

Bildanalytische Formanalyse und Klassifizierung der irregulären Graphitmorphologie in Gusseisen

Shape Analysis and Classification of Irregular Graphite Morphology in Cast Iron

A. Velichko, F. Mücklich

Korrespondenzanschrift / Correspondence address:

Universität des Saarlandes, Funktionswerkstoffe, Postfach 151150, D-66041 Saarbrücken

E-Mail: a.velitchko@matsci.uni-sb.de

Eingangen: 19. April 2005

Angenommen: 13. Mai 2005

Received: April 19th, 2005

Accepted: May 13rd, 2005

Translation: J. Fritsche

Kurzfassung

Die Unterscheidung der verschiedenen Graphitmorphologien in Gusseisen erfolgte bisher im Wesentlichen qualitativ durch subjektiven Vergleich mit Richtreihenbildern. In Hochleistungsanwendungen im Motorenbau werden nunmehr objektive quantitative Messungen der jeweiligen Graphitanteile benötigt, damit die mechanischen Eigenschaften reproduzierbar erreicht werden können.

Vorge stellt werden bildanalytische Untersuchungen zur automatischen Klassifizierung von Lamellen-, Vermikular- und Kugelgraphitformen, sowie Graphitformen in Temperguss. Dabei wurden insbesondere teilchenbasierte Messmethoden angewendet. Unterschiedliche Formparameter wurden in dieser Arbeit zusammengefasst, und ihre Relevanz für die Charakterisierung und Klassifizierung irregulärer, komplexer Graphitteilchen in Gusseisen wurde bestimmt. Es zeigte sich, dass die Kombination der Formparameter Rundheit und Kompaktheit die präziseste Klassifizierung liefert. Ein Klassifizierungsalgorithmus wurde mit Berücksichtigung der Abhängigkeit der Formparameter von

Abstract

Up to now, the various graphite morphologies in cast iron have been mainly classified only qualitatively with the help of subjective comparison to the standard series images. Hence high-performance applications in motor construction there is a need for objective quantitative measurements of the respective graphite type fractions in order to allow reproducible estimation of mechanical properties.

The article introduces image analytical examinations for the automatic classification of lamellar, vermicular, and nodular graphite types as well as graphite in malleable cast iron. Particle-based methods were specifically used here. Different shape parameters are summarized in this work, and their relevance for the characterization and classification of irregular complex graphite particles in cast iron was studied. It has been shown that the combination of the shape parameters roundness and compactness provides a most precise classification. A classification algorithm was developed considering the dependence of the particle size on the particle shape. This newly proposed method can

der Teilchengröße entwickelt. Die traditionelle subjektive Analyse der Gusseisengefüge anhand EN ISO 945 kann durch die Anwendung der neu vorgeschlagenen Methode mit einer automatischen reproduzierbaren Graphitformcharakterisierung und Klassifizierung deutlich verbessert werden.

1. Einleitung

Eine wichtige Aufgabe der Werkstoffwissenschaftler ist es, den Zusammenhang zwischen Mikrostruktur und Eigenschaften eines Werkstoffs zu finden. Gefügecharakterisierung ist im Fall von vielen regelmäßigen Strukturen durch die Anwendung quantitativer Bildanalyse unkompliziert und oft schon automatisch durchführbar. Dies ist leider für unregelmäßige Graphitteilchen in Gusseisen nicht der Fall. Um die Aufgabe für Metallographen zu erleichtern, wurden die idealen Gusseisenstrukturen mit sechs unterschiedlichen Graphittypen in DIN EN ISO 945 zusammengefasst (Bild 1).

Nun ist der qualitative und subjektive Vergleich mit Richtreihenbildern möglich, aber keine eindeutige Klassifizierung des Graphits und keine quantitative Aussage über z.B. den Volumenanteil der jeweiligen Graphittypen. Gleichzeitig ist bekannt, dass Graphittyp, Form, Größe und Verteilung einen Einfluss auf die Eigenschaften des Gusseisens haben. Allein der Graphittyp in

considerably improve the traditional subjective analysis of cast iron microstructures based on EN ISO 945 by automatic reproducible shape characterization and classification of graphite morphology.

1. Introduction

One of a material scientist's important tasks is to find a correlation between the material microstructure and its properties. With the help of quantitative microstructure analysis and computerized image analysis systems is the characterization for many regular microstructures now explicit and can often be automatically realized. This is, however, not the case for irregular graphite particles in cast iron. The cast iron structures with six different graphite types were summarized in DIN EN ISO 945 (Fig. 1) to facilitate the job of metallographers.

Now it possible to perform the qualitative subjective comparison with the standard series images. Unfortunately the exact classification of the graphite and a quantitative determination of, for example, the volume fraction for every specific graphite type can not be done. At the same time, it is known that the graphite morphology, shape, size, and distribution have a significant

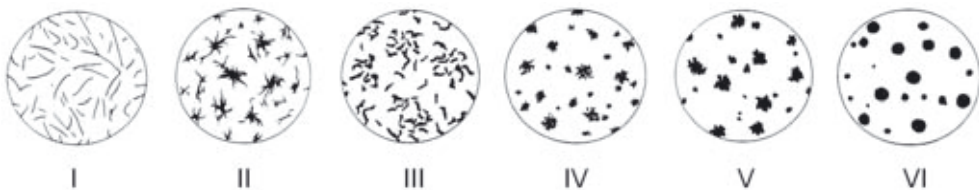


Bild 1. Richtreihenbilder für die sechs Graphittypen nach DIN EN ISO 945

Fig. 1. Standard series images of the six graphite types according to DIN EN ISO 945

Gusseisen mit gleicher perlitischer Matrixstruktur verändert stark nicht nur die mechanischen, sondern auch die magnetischen, elektrischen und thermischen Eigenschaften (Tab. 1).

impact on the properties of the cast iron. Cast iron with the same pearlitic matrix but different types of graphite shows great variation not only in mechanical, but also in magnetic, electrical and thermal properties (Tab. 1).

