

# Einsatzmöglichkeiten von CT in der Stahlforschung

Christian GUSENBAUER<sup>1</sup>, Simon GROßEIBER<sup>2</sup>, Bernhard HARRER<sup>3</sup>,  
Bernhard PLANK<sup>1</sup>, Gerald KLÖSCH<sup>4</sup>, Wolfgang SCHÜTZENHÖFER<sup>5</sup>, Sergiu ILIE<sup>3</sup>,  
Guillermo REQUENA<sup>2</sup>, Johann KASTNER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich

<sup>2</sup> TU Wien, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Wien, Österreich

<sup>3</sup> voestalpine Stahl GmbH, Linz, Österreich

<sup>4</sup> voestalpine Stahl Donawitz GmbH, Leoben, Österreich

<sup>5</sup> Böhler Edelstahl GmbH & Co KG, Kapfenberg, Österreich

**Kurzfassung.** Die Röntgen-Computertomographie (CT) weist neben einem großen Material- und Anwendungsspektrum auch eine Vielzahl von Prüfmodalitäten in Form von laborbasierten  $\mu$ CT-Systemen und Synchrotroneinrichtungen auf. Durch die physikalische Limitierung von CT im Stahlbereich muss die Auslegung der experimentellen Versuche jedoch entsprechend sorgfältig geplant werden. Dieser Beitrag gibt einen Überblick zu den Einsatzmöglichkeiten von CT zur Charakterisierung von Materialinhomogenitäten, thermomechanischen Eigenschaften und zur Überprüfung der Reinheit in Stählen.

Materialinhomogenitäten lassen sich bei entsprechender Probengeometrie, Ausdehnung der Inhomogenität und Kontrast zur Matrix bereits mit Laborsystemen hochauflösend charakterisieren. Laborsysteme haben den Vorteil des einfacheren Zugangs und werden deshalb oft auch für die Planung von komplexen Versuchsreihen am Synchrotron genutzt, wo normalerweise nur ein kleines Zeitfenster für die Durchführung der Experimente zur Verfügung steht.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Stahlforschung ist die Charakterisierung von thermomechanischen Eigenschaften von belasteten Proben. Laborbasierte CT-Systeme ermöglichen die Charakterisierung von unterbrochenen Zugversuchen oder gebrochenen Warmzugproben hinsichtlich des Schädigungsbeginns und der weiteren Schädigungsentwicklung. Die Bestimmung der Duktilität erfolgt herkömmlicherweise über die Bestimmung der Bruch einschnürung an der Bruchfläche. Mittels CT kann über den Schädigungsbeginn ein weiterer Zugang zur Bestimmung der Duktilität erfolgen. Mit diesem Ansatz wurde das zweite Duktilitätsminimum (Temperaturbereich niedriger Duktilität) von Stranggussproben systematisch mittels  $\mu$ CT, sub- $\mu$ CT und Synchrotron untersucht, um auch einen möglichen Einfluss von Mikroporen zu berücksichtigen.

Nicht-metallische Einschlüsse beeinflussen zu einem hohen Grad die Qualität und Reinheit von Stählen und sind oft Ursache für ein funktionales Versagen in dynamisch belasteten Komponenten. Ein systematischer Vergleich zwischen den Methoden CT, Ermüdungsprüfung, Rasterelektronenmikroskopie und Lichtmikroskopie soll Auskunft über Aussagekraft und Praktikabilität der einzelnen Methoden zur Detektion von Materialinhomogenitäten geben.

## 1. Einführung

Die Röntgen-Computertomographie (CT) ist durch die Möglichkeit der zerstörungsfreien Prüfung und der dreidimensionalen Darstellung von inneren Strukturen mittlerweile eine essentielle Methode in der Werkstoffcharakterisierung und Qualitätssicherung. Neben einem großen Material- und Anwendungsspektrum kann auf eine Vielzahl von verschiedenen Prüfmodalitäten und Geräten in Form von laborbasierten  $\mu$ CT und sub- $\mu$ CT-Systemen oder Synchrotron-Einrichtungen zurückgegriffen werden. Dadurch kann je nach Aufgabenstellung (Abmessung des Prüflings, Materialzusammensetzung und Durchstrahlungslängen) ein geeignetes System für die Prüfaufgabe ausgewählt werden. Die eingesetzten CT-Systeme unterscheiden sich im Wesentlichen durch folgende Punkte:

