

# Charakterisierung von Inhomogenitäten in metallischen Gusswerkstoffen mittels 3D-Röntgen-Computertomographie

Bernhard HARRER, Johann KASTNER, FH OÖ F&E, Campus Wels, Österreich  
Bernhard HARRER, Andreas KOTTAR, H.P. DEGISCHER, Institut für  
Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik, TU Wien, Österreich

**Kurzfassung.** Inhomogenitäten in Aluminiumlegierungen und Eisenwerkstoffen werden mittels 3D-Röntgen-Mikrofokus-Computertomographie ( $\mu$ XCT) untersucht. Zur Verifizierung der Ergebnisse werden lichtmikroskopische Schliffbilder und Elementanalysen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM/EDX) herangezogen. In der Aluminiumlegierung EN AW-2024 werden mit  $\mu$ XCT Korngrenzenausscheidungen aufgrund von Seigerungen nachgewiesen und aufgrund der dreidimensionalen Verteilung können nun Rückschlüsse auf die Erstarrungsgeschwindigkeit, -richtung und das Seigerungsverhalten getroffen werden. Oxidische Einschlüsse in Kombination mit Mikroporositäten in der Aluminiumlegierung EN AW-7075 werden gezeigt. Nichtmetallische Einschlüsse bzw. Lunker in Stahl-Stranggussbrammen und deren Differenzierung anhand von Grauwerten in den CT-Daten werden diskutiert. Graphitpartikel in Gusseisen werden mit Multiskalen-Algorithmen robust segmentiert und dreidimensional dargestellt, um so auf Erstarrungsbedingungen oder auf potentielle Risspfade bei mechanischen Belastungen schließen zu können.

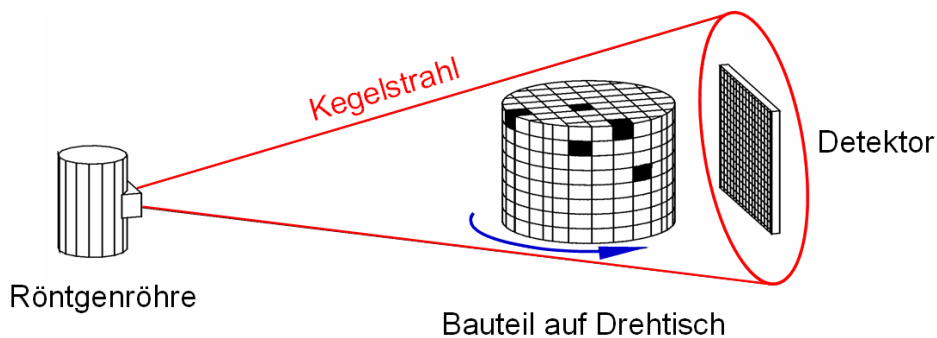
## 1. Einführung

Mit steigenden Produkthanforderungen und verbesserten Gebrauchseigenschaften von metallischen Erzeugnissen kommt gerade den zerstörungsfreien Prüfmethoden immer größere Bedeutung zu. Die 3D-Röntgen-Mikrofokus-Computertomographie ( $\mu$ XCT) mittels Absorptionskontrast ist eine noch sehr junge Technologie, die in den letzten Jahren in der Werkstoffprüfung für stichprobenartige Offline-Prozesskontrolle, aber vor allem auch in der Prozessentwicklung (-verbesserung) verstärkt Einsatz findet. Die Detektion von Materialtrennungen wie Lunker, Gasporen oder Rissen in Metallen zählen mittlerweile zu Standardanwendungen. Inhomogenitäten dieser Art – eine ausreichend große räumliche Ausdehnung vorausgesetzt – sind aufgrund des hohen Absorptionskontrasts in vielen Fällen einfach zu charakterisieren. Schwieriger hingegen gestaltet sich die Detektion von Inhomogenitäten mit geringem Dichteunterschied zur Matrix. Der Unterschied im Grauwertkontrast wird dabei maßgeblich verringert und das Ziel der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung der Detektierbarkeit einiger dieser Inhomogenitäten (Seigerungen, oxidische und sulfidische Einschlüsse, Graphitpartikel) mittels  $\mu$ XCT. Dazu werden die beobachteten CT-Anzeigen mittels metallographischer Zielpräparationen eindeutig identifiziert und quantitativ ausgewertet. Die Möglichkeiten aber auch die Grenzen der 3D- $\mu$ XCT sollen anhand ausgewählter Beispiele dargestellt werden.