Eigenschaft / Property	Maßeinheit Measuring unit	GJL-250	GJV-500	GJS-700
Zugfestigkeit / Tensile strength, R_m	MPa	250-350	500	700
Bruchdehnung / Fracture strain, A	%	0,3-0,8	1	2
Elastizitätsmodul / Elastic Modulus, E	GPa	103	170	177
Wärmeleitfähigkeit / Thermal conductivity, λ	W/(m·K)	45	40	30
Spezifischer elektrischer Widerstand, / Electric resistivity ρ	$\mu\Omega\cdot m$	0,73	0,60*	0,54
Maximale Permeabilität / Maximum permeability, μ	$\mu H/m$	220-330		501

* gemessener Wert für GJV-400 /measured value of GJV-400

Tab. 1. Eigenschaftsvergleich zwischen GJL-250, GJV-500 und GJS-700 [1], [2]

Tab. 1. Comparison of properties between GJL-250, GJV-500, and GJS-700 [1], [2]

Deshalb ist es wichtig, den Volumenanteil einzelner Graphittypen und die Größenverteilung der Graphitteilchen zu bestimmen. Die quantitative Bildanalyse stellt ein zuverlässiges Werkzeug für diese Aufgabe dar. Deren Einführung hat eine quantitative Charakterisierung der unterschiedlichen Gefügetypen ermöglicht.

Therefore, it is very important to determine the volume fraction of each graphite type and the size distribution of graphite particles. A quantitative image analysis is a reliable tool for this task. Its implementation has made it possible the quantitative characterization of the different microstructures.

Stand der Forschung

Die Frage der Klassifizierung unterschiedlicher Graphitmorphologien wurde von vielen Werkstoffwissenschaftlern, Mathematikern und Informatikern bearbeitet. J. Ohser et al. [3] hat eine Methode entwickelt, die durch die Anwendung der morphologischen Transformationen die Klassifizierung unterschiedlicher Lamellengraphitanordnungen ermöglicht. In der Arbeit von K. Roberts et al. [4, 5] wurde für die Lamellengraphitklassifizierung das Stützvektorver-

Previous Investigations

Many materials scientists, mathematicians and computer scientists have been working on the question of classification of different graphite morphologies. J. Ohser et al. [3] introduced a method which makes it possible to classify different flake graphite configurations by applying morphological image transformations. The referenced articles by K. Roberts et al. [4, 5] report that the support vector method was employed to classify flake graphite. The author has employed

fahren benutzt. Dabei wurden Haralick-Koeffizienten [6] und messfeldbasierte bildanalytische Kenngrößen [7] verwendet. Als Ergebnis wurde eine Kombination von Kenngrößen festgelegt, die eine entscheidende Rolle für die Klassifizierung spielen.

Lamellengraphit existiert in fünf verschiedenen Anordnungen, ist selbst aber nur einer von sechs Graphittypen (Bild 1). Die Unterscheidung von diesen sechs Graphittypen kann anhand ihrer Form durchgeführt werden. Allerdings ist diese Aufgabe nicht trivial. Die in [8,9,10,11,12] beschriebenen Formparameter sind allein für die Klassifizierung der gesamten Vielfalt der Graphitmorphologien nicht ausreichend. In Arbeiten [9,10,13] wurde erfolgreich für die Graphitklassifizierung der Parameter „fraktale Dimension“ in Kombination mit anderen Formparametern verwendet. Allerdings hat diese Methode einige Nachteile und kann zurzeit noch nicht in der Produktion benutzt werden [9]. L. Wojnar [12] hat neben den Formparametern für solche Klassifizierung „fuzzy logic“ benutzt.

Formanalyse

Für die Beschreibung und Unterscheidung der irregulären Graphittypen können Formparameter benutzt werden. Es wurde festgestellt, dass viele Formparameter, die in [9,10,11,14] beschrieben sind, zu folgenden sechs wichtigen Kenngrößen reduziert werden können (Tab. 2).

Alle diese Formparameter können einfach aus den automatisch ermittelten zweidimensionalen geometrischen Merkmalen, wie Fläche (A), Umfang (P), konvexer Umfang (ConvexP) und Feret-Durchmesser [16], berechnet werden. Ihre Messung kann durch Anwendung eines geeigneten Bildanalyse systems automatisiert werden. Der Pluspunkt aller dieser Formpara-




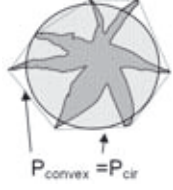
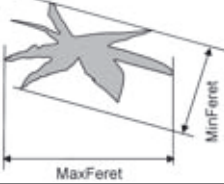
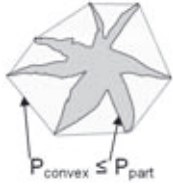
Haralick coefficients [6] and field-based image analytical parameters [7]. As the result the combination of parameters was defined, which play the most essential role for the classification.

Flake graphite existing in five different configurations is itself only one of the six graphite types (Fig. 1). A differentiation between those six graphite types may be made according to their shapes. This task admittedly is not trivial. The individual shape parameters described in [8,9,10,11,12] are alone not sufficient for a classification of the variety of graphite morphologies. In some recent works [9,10,13] the parameter “fractal dimension” in a combination with other shape parameters was successfully used for the graphite classification. However, several disadvantages are associated with this method and it cannot yet be used for production purposes [9]. L. Wojnar [12], together with the shape parameters, used the “fuzzy logic” for such classification.

Shape Analysis

Shape criteria can be used to characterize and separate irregular graphite particles. It has been found that majority of the shape parameters which are described in [9,10,11,14] can be reduced to only six most important characteristics listed in Tab. 2.