- Maximaler Energiebereich  $\rightarrow$  maßgeblich für die Durchstrahlbarkeit
- Maximale Photonendichte  $\rightarrow$  Einfluss auf Datenqualität (Signalrauschen und Scanzeit)
- Offene oder geschlossene Röntgenröhre, Teilchenbeschleuniger  $\rightarrow$  Brennfleck variabel oder konstant (Fokusgröße und Auflösung)
- Verwendung von mono- oder polychromatische Röntgenstrahlung  $\rightarrow$  Einfluss auf Datenqualität (Strahlaufhärtingsartefakte und Scanzeit)
- Röntgenstrahlgeometrie und Detektortyp  $\rightarrow$  Einfluss auf Datenqualität (Scanzeit, Artefakte und Auflösung)

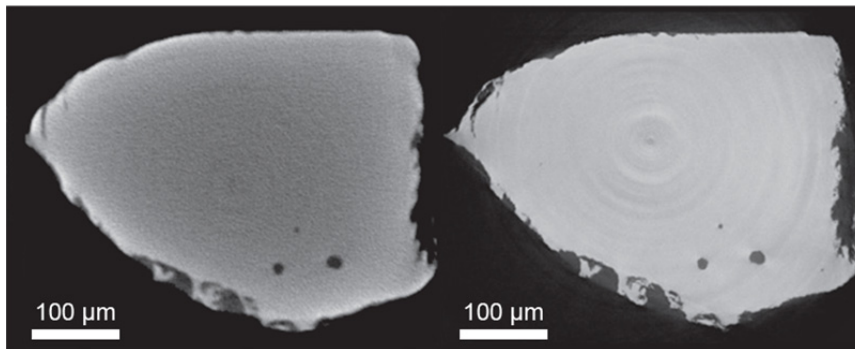
Industrielle  $\mu$ CT-Systeme werden für die Bauteilprüfung oder Materialcharakterisierung von Polymeren, Leichtmetallen und Stahlproben, sub- $\mu$ CT-Systeme und Synchrotron-CT hauptsächlich für die Materialcharakterisierung (Durchmesser von Stahlproben  $<1$  mm) eingesetzt. Die zerstörungsfreie Prüfung mittels CT im Stahlbereich ist durch die physikalische Limitierung der Durchstrahlbarkeit mit Röntgenstrahlen für eisenbasierte Materialsysteme im Vergleich zu Kunststoffproben bzw. Leichtmetalllegierungen auf ein kleineres Anwendungsfeld beschränkt. Dadurch muss die Auslegung der Probengröße, teilweise auch mit anschließender zerstörender Zielpräparation, für experimentelle Versuche und anschließender Materialcharakterisierung entsprechend sorgfältig geplant werden. Dieser Beitrag gibt einen Überblick zu den Einsatzmöglichkeiten, Limitierungen und Auswertemöglichkeiten von  $\mu$ CT (RayScan 250E), sub- $\mu$ CT (GE phoenix|x-ray nanotom 180 NF) und Synchrotron-CT (Grenoble, ID19) in der Stahlforschung zur Charakterisierung von Materialinhomogenitäten [1,2], thermomechanischen Eigenschaften [3,4] und zur Überprüfung der Reinheit in Stählen [5,6]. Weiters beinhaltet der Beitrag Vergleiche zu den etablierten Standardmethoden.

## 2. Experimentelles

Bei industriellen Röntgenanlagen entstehen die Röntgenstrahlen in einer Vakuumröhre durch Anlegen einer Hochspannung an einen Elektronenstrahl, welcher durch Ablenkspulen auf ein Targetmaterial hoher Ordnungszahl fokussiert wird. Durch Kollision von Elektronen mit den Atomen des Targetmaterials entstehen Röntgenstrahlen (Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung). Die polychromatische Röntgenstrahlung in Kegelstrahlgeometrie durchdringt die zu durchstrahlende Probenkörper und erfährt eine Schwächung durch Absorption und Streuprozesse, beschrieben durch das Lambert-Beersche Gesetz. Die transmittierte Intensität trifft üblicherweise auf einen Matrixdetektor mit einer Szintillationsschicht für die indirekte Umwandlung von Röntgenstrahlen in eine detektierbare Lichtintensität. Durch Rotation der Probe um die eigene Achse werden üblicherweise mehrere hundert Projektionsbilder aufgenommen. Ein mathematischer