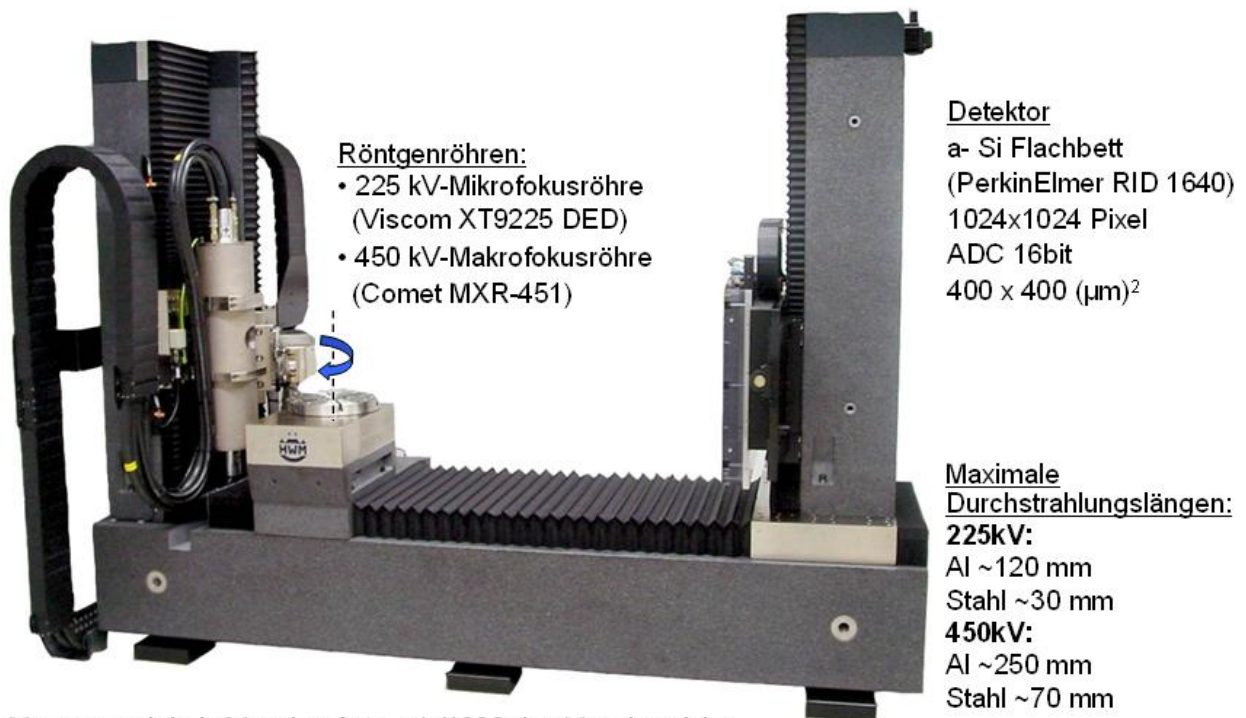
## 2. Experimentelles

In Abbildung 1 ist das Prinzip der industriellen  $\mu$ XCT dargestellt. Der Brennfleck der Röntgenröhre emittiert eine bestimmte Intensität an Röntgenstrahlung in Form eines Kegelstrahls. Dieser Röntgenstrahl durchdringt das Bauteil und wird nach dem Lambert-Beerschen Gesetz je nach Schwächungskoeffizient, der sich aus Massenschwächungskoeffizient und Dichte des Materials zusammensetzt, absorbiert und trifft auf den Detektor, wo ein 2D-Projektionsbild aufgenommen wird. Das Bauteil wird schrittweise rotiert und erneut ein Projektionsbild aufgenommen. Nach einer vollen Umdrehung wird aus den 2D-Projektionsbildern mit leistungsstarken Rechnern ein dreidimensionaler Datensatz von Volumenelementen (Voxel) rekonstruiert [1].



**Abbildung 1:** Prinzip der industriellen 3D-Röntgen-Mikrofokus-Computertomographie ( $\mu$ XCT) mit Flächendetektor nach [2].

Alle für diese Publikation ausgewerteten Proben wurden mit der  $\mu$ XCT-Anlage Rayscan 250XE der Firma Wälischmiller an der FH Wels tomographiert (Abbildung 2).



**Messgenauigkeit (Voxelgröße):**  $\sim 1/1000$  des Messbereichs

**Auflösung:** variabel bis  $\sim 5\mu\text{m/Voxel}$

**Abbildung 2:** Photographie der  $\mu$ XCT-Anlage HWM Rayscan 250XE mit Angabe einiger technischen Eckdaten, Messgenauigkeiten und maximale Durchstrahlungslängen für Aluminium und Stahl.

Diese Anlage verfügt neben einer 450 kV-Makrofokusröhre für hohe Durchstrahlungslängen über eine 225 kV-Mikrofokusröhre der Firma Viscom. Der Brennfleck der Mikrofokusröhre ist in der Größe variabel bis zu einem minimalen Spotdurchmesser von 5  $\mu\text{m}$ . Um eine hohe Messgenauigkeit und Temperaturstabilität zu gewährleisten, sind die mechanischen Achsen auf Granit aufgebaut und mit einer Präzision von 1-2  $\mu\text{m}$  ausgeführt. Die Anlage ist in einem vollklimatisierten Strahlenanwendungsraum untergebracht und steht auf einem entkoppelten Fundament, welches Gebäudeschwingungen fernhält [3]. In Tabelle 1 sind die Proben A bis E mit den verwendeten Messparametern und Auflösungen angeführt. An allen Messdaten wurde eine Strahlaufhärtungskorrektur durchgeführt.

	Röhrenspannung	Röhrenstrom	Integrationszeit	Projektionsanzahl	Filterung	Örtl. Auflösung (Voxelgröße)
<i>Korngrenzenausscheidungen in Aluminiumlegierung EN AW-2024</i>						
Probe A	117 kV	115 $\mu\text{A}$	4 s	900	0,3 mm Cu	(12,7 $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup>
Probe B	107 kV	69 $\mu\text{A}$	4 s	900	Ohne Filter	(6,7 $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup>
<i>Oxidische Einschlüsse in Aluminiumlegierungen EN AW-7075</i>						
Probe C	210 kV	120 $\mu\text{A}$	2 s	1260	0,5 mm Cu + 0,1mm Pb	(29,0 $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup>
<i>Nichtmetallische Einschlüsse und Lunker in Baustahl-Stranggussbrammen</i>						
Probe D	169 kV	35 $\mu\text{A}$	4 s	900	Ohne Filter	(6,1 $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup>
<i>Graphitpartikel in Gusseisen GJS 700</i>						
Probe E	180 kV	53 $\mu\text{A}$	4 s	900	0,3 mm Cu	(9,5 $\mu\text{m}$ ) <sup>3</sup>

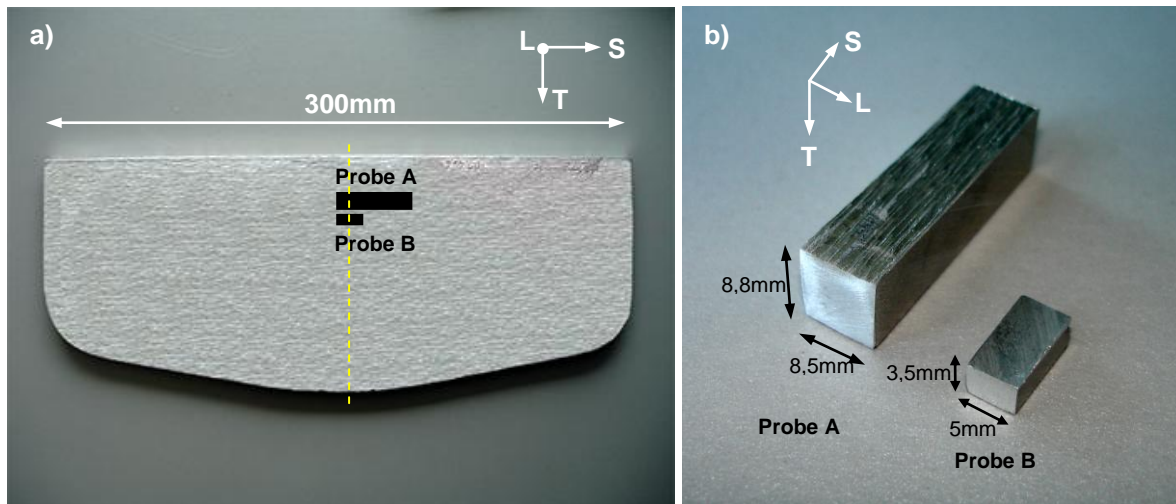
**Tabelle 1:** Parameter der Tomographien der unterschiedlichen Inhomogenitäten der Proben A bis E.