All of those shape parameters can be easily calculated from the two-dimensional geometric characteristics which were determined automatically, e.g. the area (A), perimeter (P), convex perimeter (ConvexP), and Feret diameter [16]. The measurement can be automated with a suitable image analysis system. The positive characteristic of all of those shape parameters is

<p>Sphericity, Formfaktor [9,10,11]</p>	$S = \frac{A}{A_{\text{cir1}}} = \frac{4\pi \cdot A}{P^2}$	
<p>Roundness, Rundheit [9,10]</p>	$R = \frac{A}{A_{\text{cir2}}} = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot (\text{MaxFeret})^2}$	
<p>Circularity, Kreisform [9]</p>	$C = \frac{D_{\text{cir}}}{\text{MaxFeret}} = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi \cdot (\text{MaxFeret})^2}}$	
<p>Compactness, Kompaktheit [9]</p>	$P = \frac{A}{A_{\text{cir3}}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{(\text{ConvexP})^2}$	
<p>Aspect ratio, Streckung [9,10,11]</p>	$F = \frac{D_{\text{min}}}{D_{\text{max}}} = \frac{\text{MinFeret}}{\text{MaxFeret}}$	
<p>Convexity, Konvexität [15]</p>	$K = \left(\frac{\text{ConvexP}}{P} \right)^2$	

Tab. 2. Formparameter

Tab. 2. Shape parameters

meter ist ihre Dimensionslosigkeit. Zusätzlich liegen ihre Werte in Abhängigkeit von der Teilchenform zwischen 0 und 1, was die Auswertung und Anschaulichkeit deutlich erleichtert.

Ein am meisten benutzter Formparameter ist der Formfaktor. Er vergleicht die Objektfläche (A) mit der Fläche des Kreises (A_{circ}) mit dem gleichen Umfang, wie der Umfang des Objektes (P). Andere Formparameter, wie Rundheit, Kompaktheit und Kreisform-Faktor vergleichen ähnlicherweise das Objekt mit einem idealen Kreis. Nur ist die Definierung des Vergleichskreises für alle diese Formparameter unterschiedlich (siehe Tab. 2). Als Ergebnis ist die Empfindlichkeit der Formparameter für die Formunterscheidung sehr verschieden.

Die Streckung beschreibt die Verlängerung eines Objektes, aber kann keine Aussage über die Komplexität der Objektform machen. Zum Beispiel hat ein Stern immer den Streckungswert gleich 1. Die Konvexität des Objektes ist als Quadrat des Verhältnisses des konvexen Umfangs zum Umfang des Objektes definiert. Ein Objekt mit konvexer Form hat die Konvexität gleich 1. Je rauer, je welliger und je komplizierter der Umriss des Objektes ist, desto kleiner ist der Betrag seiner Konvexität.

Eines der Ziele dieser Arbeit ist es, diese Formparameter nach ihrer Fähigkeit alle Graphitmorphologien zu charakterisieren und zu klassifizieren zu vergleichen. Ideale und reale Graphitteilchen wurden mit Hilfe teilchenbasierter bildanalytischer Messmethoden charakterisiert. Die Ergebnisse der Klassifizierung mit Berücksichtigung der Teilchengröße werden vorgestellt.

that they are dimensionless. In addition, their values range between 0 and 1 depending on the particle shape, providing easy and clear-cut shape characterization.

One of the most widely used shape parameter is particle-form factor. It compares the object's area (A) to the area of the circle (A_{circ}) having the same perimeter as the perimeter of the object (P). Other shape parameters such as roundness, compactness, and circularity similarly compare the object to an ideal circle. Except that the definition of the comparative circle is different for all of those shape parameters (see Tab. 2). As a result, the sensitivity of shape parameters proves to be very different for discrimination between shapes.

The aspect ratio describes the elongation of objects, but cannot give any information about the complexity of the object shape. For instance, the value of the aspect ratio of a star always is equal to 1. The convexity of the object is defined as the square of the relationship of the convex perimeter to the perimeter of the object. An object of a convex shape has a convexity which is equal to 1. The rougher, the wavier, and the more complicated is the outline of the object the smaller is the value of its convexity.

One of the goals of this article is to compare those shape parameters according to their capability of characterizing and classifying all graphite morphologies. Ideal and real graphite particles were characterized with the help of particle-based image analytical methods. The results of a classification considering the particle size are presented.

2. Experimentelles**Probenpräparation**

Zur Untersuchung kamen Gusseisenproben mit Kugel-, Lamellen-, oder Vermikulargraphit, sowie Temperegussproben. Die Präparation der Proben erfolgte am automatischen Schleif- und Poliergerät „RotoPol 22“ der Fa. Struers in zwei Schritten: Schleifen und Polieren (siehe Tab. 3). Um zu prüfen welcher metallographische Präparationsvorgang die beste Oberflächenqualität

2. Experimental Details**Sample Preparation**

The samples of cast iron with either nodular, or lamellar, or vermicular graphite, as well as samples of malleable cast iron were investigated. The samples were prepared on an automatic grinding and polishing machine “RotoPol 22” of the Struers Company in two steps: grinding and polishing (see Tab. 3).

Stufen / Steps	Schleifen / Grinding	Polieren / Polishing		
Unterlage / Surface	SiC-Papier / SiC paper	MD – DAC		
Körnung / Grain size	220, 500, 800, 1200	6 µm	3 µm	1 µm
Schmiermittel / Lubricant	Wasser / Water	Lubrikant grün / Lubricant green		
[U/min] / [r.p.m.]	300	150	150	150
Kraft / Force [N]	10	5	5	5
Zeit / Time [min]	je 2-5	5	5-10	10

Tab. 3. Präparationsvorgang

Tab. 3. Preparation procedure

des Schliffes liefert, wurde die Oberflächen-topographie der Gussproben nach jedem der vier letzten Präparationsschritte mit Hilfe des Weißlichtinterferometers [17] analysiert. Nach dem Polieren mit 3 µm Diamantsuspension wurde eine plane Oberfläche erreicht, die zur Untersuchung am Lichtmikroskop ausreichend ist. Allerdings ist die Topographie ziemlich stark ausgeprägt. Durch anschließendes Polieren mit 1 µm Diamantsuspension wird die Oberflächenqualität verbessert und die Topographie der Graphitteilchen wird kleiner. Das Endpolieren mit OPS-Suspension hat zur unerwünschten Gefügeentwicklung auf der Probenoberfläche geführt, welche die Rauigkeit der Oberflä-

The surface topography of the cast iron samples was analyzed with the help of the white-light interferometer [17] after each of the four last preparation steps in order to prove which metallographic preparation procedure provides the optimum surface quality of the polished micro-section. The planar surface, which is satisfactory for examination under the optical microscope, was obtained already after polishing the samples with 3 µm diamond suspension. It is true, however, that the topography is very distinctive. The surface quality is improved and the topography of the graphite particles is reduced after subsequent polishing with a 1 µm diamond suspension. The final polishing of the surface with

che erhöht hat. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass die Präparation bis zum Polieren mit 1 µm Diamantsuspension beste Ergebnisse liefert. Die Oberflächenqualität ist deshalb wichtig, weil die erhöhte Topographie zu Ungenauigkeiten bei der Erkennung der Phasengrenzen zwischen Matrix und Graphitteilchen führt. Besonders bedeutend wird es bei den Gussproben mit Lamellengraphit. Durch die relativ große spezifische Grenzfläche (S_v) der lamellaren Graphitteilchen wird die Präzision der quantitativen Analyse stark beeinflusst.