Algorithmus (gefilterte Rückprojektion) erlaubt die Rekonstruktion von volumetrischen Daten bestehend aus volumetrischen Pixeln (Voxel). Die zu erreichende Voxelgröße ist unter anderem limitiert durch den maximalen Probendurchmesser bzw. durch die Anzahl der zur Verfügung stehenden Detektorpixel. Laborbasierte CT-Systeme haben den Vorteil eines einfacheren Zugangs im Vergleich zum Synchrotron und hinsichtlich Energie und Probengröße ergeben sich weniger Beschränkungen. Neben typischen Prüfaufgaben wie z.B. Lunkerdetektion oder Bestimmung der Faserorientierung werden Laborgeräte auch oft für die Planung (Vorauswahl von geeigneten Proben) von komplexen Versuchsreihen am Synchrotron genutzt, um das kleine Zeitfenster für die Durchführung der Experimente am Synchrotron optimal nutzen zu können.

Synchrotronstrahlung wird in einem Teilchenbeschleuniger durch Ablenkung von Elektronen mit Bewegungsenergien in der Größenordnung von 1 GeV erzeugt und weist eine Reihe interessanter Eigenschaften für die Anwendung in Wissenschaft und Technik auf. Neben einer Parallelstrahlgeometrie verfügt sie auch über eine hohe Strahlungsintensität und Brillianz. Diese Eigenschaften erlauben schnelle Scanzeiten, hohe Auflösungen, beinahe artefaktfreie Darstellung, sehr gute Datenqualität und die in-situ Untersuchung von z.B. Hochtemperaturversuchen. Beschränkte Zugangsmöglichkeiten, ein limitierter Energiebereich und die Prüfung innerhalb eines kleinen Zeitfensters erlauben nur die Durchführung von einer begrenzten Anzahl von Experimenten.



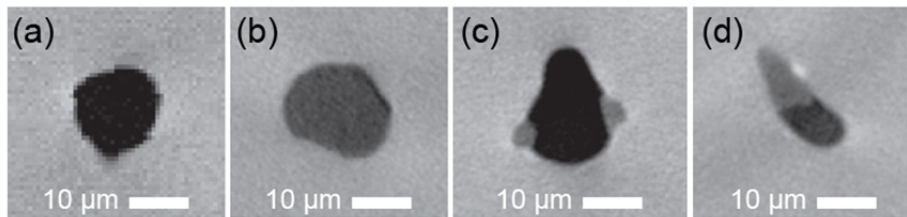
**Abb. 1.** CT-Schnittbilder eines sub- $\mu$ CTs (links) und Synchrotron-CTs (rechts) von einer Stahlprobe mit Materialinhomogenitäten, Voxelgröße:  $(0,4 \mu\text{m})^3$  sub- $\mu$ CT,  $(0,3 \mu\text{m})^3$  Synchrotron-CT (adaptiert von [1])

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Charakterisierung von Materialinhomogenitäten mittels sub- $\mu$ CT und Synchrotron

Materialinhomogenitäten wie z.B. Erstarrungslunker, Gasporen, Einschlüsse und Risse und deren Eigenschaften wie z.B. Position, Größe, Volumen oder Form kann in den CT-Daten von Stahlproben erfolgreich detektiert und quantifiziert werden, sofern diese eine genügend große Ausdehnung besitzen und ein guter Kontrast zwischen Inhomogenität und Matrixmaterial existiert. Dies ist hauptsächlich durch die zu erreichende Auflösung und Durchstrahlbarkeit des Materials limitiert. Im Allgemeinen gestaltet sich die Auswertung von CT-Daten von Stahlproben schwierig, falls die genannten Bedingungen nicht hinreichend erfüllt sind. Abbildung 1 zeigt einen Vergleich zwischen sub- $\mu$ CT (links) und Synchrotron-CT Schnittbilder (rechts) einer Stahlprobe mit einem maximalen Probendurchmesser von ca. 0,5 mm. Beide CT-Modalitäten lassen in der exemplarisch gewählten, axialen CT-Schicht die Detektion von insgesamt drei verschiedenen Materialinhomogenitäten zu, wobei die sub- $\mu$ CT-Daten auf Grund einer gewissen Brennfleckausdehnung und der größeren Voxelgröße unschärfer wirkt. Beim sub- $\mu$ CT

