
GEFÜGEANALYSE VON METALLISCHEN LEGIERUNGEN MIT QUANTITATIVEN COMPUTERTOMOGRAFIEMETHODEN

M. Firsching, R. Hanke, P. Keßling, M. Krumm, F. Nachtrab, M. Salamon, N. Uhlmann
Entwicklungszentrum Röntgentechnik, Fraunhofer IIS

DGZfP-Jahrestagung, 10.-12. Mai 2010, Erfurt, Kontakt: markus.firsching@iis.fraunhofer.de

© Fraunhofer IIS



ÜBERBLICK

1. Einführung zur Gefügeanalyse
2. Gefügeanalyse mittels 3D-Computertomographie (CT)
3. Vergleich mit konventionellen Methoden
4. Beispiel: Al Si6 Cu4
5. Quantitative CT: Zwei Spektren CT (2X-CT)
6. Möglichkeiten und Grenzen
7. Zusammenfassung

© Fraunhofer IIS



Motivation Überblick

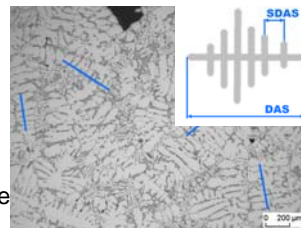
- Analyse von metallischen Gefüge ermöglicht Rückschlüsse auf:
 - Festigkeit
 - Ermüdungsverhalten
 - Fertigungsprozess (Analyse antiker Werkstoffe)
 - Zusammensetzung des Werkstoffs
- Besonders für hoch belastbare Werkstoffe ist die genaue Kenntnis der Gefügeausprägung von enormen Interesse.
 - z.B. Verbrennungsmotoren → Legierung AlSi6Cu4

© Fraunhofer IIS



Gefügeanalyse Charakteristische Merkmale

- Merkmale:
 - Dendriten Arm Abstand (DAS)
 - Sekundäre Dendriten Arm Abstand (SDAS)
 - Porosität
 - Vorkommen und Ausprägung unterschiedliche
- Methoden:
 - 2D-Bildgebung (LOM / EDX)
 - Bisher: 3D-Bildgebung nur durch Kombination



Bilder: IFQ Fakultät für Maschinenbau, Uni Magdeburg

© Fraunhofer IIS



Messprinzip 3D Computertomographie

Absorption von Röntgenstrahlung

Lambert Beer'sches Gesetz

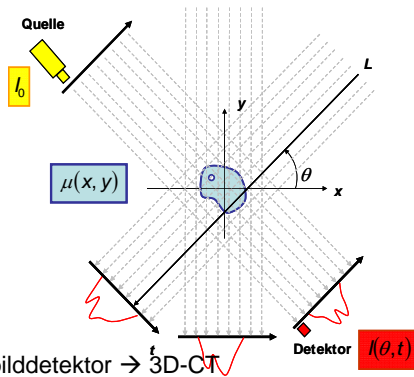
$$I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Intensität im Schattenwurf abhängig von:

- Durchstrahlungslänge $\rightarrow d$
- Materialeigenschaft $\rightarrow \mu(\rho, Z)$

Aufnahme aus 360° Raumwinkeln

- Rekonstruktion eines 3D Volumens
- Kombination: Kegelstrahl und Flachbilddetektor \rightarrow 3D-CT
 \rightarrow Zeitersparnis, Artefakte



© Fraunhofer IIS

Fraunhofer
IIS

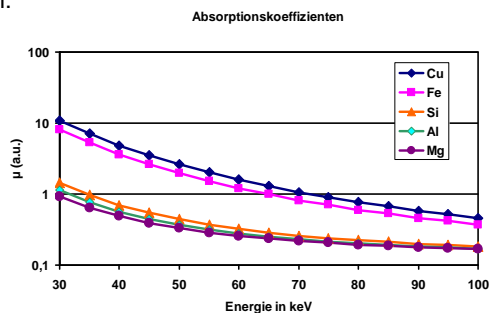
Gefügeanalyse mittels CT Materialspezifische Einflussfaktoren

Abbildung wird beeinflusst durch:

- Differenz der material-spezifischen Absorptionskoeffizienten
- Räumliche- und Kontrastauflösung

Anpassungspotentiale der CT

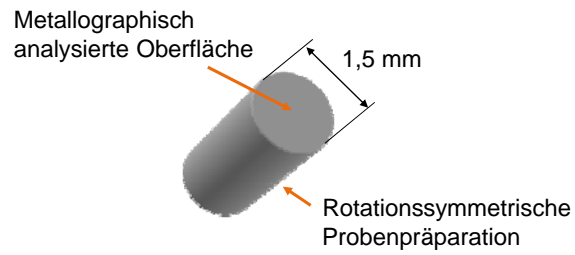
- Röntgenspektrum
- Detektorempfindlichkeit
- Probengeometrie
- Artefaktreduktion