Bildaufnahme und Analyse

Für die Analyse wurden Aufnahmen in Hellfeldbeleuchtung am Lichtmikroskop Olympus® BX60 gemacht. Es wurde eine Videokamera verwendet, deren Standard-Chip ein Bild in einer Auflösung von ca. 1296 × 1028 Pixeln wiedergibt. Die 200-fache Vergrößerung wurde verwendet, weil sie einerseits eine ausreichend hohe digitale Auflösung (Pixelgröße von ca. 0,66 µm) liefert und damit die genaue Ermittlung der Gefügekenngößen ermöglicht [9]. Andererseits ist es durch Kombination mehrerer Aufnahmen möglich, hinreichend große Flächen zu erfassen, um das Gefüge repräsentativ zu beschreiben und um verfälschende Randeefekte gering zu halten. Typische lichtmikroskopische Aufnahmen sind am Bild 2 zu sehen.

Auf die Probleme der Bildaufbereitung wird genauer in [3] hingewiesen.

Die Ermittlung der gefügecharakteristischen Parameter erfolgte am Bildanalysesystem a4i Analysis der Fa. Aquinto AG. Für die Beschreibung der Gestalt der Graphitteilchen kann in einer 2D-Ebene nur die Form ihrer 2D-Schnitte

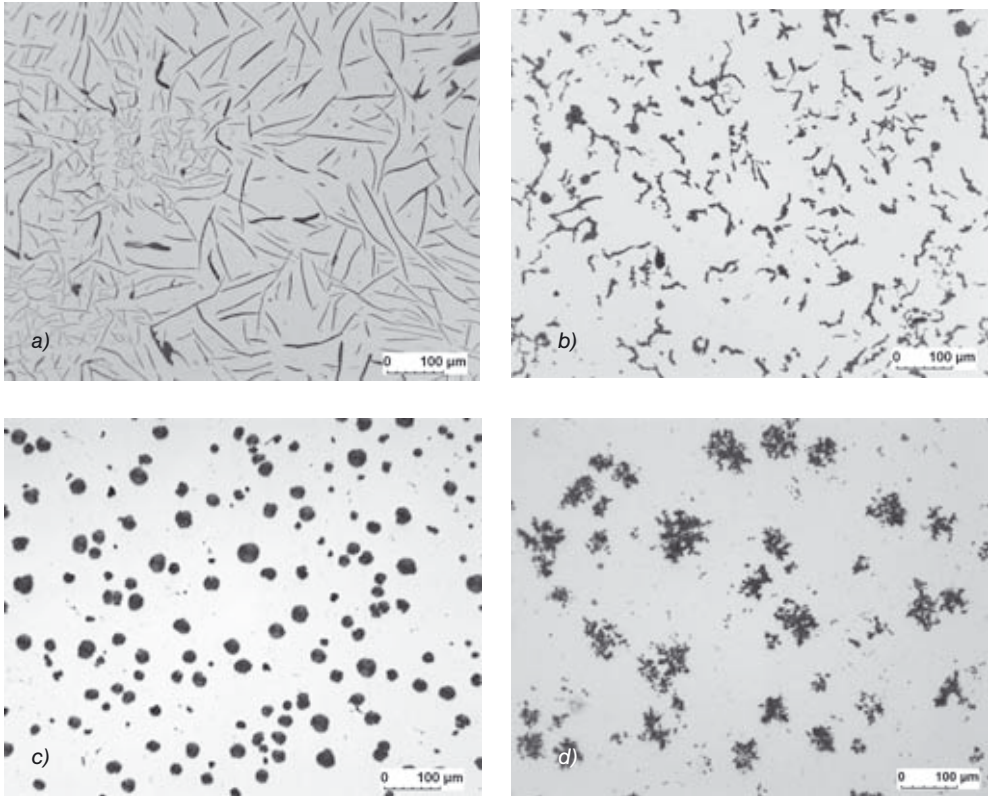
an OPS suspension caused the objectionable microstructure changes on the sample surface which increased the surface roughness. The investigations made have shown that the preparation with polishing down to 1 µm diamond suspension yields best results. Surface quality is very important for the reason that an increased topography leads to inaccuracies in detecting the phase boundaries between the matrix and graphite particles. This is especially important analyzing the cast iron samples with flake graphite. The relatively large specific surface area (S_v) of the flake graphite particles heavily influences the precision of the quantitative analysis.

Imaging and Analysis

Microstructural images were captured with an optical microscope (Olympus® BX60) in the bright field mode. A video camera was used the standard chip of which produced an image at a resolution of about 1296 × 1028 pixels. The magnification of 200 x was chosen, providing sufficiently high digital resolution (pixel size 0.66 µm) which allows exact determination of structural characteristics [9]. In addition, it is possible to measure a sufficiently large surface area when several images are combined together. The chosen imaging procedure made possible representative characterization of the structure while keeping any distorting border effects at the minimum. Typical optical micrographs can be seen in Fig. 2.

The problems of image processing are discussed in detail in [3].

The structural parameters were determined with the help of image analysis system a4i Analysis of the Aquinto AG. For the description of the shape of the graphite particles in a two-dimensional plane only the shape of their two-dimensional



Bilder 2a bis d. Lichtmikroskopische Aufnahmen von Gusseisen mit a) Lamellengraphit (I), b) Vermikulargraphit (III) und c) Kugelgraphit (VI), sowie d) Temperguss (IV-V).