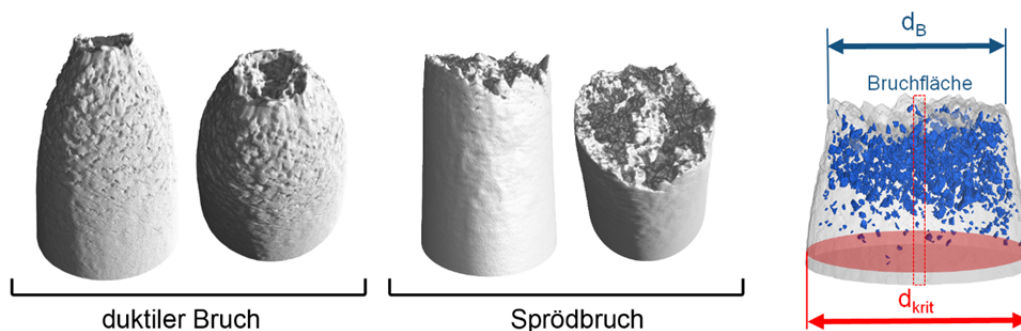
Datensatz dominieren Signalrauschen und geringe Strahlaufhärtungsartefakte, wohingegen beim Synchrotron-CT Ringartefakte stärker ausgeprägt sind. Bei genauerer Betrachtung der Synchrotron-Daten ergeben sich weitere Vorteile in Kontrast und Auflösungsvermögen. Abbildung 2 zeigt vergrößerte CT-Schnittbilder verschiedener Materialinhomogenitäten, die in dem abgebildeten Detailreichtum nur mittels Synchrotron-CT detektiert werden können. Auf Grund des exzellenten Kontrasts und detaillierten Auflösungsvermögens lassen sich verschiedene Typen von Materialinhomogenitäten unterscheiden und klassifizieren: Poren, Einschlüsse niedriger Dichte, Poren mit Einschlüssen niedriger Dichte und Poren mit Einschlüssen niedriger und hoher Dichte. Mit laborbasierten sub- $\mu$ CTs in neuer Generation ist man mittlerweile auch in der Lage, einen vergleichbaren Kontrast hinsichtlich Unterscheidung der Grauwerte von Poren und Einschlüssen zu erzielen [7].



**Abb. 2.** Synchrotron CT-Schnittbilder zeigen verschiedene Materialinhomogenitäten (a) Pore und (b-d) Kombinationen von Poren und Einschlüsse niedriger und hoher Dichte (adaptiert von [1])

### 3.2 Charakterisierung thermomechanischer Eigenschaften von Zugproben mittels CT

Laborbasierte  $\mu$ CT-Systeme ermöglichen die Charakterisierung von Stahlproben hinsichtlich unterbrochener Zugversuchen oder gebrochenen Warmzugproben nach Versuchsdurchführung, um die Probenverformung und die Bruchfläche hinsichtlich Schädigungsbeginn und Schädigungsentwicklung für verschiedene Versuchstemperaturen und Dehnraten zu untersuchen. Die Charakterisierung der thermomechanischen Eigenschaften von Zugproben kann z.B. durch Bestimmung der Duktilität erfolgen. Die Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, sich unter Belastung plastisch zu verformen, bevor er versagt. Abbildung 3 zeigt die Bruchfläche eines duktilen und eines spröden Bruchs von Stahlproben mit einem anfänglichen Durchmesser  $d_0$  von 8 mm in Form von gerenderten  $\mu$ CT-Daten.



**Abb. 3.** Gerenderte  $\mu$ CT-Daten der Bruchflächen von Stahlproben zeigen einen duktilen Bruch (links) und einen Sprödbbruch (Mitte), semi-transparentes Rendering eines  $\mu$ CT-Scans mit Verformungsporen (rechts)