### 3. Materialbeschreibung und Probenvorbereitung

#### 3.1. Korngrenzenausscheidungen aufgrund von Seigerungen in Aluminiumlegierungen

Unter Seigerung versteht man Entmischungserscheinungen, die beim Erstarren von Legierungsschmelzen auftreten und die zu Inhomogenitäten des Gefüges führen [4]. Seigerungen im Gusszustand hängen vor allem von der Abkühlgeschwindigkeit ab. Die Restschmelze zwischen den primär erstarrten Dendriten erstarrt meist eutektisch und enthält spröde, intermetallische Phasen, die die Umformbarkeit beeinträchtigen. Erfolgt bei der Homogenisierung keine Auflösung dieser Primärausscheidungen, so werden sie bei einer nachfolgenden Warmumformung mechanisch zertrümmert und zeilenförmig im Gefüge verteilt [5]. Derartige Einlagerungen wirken zähigkeitsmindernd. Als Beispiel für diese eutektischen Entmischungen wird die Untersuchung an einem Gussgefüge eines langsam abgekühlten, homogenisierten Barren aus der Aluminiumlegierung EN AW-2024 (AlCu4Mg1) mit 4 % Cu und 1 % Mg angeführt. Diese Zusammensetzung entspricht der maximalen Löslichkeit bei der Solidustemperatur.

Für die Tomographie wurden zwei Proben A und B, wie in Abbildung 3 ersichtlich, aus dem Mittenbereich des Gussbarrens herausgeschnitten, weil dort wegen der relativ langsamen Abkühlung die meisten Inhomogenitäten und das größte Korn zu erwarten sind.



**Abbildung 3:** Gussbarrenabschnitt EN AW-2024 (homogenisiert): a) Probenlage innerhalb des Barrens, b) Abmessungen der Proben A und B.

### 3.2. Oxidische Einschlüsse in Aluminiumlegierungen

Oxidische Einschlüsse (von „Oxidhäutchen“ der Schmelzoberfläche) können beim Gießen in das Innere des flüssigen Metalls gelangen. Diese Einschlüsse sind thermisch stabil und können durch Wärmebehandlungen nicht aufgelöst werden, sodass sie die Eigenschaften der Legierung bei der Weiterverarbeitung beeinträchtigen. Untersucht wurde die homogenisierte Aluminiumlegierung EN AW-7075 (AlZn5,5MgCu) mit 5,5 % Zn und Anteilen von Mg und Cu. Derartige Legierungen erreichen durch Aushärtungsbehandlungen höchste Festigkeiten und werden aufgrund ihrer geringen Abschreckempfindlichkeit häufig als Werkstoffe für Schweißkonstruktionen eingesetzt [5]. Aus einem Gussbarren mit 720 mm Gusslänge wurde in einer Tiefe von 102 mm und einem Abstand zur Aussenkante von 85 mm eine Probe C mit einer Dimension von  $51 \times 17 \times 19 \text{ mm}^3$  herausgeschnitten. Eine vorangestellte Ultraschalluntersuchung unterstützte die Vorselektion der Probenlage im Barren, denn genau in der Mitte der Probe C zeigte die Ultraschallmessung eine deutliche Reflexion.

### 3.3. Nichtmetallische Einschlüsse in Baustahl-Stranggussbrammen

Trotz ständiger Verbesserung in Metallurgie und Gießtechnik stellt der Gehalt an nichtmetallischen Einschlüssen in Form von Sulfiden und Oxiden, der sogenannte Reinheitsgrad, bei Stahlanwendungen nach wie vor ein wesentliches Qualitätskriterium dar. Werkstoffkennwerte werden entscheidend vom Reinheitsgrad beeinflusst, da diese Einschlüsse strukturelle Inhomogenitäten darstellen, die Schädigungen einleiten können. Deshalb ist die Kenntnis der Größenverteilung dieser Einschlüsse, die volumenbezogene Anzahl, die räumliche Anordnung, die Morphologie und die Zusammensetzung von Bedeutung für die Produktqualität. In der metallkundlichen Analytik angewandte Prüfmethode sind umfangreich und reichen von genormten, optischen Standard-Verfahren nach DIN 50602 [6] bzw. ASTM E45-97 [7] und Rasterelektronenmikroskopie mit Energie-/Wellenlängen-dispersiver Röntgenmikroanalyse (REM/EDX/WDX) [8][9], Ultraschall [10][11][12], Hochfrequenz-Ultraschall mit 50 MHz [13][14] zu Spezialgeräten der Spektrometrie [15]. Da die Dichte der Einschlüsse nur etwa die Hälfte von Stahl beträgt, ergibt sich für Röntgentransmission ein entsprechender Absorptionsunterschied und somit sollte ab einer Mindestgröße der Kontrast im CT-Grauwert ausreichen, um Einschlüsse zu detektieren.

Ein Probenstück wurde ca. 80 mm von der Brammenoberseite entnommen und eine Fläche von  $100 \text{ mm}^2$  mit einem automatisierten REM/EDX-System abgerastert und auf chemische Zusammensetzungen hin analysiert. Diese Voruntersuchung ergab einen hohen Anteil an nichtmetallischen Einschlüssen  $>10 \mu\text{m}$ . Als Einschlussart liegen z.B. Aluminate, Calciumaluminate, Calciumsulfide oder Oxisulfide vor. Dieses Probenstück wurde zur Probe D mit einer Dimension von  $3,9 \times 3,9 \times 28 \text{ mm}^3$  zerkleinert und mittels XCT gemessen.