© Fraunhofer IIS

Fraunhofer
IIS

Probenkörper der Al Legierung



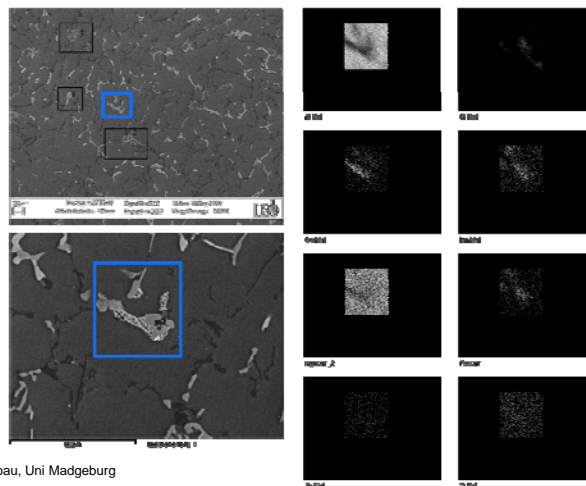
© Fraunhofer IIS



Ergebnisse Al Legierung SEM-EDX Analyse

Bestandteile Al-
Legierung

- Blocky Cu Phase
 - $\text{Cu}_{10,5}\text{Al}_{4,1}\text{Si}_{2,81}\text{Mg}_{2,48}$
 - $\text{Cu}_{7,27}\text{Al}_{12,25}\text{Si}_{0,47}$
- $\text{Al-Al}_2\text{Cu}$
- MgSi
- $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$
- $\alpha\text{-Al}$



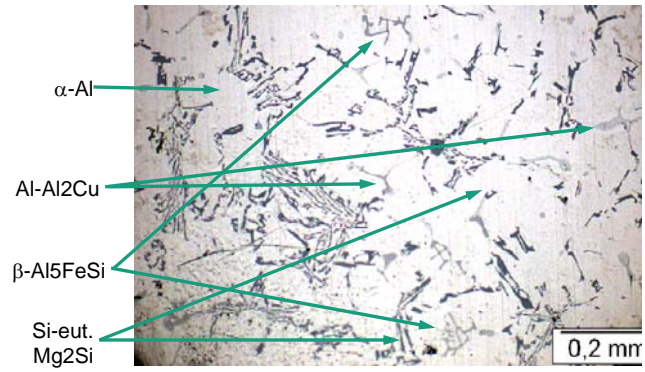
IFQ Fakultät für Maschinenbau, Uni Magdeburg

© Fraunhofer IIS



Möglichkeiten und Grenzen

LOM

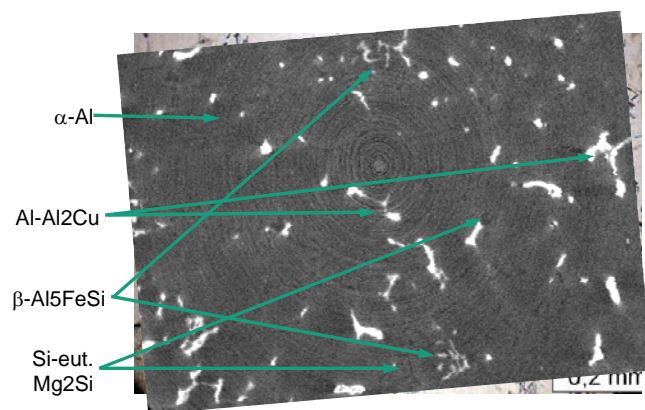


© Fraunhofer IIS



Möglichkeiten und Grenzen

Sub μ -CT



© Fraunhofer IIS

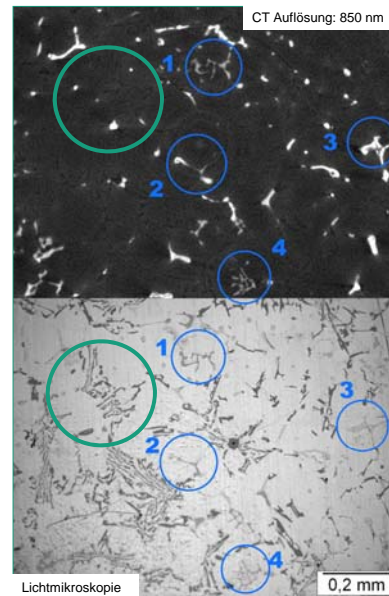


Ergebnisse Al Legierung 2D Vergleich LOM mit CT

Oberflächenferne Probe

- Zuordnung der eisen- und kupferhaltigen Strukturen möglich
- Ohne zusätzliche Kontrastierung ist die qualitative Zuordnung der einzelnen Phasen im LOM schwierig

