

Röntgen-Computertomografie der Verformungsporen in Warmzugproben aus Baustahlbrammen

M.Hochegger¹⁾, B. Harrer²⁾, H.P. Degischer¹⁾, Sergiu Ilie³⁾

¹⁾Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Technische Universität Wien, Wien/Österreich

²⁾FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH, Wels/Österreich

³⁾voestalpine Stahl AG, B2E, Linz/Österreich

Kurzfassung

Proben aus der oberflächennahen Schicht einer Stranggussbramme eines Baustahls werden mittels einer Gleeble Maschine bis Bruch bzw. bis zu einer bestimmten Dehnung gezogen. Der Bereich der Prüftemperaturen liegt nach einer Austenitisierung zwischen 700-800°C, wo ein Duktilitätsminimum beobachtet wird. Zur Klärung des Schädigungsmechanismus werden Längsschliffe, Fraktografie und Röntgen-Computertomografien (XCT) angefertigt. Mit Hilfe der XCT wird die durch Verformung hervorgerufene Porenbildung dargestellt und als Porosität mit der Querschnittsverminderung korreliert. Weiters werden eine die in der XCT sichtbaren Poren durch eine metallografische Zielpräparation im Gefüge lokalisiert. Das Duktilitätsminimum korreliert mit einer Porenbildung bei geringer lokaler Dehnung. Die Risseinleitung beginnt an Tripelkorngrenzen des ursprünglichen Austenits wo sich verformungsinduzierter α -Ferrit gebildet hat.

Keywords: Warmzugproben, Stahlstrangguss, Röntgen-Computertomografie, Zielpräparation, Verformungsporen, Schädigungsmechanismus

1. Einleitung

Stranggussbrammen sind von der Kokille bis zum Stoßofen thermischen und mechanischen Spannungen unterworfen, welche wiederum zu lokalen Verformungen führen. Der für diese Arbeit wichtige Bereich einer Stranggussanlage ist die sekundäre Kühlzone, in der auch das Richten der Bramme vonstatten geht. Im Temperaturbereich von ca. 700-900°C kommt es zur Bildung von verformungsinduziertem Ferrit an den Austenitkorngrenzen. Ferritsäume sind duktiler als die Austenitkörner, deshalb konzentriert sich die plastische Verformung in diesem Bereich, was zu inneren Rissen führen kann. Die Rissbildung unter Zugbelastung im Temperaturbereich um A_{r3} wird mittels Warmzugversuch anhand von Proben aus einer Stranggussbramme untersucht [1][2].

2. Material und Experimentelles

Tabelle 1 zeigt die chemische Analyse der für diese Untersuchung verwendeten Charge E17-714.

Tabelle 1: Chemische Analyse der Charge E17-714

C	Si	Mn
0,16	0,23	1,43

Proben wurden aus der oberflächennahen Schicht einer Stranggussbramme eines Baustahls entnommen und mittels einer Gleeble 1500 Maschine bis Bruch bzw. bis zu einer bestimmten Dehnung mit 0,3 bzw. $1,25 \cdot 10^{-3}$ /s Verformungsgeschwindigkeit gezogen. Der Bereich der Prüftemperaturen lag nach einer Austenitisierung zwischen 700-800°C. Skizze 1 und 2 zeigen jeweils die Probengeometrie bzw. den Temperaturverlauf des Zugversuches [3].