#### 3.4. Graphitpartikel in Gusseisen

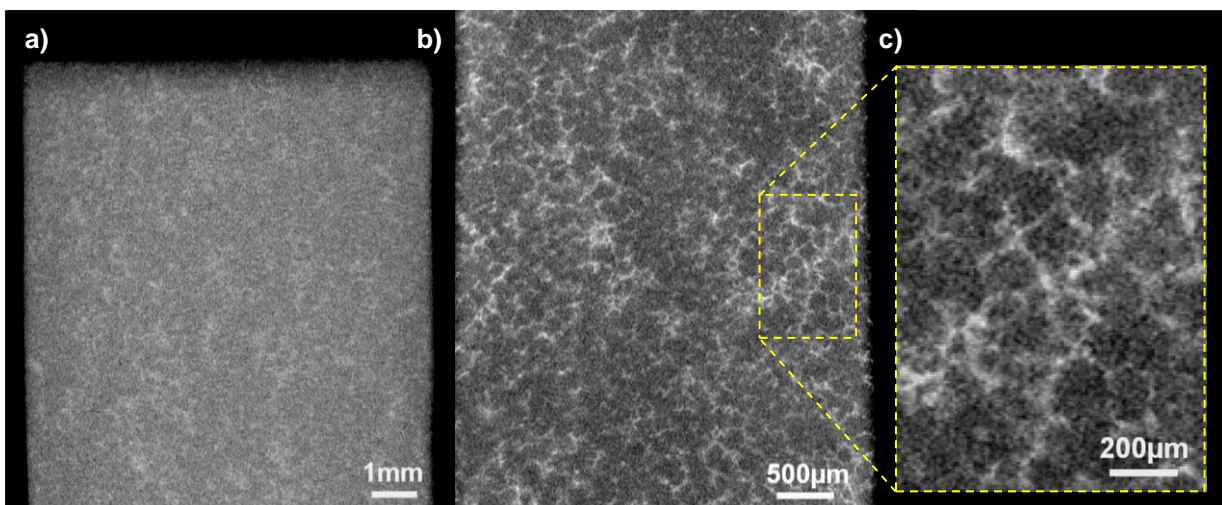
Neben den Erstarrungslunkern und Poren beeinflussen die Größe, Form und räumlich Verteilung der Graphitpartikel im Sphäroguss die bruchmechanischen Kennwerte und die Ermüdungsbeständigkeit. Aus zweidimensionalen metallographischen Schlibfbildern kann nur bedingt auf entscheidende Charakteristiken wie mittlere Teilchenabstände und Teilchendurchmesser geschlossen werden.

Untersucht wurden Kokillenabgüsse von Gusseisen mit Kugelgraphit (GJS 700, Probe E). Diese zeichnen sich durch hohe Festigkeit auch bei erhöhten Temperaturen, durch relativ gute Zähigkeit, attraktives Dämpfungsvermögen und kostengünstige Produktgestaltung aus [16]. Eine dreidimensionale Verteilung der Graphitteilchen kann aufgrund des ausreichenden Absorptionskontrastunterschieds zwischen Graphit und Grundgefüge mittels  $\mu\text{XCT}$ -Methoden und geeigneter Segmentierung im CT-Datensatz dargestellt werden [17].

### 4. Resultate und Diskussion

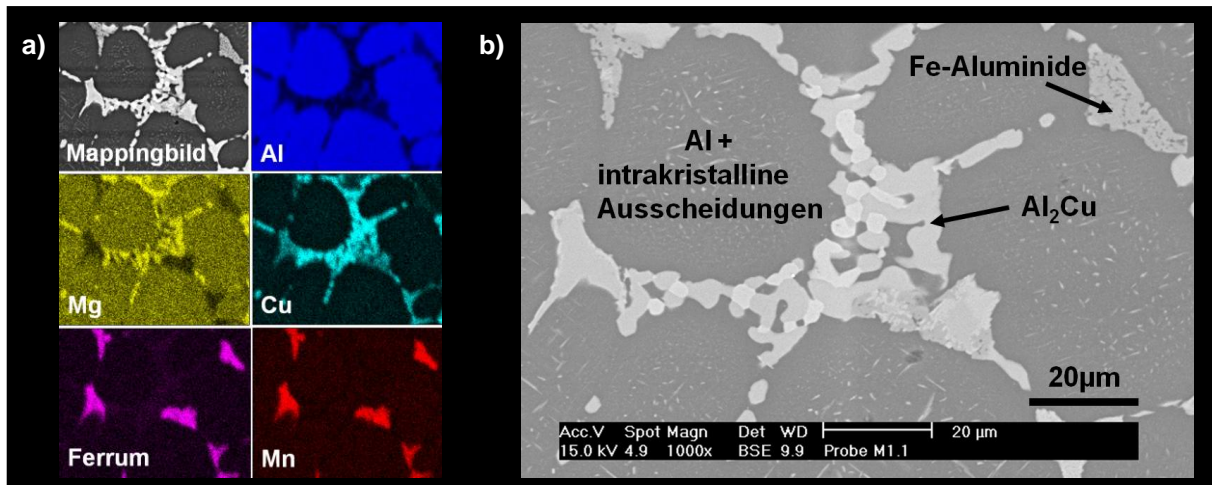
#### 4.1. Korngrenzenausscheidungen aufgrund von Seigerungen in Aluminiumlegierungen

Bei der Messung von Probe A und Probe B konnten eindeutig Bereiche erhöhter Absorption innerhalb des gesamten, erfassten Bereichs identifiziert werden. Erhöhte Absorption bedeutet erhöhte Dichtewerte im Vergleich zur Metallmatrix, wobei in Abbildung 4 eindeutig Zellstrukturen von der dendritischen Erstarrung erkennbar sind und weiters eine unregelmäßige Ausbildung der Bereiche erhöhter Dichte über das Probenvolumen. Die Dendritenabmessungen betragen zwischen  $50 \mu\text{m}$  und  $300 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 4:**  $\mu\text{XCT}$ -Schnittbilder der Zellstrukturen in der Ebene ST der Aluminiumlegierung EN AW-2024: a) Probe A gemessen mit einer Auflösung von  $(12,7 \mu\text{m})^3/\text{Voxel}$ , b) Probe B mit  $(6,7 \mu\text{m})^3/\text{Voxel}$ , c) vergrößerte Darstellung eines Bereichs aus (b).

Zur Identifikation dieser Strukturen wurde eine metallographische Untersuchung einer Probe im Mittenbereich des Barrens durchgeführt (Abbildung 5).

