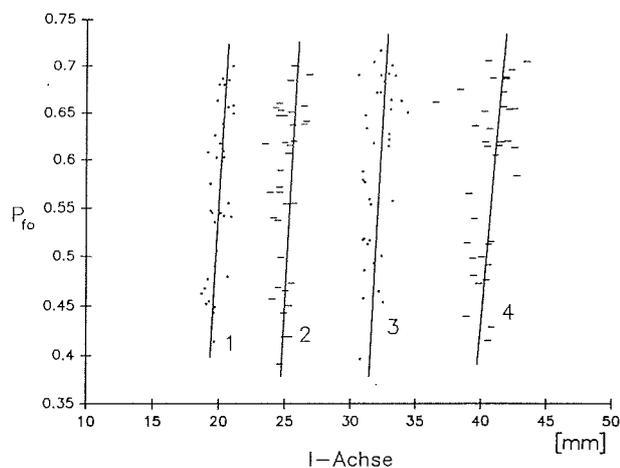
Die Kornform

Abb. 4-16. Bivariate Verteilung der Probenmittelwerte von I- und S-Achsen kalabrischer Gerölle. 1) 16-20 mm 2) 20-25 mm 3) 25-32 mm 4) 32-40 mm. Die Werte für die Fraktion 20-25 mm bleiben alle innerhalb des von der mittleren Ellipsoid- und der mittleren Quaderfunktion aufgespannten Fensters. In allen Korngrößen ist eine signifikante negative Korrelation vorhanden zwischen den Achsen vorhanden.



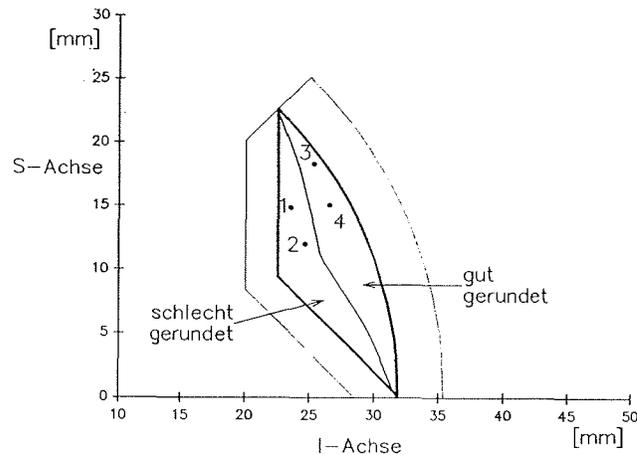
I-Achsen um ca. 1,5 mm. Die in der Abbildung 4-18 dargestellten Mittelwerte für zwei kalabrische und zwei Death Valley Gesteine bestätigen diesen Zusammenhang. Die schlechter gerundeten Death Valley Gerölle haben die kleineren I-Achsen. Man könnte also - wie in der Abbildung skizziert - das Fenster entsprechend der Rundung in mehrere Streifen unterteilen.

Abb. 4-17. Korrelation zwischen den Probenmittelwerten der I-Achsen und der Rundung kalabrischer Gerölle - alle Korngrößen > 99%. 1) 16-20 mm 2) 20-25 mm 3) 25-32 mm 4) 32-40 mm. In der Korngröße 16-20 mm werden die I-Achsen der schlechter gerundeten Gerölle um durchschnittlich 2 mm kleiner eingestuft (Rundungsunterschied 0.3). In den anderen Korngrößen ergeben sich ähnliche Unterschiede.



Die Kornform

Abb. 4-18. Mittelwerte für I- und S-Achsen alluvialer Gerölle des Death Valley und kalabrischer Küstengerölle in der Korngröße 20-25 mm. 1) Death Valley: Quarzite, Rundung 0.36 2) Death Valley: Argillite, Rundung 0.41 3) Kalabrien: Pegmatite und Quarzite (Gruppe PGQ), Rundung 0.65 4) Kalabrien: melanokrate Gneise (Gruppe GD), Rundung 0.70.



Die Streuung der Werte in der Abbildung 4-17 zeigt jedoch auch, daß die Rundung zur Erklärung nicht ausreicht. Mehrere Fehlerquellen kommen dafür in Frage:

- Erstens kann es sein, daß die Zahl der Partikel zu klein ist. Welche Zahl als ausreichend gelten kann, ist noch nicht geklärt.
- Desweiteren können - wie oben dokumentiert - Siebfehler vorkommen. Der häufigste entsteht durch zu geringe Siebzeiten. Ludwick & Henderson (1968) geben für verschiedene Formen Wahrscheinlichkeiten an, mit der diese in einer bestimmten Zeit ein Sieb passieren. Kennedy et al. (1984) konnten mit Hilfe von Fourier-Spektren nachweisen, daß die "Durchfallrate" eine logarithmische Funktion der Zeit ist. Bei Feinsanden kann es danach mehr als 2 Stunden dauern, bis alle Partikel, die theoretisch ein Sieb passieren können, auch tatsächlich durchgefallen sind. Im Feinkornbereich spielt überdies auch die Qualität der Siebe eine große Rolle.
- Ein weiterer Fehler entsteht durch die ungleiche Verteilung von Korngrößen innerhalb einer Siebgröße. Es kommt zu einer Verschiebung der mittleren Korngröße eines Siebes in die eine oder andere Richtung. Diese Verschiebung kann bei der Schätzung einkalkuliert werden, wenn man den Trend der angrenzenden Fraktionen berücksichtigt.
- Schließlich muß betont werden, daß die Rundung für die weitere Differenzierung innerhalb des Fensters nicht optimal geeignet ist, denn bei der Rundung werden auch feine Umrißdetails mitbewertet, die für das Passieren durch ein Sieb jedoch nicht maßgeblich sind.

Zusammenfassend kann zu dem Verfahren gesagt werden, daß es potentiell eine gute Möglichkeit zur Schätzung der S-Achsen darstellt. Damit das Verfahren auch praktische Verwendung finden kann, bedarf es jedoch noch weiterer Untersuchungen.

4.6. Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse

Das hier dargestellte Verfahren approximierte die Kornform durch ein Ellipsoid und entspricht damit optimal der Konzeption der wichtigsten Kornformparameter. Im Gegensatz zu bisher üblichen Methoden wird die Erfassung der Kornform nicht durch die Rundungseigenschaften der Partikel beeinflusst.

Die Untersuchungen an den kalabrischen Geröllen zeigen, daß die Populationseigenschaften mit dem Ellipsoid-Verfahren gut erfaßt werden. Im Vergleich zur ebenfalls verwendeten konventionellen Methode weisen die Verteilungen der mit dem Ellipsoid-Verfahren gemessenen Achsen erheblich weniger Schwankungen auf.

Die Untersuchungen an den Death Valley Geröllen zeigen, daß für die Achsenmessung prinzipiell alle drei Projektionsebenen verwendbar sind. Bedingt durch den Positionierungsfehler sollten jedoch nur die erste und zweite Projektion verwendet werden.

Das Schätzverfahren zur Ermittlung der S-Achsen bei fehlender zweiter Projektion bringt erhebliche Vorteile, wenn es um die Formbestimmung bei kleinen Korngrößen geht. Die in diesem Verfahren steckenden potentiellen Möglichkeiten bedürfen jedoch noch weiterer Untersuchungen.

Insgesamt kann gesagt werden, daß das hier dargestellte Ellipsoid-Verfahren nicht nur ein äquivalenter Ersatz zu anderen Meßmethoden ist, sondern für die Formanalyse eine Verbesserung bedeutet.

5. DIE KLASSIFIZIERUNG DER KORNGESTALT MIT FOURIER-SPEKTREN

5.1. Bedeutung und Überblick zu den bisherigen Arbeiten

Mit Fourier-Spektren läßt sich die Korngestalt beliebig genau beschreiben. Damit ergibt sich die Möglichkeit, Populationen von Partikelgestalten als solche zu identifizieren.

Die bisherigen Arbeiten zur 'shape analysis' sind geprägt durch die konzeptionellen Vorstellungen von Ehrlich et al. (1980). Danach werden für die Analyse ausschließlich die Amplitudenwerte einzelner, selektierter Frequenzen benutzt und zu sogenannten 'shape frequency distributions' zusammengefaßt. Die Charakteristika solcher Verteilungen, insbesondere die Modalitäten, sehen die Autoren als "Fingerabdruck" (Ehrlich et al., 1980, S. 478) einer Probe, wobei hinter einzelnen Modalwerten die Kornpopulationen vermutet werden. Das weitere Vorgehen sieht zumeist so aus, daß die Populationen, die sogenannten 'end members', mit einer von Klovan & Miesch (1976) entwickelten Faktorenanalyse im Q-Modus aus dem Probenensemble bestimmt werden.