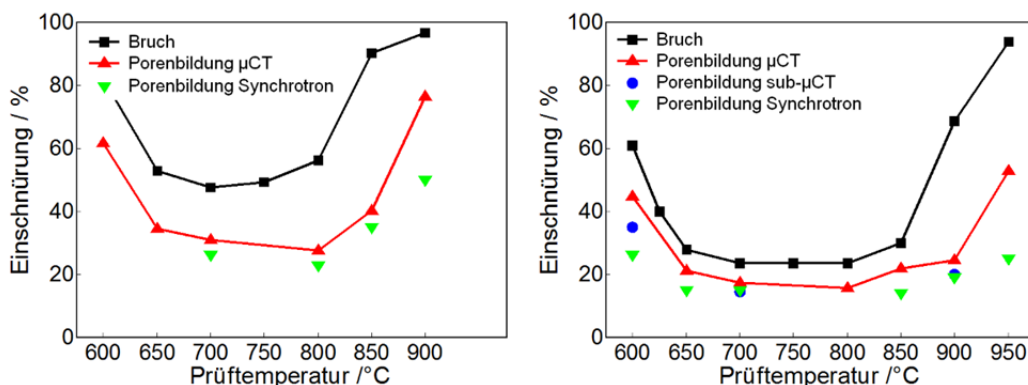
Die Bestimmung der Duktilität erfolgt herkömmlicherweise über die optische Bestimmung der Querschnittsverminderung (Einschnürung) der Bruchfläche und ist wie folgt definiert:

$$RA = \frac{d_0^2 - d_B^2}{d_0^2}$$

Abbildung 3 (rechts) zeigt in einer semi-transparenten und gerenderten Darstellung die detektierten Verformungsporen Nahe der Bruchfläche in blau. Die Detektion von den ersten Verformungsporen zur Bestimmung der Duktilität ermöglicht einen neuen Zugang über den Schädigungsbeginn:

$$RA_{\text{krit}} = \frac{d_0^2 - d_{\text{krit}}^2}{d_0^2}$$

Mit diesem Ansatz wurde das zweite Duktilitätsminimum von Stranggussproben systematisch über einen größeren Auflösungs- und Temperaturbereichs (von 600-950°C) mittels  $\mu$ CT, sub- $\mu$ CT und Synchrotron-CT untersucht, um auch den möglichen Einfluss von Mikroporen zu untersuchen. Die erreichten Voxelgrößen bewegen sich im Bereich von ca.  $(1 \mu\text{m})^3$  bis  $(10 \mu\text{m})^3$ . Der rot markierte Bereich (rechts im transparenten Volumen) in Abbildung 3 entspricht der zerstörenden Zielpräparation für die hochauflösenden CT-Scans beim sub- $\mu$ CT bzw. Synchrotron-CT. Die entnommenen Proben für den sub- $\mu$ CT hatten eine maximale Diagonale  $< 1,4 \text{ mm}$  und für Synchrotron-CT  $< 0,4 \text{ mm}$ . Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse von Ni-legiertem Stahl für Dehnraten  $3 \cdot 10^{-3}/\text{s}$  (links) und  $3 \cdot 10^{-4}/\text{s}$  (rechts) hinsichtlich der konventionellen Brucheinschnürung (schwarz) und Einschnürung des Schädigungsbeginns für  $\mu$ CT, sub- $\mu$ CT und Synchrotron-CT (farbig) jeweils in Abhängigkeit der Versuchstemperatur.



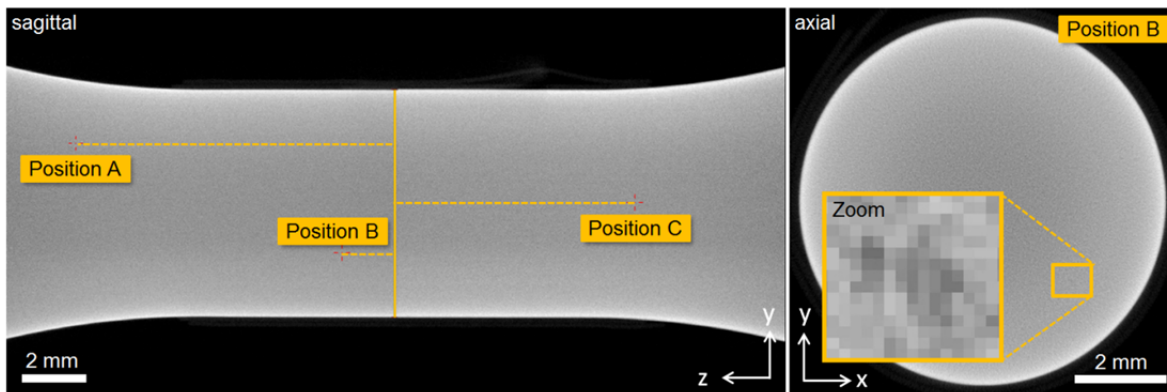
**Abb. 4.** Einschnürung in Abhängigkeit der isothermen Prüftemperatur dargestellt für zwei verschiedene Dehnraten:  $3 \cdot 10^{-3}/\text{s}$  (links), Dehnraten  $3 \cdot 10^{-4}/\text{s}$  (rechts)