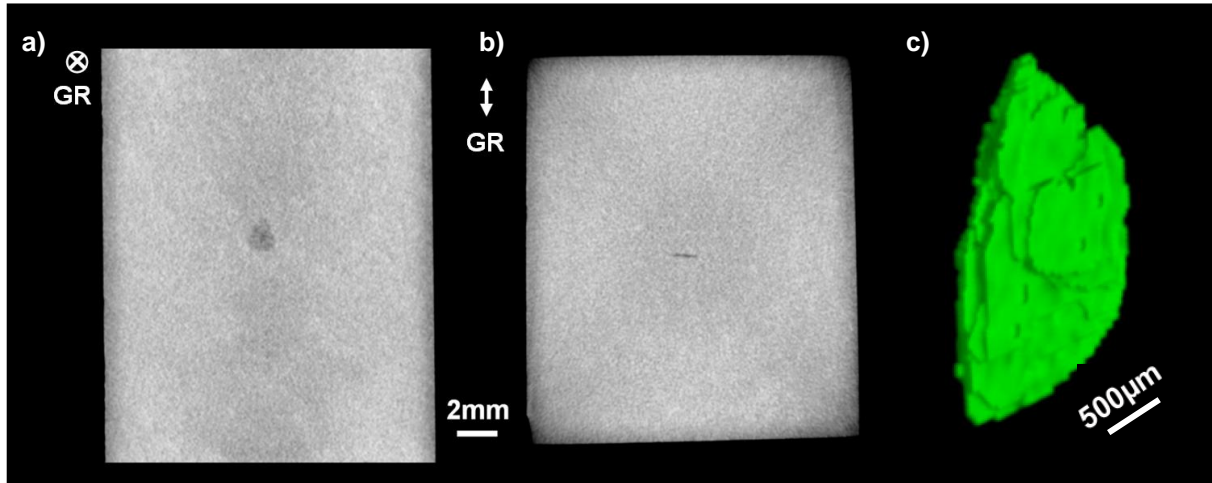


**Abbildung 5:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Probe in der Ebene LS: a) Elementverteilung mittels energiedispersiver Röntgenmikroanalyse, b) Rückstreuelektronen-Bild und die Interpretation der Elementanalyse.

Die metallographische Auswertung bestätigte, dass es sich bei den Bereichen erhöhter Absorption um  $\text{Al}_2\text{Cu}$  dekorierte interdendritische Bereiche handelt, in denen auch einige Fe-Aluminide auftreten. Die  $\text{Al}_2\text{Cu}$  Teilchen können bei ausreichender Wärmebehandlung wieder aufgelöst werden, aber die Fe-Aluminide nicht mehr. Die Verteilung dieser spröden Phasen ist für die weitere Umformung von Bedeutung. Die mittels  $\mu\text{XCT}$  detektierten Zellstrukturen bilden die dendritische Erstarrungsstruktur ab, und aufgrund der dreidimensionalen Verteilung können Rückschlüsse auf die Erstarrungsgeschwindigkeit, -richtung und auf das Seigerungsverhalten getroffen werden.

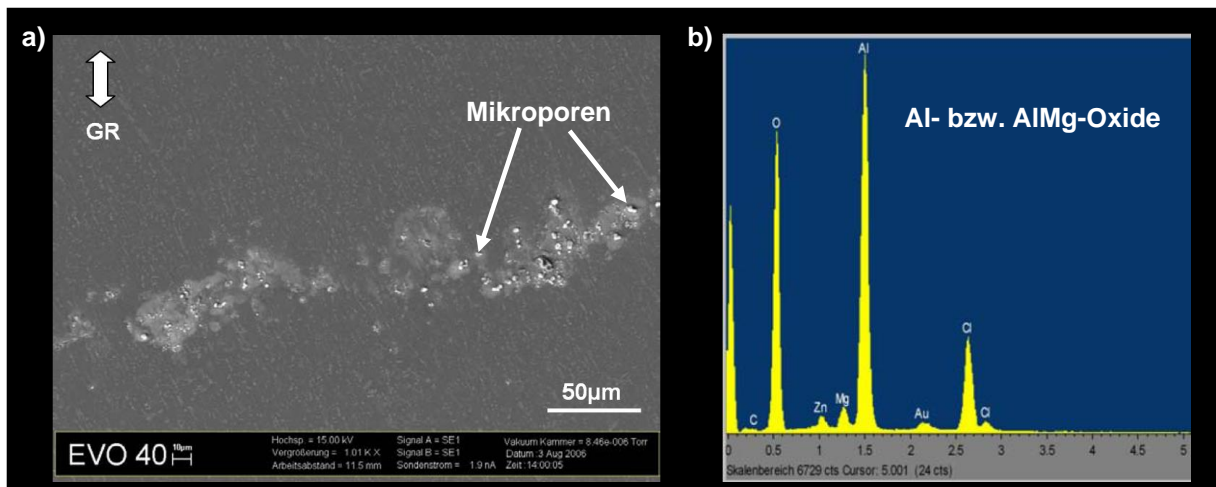
#### 4.2. Oxidische Einschlüsse in Aluminiumlegierungen

Wie in Abbildung 6 erkennbar, konnte in der Probe C bei der  $\mu\text{XCT}$ -Messung nahezu mittig eine Diskontinuität detektiert werden. Mit der Auswertesoftware für 3D-Volumendaten VG Studio MAX 1.2.1 wurde nach einer zweimaligen Gaußfilterung mit einem Kern von  $5 \times 5 \times 5$  Voxeln die Diskontinuität manuell segmentiert, wobei diese die Form eines sehr flachen Plättchens mit einer maximalen Ausdehnung von  $1,7 \text{ mm} \times 1,5 \text{ mm}$  und einer Dicke von maximal  $300 \mu\text{m}$  erreicht. Die Lage des Plättchens innerhalb der Probe stimmt exakt mit der Position der Ultraschallanzeige überein.



**Abbildung 6:**  $\mu$ XCT-Schnittbilder mit eingetragener Gießrichtung (GR) und 3D-Darstellung der Diskontinuität in der Aluminiumlegierung EN AW-7075: a) Schnittbild durch die Diskontinuität, b) zu (a) orthogonales Schnittbild, c) 3D-Darstellung der segmentierten Diskontinuität.