Figs. 2a to d. Optical micrographs of cast iron with a) lamellar graphite (I), b) vermicular graphite (III), and c) nodular graphite (VI), as well as d) malleable cast iron (IV-V).

betrachtet werden. Für die Charakterisierung solcher einzelner irregulärer 2D-Objekte wird in der vorliegenden Arbeit die teilchenbasierte Methode gewählt. Anhand derer kann jedes einzelne Graphitteilchen, oder genau genommen sein 2D-Schnitt, individuell charakterisiert, identifiziert und einer bestimmten Klasse zugeordnet werden. Geometrische Merkmale, Formparameter, Position im Querschnitt und in Bezug zu anderen Teilchen wurden für jedes isolierte Teilchen ermittelt. Das ist besonders vorteilhaft,

microsections can be considered. The particle-based method was chosen in the present article to characterize such single irregular two-dimensional objects. With this method every single graphite particle or, strictly speaking, its two-dimensional microsection, can be individually characterized, identified and assigned to a certain class. Geometrical characteristics, shape parameters, its position in a cross-section and in regard of other particles were determined for each isolated particle. This is specifically benefi-

wenn ein Gefüge mit unterschiedlichen Objekttypen analysiert werden muss.

cial when a microstructure containing different object types have to be analyzed.

3. Ergebnisse und Diskussion

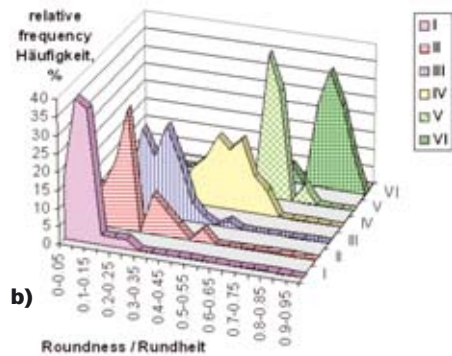
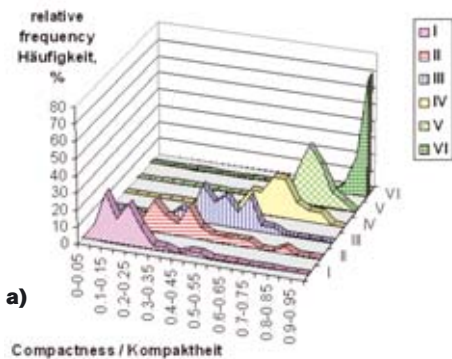
3. Results and discussion

Analyse der DIN Graphittypen und Auswahl der Formparameter

Analysis of DIN Graphite Types and Selection of Shape Parameters

Da bis jetzt die Charakterisierung von Graphitmorphologien oft durch Vergleich mit Standardbildern von DIN EN ISO 945 durchgeführt worden ist, wurden diese Bilder als erstes für die Untersuchungen genommen. Alle Formparameter von Tab. 2 wurden für ideale Graphittypen bestimmt. Es wurde eine starke Überlappung der Werte für die meisten Formparameter für die unterschiedlichen Graphitmorphologien festgestellt. Die besten Ergebnisse für eine weitere Klassifizierung wurden mit den Parametern Rundheit und Kompaktheit ermittelt. Die Verteilungen dieser Parameter für ideale Graphittypen sind in den Bildern 3a und 3b zu sehen. Allerdings können auch diese Formpara-

Since up to now a characterization of graphite morphologies was often carried out by comparing real structures with ideal standard images from EN ISO 945, those images were used first for the examinations. All shape parameters of Tab. 2 were determined for the ideal graphite types. It was found that the values of most shape parameters intensely overlap each other for different graphite morphologies. The best results for a further classification were obtained with the aid of the parameters roundness and compactness. The distributions of those parameters for ideal graphite types can be seen in Figs. 3a and 3b. However, we admit that even those shape parameters cannot be used alone for a graphite



Bilder 3a und b. Verteilung der Formparameter a) Kompaktheit und b) Rundheit für die sechs Graphittypen nach DIN EN ISO 945

Figs. 3a und b. Distribution of shape parameters: a) compactness and b) roundness for the six graphite types according to DIN EN ISO 945.

meter nicht allein für die Graphitunterscheidung benutzt werden. Um die Überlappung zu verkleinern, wurden diese beiden Formparameter gleichzeitig angewendet. Bild 4 zeigt die Mittelwerte und den 95 %igen Vertrauensbereich für Rundheit und Kompaktheit, die an unterschiedlichen idealen Graphitmorphologien von EN ISO 945 gemessen worden sind.

Die Präzision der Klassifizierung hängt natürlich vom gewählten Vertrauensbereich ab. Ein kleiner Vertrauensbereich führt zu niedriger Genauigkeit, ein großer Vertrauensbereich erhöht die Exaktheit, führt aber zu gewisser Überlappung von Identifizierungsbereichen. Bei dem gewählten Vertrauensbereich von 95 % ist immer noch eine gute Unterscheidung zwischen den idealen Graphittypen I, III, IV-V und VI möglich. Graphittyp II kommt in realen Gussteilen als Fehlergraphittyp vor, und wird wegen starker Überlappung seines Identifizierungsbereiches nicht weiter berücksichtigt. Die DIN-Graphittypen IV und V haben sehr ähnliche Werte der Rundheit und Kompaktheit, deshalb ist die nähere Untersuchung ihrer realen Modifikationen notwendig. In dieser Arbeit werden diese beiden Graphittypen zusammen analysiert und werden „IV-V Graphit“ genannt.

To reduce the overlapping those two shape parameters were applied simultaneously. Fig. 4 shows the mean values and the 95% confidence interval for roundness and compactness which were measured for different ideal graphite morphologies of EN ISO 945.

The precision of a classification naturally depends on the chosen confidence interval. A small confidence interval results in low accuracy whereas a large confidence interval increases accuracy, but causes certain overlap of identification domains. In the case of the selected confidence interval of 95%, it is still possible to discriminate well between the ideal graphite types I, III, IV-V, and VI. Graphite type II occurs as a faulty graphite type in real castings and will no longer be taken into account because of the strong overlap of its identification range with neighboring domains. The DIN graphite types IV and V feature very similar values of roundness and compactness and, therefore, it is necessary to thoroughly study their real modifications. In this article those two graphite types were analyzed together and called „IV-V graphite“.