In den bislang veröffentlichten Arbeiten wird betont, daß die 'shape analysis' besonders dazu geeignet ist, die Herkunft der Sedimente zu belegen. Entsprechend Kap. 1.2. verbinden sich in der Korngestalt Informationen sowohl über die Provenance als auch die Transport- und Ablagerungsgeschichte. Um also als 'provenance guide' verwendbar zu sein, dürfen die Spektren oder auch nur Teile davon durch Abrasion, Verwitterung oder Diagenese des Sediments nicht oder nur wenig veränderbar sein. Ehrlich et al. (1980, S. 479) räumen ein, daß aufgrund der Abrasion die Amplituden im höheren Frequenzbereich zurückgehen, meinen aber auch, daß selbst bei sehr gut gerundeten Sedimenten die Provenance-Information erhalten bleibt. Es gibt jedoch bislang keine Arbeit, die das belegen würde. Die Durchsicht der bisherigen Arbeiten zeigt im Gegenteil, daß diese bestenfalls auf eine Diskriminierung gut gerundeter Sedimente von weniger gerundeten Sedimenten hinauslaufen (Nieuwenhuise et al., 1978; Mazzullo & Ehrlich, 1980; Riester et al., 1982; Mazzullo & Ehrlich, 1983; Kennedy & Ehrlich, 1984; Smith et al., 1985; Mazzullo & Magenheimer, 1986). Es ist daher zweifelhaft, ob die Amplitudenverteilungen - außer für die Rundungsdifferenzierung - noch irgendeine andere, faßbare geologische Bedeutung haben. Auch steht die Verwendung einzelner Frequenzen für die Analysen in krassem Gegensatz zu der von Ehrlich et al. (1980, S. 476) betonten Vieldimensionalität der Korngestalt. Bezeichnend ist in diesem Zusammenhang, daß Mazzullo et al. (1988) und Mazzullo & Haines (1988) versuchen, sich bei der Probenklassifizierung auf die bereits von Wadell (1932) vorgeschlagenen Parameter Rundung und Sphärizität zurückziehen, dargestellt als bivariate Verteilung der Amplituden der Frequenzen 2 und 19.

Boon, Evans & Hennigar (1982) benutzten zur Diskriminierung von Fluß- und Küstensanden das gesamte Amplitudenspektrum der Partikel. Die Autoren konnten feststellen, daß die Verteilungen der Amplituden in den einzelnen Frequenzen lognormal sind. Um die Zusammenhänge zwischen einzelnen Verteilungen zu prüfen, wird ein Chi-Quadrat-Test benutzt.

Bookstein et al. (1982) und Rohlf (1986) vertreten die Meinung, daß für die Umrißklassifizierung Amplituden und Phasenverschiebungen erforderlich sind. Die Diskus-

sion in den beiden Arbeiten bezieht sich primär auf die Fossilbeschreibung. Wie der folgende Abschnitt jedoch zeigt, sind die Amplituden auch bei der Klassifizierung von Sedimentpartikeln nicht ausreichend.

5.2. Provenance und Transport in den Amplitudenspektren

Um den Einfluß von Provenance und Transport auf die Amplituden zu zeigen, wurden sowohl für die Death Valley-Gesteine als auch für die kalabrischen Gesteine mittlere Amplitudenspektren berechnet (zu den Lokalitäten vgl. Kap. 3.5.3. und 3.5.4..

Kalabrien

Die Abbildungen 5-1 und 5-2 zeigen mittlere Amplitudenspektren für die hellen (GH) und die dunklen Gneise (GD). Für die Darstellung wurden jeweils zwei Proben aus drei verschiedenen Transportabschnitten zusammengefaßt: Die Laverdeproben hinter der 'fall line' (A), Probenpunkte etwa 1 km nördlich von der Mündung des Laverde (B) und zwei Probenpunkte 5 km weiter nordwärts an der Küste (C). Die etwas stärkere Unregelmäßigkeit in den mittleren Spektren der hellen Gneise ist auf die sehr viel geringeren Stückzahlen in den Proben zurückzuführen. Im übrigen ist der Verlauf der Spektren bemerkenswert einfach. Deutlich ist zu sehen, daß sich durch die Abrasion die Amplituden im mittleren und hohen Frequenzbereich gleichmäßig absenken. Zu den niedrigen Frequenzen hin verengen sich die Abstände zwischen den Spektren und bei der Frequenz 2 sind keine bedeutenden Unterschiede mehr erkennbar. Da die Frequenz 2 für die Länglichkeit steht, bestätigt sich die Stabilität der Achsenverhältnisse während des Transports. Darüberhinaus zeigt das Beispiel, daß die Kornform die einzige Gestaltkomponente ist, die nicht von der Abrasion verändert wird.

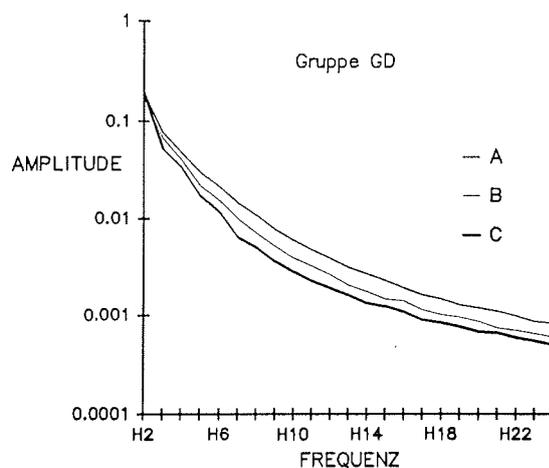


Abb. 5-1. Mittlere Amplitudenspektren für die kalabrische Gesteinsgruppe der dunklen Gneise (GD). Für die Darstellung wurden die Korngrößen 16-40 mm zusammengefaßt. A) fall line B) Mündung Laverde C) Küste vor Bianco.

Die Klassifizierung der Korngestalt

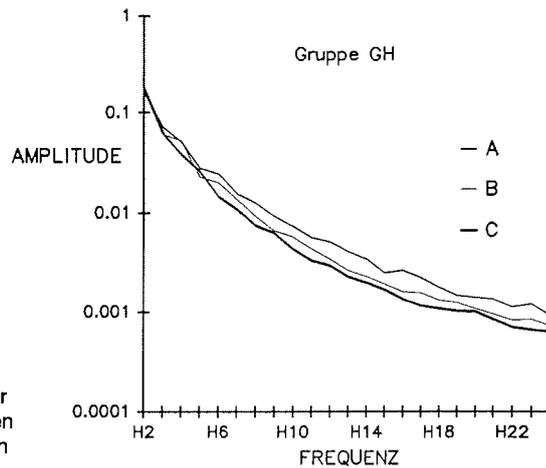


Abb. 5-2. Mittlere Amplitudenspektren für die kalabrische Gesteinsgruppe der hellen Gneise (GH). Lokaltäten und Korngrößen wie in Abb. 5-1.

Vergleicht man die Entwicklung der Spektren beider Gesteine im niedrigen Frequenzbereich, so stellt man zunächst fest, daß die 'fall-line'-Spektren sich trotz der petrographischen Verschiedenheiten beider Gesteine nur unwesentlich unterscheiden. Der Vergleich mit den 'Küsten-Spektren' zeigt schließlich, daß auch der niederfrequente Bereich mehr von der Abrasion als durch die Gesteinsunterschiede beeinflusst wird (Abb. 5-3). Dies ist auch in den Amplitudenverteilungen zu sehen. Die Abrasion bewirkt hier - außer bei der Frequenz 2 - eine Verschiebung und Konzentration der Verteilungen zu niedrigeren Amplitudenwerten hin (Abb. 5-4). Die Zusammengehörigkeit

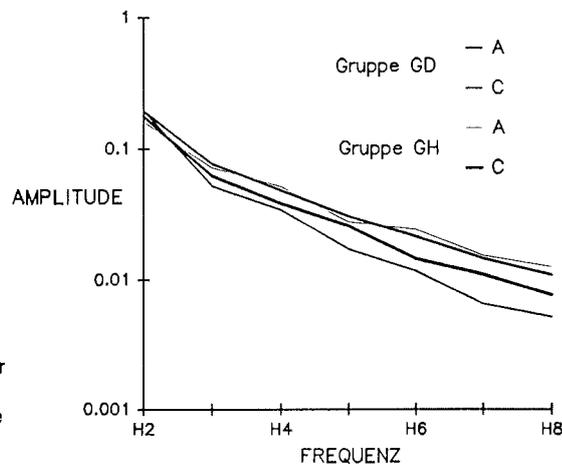


Abb. 5-3. Mittlere Amplitudenspektren der dunklen (GD) und hellen Gneise (GH) für den niedrigfrequenten Bereich. A) fall line C) Küste vor Bianco.

Die Klassifizierung der Korngestalt

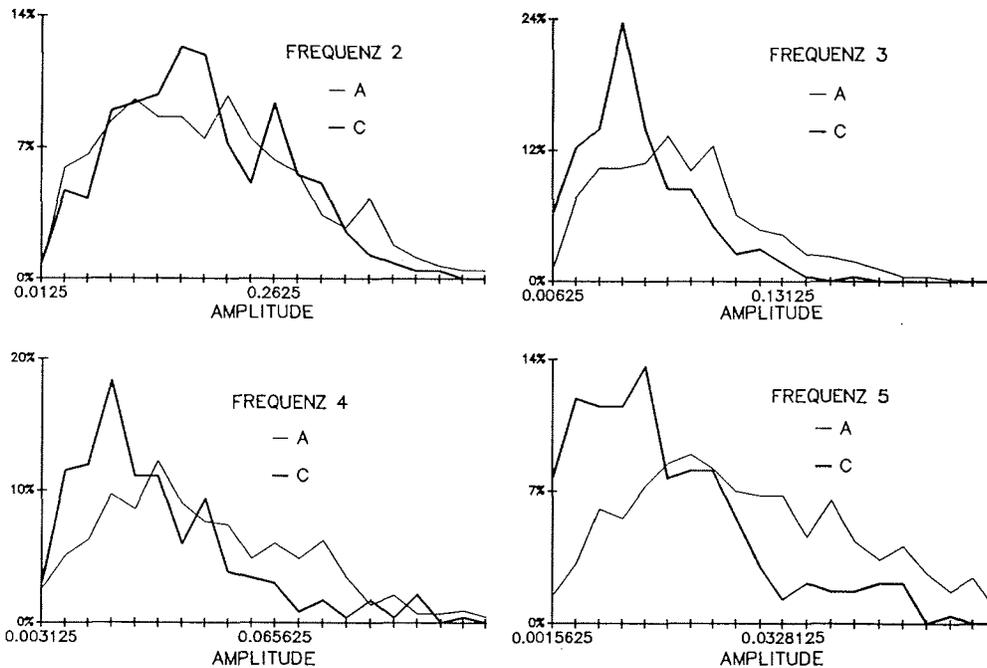


Abb. 5-4. Amplitudenverteilungen der Frequenzen 2-5 für die kalabrischen Gerölle in den Fraktionen 16-40 mm. A) fall line C) Küste vor Bianco.

von Gesteinsarten ist daher mit den Amplitudenverteilungen nicht feststellbar. Die konzeptionelle Vorstellung von Ehrlich et al. (1980), daß die Provenance-Information sich in den Amplitudenverteilungen wiederfindet, wird damit widerlegt.