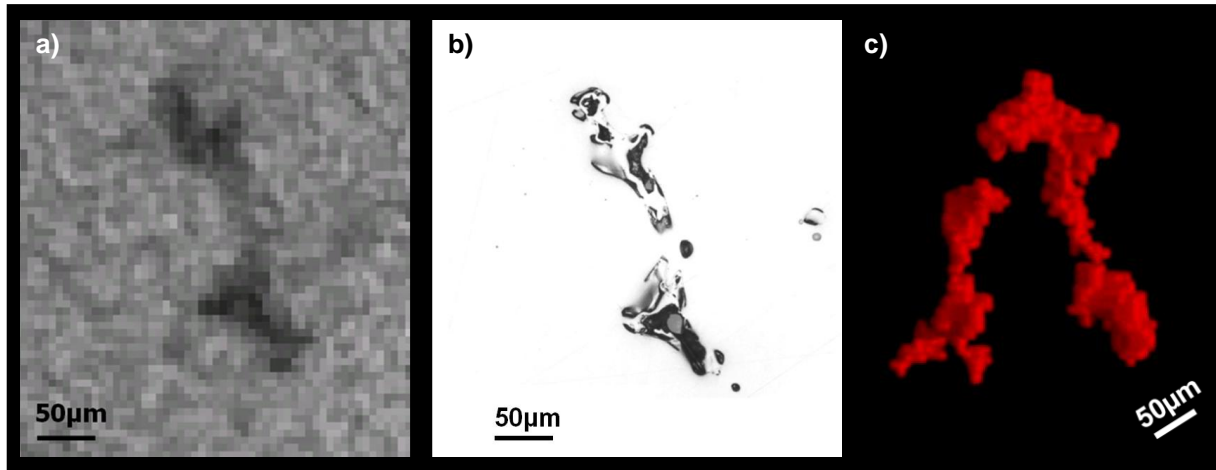
Die metallographische Zielpräparation zeigte eine gute Übereinstimmung in der Größe mit dem aus dem CT-Datensatz segmentierten Plättchen. Eine Analyse mit dem REM/EDX belegte, dass es sich dabei um einen oxidischen Einschluss handelt. Als Einschlussart liegen Al- bzw. AlMg-Oxide vor (Abbildung 7), die jedoch gemeinsam mit Poren auftreten. Die deutlich verringerte Absorption in der  $\mu$ XCT-Messung kann also durch den oxidischen Einschluss in Kombination mit Mikroporositäten erklärt werden.



**Abbildung 7:** Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme mit energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (REM/EDX) der Diskontinuität mit eingetragener Gießrichtung (GR): a) die hellen Bereiche im Rückstreuerelektronen-Bild entsprechen den Oxiden, einige Mikroporen sind markiert, b) Punktspektrum der EDX-Analyse eines Partikels und dessen Interpretation.

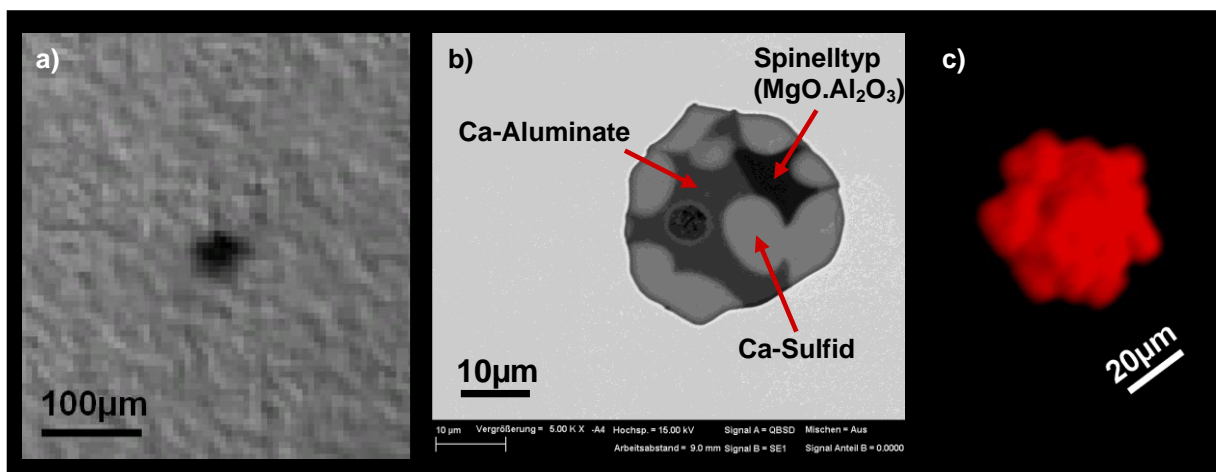
#### 4.3. Nichtmetallische Einschlüsse und Lunker in Baustahl-Stranggussbrammen

Probe D wurde in 6 Einzelmessungen mit einer Auflösung von jeweils  $(6,1 \mu\text{m})^3/\text{Voxel}$  tomographiert. Es konnte eine Vielzahl an Inhomogenitäten in der Stahlmatrix festgestellt werden. Die Lage einiger dieser Inhomogenitäten wurde im CT-Datensatz exakt vermessen und auf metallographischem Wege identifiziert. Ein Beispiel für einen verhältnismäßig großen (ca.  $250 \mu\text{m}$ ) Erstarrungslunker ist in Abbildung 8 dargestellt. Man erkennt in der 3D-Darstellung, dass die Hohlräume zusammenhängen und so die dendritische Erstarrung abbilden.



**Abbildung 8:** Erstarungslunker: a)  $\mu$ XCT-Schnittbild, b) zu (a) korrespondierende lichtmikroskopische Aufnahme, c) 3D-Darstellung des segmentierten Lunkers.

In Abbildung 9 ist eine globulitische Inhomogenität, die als mehrphasiger Einschluss identifiziert wurde, dargestellt. Im CT-Datensatz erkennt man die globulare Form mit einem Durchmesser von ca. 50  $\mu$ m.



**Abbildung 9:** Mehrphasiger Einschluss: a)  $\mu$ XCT-Schnittbild, b) REM Aufnahme und Interpretation der Phasen, c) 3D-Darstellung des segmentierten Einschlusses.