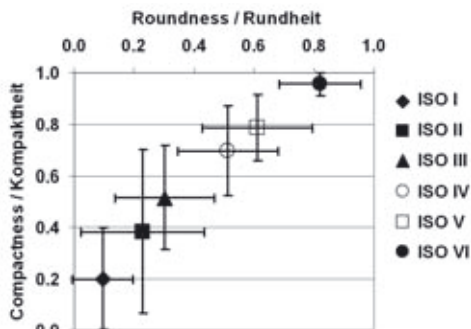


Bild 4. Mittelwerte der Kompaktheit und Rundheit mit 95%igem Vertrauensbereich für sechs Graphittypen nach EN ISO 945.

Fig. 4. Mean values of compactness and roundness with a 95% confidence interval for six graphite types from DIN EN ISO 945.

Formanalyse realer Graphittypen I, III, IV-V und VI

Mit der Formanalyse der realen Lamellar-, Vermikular- und Kugelgraphitteilchen, sowie Graphitmorphologie in Temperguss wurde nachgewiesen, dass die Formparameter Rundheit und Kompaktheit für die Klassifizierung geeignet sind. Die Ergebnisse sind in Bild 5 zusammen-

Shape Analysis of Real Graphite Types I, III, IV-V, and VI

A shape analysis of the real lamellar, vermicular, and nodular graphite particles, and a graphite morphology in malleable castings proved that the shape parameters: roundness and compactness are suited for a classification. The results are summarized and compared to the results

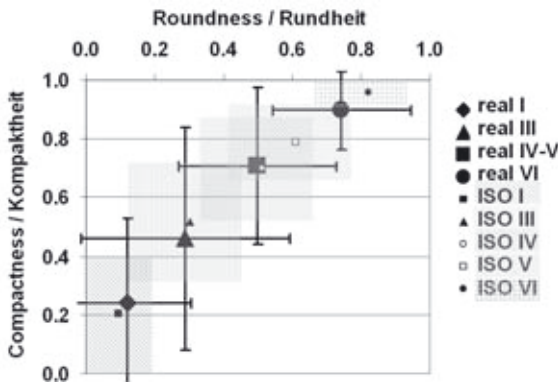


Bild 5. Vergleich der Rundheit und Kompaktheit für ideale und reale Graphittypen.

Fig. 5. Comparison of compactness and roundness for ideal and real graphite types.

gefasst und mit den Ergebnissen der idealen Graphittypen verglichen. Die Mittelwerte der Formparameter für reale Graphitmorphologien stimmen mit entsprechenden Identifizierungsbereichen für ideale Graphittypen überein. Dennoch sind wegen experimenteller Streuung, die Standardabweichungen größer geworden. Dies führt zur Ausweitung des Vertrauensbereichs und letztendlich zu starker Überlappung des Identifizierungsbereiches. Insbesondere das Trennen der Graphittypen I (Lamellar) und III (Vermikular) wird wegen Überlappung problematisch.

of the ideal graphite types in Fig. 5. The mean values of the shape parameters for real graphite morphologies agree with respective identification ranges for ideal graphite types. However, standard deviations have increased because of an experimental scatter. This results in an expansion of the confidence interval and, ultimately, causes identification domains to overlap. More specifically, it becomes a problem to separate the graphite types I (flake) and III (vermicular) due to the overlap.

Abhängigkeit der Formparameter von der Teilchengröße

Dependence of Shape Parameters on Particle Size

Die Analyse der Teilchenform ist für die präzise Klassifizierung allein nicht ausreichend. Die Beobachtungen der Graphitmorphologien bei hohen Vergrößerungen am REM haben angedeutet, dass die Berücksichtigung der Abhängigkeit der Teilchenform von der Teilchengröße die Klassifizierung deutlich verbessern kann. Castro et al. [18] hat auch schon in seiner Arbeit die Abhängigkeit des Mittelwertes einer der Formparameter von minimaler Größe des Teilchens, die in der Analyse berücksichtigt wurde, festgestellt. Die Europäische Norm ISO 945 schreibt die Bestimmung der Graphitteilchengröße vor. Acht Größenklassen (Richtzahlen) sind festgelegt (Tab. 4).

An analysis of particle shapes alone is not sufficient for the precise classification. The observations of graphite morphologies which were made at large magnifications in the SEM have suggested that a classification can be clearly improved by taking into account that particle shapes are dependent on particle sizes. Castro et al. [18] have also noticed in their study that the mean value of one of the shape parameters depends on the minimal particle size considered in the analysis. The European Standard ISO 945 gives guidelines for determining graphite size. Eight size classes (guiding values) were defined (Tab. 4).

Size class / Größenklasse	1	2	3	4	5	6	7	8
Object size / Objektgröße MaxFeret, µm	> 1000	500 – 1000	250 – 500	120 – 250	60 – 120	30 – 60	15 – 30	< 15

Tab. 4. Größenklassen nach EN ISO 945

Tab. 4. Size classes according EN ISO 945

Weiterhin wird der maximale Feret'sche Durchmesser (MaxFeret) als Größenparameter benutzt. Er ist dafür am besten geeignet, weil die tatsächlichen Objektdimensionen beschrieben werden, während der mittlere Durchmesser nur für Kugelgraphitteilchen charakteristisch ist und nicht die Größe von gestreckten Lamellen-graphit-Partikeln wiedergeben kann.

Furthermore, the maximal Feret diameter (MaxFeret) is used as a size parameter. It is suited best for the purpose because it describes the actual object dimensions whereas the mean diameter is characteristic for nodular graphite particles only and is unable to reflect the size of elongated lamellar graphite particles.

Die Formen von Graphitteilchen unterschiedlichen Typs und unterschiedlicher Größe wurden analysiert. Die Ergebnisse sind im Bild 6 zusammengefasst.

An analysis was made for the shape of graphite particles of different types and different sizes. The results are summarized in Fig. 6.