Death Valley

Bei den Argilliten und Quartziten des Hanapauh Fan im Death Valley wurden mittlere Amplitudenspektren für zwei Proben 2 km oberhalb des 'fan head' (A) und für eine Probe 3 km unterhalb des 'fan head' (B) berechnet. Auch hier kann man feststellen, daß die Spektren überwiegend durch die Abrasion geprägt werden (Abb. 5-5). Desweiteren ist zu sehen, daß sich die beiden Gesteine oberhalb des 'fan head' noch deutlich unterscheiden, unterhalb jedoch nicht mehr. Nichtsdestoweniger sind die Unterschiede in den Korngestalten der verschiedenen Gesteine in allen Proben makroskopisch erkennbar. Es liegt daher der Schluß nahe, daß die Amplituden für eine Quantifizierung dieser Unterschiede nicht ausreichen.

Die Klassifizierung der Korngestalt

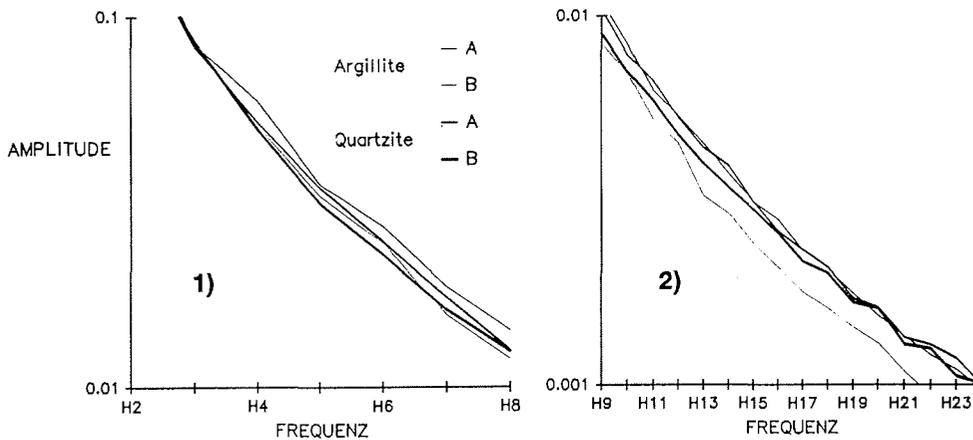


Abb. 5-5. Mittlere Amplitudenspektren für die Argillite und Quartzite des Death Valley. A) 2 km oberhalb des 'fan heads' B) 3 km unterhalb des 'fan heads'. 1) niederfrequenter Bereich 2) hochfrequenter Bereich.

5.3. Abschließende Bemerkung

Die Beschreibung der Korngestalt mit Amplituden ist nicht vollständig. Entsprechend weisen die Ergebnisse des vorgehenden Abschnitts darauf hin, daß eine Klassifizierung von Kornpopulationen selbst mit dem gesamten Amplitudenspektrum nicht eindeutig ist. Unterschiede zwischen Kornpopulationen können wahrscheinlich nur über die Erfassung weiterer Projektionsebenen und/oder zusammen mit den Phasenverschiebungswinkeln quantifiziert werden. Dazu gibt es bislang jedoch keine Untersuchungen.

Ein weiterer wichtiger Punkt dieser Untersuchung ist die Feststellung, daß die Amplituden mehr durch die Abrasion als durch die Herkunft und Lithologie von Kornpopulationen geprägt werden. Amplitudenspektren oder gar Amplitudenverteilungen einzelner Frequenzen können daher nur dann als 'provenance guide' verwendet werden, wenn wenigstens Teile des Frequenzbandes durch die Abrasion nicht oder nur unwesentlich beeinflusst werden. Dies ist dann möglich, wenn das Herkunftsgestein, wie z.B. ein äolischer Sandstein, aus bereits gut gerundeten Partikeln besteht und durch eine weitere Transportphase nur noch wenig verändert wird - solche Fälle sind aber selten. In der Regel geht die Information über die ursprünglichen Gestalteigenschaften einer Kornpopulation mit der Abrasion sukzessive verloren. Es ist daher viel schwieriger, die Provenance-Information einer Korngestalt zu erfassen als lediglich den Ist-Zustand dieser Gestalt zu beschreiben. Um zumindest grobe Gestaltanteile - wenn diese herkunftstypisch sind - bei transportierten Sedimentpartikeln wiederzuerkennen zu können, ist es unumgänglich, weitere Informationen, wie etwa die Phasenverschiebungswinkel, miteinzubeziehen. Ob mit der Fourier-Analyse die Typisierung von Sedimentpartikeln nach ihrer Herkunft letztlich überhaupt möglich ist, müssen zukünftige Arbeiten zeigen.

6. VOM ANALOGBILD ZUM BINÄRBILD - DIE BILDVERARBEITUNG

In diesem Kapitel soll keine lehrbuchartige Darstellung der digitalen Bildverarbeitung gegeben werden, sondern die gängigen Verfahren werden - sofern angewendet - kurz erläutert und darüber hinaus erfolgt eine Beschreibung der bei der Partikelanalyse auftretenden Besonderheiten sowie eine Beschreibung der für diesen Zweck gemachten Entwicklungen. Zum Abschluß werden die benutzten Peripheriegeräte dargestellt.

6.1. Die Hardware

Abbildung 6-1 zeigt schematisch die Hardware-Komponenten für die Bildverarbeitung. Notwendige Bestandteile sind ein 80386/486 IBM kompatibler Rechner mit integrierter 32-Bit Bildverarbeitungskarte und einer Videokamera (S/W oder Farbe). Für die manuelle Digitalisierung kann ein handelsüblicher Digitalisierertisch verwendet werden.

Sinnvoll ist desweiteren ein Leuchttisch, der sowohl für Lockerpräparate als auch für Filmnegative geeignet ist. Feine Partikel und Dünnschliffe können über ein Mikroskop dargestellt werden.

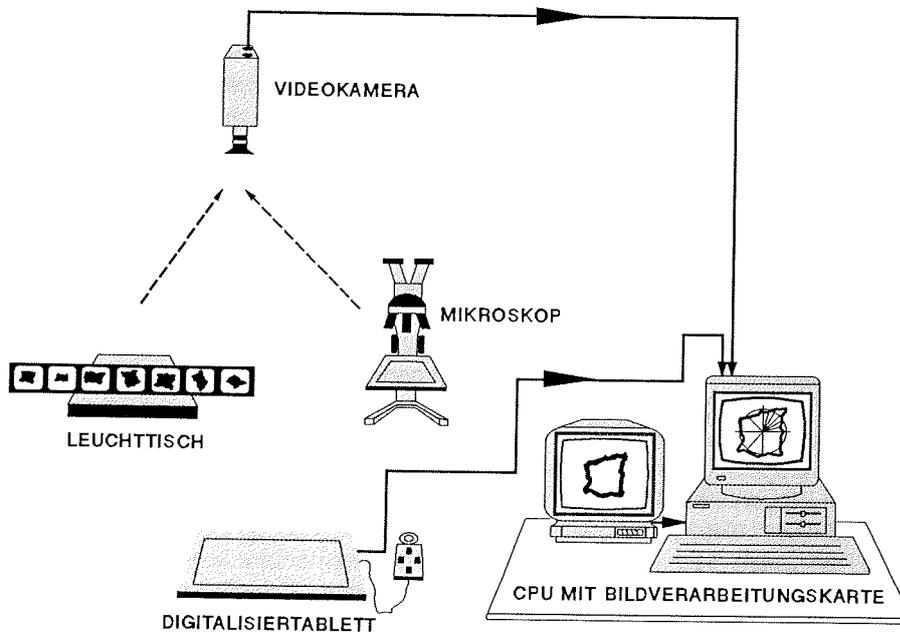


Abb. 6-1. Hardware-Komponenten für die Bildverarbeitung.

6.2. Überblick zu den bildverarbeitenden Verfahren

Ziel der hier beschriebenen Bildverarbeitung ist es, von einem Partikel die Umrißkoordinaten zu bekommen. Zwei grundsätzliche Wege bieten sich dazu an: Entweder man bearbeitet die Bildvorlage manuell oder man setzt automatische Verfahren ein.