Bild 1: Probengeometrie

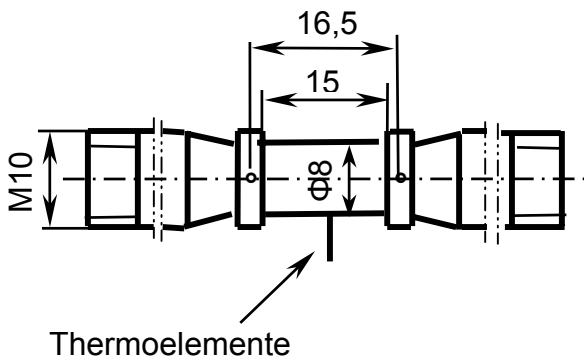
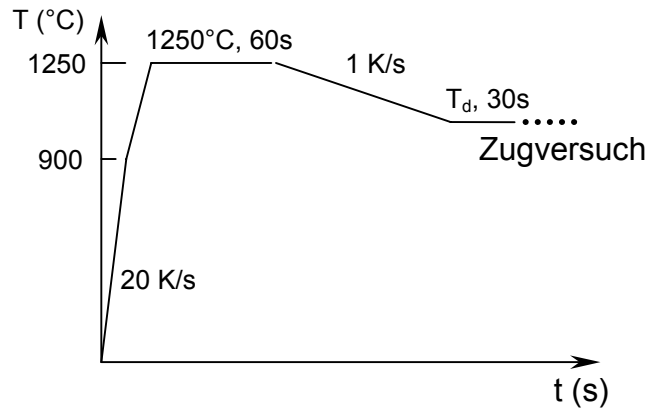


Bild 2: Temperaturverlauf des Zugversuches



Metallografische Untersuchung erfolgte stets an mit Nital geätzten Längsschliffen und wurde mittels Zeiss Axioplan – Auflicht/Durchlichtmikroskopie durchgeführt. Für Fraktografien wurde ein Phillips XL 30 Gerät verwendet.

XCT-Messungen wurden an der FH OÖ Forschungs- & Entwicklungs GmbH Wels mittels einer CT-Anlage Rayscan 250XE der Firma Wälischmiller durchgeführt. In Tabelle 1 sind die für die jeweiligen Proben verwendeten Messparameter und örtlichen Auflösungen angeführt.

Tabelle 2: Parameter der Tomografien

Proben Ø	Röhrenspannung	Röhrenstrom	Integrationszeit	Voxelgröße
8 mm	195 kV	50 µA	4 s	8 µm

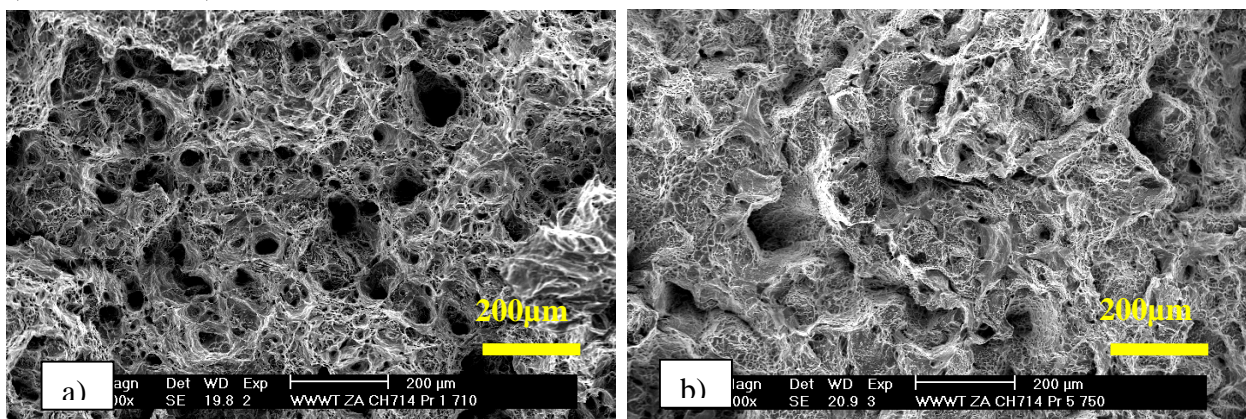
Alle Messungen wurden mit einer Projektionsanzahl von 900 Durchstrahlungsbildern pro Umdrehung aufgenommen und mit einer Strahlauflärungskorrektur durchgeführt. Die Auswertung der CT-Daten erfolgte mit dem Programm VGStudio MAX 1.2.1 [4].

3. Ergebnisse

3.1 Fraktografie

Nach der Austenitisierung stellt sich eine Austenitkorngröße von ca. 200µm ein. Die Fraktografie in Bild 3b zeigt interkristallinen Bruchverlauf im Austenitgefüge, wobei der Riss im Ferritsaum an den Korngrenzen verläuft. Im Vergleich dazu zeigt Bild 3a wesentlich größere Dimpeln und somit eine makroskopisch duktile Bruchfläche.