In der austenitischen Phasenregion korreliert der Wiederanstieg der Brucheinschnürung nicht zwangsläufig mit der Einschnürung bei Schädigungsbeginn. Bei der Definition über den Schädigungsbeginn durch Deformationsporen kommt es bei beiden Dehnraten im Vergleich zur Brucheinschnürung zu einer verspäteten Erholung der Querschnittsverminderung (um ca. 50°C versetzt). Eine beträchtliche Diskrepanz zwischen beiden Definitionen ist bei 900°C für die niedrigere Dehnraten von  $3 \cdot 10^{-4}/\text{s}$  und bei 850°C für die höhere Dehnraten von  $3 \cdot 10^{-3}/\text{s}$  ersichtlich. Weiters ist ein ausgedehnterer Bereich des Duktilitätsminimums bei verringerten Dehnraten zuerkennen. Der direkte Vergleich zwischen  $\mu$ CT, sub- $\mu$ CT und Synchrotron-CT zeigt ähnliche Trends hinsichtlich der Duktilitätskurven, wodurch die Bestimmung des Schädigungsbeginns über  $\mu$ CT (detektierbare Poren  $> 50 \mu\text{m}$  im Durchmesser) als hinreichend genau betrachtet und der

Einfluss von kleineren Poren vernachlässigt werden kann. Dies erlaubt die Prüfung der Proben direkt nach Versuchsdurchführung ohne aufwendige Probenpräparation.

### 3.3 Reinheitsprüfung $\mu$ CT, Methodenvergleich ohne zerstörende Probenpräparation

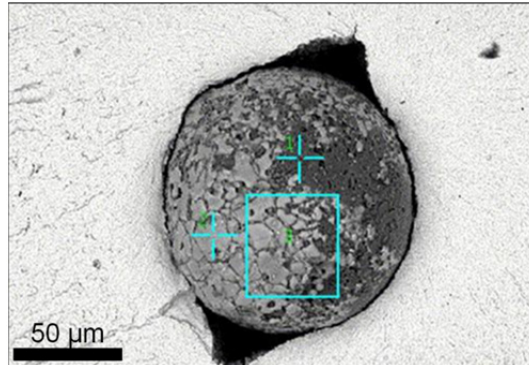
Nicht-metallische Einschlüsse (NMEs) beeinflussen zu einem hohen Grad die Qualität und Reinheit von Stählen und sind oft Ursache für ein funktionales Versagen in dynamisch belasteten Komponenten. Für die Optimierung des metallurgischen Produktionsprozesses durch Verbesserung des Reinheitsgrads wurden Rundproben aus Stahl mit einem Durchmesser von 7 mm hinsichtlich des Auftretens von NMEs systematisch untersucht. Die Charakterisierung erfolgte einerseits zerstörungsfrei durch die Detektion potentieller NMEs mittels CT und andererseits zerstörend durch Ermüdungsprüfung. Für die Prüfung des zentralen Bereichs der Probe wurden zwei überlappende CT-Scans mit einer Voxelgröße von  $(9 \mu\text{m})^3$  durchgeführt. Dies sollte eine zuverlässige, manuelle Detektion von NMEs ab einem Durchmesser von ca.  $45 \mu\text{m}$  zulassen. Abbildung 5 zeigt exemplarische CT-Schnittbilder von Probe 3, bei der drei Positionen (A, B, und C) als potentielle bruchauslösende NMEs identifiziert werden konnten. Nach erfolgter Positionsbestimmung der NMEs hinsichtlich Position und Abstand zur Oberfläche wurden die Proben mittels Dauerschwingversuch ( $2 \cdot 10^6$  Zyklen, Spannungsverhältnis  $R=0$ , 100 Hz) durch Anlegen unterschiedlicher Spannungsniveaus (975-1050 MPa) getestet. Um eine Korrelation zwischen Anzahl der detektierten NMEs mittels CT und angelegter Spannung zu vermeiden, wurden die Proben für die jeweiligen Spannungsniveaus zufällig ausgewählt. In einem ersten Durchlauf versagten ca. 50% der Proben an Positionen, die auch mit CT vorhergesagt wurden. Nach einem zweiten Durchlauf mit maximaler Spannung versagten schlussendlich alle Proben, und auch hier an Positionen, die mit CT vorhergesagt wurden.