Jeder Datenpunkt in dem Diagramm ist der Mittelwert der Formparameter für den spezi-

Each data point in the graph is the mean value of the shape parameters for the specific graph-

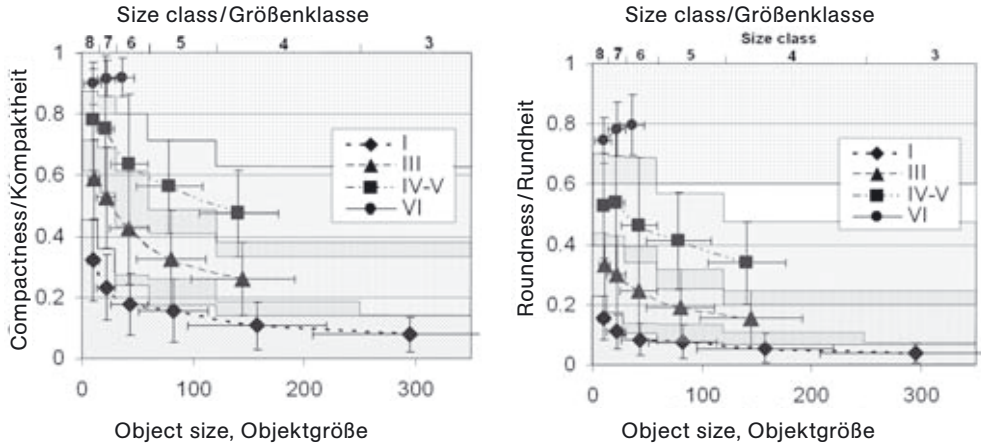


Bild 6. Form-Größe-Abhängigkeit für Graphitteilchen

Fig. 6. Shape-and-size interdependence of graphite particles

fischen Graphittyp einer bestimmten Größe. Der 95%-ige Vertrauensbereich bestimmt die Klassifizierungsgrenzen für entsprechenden Lamellen-, Vermikular- und Kugelgraphit sowie Graphit in Temperguss. Die Form-Größen-Abhängigkeit erfordert die Benutzung unterschiedlicher Klassifizierungsgrenzen für unterschiedliche Größenklassen. Die Vernachlässigung dieser Faktoren führt zur falschen Klassifizierung. Zum Beispiel können kleine Lamellengraphitteilchen der Größenklasse 6, 7 und 8 als Vermikulargraphit klassifiziert werden, und große Vermikularpartikel der Größenklasse 1 bis 3 als Lamellengraphit.

ite type of a certain size. The 95% confidence interval determines the classification limits for the respective flake, vermicular, and nodular graphite, and graphite in malleable castings. The shape-and-size interdependence requires that different classification limits be used for different size classes. Neglecting this fact leads to a faulty classification. For instance, small-sized lamellar graphite particles of the size classes 6, 7, and 8 can be classified as vermicular graphite and large vermicular particles of size classes 1 to 3 as lamellar graphite.

Erarbeitung eines Klassifikators mit Berücksichtigung der Teilchengröße

Anhand dieser Ergebnisse wurde eine neue Klassifizierungsmethode entwickelt, die eine gute Unterscheidung der realen Graphittypen I, III, IV-V und VI ermöglicht. Drei Objektparameter (MaxFeret, Rundheit und Kompaktheit) wurden für die Festlegung der Klassifizierungsgrenzen für vier Graphittypen benutzt. Dadurch wurden

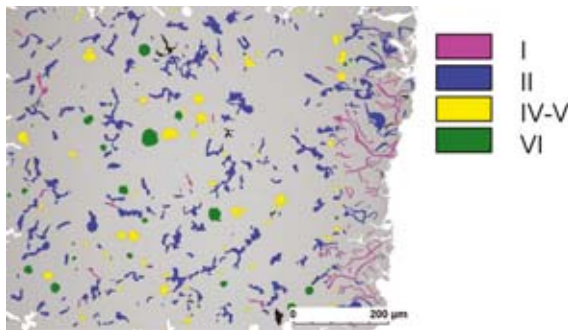
Creation of the Classifier Considering the Particle Size

These results were used to develop a new classification method which allows the good discrimination between the real graphite types I, III, IV-V, and VI. Three object parameters (MaxFeret, roundness, and compactness) were employed to determine the classification limits of four graphite types. This defined the iden-

die Identifizierungsbereiche definiert. Jedes einzelne Objekt wurde analysiert und seine Parameter bestimmt. Wenn die drei genannten Objektparameter

- eindeutig innerhalb eines Identifizierungsbereichs liegen, dann wird das Objekt der entsprechenden Klasse, Lamellen-, Vermikular-, IV-V oder Kugelgraphit, zugeordnet;
- im Überlappungsbereich der zwei Identifizierungsbereiche liegen, dann gehört das Objekt beiden Klassen an;
- außerhalb aller Identifizierungsbereiche liegen, dann gehört das Objekt keiner der vier Graphittypenklassen an.

Die Identifizierung und Klassifizierung der komplexen Graphitteilchen wurde mit Hilfe der neu entwickelten Klassifizierungsmethode durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 7 zu sehen.



tification domains. An analysis was made for each individual object and its parameters were determined. If the three object parameters mentioned above

- are clearly within one identification domain the object will be assigned to the respective class of lamellar, vermicular, IV-V or nodular graphite;
- are within the overlapping range of the two identification domains the object will belong to either of the two classes;
- are outside of all identification domains the object will not belong to any of the four graphite type classes.

The complex graphite particles were identified and classified using the newly developed classification method. The results are depicted in Fig. 7.

Bild 7. Ergebnisse der Klassifizierung einer Gusseisen Struktur mit unterschiedlichen Graphitmorphologien.

Fig. 7. Results of classification for a cast iron structure containing different graphite morphologies.

Da die Objektparameter stark von digitaler Bildauflösung abhängen [9,13] und diese Methode anhand der Ergebnisse nur von Bildern einer Vergrößerung aufgebaut ist, ist die Voraussetzung für die Benutzung dieses Klassifikators eine 200-fache Vergrößerung mit der Pixelgröße von ca. 0,7 µm. Kleinere Vergrößerungen, mit entsprechend größeren Pixelgrößen werden für die Graphitklassifizierung nicht empfohlen, da die Überlappung der Identifizierungsbereiche sehr stark wird und eine nur geringere Präzision der Klassifizierung erreicht werden kann.