Bei den manuellen Verfahren wird die Kontur eines Partikels mit einer Maus, einer Fadenkreuzlupe oder einem Stylo umfahren. Bezüglich der Genauigkeit und des Aufwands für die Erfassung sind die manuellen den automatischen Verfahren unterlegen.

Schwerpunktmäßig wird in den folgenden Abschnitten die automatisierte Verarbeitung von Bildvorlagen beschrieben werden. Der Ablauf einer solchen Bildverarbeitung läßt sich wie folgt skizzieren:

Nach der Digitalisierung des Bildes werden zunächst die im Bild vorhandenen Grauwerte mittels eines Schwellwertverfahrens in Objekt- und Matrixgrauwerte getrennt. Die beiden Grauwertbereiche werden dann zu je einem Grauwert zusammengefaßt und es entsteht ein Binärbild. Mittels eines Linienverfolgungsverfahrens werden schließlich die Umrisse der Objekte bzw. deren Koordinaten ermittelt. Da durch verschiedene Einflüsse Bildverzerrungen entstehen, müssen die Koordinaten in einem späteren Schritt noch entzerrt werden.

6.3. Digitalisierung der Bildvorlagen

Mit der Digitalisierung werden die Bildvorlagen in rechnerkompatible Formate transformiert. Durch Überlagerung eines quadratischen "Gitters" wird die Bildfläche aufgerastert und jedem Bildpunkt (pixel) ein seinem Grauwertlevel entsprechender Wert zugeordnet. Das zur Zeit verwendete Raster beträgt 512 x 512 Bildpunkte und die Anzahl der Grauwerte 256. Damit steht die originale Bildinformation dann als zweidimensionale, diskrete Funktion zur Verfügung.

In der Grauwertematrix ist jedoch auch ein gewisser Rauschanteil vorhanden, der - soweit möglich - reduziert werden sollte. Mit Filtern im Orts- oder Frequenzbereich, wie z.B. mit einem gleitenden Mittelwert oder einer Fourier-Transformation läßt sich die Rauschleistung mindern. Gleichzeitig geht allerdings auch Bildinformation verloren. Eine andere Möglichkeit besteht darin, eine Bildvorlage mehrfach zu digitalisieren und anschließend für jeden Bildpunkt einen Mittelwert zu berechnen. Dieses Verfahren mindert nicht nur die Rauschleistung, sondern auch die Auflösung des Bildes durch das verwendete Raster bleibt erhalten. Mit Blick auf die geforderte Bildauflösung für die Rundungsanalyse wird dieses Verfahren bei der Digitalisierung verwendet. 40 Bilder werden dabei überlagert und gemittelt.

6.4. Schwellwertbildung zur Binärbilderzeugung

Für die Extraktion von Partikelumrissen können grundsätzlich alle Bildvorlagen genommen werden, die eine Partikelkontur erkennen lassen, gleich ob diese als Grauwert- oder als Texturkante zu erkennen ist. Für die Rundungsanalyse jedoch braucht man scharfe, fehlerfreie Umrisse. Es werden daher nur qualitativ gute, kontrastreiche

Bildvorlagen benutzt, die sich mit einfachen Schwellwertverfahren segmentieren lassen. Der Schwellwert ist der Grauwert, welcher zwischen den Objekt- und den Hintergrundgrauwerten liegt. Da kontrastreiche Bildvorlagen bimodale Grauwertverteilungen haben, läßt sich der Schwellwert leicht aus dem Minimum zwischen den beiden Modalwerten des Histogramms ermitteln. Um optimale Grauwertverteilungen zu erhalten, werden bei jeder neuen Bildvorlage die Helligkeiten und Kontraste überprüft. Gegebenfalls werden die Spannungspegel am A/D-Wandler angepaßt.

Schwierigkeiten bei der Schwellwertbestimmung treten dann auf, wenn mehr als zwei Grauwertmaxima auftreten oder Objektgrauwerte auch in der Matrix vorkommen. Solche Effekte entstehen hauptsächlich durch eine ungleichmäßige Ausleuchtung des Bildfeldes bei der Aufnahme. Aber auch durch Randabschattungen aufgrund qualitativ schlechter Objektive oder durch die Filmentwicklung kann die Schwellwertfindung erschwert sein.

Ist der Effekt für eine größere Zahl von Bildern gleichbleibend, dann ist es lohnenswert, die Grauwerte vor der eigentlichen Objekterfassung zu kalibrieren, d.h. die ortsabhängigen Grauwertlevel können ausgeglichen werden.

Ein weitere Möglichkeit besteht in der Verwendung einer dynamischen Schwellwerttechnik. Bei dieser Methode wird nicht ein einheitlicher, für das gesamte Bild gültiger Schwellwert berechnet, sondern für jeden Bildpunkt ein neuer Schwellwert bestimmt, der aus einer bestimmten Umgebung des Bildpunktes abgeleitet wird. Um die Bimodalität in einer Verteilung erkennen zu können, sollte die Umgebung genügend groß sein. Das Verfahren ist extrem rechenzeitintensiv und wird daher nur in besonderen Fällen zur Anwendung kommen.

Eine praktische Lösung bietet sich an, wenn die Grauwertschwankungen im Bereich einzelner Objekte und deren unmittelbarer Umgebung nicht gravierend sind. Zunächst wird über Grauwertprofile die Lage und die ungefähre Größe eines Objekts ermittelt. Im Anschluß daran wird ein Fenster im Bild festgelegt, welches das Objekt inklusive einer angemessenen Umgebung erfaßt. Für dieses Fenster wird dann der für das jeweilige Objekt gültige Schwellwert berechnet. Die Fenstertechnik ist sehr schnell und war für die meisten der in dieser Arbeit verwendeten Bildvorlagen ausreichend.

Schwierigkeiten gab es lediglich bei einigen großen Geröllern, die mit einem Leuchtkasten und 16 mm Filmstreifen aufgenommen wurden (vgl. Kap. 6.6.2.).

Den Abschluß der Schwellwertfindung bildet die Klassifizierung der Bildpunkte, bzw. die Darstellung des Binärbildes. Die Binärdarstellung nicht unbedingt erforderlich. Sie erleichtert jedoch die für die Umrißermittlung notwendigen Abfragen und erspart damit Programmier- und Rechnerzeit.

6.5. Umriß und Linienverfolgung

Bei der Kantenextraktion mit einem Linienverfolgungsverfahren wird zunächst eine Ansatzstelle am Bildobjekt gesucht. Ist der Ansatz gefunden, kann das Objekt umfahren werden, wobei die aufeinanderfolgenden Punkte mit einem Suchstrahl ermittelt werden.

Die Vorteile der Linienverfolgung sind zum einen, daß nicht alle Bildpunkte des Bildes untersucht werden müssen und zum anderen, daß während des Umfahrens von Objekten abgefragt werden kann, ob das Objekt brauchbar ist. Dabei kann es vorkommen, daß einzelne Abschnitte als Schwachstellen erkannt werden und weiterer Untersuchung bedürfen oder das Objekt in Gänze verworfen wird. Letzteres ist z.B. der Fall, wenn das Objekt zu klein ist oder vom Bildrahmen angeschnitten wird.

Schwachstellen im Umriß treten dort auf, wo die Objektkontur mit dem Schwellwertverfahren nicht klar abgebildet wird. Die Hauptursache dafür sind randliche Überblendungen der Objektkontur (vgl. Kap. 6.2.2.). Solche Stellen sind entweder an einer für Sedimentpartikel ungewöhnlichen Koordinatenabfolge zu erkennen oder an den an diesen Stellen verringerten Kontrasten. Schwachstellen erfordern eine Überarbeitung. Diese sieht so aus, daß als erstes über die Schwachstelle ein Fenster gelegt wird. Dann wird ein Grauwertprofil erstellt, welches annähernd normal zum Verlauf der Umrißlinie liegt. Mittels des Grauwertprofils wird schließlich aus einer Kombination von absolutem Grauwert und Kontrast der wahrscheinlichste Randpunkt ermittelt. Derartige Randpunkte werden in Abhängigkeit von ihrer Umgebung bestimmt. Die Folge ist ein Glättungseffekt in der Grauwertkante, der sich u.U. im Rundungswert bemerkbar macht. Schwachstellen können daher nur bis zu einem gewissen Prozentsatz akzeptiert werden (hier 5%).

6.6. Umrißverzerrung - Der Einfluß der Optik

Durch die Bildaufnahmetechnik entstehen Verzerrungen, die je nach Ausmaß eliminiert werden sollten.

Mittels einer Reihe von Paßpunkten an einem bekannten Objekt wurden die Verzerrungen bei dem für diese Arbeit benutzten System untersucht. Die Rechnungen ergaben, daß die Verzerrung hauptsächlich durch den CCD-Chip der Videokamera verursacht wird; Verzerrungen durch die übrige Optik können vernachlässigt werden, was auf die durchgängig guten Abbildungseigenschaften der verwendeten Optiken zurückzuführen ist.

Die Verzerrung durch den Chip ist linear. Es wurde daher ein einfacher Korrekturfaktor für die Y-Achse errechnet.

Da in den Bildvorlagen ausschließlich die Umrißlinien von Interesse sind, wird die Korrektur auch nur an den Umrißkoordinaten vorgenommen.

6.7. Periphere Hilfsmittel und Techniken

Die im folgenden beschriebenen Hilfsmittel und Techniken erleichtern die Digitalisierung des Probenmaterials. Vorrangiges Ziel ist es dabei, ausreichende und scharfe Kontraste zwischen Partikeln oder zwischen Partikeln und Matrix zu erzeugen; entweder für die Direkterfassung mit der Videokamera oder für die photographische Dokumentation und anschließende Digitalisierung.