Bild 3: REM Fraktografien der gebrochenen Zugproben bei verschiedenen Prüftemperaturen: a) 710°C, und b) 750°C



3.2 Röntgen-Computertomografie XCT

2.3.1 Axiale Porositätsverteilung von gebrochenen und unterbrochenen Warmzugproben

Das Beispiel der tomografischen Untersuchung der Umgebung der Bruchfläche einer Warmzugprobe zeigt die Außenkontur des tomografischen Volumens in Bild 4a. Die in diesem Volumen enthaltenen Poren $> 40\mu\text{m}$ sind in Bild 4b segmentiert und sagittal projiziert: je näher der Bruchfläche umso mehr Poren. Bild 4c zeigt eine segmentierte, größere Pore mit komplexer Form, die vom Korngrenzenverlauf und dem Riss im Ferritfilm stammt. Die Zielpräparation in Bild 4d zeigt die Ferritsäume an den längsgestreckten, ursprünglichen Austenitkörnern im Lichtmikroskop. An einigen Korngrenzen sind Risse erkennbar.

Bild 4: 3D-XCT Rekonstruktion einer bis Bruch gezogenen Probe bei 750°C : a) Rekonstruktion der Probenoberfläche, b) Rekonstruktion der segmentierten Poren im Volumen a), c) Rekonstruktion einer Einzelpore an einer Korngrenze, d) Lichtmikroskopische Zielpräparation (Zugrichtung vertikal): Pore an ehemaliger Austenitkorngrenzen mit Ferritsäumen (weiß)