! Al Matrix und Si Eutektikum auf Grund ihrer geringfügige Absorptionsunterschiede in der Röntgen-CT nur schwer zu trennen



© Fraunhofer IIS

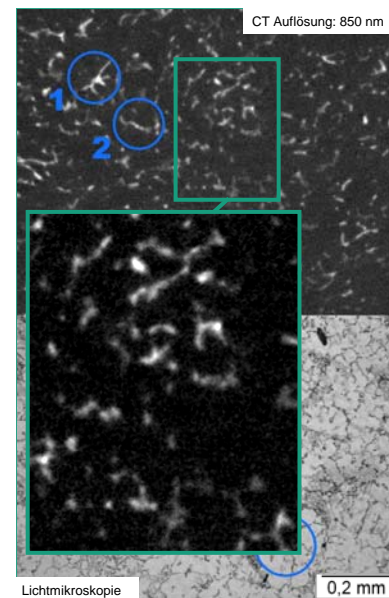
Fraunhofer IIS

Ergebnisse Al Legierung 2D Vergleich LOM mit CT

Probe 2 (oberflächennah)

- Zuordnung der eisen- und kupferhaltigen Strukturen möglich
- Ohne zusätzliche Kontrastierung ist die qualitative Zuordnung der einzelnen Phasen im LOM schwierig

! Fein ausgeprägte Strukturen zeigen die Begrenzung der Strukturerkennbarkeit durch räumliche Auflösung



© Fraunhofer IIS

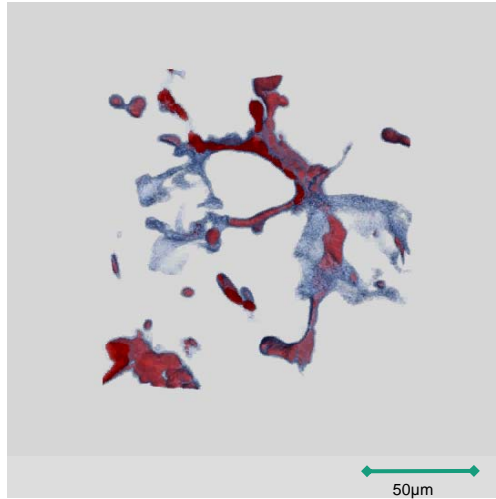
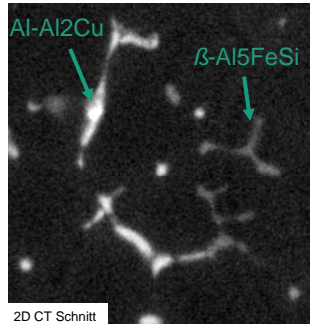
Fraunhofer IIS

Ergebnisse Al Legierung

3D Abbildung von Materialphasen mit CT

Probe 1

- Analyse der Gefügeorientierung



© Fraunhofer IIS

Fraunhofer IIS

Zwei-Spektren Computertomographie (2X-CT)

Theorie zur 2X-CT

- Röntgenabschwächung von zwei Effekten abhängig:
 - Comptonstreuung
 - Photoeffekt
 - Beide sind Material- und Energieabhängig
- CT bestimmt den Schwächungskoeffizienten μ , dieser ist abhängig von Massendichte ρ und (effektiver) Ordnungszahl Z

→ Messung mit zwei verschiedenen Röntgenspektren (Energien 1 und 2) erlaubt Rückschlüsse auf das Material, z.B. Massendichte ρ und Ordnungszahl Z

→ Sog. „Rho-Z-Projektion“

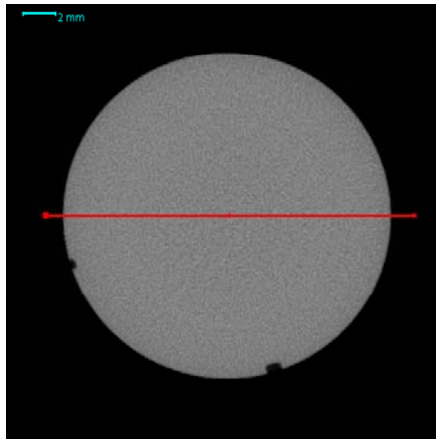
$$\begin{pmatrix} \mu_1(\rho, Z) \\ \mu_2(\rho, Z) \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \rho(\mu_1, \mu_2) \\ Z(\mu_1, \mu_2) \end{pmatrix}$$