Die vorherige photographische Erfassung ist in vielen Fällen sinnvoll. Erstens können so nachträglich Besonderheiten im Probenmaterial oder Fehler bei der Digitalisierung besser untersucht werden, zweitens ist es mit photographischen Bildvorlagen leichter möglich, Geräte und Routinen für die vollautomatische Digitalisierung zu entwickeln und schließlich erspart man sich den Transport des Materials aus dem Gelände. Bei der manuellen Digitalisierung von Sedimentoberflächen oder -aufschlüssen ist die photographische Erfassung unumgänglich.

6.7.1. Leuchttisch

Mit einem handelsüblichen Leuchttisch lassen sich auf einfache Weise kontrastreiche Bilder erzeugen. Ein solcher Leuchttisch eignet sich besonders gut für Direktaufnahmen mit der Videokamera. Benutzt wird der Tisch im allgemeinen für Gerölle > 16 mm. Bei Verwendung eines Makroobjektivs ist es jedoch auch möglich, feinere Partikel bis in den Mittelsandbereich hinein zu erfassen.

Für die photographische Erfassung von Partikeln wurde ein spezieller Leuchttisch mit einer an die Kamera gekoppelten Blitzbelichtung entwickelt (Abb. 6-2, links). Diese Aufnahmetechnik liefert hervorragend kontrastierende Bilder, die problemlos digitalisiert werden können.

6.7.2. Leuchtkasten zur photographischen Erfassung beliebiger Geröllprojektionen

Bei bestimmten Untersuchungen ist es notwendig, Objekte in mehreren Projektionen zu erfassen. Für Gerölle > 16 mm wurde ein Plexiglaskasten konstruiert, der von unten mit einer Reihe von Halogenlampen durchleuchtet wird. Der Kasten ist zum Teil

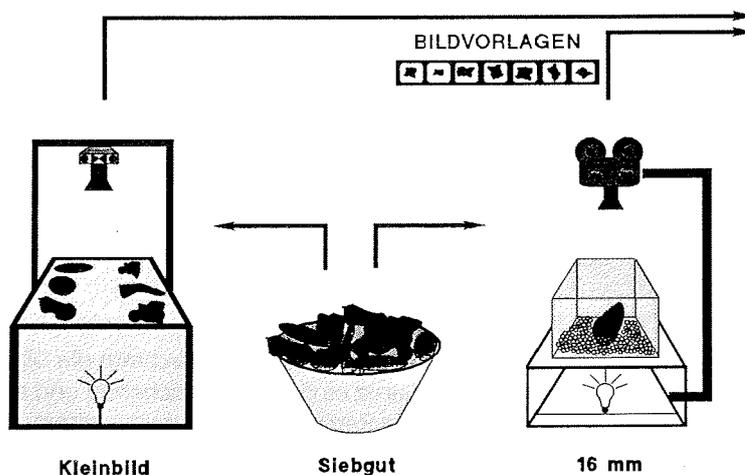


Abb. 6-2. Leuchttisch für Blitzlichtphotographien im Gegenlicht (links) und Leuchtkasten für zur Erfassung beliebiger Projektionsebenen an Geröllen (rechts).

mit mattierten kleinen Glaskugeln gefüllt, die als Einbettungssubstrat für die Gerölle dienen (Abb. 6-2, rechts).

Die Verwendung von Glaskugeln ist nicht unproblematisch, da das entstehende Streulicht starke Überblendungen erzeugt, besonders bei Projektionsebenen, die von der maximalen Projektion abweichen. Zusammen mit Verschmutzungen am Kastenboden durch tonige Partikel sorgte der Überblendungseffekt dafür, daß ein großer Teil des Bildmaterials von den alluvialen Geröllen des Death Valley für die Rundungsanalyse wertlos wurde. Um die Bildqualität zu steigern, sollten kleinere Glaskugeln genommen werden. Dadurch jedoch verliert das Substrat an Festigkeit und die ab und zu notwendige Reinigung des Kastens und der Kugeln wird erschwert. Alternativ bietet sich als Einbettungssubstrat ein Silikonkissen an, was bislang jedoch noch nicht getestet wurde.

Da nur wenige Gerölle gleichzeitig in den Kasten plaziert werden können, ist es aus Kostengründen empfehlenswert, die Gerölle entweder direkt zu digitalisieren oder - falls eine photographische Dokumentation notwendig ist - eine 16 mm Kamera in Einzelbildschaltung zu benutzen. Für die Praxis erwies es sich als vorteilhaft, die Gerölle einzeln mit einer solchen Kamera zu photographieren.

6.7.3. Rechnergesteuerter XY-Tisch

Zum Einlesen von photographischen Bildvorlagen und von Lockerpräparaten in den Korngrößen Mittel- bis Grobsand wurde ein rechnergesteuerter XY-Tisch konstruiert. Für das Filmmaterial gibt es zusätzlich zur XY-Bewegung eine Transportwalze, mit der sowohl Kleinbild- als auch 16 mm-Filme bewegt werden können.

Der Tisch wird von drei Motoren bewegt, die von eigens dafür entwickelten Programmmodulen gesteuert werden. Eine einfache manuelle Steuerung ist über die Tastatur möglich. Diese ist besonders nützlich beim Einlesen von Lockerpräparaten.

Für das 16 mm- Filmmaterial wurde ein Modul erstellt, welches die vollautomatische Digitalisierung ganzer Filmstreifen erlaubt. Der Bildtransport und die Lage der Partikel im Bild wird dabei von der Kamera überwacht und gegebenenfalls korrigiert. Zusätzlich wird auf dem Bildschirm ein Protokoll erstellt. Auftretende Fehler werden als File dokumentiert.

Auch für das Kleinbildmaterial wurde eine vollautomatische Steuerung entworfen. Die bereits fertigen Algorithmen sind jedoch noch nicht implementiert.

6.7.4. Mikroskop

Mit dem Mikroskop hat man die Möglichkeit Feinsand- und Siltpartikel zu digitalisieren. Zu dem Zweck wird die Videokamera direkt auf den Tubus aufgesetzt. Der kleinstmögliche Korngrößenbereich und die Qualität der Umrisse hängt dabei wesentlich von der Belichtung ab. Tests an Ostseesanden ergaben, daß es mit einem einfachen Köhlerschen Beleuchtungsapparat immerhin noch möglich ist, Feinsandpartikel ($63\text{-}200\ \mu$) zu erfassen. Um bei feineren Partikeln den notwendigen Kontrast und die Tiefenschärfe zu gewährleisten, ist eine größere Lichtmenge erforderlich, die nur durch besondere Techniken wie z.B. durch Lichtleiter erzeugt werden kann. Geschätzt wird, daß damit Partikel bis zu einer Größe von $20\ \mu$ digitalisiert werden können.

Bei noch feineren Partikeln sollte ein Elektronenmikroskop benutzt werden. Lohnenswert ist der Einsatz eines solchen Gerätes, wenn gleichzeitig die Oberflächentexturen der Partikel untersucht werden sollen.

Außer für die Erfassung von Lockerpräparaten kann das Mikroskop auch für die Digitalisierung von Dünnschliffen genutzt werden (vgl. Kap. 6.6.5.).

6.7.5. Manuelles Digitalisieren mit der Maus oder auf dem Digitalisiertisch

Für die Analyse von Sedimentoberflächen oder -aufschlüssen sowie für Dünnschliffe wurden Programmmodule erstellt, welche die manuelle Digitalisierung von Bildvorlagen ermöglicht. Die Routinen sind nicht speziell auf die Partikel-Analyse ausgerichtet. Grundsätzlich können alle im Bild vorhandenen Strukturen erfaßt werden.

Die Digitalisierung kann entweder mit der Maus auf dem Bildschirm durchgeführt werden oder mit einem Stylo bzw. einer Fadenkreuzmaus auf einem Digitalisierbrett. Was davon benutzt wird, hängt von der Vorlage und dem Zweck der Untersuchung ab.

Bei Dünnschliffen ist es in den meisten Fällen sinnvoll, die Schliffe direkt über die Videokamera darzustellen und mit der Maus zu digitalisieren. Auf diese Weise ist es während des Digitalisierens möglich, den Schliff auf fragliche Bestandteile hin zu untersuchen.

Falls für die Untersuchung nur Größe, Form und Orientierung der Partikel gefragt sind, sollte ein Digitalisierbrett benutzt werden. Die Arbeit am Brett wird im allgemeinen als weniger anstrengend empfunden. Nachteilig ist, daß mit der Fadenkreuzlupe keine direkte Kontrolle über bereits digitalisierte Strukturen besteht. Die Daten werden jedoch am Bildschirm protokolliert. Mit dem Stylo dagegen können die Linien direkt mitgezeichnet werden. Nachteilig ist hier die etwas umständliche Datenflußsteuerung. Größe, Form und Orientierung von Partikeln sind mit allen manuellen Verfahren leicht und schnell erfaßbar. Rundungsanalysen erfordern sehr viel mehr Aufwand, da die Umrisse sehr genau umfahren werden müssen. In einigen Fällen mag dieser Aufwand gerechtfertigt sein, besonders wenn mit der Digitalisierung gleichzeitig auch andere Daten wie z.B. gefügekundliche Parameter ermittelt werden. Man sollte sich jedoch bewußt sein, daß die Qualität der Digitalisierung bei den manuellen Verfahren stets vom jeweiligen Bearbeiter abhängig ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Bedeutung der Gestalt von Partikeln ist mehrschichtig. Einerseits reflektiert die Gestalt einen Teil der Entstehungs- und Veränderungsgeschichte der Partikel, andererseits hat sie Einfluß auf das dynamische und chemische Verhalten von Partikeln sowie auf die Packungseigenschaften von Partikelaggregaten.