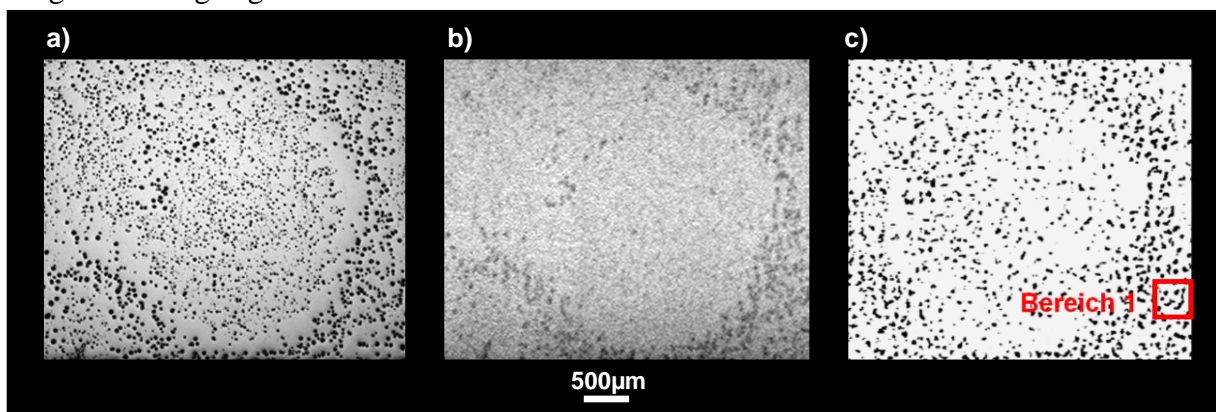
Durch weitere Vergleiche zwischen CT-Datensatz und der metallographischen Auswertung kann für Stahl folgendes zusammengefasst werden: Bei dieser  $\mu$ XCT-Messung sind Lunker bzw. Poren  $>30 \mu\text{m}$  noch gut visuell erkennbar. Einschlüsse mit  $30 \mu\text{m}$  Durchmesser sind zumindest im Mittenbereich der Probe vom Rauschen nicht mehr zu unterscheiden. Erst ab einem Durchmesser von  $50 \mu\text{m}$  sind Einschlüsse wieder klar zu erkennen. Ein weiteres Ziel dieser Untersuchungen ist die Klärung der Fragestellung, ob Lunker (Poren) und Einschlüsse anhand von Grauwerten im CT-Datensatz differenzierbar sind. Das Problem dabei ist, dass der Grauwert der Inhomogenität stark von der Lage in der Probe abhängig ist. Stahl absorbiert Röntgenstrahlung sehr stark und dadurch treten zahlreiche Messartefakte auf, die die Grauwerte der Inhomogenitäten verfälschen. Aufgrund der Größe der Einschlüsse und die beschränkte Auflösung der  $\mu$ XCT-Anlage bestehen die Inhomogenitäten nur aus wenigen auswertbaren Voxeln, sodass geringe Artefakte das Ergebnis schon maßgeblich beeinflussen. Nicht zuletzt stellt die fehlende Referenzmethode -sieht man von einer aufwendigen Metallographie ab- ein Problem dar.



#### 4.4. Graphitpartikel in Gusseisen

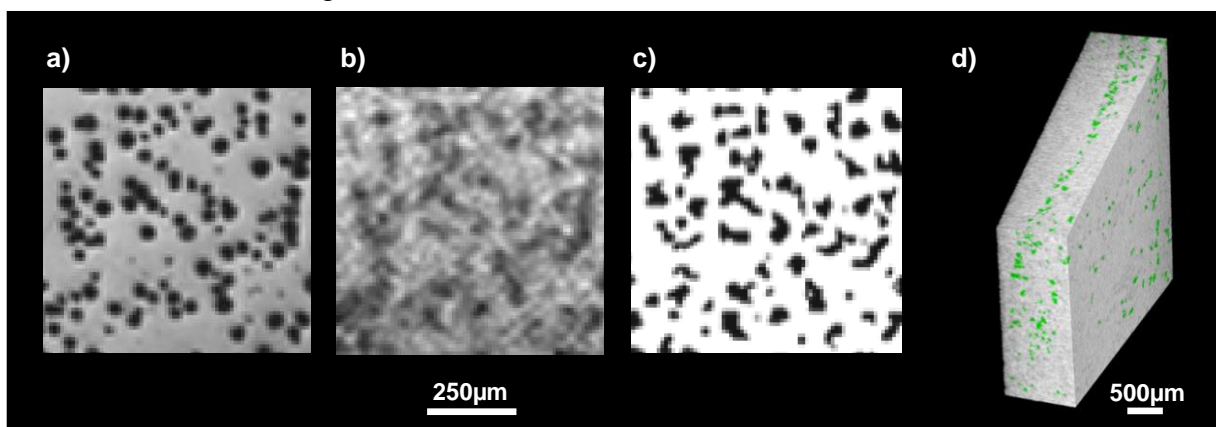
Bei der Messung der  $4,7 \times 7,2 \times 8,5 \text{ mm}^3$  großen Probe E können Graphitpartikel  $>30 \mu\text{m}$  visuell gut erkannt werden. Weiters findet man mehrere bogenförmige Anhäufungen von größeren Partikeln, die sich im 3D-Datensatz als Kugelkalotten identifizieren lassen. In Abbildung 10b) ist ein Schnittbild durch eine derartige Kugelkalotte dargestellt. Man erkennt starke Artefakte und einen hohen Rauschpegel in den CT-Daten, sodass Standardmethoden zur Segmentierung des Graphits nur beschränkt einsetzbar sind.

Ein Ansatz für eine robuste Segmentierung stellt die Anwendung von Multiskalen-Algorithmen dar. Das Systemrauschen sowohl vom Detektor als auch von der Röhre wird experimentell bestimmt und durch Anwendung spezieller Filtermethoden berücksichtigt. Dabei werden einerseits mittels „Wavelets“ die niederfrequenten Bildanteile bestimmt, andererseits mit „Platelet“-Filter die hochfrequenten Anteile betont. Die unterschiedlichen statistischen Eigenschaften in der Intensitätsschätzung dieser beiden Denoising-Ansätze gewährleisten nach einer arithmetischen Differenzbildung eine robuste und auf das Systemrauschen optimierte Segmentierung von kleinsten Bildstrukturen [17]. Das Ergebnis dieser Segmentierungsmethodik wird in Abbildung 10c) dargestellt. Vergleicht man dieses Ergebnis mit dem metallographische Schliffbild aus Abbildung 10a), so lässt sich eine sehr gute Korrelation zwischen der Graphitverteilung im Schliff und dem Segmentierungsergebnis erkennen.



**Abbildung 10:** Schnittbilder durch eine bogenförmige Anhäufung von größeren Graphitpartikel: a) Lichtmikroskopische Aufnahme, b) zu (a) korrespondierendes  $\mu\text{XCT}$ -Schnittbild, c) Segmentierungsergebnis nach Anwendung von Multiskalen-Algorithmen und Markierung von Bereich 1 (siehe Abbildung 11).

Bereich 1 aus Abbildung 10c) wird in Abbildung 11 vergrößert dargestellt. Bei der 3D-Darstellung eines Bereichs der Kugelkalotte wurden Graphitpartikel  $>50 \mu\text{m}$  segmentiert und markiert (Abbildung 11d)).



**Abbildung 11:** a) Lichtmikroskopische Aufnahme von Bereich 1 aus Abbildung 10, b) zu (a) korrespondierendes  $\mu\text{XCT}$ -Schnittbild, c) Segmentierungsergebnis, d) 3D Darstellung.

Derartige 3D-Verteilungen können die Grundlage für die Korrelation mit den Erstarrungsbedingungen bilden oder auch potentielle Risspfade nach einer mechanischen Belastung prognostizieren.