Heismann et al., Jour. Appl. Phys., Vol 94, No. 3, 2003, pp 2073-2079

© Fraunhofer IIS

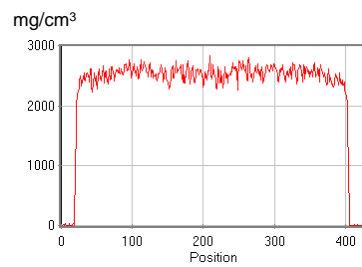
Fraunhofer IIS

Zwei-Spektren Computertomographie (2X-CT) Beispiel 2X-CT: Aluminiumzylinder Dichtebild



Alu-Zylinder, 20 mm Durchmesser
Auflösung ca. 50 μm

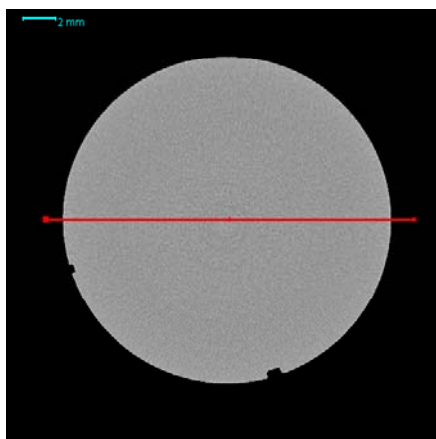
Mit 2X-CT bestimmte mittlere Dichte:
2600 mg/cm^3 (real 2700 mg/cm^3)



© Fraunhofer IIS

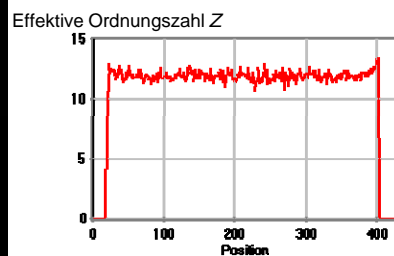
Fraunhofer
IIS

Zwei-Spektren Computertomographie (2X-CT) Beispiel 2X-CT: Aluminiumzylinder Z-Bild



Alu-Zylinder, 20 mm Durchmesser
Auflösung ca. 50 μm

Mit 2X-CT bestimmte Ordnungszahl:
12 (real 13)



© Fraunhofer IIS

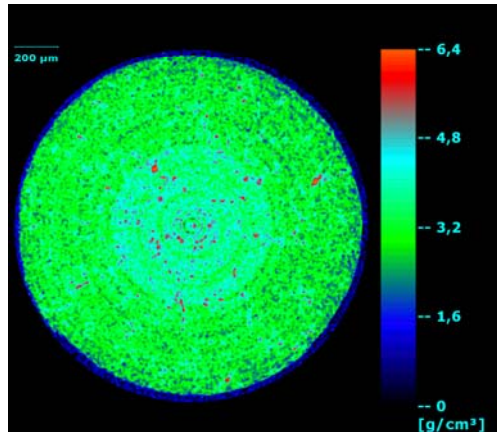
Fraunhofer
IIS

Zwei-Spektren Computertomographie (2X-CT) Dichtebild

Dichtebild einer
AlSi6Cu4-Legierung

- Dichte der Aluminiummatrix
ca. 2,6-3 g/cm³ (erwartet 2,7)
- Kupferhaltige Phasen haben
deutlich höhere Dichte (bis zu
ca. 6 g/cm³)
- Sehr neue Methode,
experimentelles Stadium

→ noch nicht vollständig
charakterisiert.



© Fraunhofer IIS

Fraunhofer
IIS

Zusammenfassung

Gefügeanalyse mittels 3D-Computertomographie:

- ist eine Ergänzung zur 2D Schliffbildmethode
- liefert bei Al-Legierungen besonders guten Kontrast bei den eisen- und kupferhaltigen Phasen
- erlaubt Erstellung von 3D-Datensätzen mit isotroper Auflösung in einem Schritt. Für 3D-CT kein Ätzen, kein Anfertigen von Schliffbildern nötig!

Zwei Spektren Computertomographie (2X-CT)

- quantitative Materialinformation (Massendichte, in Zukunft auch Ordnungszahl)
- Ergänzung zu EDX-Methoden

© Fraunhofer IIS

Fraunhofer
IIS

Kontakt: markus.firsching@iis.fraunhofer.de

© Fraunhofer IIS