Für die quantitative Beschreibung von Partikelgestalten gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. Das bislang brauchbarste "Werkzeug" ist die Fourier-Analyse. Die für diese Arbeit verwendete Radon-Technik gewährleistet eine vollständige, prägnante als auch skalen-, rotations- und reflexionsinvariante Beschreibung.

Aus den aus der Fourier-Analyse hervorgehenden Amplitudenspektren werden die Parameter Form und Rundung abgeleitet. Für die Rundungsbewertung wurde ein neues Konzept entwickelt, welches näher an den im Transport wirksamen physikalischen Prozessen orientiert ist. Wesentliche Kriterien sind danach nicht mehr nur die Kurvenkrümmungen an einzelnen morphologischen Elementen des Partikels, sondern auch die relative Position dieser Elemente, d.h. ob diese mehr oder weniger exponiert sind. Beides, Krümmung und Position, wird auf ein zum Partikel approximiertes Ellipsoid bezogen. Das Ellipsoid wird als ultimate Gestalt im Rundungsprozeß gesehen und verkörpert gleichzeitig den Aspekt der Form oder Sphärizität. Die Trennung von Rundung und Sphärizität wird beibehalten, da die Sphärizität während des Transports - außer durch Selektion - keine systematische Veränderung erfährt.

Methodisch erfolgt die Aufspaltung in die Gestaltkomponenten Form und Rundung darüber, daß aus dem Amplitudenspektrum zunächst die zur Partikelkontur am besten approximierende Ellipse errechnet wird. Anschließend wird das Spektrum der Ellipse von dem Partikelspektrum subtrahiert. Die Restamplituden beinhalten die Rundungsinformation und aus der Ellipse werden die für die Form maßgeblichen Achsen des Partikels berechnet. Mit Hilfe des Ellipsoids als Bezugskörper wird die Formmessung an die Konzeption der wichtigsten Formparameter angepaßt. Eine solche Anpassung ist z.Z. nur mit Bildverarbeitungsmethoden praktikabel.

Darüberhinaus wurde ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe es möglich ist, aus der maximalen Projektionsebene und der Siebkorngröße die fehlende kurze Achse des Partikels zu schätzen. Das Verfahren kann durch weitere Untersuchungen noch verbessert werden.

Die geschaffenen Methoden zu Rundung und Form von Partikeln wurden mehrfach getestet, sowohl an experimentellen Geröllen als auch an Proben von alluvialen, fluvialen und Küstengeröllen.

Die Rundungsergebnisse zeigen, daß es nunmehr möglich ist, auch kleinste Rundungsunterschiede nachzuweisen. Limitierend für den Nachweis ist einzig die Streuung der Rundungswerte innerhalb der Proben. Desweiteren wurde in dieser Arbeit erstmals festgestellt, daß die Rundung in geringem, aber signifikantem Maß, von der für die Messung verwendeten Projektionsebene abhängig ist. Die Ursache dafür läßt sich nur durch gezielte weitere Untersuchungen erfahren.

Bei der Formmessung konnte gezeigt werden, daß mit der Ellipsoid-Approximation die Formeigenschaften von Partikelpopulationen eindeutiger erfaßt werden. Der störende Einfluß der Rundung, der die Messung bei den üblichen mechanischen Verfahren überlagert, entfällt.

Zusammenfassung

Im fünften Kapitel wurden die bisherigen Arbeiten zur Analyse von Korngestalten kritisch beleuchtet. Der überwiegend in diesen Arbeiten vertretene Anspruch, daß in den Amplitudenspektren Informationen zur Herkunft der Sedimente stecken, wird durch die Ergebnisse in den Arbeiten nicht bestätigt. Eigene empirische Untersuchungen zeigen, daß nahezu das gesamte Amplitudenspektrum stark von der Abrasion geprägt wird. Eine Ausnahme ist lediglich die Frequenz 2, die für die Länglichkeit und damit Sphärizität der Partikel steht. Die Provenance-Information wird durch den Transport überlagert und geht sukzessive verloren. Um die Fourier-Transformation von Partikelkonturen als 'provenance guide' nutzen zu können, sind die Phasenverschiebungswinkel als zusätzliche Information unverzichtbar.

Die Information der Amplitudenspektren ist mit der Ableitung von Form und Rundung erschöpft und erfährt, wie die vorliegende Arbeit zeigen konnte, in diesen beiden Parametern eine prägnante Darstellung.

LITERATUR

- ALLEN, J.R.L. (1985) Principles of physical sedimentology, London, George Allen & Unwin, 272 S.
- BABA, J. & KOMAR, P.D. (1981) Measurements and analysis of settling velocities of natural quartz sand grains, Jour. Sed. Petrology, Bd. 51, S. 631-640
- BARRETT, P.J. (1980) The shape of rock particles, a critical review, Sedimentology, Bd. 27, S. 291-303
- BARTHOLOMÄ, A. (1992) Texturelle und kompositionelle Reifung von Fluß- und Küstenschottern, Kalabrien, Süditalien, Diss., FB Geowiss., FU-Berlin
- BEAL, M.A. & SHEPARD, F.P. (1956) A use of roundness to determine depositional environment, Jour. Sed. Petrology, Bd. 26, S. 49-60
- BEHRENS, M. (1977) Stereometrie von Geröllen, Mitt. geol. pal. Inst. Univ. Hamburg, Bd. 47, S. 1-124
- BLATT, H. & CRISTIE, J.M. (1963) Undulatory extinction in quartz of igneous and metamorphic rocks and its significance in provenance studies of sedimentary rocks, Jour. sed. Petrology, Bd. 33, S. 559-579
- BLUCK, B.J. (1967) Sedimentation of beach gravels: Examples from south Wales, Jour. Sed. Petrology, Bd. 37, S. 128-156
- BOKMAN, J. (1952) Clastic quartz particles as indices of provenance, Jour. sed. Petrology, Bd. 22, S. 17-24
- BOOKSTEIN, F.L. et al. (1985) Morphometrics in evolutionary biology, Special Publ. 15, Academy of Natural Sciences of Philadelphia, Philadelphia, 277 S.
- BOON, J.D., EVANS, D.A. & HENNIGAR, H.F. (1982) Spectral information from Fourier analysis of digitized quartz grain profiles, Math. Geol., Bd. 14, S. 589-605
- BRACEWELL, R.N. (1989) Die Fourier-Transformation, Spektrum d. Wiss., H. 9, S. 90-99
- BRIGGS, L.I., McCULLOCH, D.S. & MOSER, F. (1962) The hydraulic shape of sand particles, Jour. sed. Petrology, Bd. 32, S. 645-656
- CAILLEUX, A. (1947) L'indice d'émousse: définition et première application, C.R.S. Soc. géol., S. 250-252.
- CLARK, M.W. (1981) Quantitative shape analysis: A review, Math. Geol., Bd. 13, S. 303-320
- CLARK, M.W., CLARK, I. (1976) A sedimentological pattern recognition problem, in D.F. Merriam (Hrsg.), Quantitative techniques for the analysis of sediments, Oxford, Pergamon, S. 121-141
- CLARK, N.N. (1987) A new scheme for particle shape characterization based on fractal harmonics and fractal dimensions, Powder Technol., Bd. 51, S. 243-249
- COREY, A.T. (1949) Influence of shape on the fall velocity of sand grains, MSc thesis, Colorado A. & M. College, Fort Collins, Colorado, 102 S.
- CUI, B. & KOMAR, P.D. (1984) Size measures and the ellipsoidal form of clastic sedimentary particles, Jour. Sed. Petrology, Bd. 54, no. 3, S. 783-797
- CZARNECKA, E. & GILLOTT, J.E. (1980) Roughness of limestone and quartzite pebbles by the modified Fourier method, Jour. Sed. Petrology, Bd. 50, S. 857-868
- DOBKINS, J.E. & FOLK, R.L. (1970) Shape development on Tahiti-Nui, Jour. Sed. Petrology, Bd. 40, S. 1167-1203