## 5. Zusammenfassung

Mit 3D- $\mu$ XCT ist man in der Lage, interdendritische Seigerungen und Poren mit oxidischen Einschlüssen, sowie primäre Eisenaluminide in gegossenen Leichtmetalllegierungen zu detektieren. Weiters können Inhomogenitäten in Eisenwerkstoffen unter bestimmten Größeneinschränkungen charakterisiert werden. Tabelle 2 zeigt die unterste Auflösungsgrenze in Abhängigkeit von der Art und Dichte einiger ausgewählter Inhomogenitäten für Proben ähnlicher Größe. Die Detektierbarkeit der Graphitpartikel mit vergleichsweise geringer Dichte ist demnach trotz der etwas schlechteren Messauflösung deutlich besser als für die nichtmetallischen Einschlüsse.

Inhomogenität	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Probengröße [mm <sup>3</sup> ]	Voxelgröße	CT-Detektierbarkeit im Vielfachen der Voxelgröße	
				visuell	automatisch
Graphitpartikel in Gusseisen	~ 1,9	4,7 × 7,2 × 8,5	(9,5 μm) <sup>3</sup>	3 fach	4 fach (mit Anwendung von Multiskalen-Algorithmen)
Nichtmetallische Einschlüsse in Stahl	~ 3,5 bis 5	3,9 × 3,9 × 28	(6,1 μm) <sup>3</sup>	8 fach	

**Tabelle 2:** Auflösungsgrenzen für einige Inhomogenitäten in Eisenwerkstoffen für die visuelle und automatische Detektierbarkeit mittels  $\mu$ XCT.

## Danksagungen

Das Projekt wurde im Rahmen des Förderprogrammes „FH-Plus“ der FFG finanziell unterstützt. Die Autoren bedanken sich bei den Firmen AMAG Rolling GmbH, Georg Fischer Eisenguss GmbH und voestalpine Stahl GmbH für die Bereitstellung der Proben und für die Freigabe der Bilder und Messergebnisse. Die metallographische Auswertung der Stahlproben wurde von voestalpine Stahl GmbH durchgeführt. Die Metallographie der oxidischen Einschlüsse in Aluminiumlegierungen wurde von AMAG Rolling GmbH ausgeführt. Herrn Dr. Zauner von der FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH sei gedankt für die Segmentierung der Graphitpartikel im Gusseisen.

## Referenzen

- [1] P.O.Moore (Hrsg.): „Nondestructive Testing Handbook, Volume 4, Radiographic Testing“, ISBN: 1-57117-046-6, American Society for Nondestructive Testing, Columbus, 2002
- [2] J.Goebbels, G.Weidemann, H.Riesemeier, A.Nitschke: „Charakterisierung keramischer Mikrobauteile mittels Computertomographie-Vergleich von Laboranlagen und Synchrotronstrahlung“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, DGZfP-Jahrestagung 2002
- [3] J.Kastner, B.Harrer, D.Salaberger: „Anwendungen der 3D-Röntgen-Computertomografie im Leichtmetallguss und im Leichtbau“, 4.Ranshofener Leichtmetalltage: Vom Werkstoff zum Bauteilsystem, 79-90, LKR Verlag, 2006
- [4] H.Schumann, H.Oettel (Hrsg.): „Metallographie“, Wiley-Vch Verlag, 14.Auflage, ISBN: 3-527-30679-X, Weinheim, 2005
- [5] C.Kammer: „Aluminium Taschenbuch Teil 1: Grundlagen und Werkstoffe“, Aluminium-Verlag, 16.Auflage, ISBN: 3-87017-274-6, Düsseldorf, 2002

- [6] DIN 50602: „Metallographische Prüfverfahren; Mikroskopische Prüfung von Edelstählen auf nichtmetallische Einschlüsse mit Bildreihen“, Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung, Ausgabe:1985-09
- [7] ASTM E45-97: „Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel“, ASTM International, 1997
- [8] S.Bethlehem-Seidel, E.Kast: „Automatisches Verfahren zur Reinheitsgradbestimmung an Stählen im REM mittels kombinierter RE-Graustufenbildanalyse und EDX-Analyse mit spezieller Auswertesoftware“, Konferenz-Einzelbericht: Sonderbände der Praktischen Metallographie, Fortschritte in der Metallographie, 1995
- [9] M.Nuspl, W.Posch, J.Angeli, W.Krieger: „Einfluss der sekundärmetallurgischen Behandlung auf den Reinheitsgrad von Stahl“, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 149. Jahrgang, Heft 11, 2004
- [10] K.Matthies, H.Ernst, W.Gieschler: „Microscopic cleanness determination of steels with ultrasound“, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, 2002
- [11] H.Richter, A.Fuchs, H.Jacobi, K.Wünnenberg, F.Leiber, K.H.Waldöfner, H.J.Bäthmann, A.Klein, K.Kupzog: „Methods of cleanness inspection.“, Thyssen Stahl, Duisburg; Krupp Hoesch Stahl, Dortmund, Mannesmannröhren-Werke, Duisburg, Preussag Stahl, Salzgitter, 1997
- [12] F.Jacobi-Hatto: „The MIDAS technique for detection of macroscopic inclusions in CC-material: fundamentals and practical applications“, Salzgitter Mannesmann Forsch -Inst, Duisburg, 2005
- [13] T.Hansen, P.Jönsson: „Some ideas of determining the macro inclusion characteristics during steelmaking“, MEFOS, Lulea; Royal Inst. of Technol. (KTH), Stockholm, 2001
- [14] T.Hansen, G.Runnsjö, K.Törresvoll, P.G.Jönsson: „On the assessment of macro inclusions in stainless steels using ultrasonic technique“, Mefos Metallurgical Res Inst, Lulea; Outokumpu Stainless, Avesta; Ovako Steel, Hofors; Royal Inst. of Technol. (KTH), Stockholm, 2004
- [15] R.Meilland, L.Dosdat: „Rapid characterization of inclusionary cleanliness in steels by PDA-OES mapping“, IRSID, Maizieres-les-Metz, FR, 2002
- [16] B.Tomic, B.Harrer, A.Kottar, H.P.Degischer, L.Zeipper, J.Kastner: „Charakterisierung der Graphitverteilung in Sphäroguss“, Konferenz-Einzelbericht: Sonderbände der Praktischen Metallographie 38, Fortschritte in der Metallographie, ISBN: 3-88355-354-9, Frankfurt, 2006
- [17] G.Zauner, B.Harrer, D.Angermaier, M.Reiter, J.Kastner: „Multiscale segmentation method for small inclusion detection in 3D industrial computed tomography“, SPIE Europe Optical Metrology 2007, München, 17. bis 21. Juni 2007, im Druck