Since object parameters are largely contingent upon a digital image resolution [9,13] and this method relies on the results from the images of only one magnification the use of this classifier presupposes the 200x magnification with a pixel size of about 0.7 µm. We do not recommend the use of minor magnifications with correspondingly larger pixel sizes for a graphite classification because the identification domains come to strong overlap and any further precision achievable in classification will only be low.

Durch die Benutzung der Formparameter Rundheit und Kompaktheit, sowie die Berücksichtigung der Objektgröße ergibt sich unter oben genannten Voraussetzungen eine eindeutige Klassifizierung von irregulären komplexen Graphitteilchen. Graphittypen I (Lamellar), III (Vermikular), IV-V und VI (Kugel) können mit Einsetzung der teilchenbasierten, bildanalytischen Methoden klassifiziert werden. Der neu entwickelte Klassifizierungsalgorithmus erlaubt eine weitere Bestimmung der gefügecharakteristischen Parameter (Volumenanteil, Größenverteilung, Position, usw.) individuell für jeden Graphittyp.

4. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden teilchenbasierte bildanalytische Methoden für die Klassifizierung unterschiedlicher Graphitmorphologien angewendet. Der erhebliche Vorteil dieser Methode ist, dass alle Formparameter mit Hilfe eines handelsüblichen Bildanalyseystems einfach bestimmt werden können. Es wurde festgestellt, dass die Formparameter Rundheit und Kompaktheit am besten für die Klassifizierung der Graphitmorphologien I, III, IV-V und VI geeignet sind. Die Entwicklung einer neuen Methode mit Berücksichtigung der Teilchengröße als ein zusätzliches Merkmal führte zur wesentlichen Verbesserung in der Klassifizierung komplexer Graphitteilchen.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Form der irregulären Graphitteilchen sich gleichzeitig mit der Teilchengröße ändert. Die Komplexität der Form ist für kleinere 2D-Schnitte eines Objekts statistisch eingeschränkt. Schmale Schnitte sind eher konvex und haben einen eher regulären Umriss. Wegen niedriger Bildauflösung ist die Messung der Teilchenform, die nur wenige Pixel groß sind, sehr ungenau. Die Form

When the above preconditions are met the use of shape parameters roundness and compactness as well as considering the object size results in a clear-cut classification of irregular complex graphite particles. Graphite types I (lamellar), III (vermicular), IV-V and VI (nodular) can be classified employing the particle-based method. The newly developed classification algorithm further allows to determine the structural characteristics (volume fraction, size distribution, position, etc.) for each graphite type individually.

4. Summary

In this study, particle-based methods of microstructural image analysis were used to classify different graphite morphologies. The significant benefit of this method is that all shape parameters can be easily determined employing commercially available image analysis system. It was found that the shape parameters roundness and compactness are suited best for a classification of the graphite morphologies I, III, IV-V, and VI. A novel method developed using particle size as an additional criterion leads to a significant improvement in classifying of complex graphite particles.

As the results of the examination reveal, the shape of irregular graphite particles changes simultaneously with particle size. The complexity of the shape is statistically restricted for the small planar sections of an object. Small planar sections are more likely to be convex and to have a regular contour. Due to the limited image resolution a measurement of shape of the particles, which are only a few pixels in size, becomes very

der kleinen Objekte neigt immer in Richtung der Form eines Kreises oder Rechtecks.

inaccurate. At small object size there is always a bias towards a circular or rectangular shape.

Die neu entwickelte Klassifizierungsmethode, mit Anwendung von Form- und Größenparameter, verbessert zurzeit verfügbare bildanalytische Verfahren und bietet eine reproduzierbare und eindeutige Identifizierung unterschiedlicher Graphitmorphologien.

The newly developed classification method which employs shape and size parameters improves currently available image analysis procedures and provides a reproducible and distinct identification of different graphite morphologies.

Danksagung

Die Arbeit wurde durch das BMBF-Projekt Nr. 03N3119 finanziert.

Acknowledgement

The research was funded by the BMBF project Nr. 03N3119.

Literatur/References

- [1] Lampic M.: GJV. Giesserei-Praxis. (2001) 1, 17-22
- [2] Ferrocast®. Qualität aus einem Guss. Werkstoff-Normblatt Nr. 1600/4. AGQ Normblatt 11/03, (2003)
- [3] Ohser J.; Sandau K.; Stets W.; Gerber W.: Practical Metallography, 40 (2003) 9, 454-473
- [4] Roberts K., Mücklich F., Weikum G.: Sonderbände der Praktischen Metallographie, 35 (2003), 117-122
- [5] Roberts K., Weikum G., Muecklich F.: Practical Metallography, 42 (2005) 8, 395-410
- [6] Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.: Textural features for image classification, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1973, 610-621
- [7] Ohser J., Muecklich F.: Statistical Analysis of Microstructures in Materials Science. Chichester. John Wiley & Sons. 2000
- [8] Russ J.C., Dehoff R.T.: Practical Stereology, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2000
- [9] Ruxanda R., Stefanescu D.M.: Int. J. Cast Metals Res. 14 (2002), 207-216
- [10] Li J., Lu L., Lai M.: Materials Characterization, 45 (2000), 83-88
- [11] Imasogie B.I., Wendt U.: J. of Minerals & Materials Characterization & Engineering 3 (2004) 1, 1-12
- [12] Wojnar L.: Image Analysis Applications in materials engineering, CRC Press, New York, 1999, 193-201
- [13] Lu Shu-Zu, Hellawell A.: Acta metal. Mater., 42 (1994) 12, 4035-4047
- [14] Guilemany J.M., Llorca-Isern N.: Practical Metallography, 27 (1990), 189-194
- [15] Benutzerhandbuch a4i-Analysis
- [16] Russ J.C.: The Image Processing Handbook 2nd Ed., CRC Press Inc., 1995, S. 490
- [17] Daniel C., Muecklich F.: Practical Metallography, 41 (2004) 6, 277-285
- [18] Castro M., Herrera-Trejo M., Alvarado-Reyna J.L., Martinez-Tello C.L., Mendez-Nonell M.: Int. J. Cast Metals Res. 16 (2003), 83-86