- DOWDESWELL, J.A. (1982) Scanning electron micrographs of quartz sand grains from cold environments examined using Fourier shape analysis, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 52, S. 1315-1323
- EHRlich, R. & WEINBERG, B. (1970) An exact method for characterization of grain shape, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 40, S. 205-212
- EHRlich, R., BROWN, J.P., YARUS, J.M. & PRZYGOCKI, R.S. (1980) The origin of shape frequency distributions and the relationship between size and shape, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 50, S. 475-484
- EIBELE, K. (1957) Kritische Betrachtungen einer Methode zur Bestimmung des Rundungsgrades an Sandkörnern, *N. Jb. f. Geol., Min., Paläont.*, Bd. 9, S. 410-419
- ENGELHARDT, W.v. & PITTER, H. (1951) Über die Zusammenhänge zwischen Porosität, Permeabilität und Korngröße bei Sanden und Sandsteinen, *Heidelberger Beitr. Min. Petrol.*, Bd. 2., S. 477-491
- EVANS, O., F. (1939) Sorting and transportation of material in the swash and backwash, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 9, S. 28-31
- FLEMMING, N.C. (1965) Form and function of sedimentary particles, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 35, S. 381-390
- FOLK, R.L. (1955) Student operator error in determination of roundness, sphericity and grain size, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 25, S. 297-301
- FULL, W.E., EHRlich, R. (1982) Some approaches for location of centroids of quartz grain outlines to increase homology between Fourier amplitude spectra, *Math. Geol.*, Bd. 14, S. 43-55
- FÜCHTBAUER, H. (1988) *Sedimente und Sedimentgesteine*, Stuttgart, Schweizerbart, 4.Aufl., 1141 S.
- GOOSSENS, D. (1987) Interference phenomena between particle flattening und particle rounding in free vertical sedimentation processes, *Sedimentology*, Bd. 34, S. 155-167
- GOTOH, K. & FINNEY, J.L. (1975) Representation of the size and shape of a single particle, *Powder Technol.*, Bd. 12, S. 125-130
- GRIFFITHS, J.C. (1967) *Scientific method in analysis of sediments*, McGraw-Hill Inc., New York, S. 508
- GROGAN, R.M. (1945) Shape variation of some lake superior beach pebbles, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 15, S. 3-10
- HEALY-WILLIAMS, N. & WILLIAMS, D.F. (1981) Fourier analysis of test shape of planktonic foraminifera, *Nature*, Bd. 289, S. 485-487
- HUMBERT, F.L. (1968) *Selection and wear of pebbles on gravel beaches*, Ph.D. diss., Groningen, 144 S.
- IBBEKEN, H. & DENZER, P. (1988) Clast measurement: a simple manual device and its semiautomatic electronic equivalent, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 58, S. 751-752
- IBBEKEN, H. & SCHLEYER, R. (1991) *Source and sediment, a case study of provenance and mass balance at an active plate margin (Calabria, Southern Italy)*, Berlin [u.a.], Springer, 286 S.
- KAYE, B.H. (1978) Specification of the ruggedness and/or texture of a fine particle profile by its fractal dimension, *Powder Technol.*, Bd. 21, S. 1-16
- KENNEDY, S.K. & EHRlich, R. (1984) Origin of shape changes of sand and silt in a high-gradient stream system, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 55, S. 57-64
- KENNEDY, S.K., MELOY, T.P. & DURNAY, T.E. (1984) Sieve data - size and shape information, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 55, S. 356-360

- KLOVAN, J.E. & MIESCH, A.T. (1976) EXTENDED CABFAC and QMODEL computer programs for Q-mode factor analysis of compositional data, *Comput. Geosci.*, Bd. L, no. 3, S. 161-178
- KOLBUSZEWSKI, J. (1950) Notes on the deposition of sands, *Research*, Bd. 3, S. 478-483
- KOMAR, P.D. & REIMERS, C.E. (1978) Grain shape effects on settling rates, *Jour. Geol.*, Bd. 86, S. 193-209
- KOSTER, E.H., RUST, BR. & GENDZWILL, D.J. (1980) The ellipsoidal form of clasts with partial applications to fabric and size analysis of fluvial gravels, *Can. Jour. Earth Sci.*, Bd. 17, S. 1725-1739
- KÖSTER, E. (1964) *Granulometrische und morphometrische Methoden an Mineralkörnern, Steinen und sonstigen Stoffen*, Enke, Stuttgart, 336 S.
- KRUMBEIN, W.C. (1941a) Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 11, S. 61-72
- KRUMBEIN, W.C. (1941b) The effects of abrasion on the size, shape and roundness of rock fragments, *Jour. Geol.*, Bd. 49, S. 483-520
- KUENEN, P.H. & PERDOK, W.G. (1962) Experimental abrasion: 5. Frosting and defrosting of quartz grains, *Jour. Geol.*, Bd. 70, S. 648-658
- KUENEN, P.H. (1956) Experimental abrasion of pebbles: 2. Rolling by current, *Jour. Geol.*, Bd. 64, S. 336-368
- KUENEN, P.H. (1957) Some experiments on fluvial rounding, *Proc. Kon. Nederl. Akad. Wetensch.*, Amsterdam, Ser. B, S. 47-53
- KUENEN, P.H. (1959) Experimental abrasion: 3. Fluvial action on sand, *Am. Jour. Sci.*, Bd. 257, S. 172-190
- KUENEN, P.H. (1960) Experimental Abrasion: 4. Eolian Action, *Jour. Geol.*, Bd. 68, S. 427-449
- KUENEN, P.H. (1964) Experimental abrasion: 6. Surf action, *Sedimentology*, Bd. 3, S. 22-28
- LABOTKA, T.C., ALBEE, A.L., LANPHERE, M.A. & McDOWELL, S.D. (1980) Stratigraphy, structure, and metamorphism in the central Panamint Mountains (Telescope Peak quadrangle), Death Valley area, Cal.: Summary, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Part I, Bd. 91, S. 125-129
- LAMING, D.J.C. (1966) Imbrication, Paleocurrents and other sedimentary features in the lower New Red Sandstone, Devonshire, England, *Jour. sed. Petrology*, Bd. 36, S. 940-959
- LANDON, R.E. (1930) An analysis of beach pebble abrasion and transportation, *Jour. Geol.*, Bd. 38, S. 437-446
- LENK-CHEVITCH, P. (1957) Beach and stream pebbles, *Jour. Geol.*, Bd. 67, S. 103-108
- LI, Z. AND KOMAR, P.D. (1986) Laboratory measurements of pivoting angles for applications to selective entrainment of gravel in a current, *Sedimentology*, Bd. 33, S. 413-423
- LUDWICK, J.C. & HENDERSON, P.L. (1968) Particle shape and inference of size from sieving, *Sedimentology*, Bd. 11, S. 197-235
- MACKIE, W. (1893) On the laws that govern the rounding of particles of sand, *Trans. Edinb. Geol. Soc.*, Bd. 7, S. 298-311
- MANDELBROT, B.B. (1977) *Fractals: form, chance and dimension*, San Francisco: Freeman, 361 S.
- MAZZULLO, J.M. & EHRLICH, R. (1983) Grain-shape variation in the St. Peter Sandstone: A record of eolian and fluvial sedimentation of an early paleozoic cratonic sheet sand, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 53, S. 105-119

- MAZZULLO, J.M. & HAINES, J. (1988) The original shapes of quartz silt grains: A test of the validity of the use of quartz grain shape analysis to determine the sources of terrigenous silt in marine sedimentary deposits, *Marine Geol.*, Bd. 78, S. 227-240
- MAZZULLO, J.M. & MAGENHEIMER, S. (1987) The original shapes of Quartz sand grains, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 57, S. 479-487
- MAZZULLO, J.M., LESCHAK, P. & PRUSAK, D. (1988) Sources and distribution of late quaternary silt in the surficial sediment of the northeastern continental shelf of the United States, *Marine Geol.*, Bd. 78, S. 241-254
- MEDALIA, A.I. (1970) Dynamic shape factors of particles, *Powder Technol.*, Bd. 4, S. 117-138
- MELOY, T.P. (1977a) A hypothesis for morphological characterization of particle shape and physiochemical properties, *Powder Technol.*, Bd. 16, S. 233-253
- MELOY, T.P. (1977b) Fast Fourier transforms applied to shape analysis of particle silhouettes to obtain morphological data, *Powder Technol.*, Bd. 17, S. 27-35
- METZLER, B., SEARLE, N.H. & BROWN, R. (1967) Numerical specification of biological form, *Nature*, Bd. 216, S. 32-36
- MILLS, H.H. (1979) Downstream rounding of pebbles - a quantitative review, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 49, S. 295-302
- MRAZEK, J. (1972) Morphometrische Untersuchungen am Brockengranitgrus in situ und im Sediment der Bode (Harz), *Ber. deutsch. Ges. geol. Wiss. - B. Mineralogie und Lagerstättenforschung*, Bd. 17, H. 1
- NAHIN, P.J. (1974) The theory and measurement of a silhouette descriptor for image processing and recognition, *Pattern Recog.*, Bd. 6, S. 85-95
- NIEUWENHUISE, D.S.v., YARUS, J.M., PRZYGOCKI, R.S. & EHRlich, R. (1978) Sources of shoaling in Charleston harbor - Fourier grain shape analysis, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 48, S. 373-383
- ORFORD, J.D. & WHALLEY, W.B. (1983) The use of the fractal dimension to quantify the morphology of irregular-shaped particles, *Sedimentology*, Bd. 30, S. 655-668
- PARK, Y.A. & PILKEY, O.H. (1981) Detrital mica: Environmental significance of roundness and grain surface textures, *Jour. sed. Petrology*, Bd. 51, S. 113-120
- PETTIJOHN, F. J. (1957) *Sedimentary Rocks*, Harper & Bros, New York
- PIPER, J.W. (1970, The use of the D-Mac pencil follower in routine determinations of sedimentary parameters, *in* J.T. Cutbill (Hrsg.), *Data processing in biology and geology*, S. 97-103
- PLUMLEY, W. J. (1948) Black Hills terrace gravels: a study in sediment transport, *Jour. Geol.*, Bd. 56, S. 526-577
- POTTER, P.E. & PETTIJOHN, F.J. (1977) *Paleocurrents and basin analysis*, Berlin [u.a.], Springer, S.
- POWERS, M.C. (1953) A new roundness scale for sedimentary particles, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 23, S. 117-119
- RIESTER, D.D., SHIPP, C. & EHRlich, R. (1982) Patterns of quartz sand shape variation, Long Island littoral and shelf, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 52, S. 1307-1314
- ROHLF, F.J. (1986) Relationships among Eigenshape analysis, Fourier analysis, and analysis of coordinates, *Math. Geol.*, Bd. 18, S. 845-854
- ROSE, H.E. (1961) *in* *Powders in Industry*, Soc. Chem. Ind., London, 130 S.