**Abb. 5.** CT-Schnittbilder von Probe 3 in sagittaler und axialer Schnittebene mit drei potentiellen bruchauslösenden NMEs,  $(9 \mu\text{m})^3$  Voxelgröße (adaptiert von [5])

Die resultierenden Bruchflächen wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) und durch eine energiedispersive Röntgenanalyse (EDX) untersucht. Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der NMEs ermöglicht es, die Reinheit des Stahls weiter zu optimieren. Bei dem bruchauslösenden NME (Probe 3, Position B) handelt es sich um ein Aluminiumoxid von sphärischer Form, umgeben durch eine Schicht von Calciumsulfid (siehe Abbildung 6). Dieser NME entsteht durch den Deoxidationsprozess bei dem Aluminium verwendet wird, um freien Sauerstoff vom flüssigen Stahl in die Schlacke zu entfernen. Durch Hinzugabe von Calcium in den flüssigen Stahl verwandelt sich das Aluminiumoxid in ein Calciumaluminat. Dies lässt in der Regel ein besseres Gießverhalten während des Stranggussverfahrens zu. In der Gegenwart von Schwefel und durch weitere thermodynamische Gründe formt sich eine Schicht Calciumsulfid um das

Aluminiumoxid, welches den weiteren Austausch bzw. Umwandlung von Aluminiumoxid in Calciumaluminat verhindert. Dieser NME zeigt Probleme bei der Deformation. Dies ist erkennbar durch die nicht-deformierte sphärische Gestalt und durch die umgebenden Hohlräume in der Eisenmatrix. Diese Positionen erleichtern das weitere Risswachstum und führen zum Versagen des Materials. Ein Vergleich zwischen den Methoden ist in Tabelle 1 angeführt.



**Abb. 6.** REM Aufnahme des bruchauslösenden NMEs von Probe 3, Position B (adaptiert von [5])

### 3.4 Reinheitsprüfung sub- $\mu$ CT, Methodenvergleich mit zerstörender Probenpräparation

Durch eine zerstörende Zielpräparation lassen sich wie bereits im Kapitel 3.1 beschrieben, auch mit laborbasierten sub- $\mu$ CT-Systeme sehr hohe Auflösungen erzielen und ermöglichen eine Steigerung der Detektionsmöglichkeiten von 45  $\mu$ m großen NMEs beim  $\mu$ CT-System auf 5  $\mu$ m große Einschlüsse beim sub- $\mu$ CT-System. Im Vergleich zu den etablierten Standardmethoden wie z.B. REM, EDX und Lichtmikroskopie ergeben sich entsprechend Auflösungsvermögen und der Möglichkeit entweder 2D- oder 3D-Daten zu generieren, Vor- und Nachteile hinsichtlich der Auswertemöglichkeiten (siehe Tabelle 1). Trotz vielversprechender Vorteile des hochauflösenden sub- $\mu$ CT-Systems hinsichtlich dreidimensionaler Charakterisierung von Materialinhomogenitäten in Stahlproben erweist sich diese Methode jedoch auf Grund der zerstörenden Zielpräparation als sehr aufwendig und teuer in Hinblick auf die Prüfung eines größeren Probenvolumens.

**Tabelle 1.** Vergleich zwischen den verwendeten Methoden

	<b>Ermüdungsprüfung</b>	<b><math>\mu</math>CT</b>	<b>sub-<math>\mu</math>CT</b>	<b>REM, EDX</b>	<b>REM, EDX (Extraktion)</b>	<b>Lichtmikroskopie</b>
Chemische Analyse	ja (EDX)	nein	nein	ja	ja	nein
Morphologie	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Größenverteilung	nein	ja	ja	ja	ja	ja
Volumenverteilung	nein	ja	ja	nein	ja	nein
Kleinste Einschlüsse ( $\mu$ m)	> 20-50	> 45	> 5	> 1	> 2	> 2
Prüfvolumen bzw. Fläche	hoch	hoch	gering	gering	gering	moderat
Probenpräparation	hoch	gering	hoch	hoch	gering	hoch
Zeit für Analyse	hoch	moderat	moderat	moderat	sehr hoch	gering

## 4. Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschäftigt sich mit den Einsatz- und Charakterisierungsmöglichkeiten mittels laborbasierten  $\mu$ CT-System mit Vergleichsmessungen am Synchrotron und weiteren etablierte, zerstörenden Standardmethoden im Bereich der Stahlforschung.

- Charakterisierung von Materialinhomogenitäten: Synchrotron-CT schneidet zwar im direkten Vergleich zum sub- $\mu$ CT hinsichtlich Bildqualität, Kontrast, Schärfe und Auflösung besser ab, der Unterschied ist jedoch in bestimmten Bereichen als verhältnismäßig gering einzustufen. Hochauflösende sub- $\mu$ CT Laborsysteme mit Kegelstrahlgeometrie verfügen zudem über einen einfacheren Zugang mit geringerem Kostenaufwand und stellen somit ein attraktives Werkzeug für die Stahlforschung dar.
- Duktilitätsbestimmung: Die Duktilitätskurven basierend auf der konventionellen Definition über die Brucheinschnürung können bei Warmzugproben hinsichtlich Rissempfindlichkeit zu einer irreführenden Beurteilung führen. Bei der Definition über den Schädigungsbeginn durch Deformationsporen kommt es bei beiden untersuchten Dehnraten in der austenitischen Phasenregion zu einer verspäteten Erholung der Querschnittsverminderung (um ca. 50°C versetzt), wodurch es bei der herkömmlichen Definition (Brucheinschnürung) zu einer Überschätzung der Duktilität kommt.
- Reinheitsüberprüfungen von Stahl: Bruchauslösende nicht-metallische Einschlüsse können sowohl mit  $\mu$ CT als auch mit der zeitintensiveren Ermüdungsprüfung unter gewissen Limitationen detektiert werden. Die Übereinstimmung beider Methoden ist sehr gut, sofern die angelegte Spannung zum Versagen der Proben führt. Beide Methoden ermöglichen eine schnellere Inspektion als z.B. im Vergleich zu metallographischen Methoden. Durch eine zerstörende Zielpräparation kann man das Detektionslimit von nicht-metallischen Einschlüssen um einen Faktor neun verbessern. Im Vergleich zu etablierten Prüfmethoden ergeben sich Nachteile hinsichtlich der Prüfung großer Probenvolumen.

## Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des K-Projekts für „Zerstörungsfreie Prüfung und Tomographie Plus“ und des K1-Zentrums „Metallurgisches Kompetenzzentrum“ unterstützt durch die COMET Programmlinie der österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) und den Bundesländern Oberösterreich und Steiermark.

## Referenzen

- [1] J. Kastner, B. Harrer, G. Requena, O. Brunke, A comparative study of high resolution cone beam X-ray tomography and synchrotron tomography applied to Fe- and Al-alloys, NDT&E International, Vol. 43, pp. 599-605, 2010
- [2] B. Harrer, J. Kastner, W. Winkler, H.P. Degischer, On the Detection of Inhomogeneities in Steel by Computed Tomography, Proceedings of the World Conference on Non-Destructive Testing 2008, Shanghai, China, 2008
- [3] S. Großeiber, C. Gusenbauer, S. Ilie, G. Requena, E. Kozeschnik, Relevance of hot ductility tests to crack sensitivity during continuous casting of steel, Advanced Materials Research, Vol. 922, pp. 201-206, 2014
- [4] S. Großeiber, S. Ilie, C. Poletti, B. Harrer, H.P. Degischer, Influence of strain rate on hot ductility of a V-microalloyed steel slab, Steel Research International, Vol. 83, pp. 445-455, 2012
- [5] C. Gusenbauer, M. Reiter, J. Kastner, G. Klösch, Detection of Non-Metallic Inclusions in Steel by X-ray Computed Tomography and After Fatigue Testing, Proceedings of European Conference on Non-Destructive Testing 2014, Prag, Tschechien, 2014
- [6] W. Schützenhöfer, A. Tazreiter, B. Plank, P. Schumacher, Determination of cleanliness of different special steels in comparison with different methods, Conference on Industrial Computed Tomography 2014, Wels, Österreich, pp. 159-165, 2014
- [7] O. Brunke, E. Neuser, A. Suppes, High Resolution Industrial CT Systems: Advances and Comparison with Synchrotron-Based CT, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography 2011, Berlin, Deutschland, 2011