- ROSENFELD, M.A. & GRIFFITHS, J.C. (1953) An experimental test of visual comparison technique in estimating two dimensional sphericity and roundness of quartz grains, *Am. Jour. Sci.*, Bd. 251, S. 553-585
- RUSSELL, D.R. & TAYLOR, R.E. (1937) Roundness and shape of Mississippi river sands, *Jour. Geol.*, Bd. 45, S. 225-267
- SAMES, C. W. (1966) Morphometric data of some recent pebble associations and their application to ancient deposits, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 36, S. 126-142
- SCHNEIDERHÖHN, P. (1954) Eine vergleichende Studie über Methoden zur quantitativen Bestimmung von Abrundung und Form von Sandkörnern (im Hinblick auf die Verwendbarkeit an Dünnschliffen), *Heidelbg. Beitr. Min. Petr.*, Bd. 4, S. 172-191
- SCHWARCZ, H.P. & SHANE, K.C. (1969) Measurement of particle shape by Fourier-analysis, *Sedimentology*, Bd. 13, S. 213-231
- SEBESTYN, G.S. (1959) On pattern recognition with application to silhouettes, PhD Thesis, MIT, 113 S.
- SMALLEY, I.J. (1967) The presentation of subjective shape and roundness data, *Sedimentology*, Bd. 8, S. 35-38
- SMITH, M.M., EHRLICH, R. & ARELLANO, R.d. (1985) Quartz provenance changes through time: Examples from two South Carolina Barrier Islands, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 55, S. 483-494
- SNEED, E.D. & FOLK, R.L. (1958) Pebbles in the Lower Colorado river, Texas; a study in partial morphogenesis, *Jour. Geol.*, Bd. 66, S. 114-150
- SORBY, H.C. (1880) On the structure and origin of the non-calcareous stratified rocks, *Jour. Geol. Soc.*, Bd. 36, S. 46-92
- SZADECZKY-KARDOSS, E.v. (1933) Die Bestimmung des Abrollgrades, *Centralbl. für Min., Abt. B*, S. 389-401
- TILMAN, S.E. (1973) The effect of grain orientation on Fourier shape analysis, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 43, S. 867-869
- VALETON, I. (1955) Beziehungen zwischen petrographischer Beschaffenheit, Gestalt und Rundungsgrad einiger Flußgerölle, *Peterm. Geogr. Mitt.*, Bd. 89, S. 13-17
- WADELL, H. (1932) Volume, shape and roundness of rock particles, *Jour. Geol.*, Bd. 40, S. 443-451
- WADELL, H. (1933) Sphericity and roundness of rock particles, *Jour. Geol.*, Bd. 41, S. 310-331
- WASKOM, J.D. (1958) Roundness as an indicator of environment along the coast of panhandle Florida, *Jour. Sed. Petrology*, Bd. 28, S. 351-360
- WENTWORTH, C.K. (1919) A laboratory and field study of cobble abrasion, *Jour. Geol.*, Bd. 40, S. 507-521
- WENTWORTH, C.K. (1922) A method of measuring and plotting the shapes of pebbles, *US Geol. Surv. Bull.*, Bd. 730, S. 91-102
- ZAHN, C.T. & ROSKIES, R.Z. (1972) Fourier descriptors for plane closed curves, *IEEE Trans. on Computers*, Bd. c-21, S. 269-281

**Folgende Hefte der Reihe „Berichte zur Polarforschung“
sind bisher erschienen:**

Verkaufspreis/DM

- * **Sonderheft Nr. 1/1981** – „Die Antarktis und ihr Lebensraum“
Eine Einführung für Besucher – Herausgegeben im Auftrag von SCAR
- Heft Nr. 1/1982** – „Die Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
zusammengestellt von Heinz Kohnen 11,50
- Heft Nr. 2/1982** – „Deutsche Antarktis-Expedition 1980/81 mit FS ‚Meteor‘“
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Liste der Zooplankton- und Mikronektonnetzfüge
zusammengestellt von Norbert Klages 10,—
- Heft Nr. 3/1982** – „Digitale und analoge Krill-Echolot-Rohdatenerfassung an Bord des Forschungs-
schiffes ‚Meteor‘“ (im Rahmen von FIBEX 1980/81, Fahrtabschnitt ANT III), von Bodo Morgenstern 19,50
- Heft Nr. 4/1982** – „Filchner-Schelfeis-Expedition 1980/81“
Liste der Planktonfänge und Lichtstärkemessungen
zusammengestellt von Gerd Hubold und H. Eberhard Drescher 12,50
- * **Heft Nr. 5/1982** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982“
by G. Hempel and R. B. Heywood
- * **Heft Nr. 6/1982** – „Antarktis-Expedition 1981/82 (Unternehmen ‚Eiswarte‘)“
zusammengestellt von Gode Gravenhorst
- Heft Nr. 7/1982** – „Marin-Biologisches Begleitprogramm zur Standorterkundung 1979/80 mit MS ‚Polar-
sirkel‘ (Pre-Site Survey)“ – Stationslisten der Mikronekton- und Zooplanktonfänge sowie der Bodenfischerei
zusammengestellt von R. Schneppenheim 13,—
- Heft Nr. 8/1983** – „The Post-Fibex Data Interpretation Workshop“
by D. L. Cram and J.-C. Freytag with the collaboration of J. W. Schmidt, M. Mall, R. Kresse, T. Schwinghammer 10,—
- Heft Nr. 9/1983** – „Distribution of some groups of zooplankton in the inner Weddell Sea in summer 1979/80“
by I. Hempel, G. Hubold, B. Kaczmaruk, R. Keller, R. Weigmann-Haass 15,—
- Heft Nr. 10/1983** – „Fluor im antarktischen Ökosystem“ – DFG-Symposium November 1982
zusammengestellt von Dieter Adeling 23,—
- Heft Nr. 11/1983** – „Joint Biological Expedition on RRS ‚John Biscoe‘, February 1982 (II)“
Data of micronekton and zooplankton hauls, by Uwe Piatkowski 16,—
- Heft Nr. 12/1983** – „Das biologische Programm der ANTARKTIS-I-Expedition 1983 mit FS ‚Polarstern‘“
Stationslisten der Plankton-, Benthos- und Grundscheppnetzfüge und Liste der Probennahme an Robben
und Vögeln, von H. E. Drescher, G. Hubold, U. Piatkowski, J. Plötz und J. Voß 14,—
- * **Heft Nr. 13/1983** – „Die Antarktis-Expedition von MS ‚Polarbjörn‘ 1982/83“ (Sommerkampagne zur
Atka-Bucht und zu den Kraul-Bergen), zusammengestellt von Heinz Kohnen
- * **Sonderheft Nr. 2/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition von FS ‚Polarstern‘ (Kapstadt, 20. Januar 1983 –
Rio de Janeiro, 25. März 1983)“, Bericht des Fahrtleiters Prof. Dr. Gotthilf Hempel
- Sonderheft Nr. 3/1983** – „Sicherheit und Überleben bei Polarexpeditionen“
zusammengestellt von Heinz Kohnen
- Heft Nr. 14/1983** – „Die erste Antarktis-Expedition (ANTARKTIS I) von FS ‚Polarstern‘ 1982/83“
herausgegeben von Gotthilf Hempel 40,—
- Sonderheft Nr. 4/1983** – „On the Biology of Krill *Euphausia superba*“ – Proceedings of the Seminar
and Report of the Krill Ecology Group, Bremerhaven 12.–16. May 1983, edited by S. B. Schnack 75,—
- Heft Nr. 15/1983** – „German Antarctic Expedition 1980/81 with FRV ‚Walther Herwig‘ and RV ‚Meteor‘“ –
First International BIOMASS Experiment (FIBEX) – Data of micronekton and zooplankton hauls
by Uwe Piatkowski and Norbert Klages 22,50
- Sonderheft Nr. 5/1984** – „The observatories of the Georg von Neumayer Station“, by Ernst Augstein 8,—
- Heft Nr. 16/1984** – „FIBEX cruise zooplankton data“
by U. Piatkowski, I. Hempel and S. Rakusa-Suszczewski 19,—
- Heft Nr. 17/1984** – „Fahrtbericht (cruise report) der ‚Polarstern‘-Reise ARKTIS I, 1983“
von E. Augstein, G. Hempel und J. Thiede 29,—
- Heft Nr. 18/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht von den Fahrtabschnitten 1, 2 und 3, herausgegeben von D. Fütterer 25,—
- Heft Nr. 19/1984** – „Die Expedition ANTARKTIS II mit FS ‚Polarstern‘ 1983/84“,
Bericht vom Fahrtabschnitt 4, Punta Arenas–Kapstadt (Ant-II/4), herausgegeben von H. Kohnen 41,—
- Heft Nr. 20/1984** – „Die Expedition ARKTIS II des FS ‚Polarstern‘ 1984, mit Beiträgen des FS ‚Valdivia‘
und des Forschungsflugzeuges ‚Falcon 20‘ zum Marginal Ice Zone Experiment 1984 (MIZEX)“
von E. Augstein, G. Hempel, J. Schwarz, J. Thiede und W. Weigel 42,—