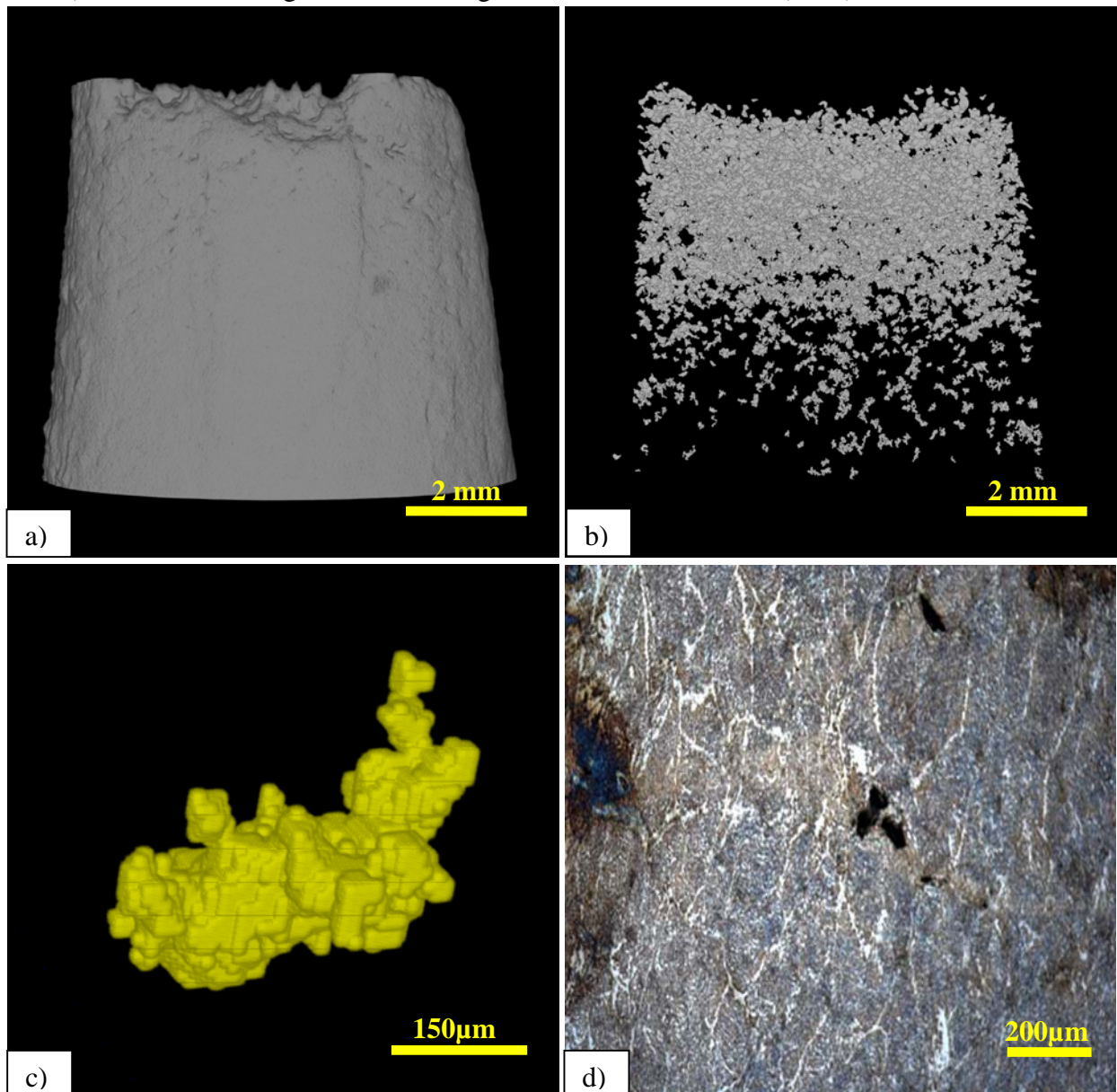
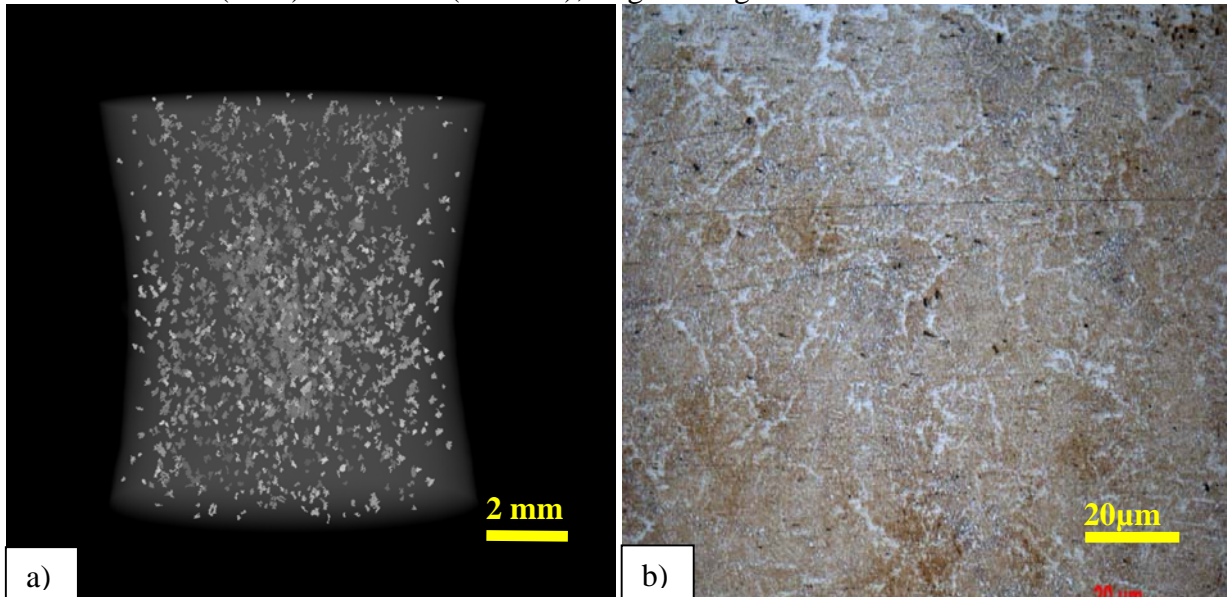


Bild 5a zeigt die sagittale Projektion der Poren in einer bis 0,3 Gesamtdehnung warmverformten Probe. Die transparente Kontur lässt die beginnende Einschnürung erkennen. In der zugehörigen Zielpräparation sind die Ferritsäume erkennbar, in denen vereinzelt Poren gebildet sind.

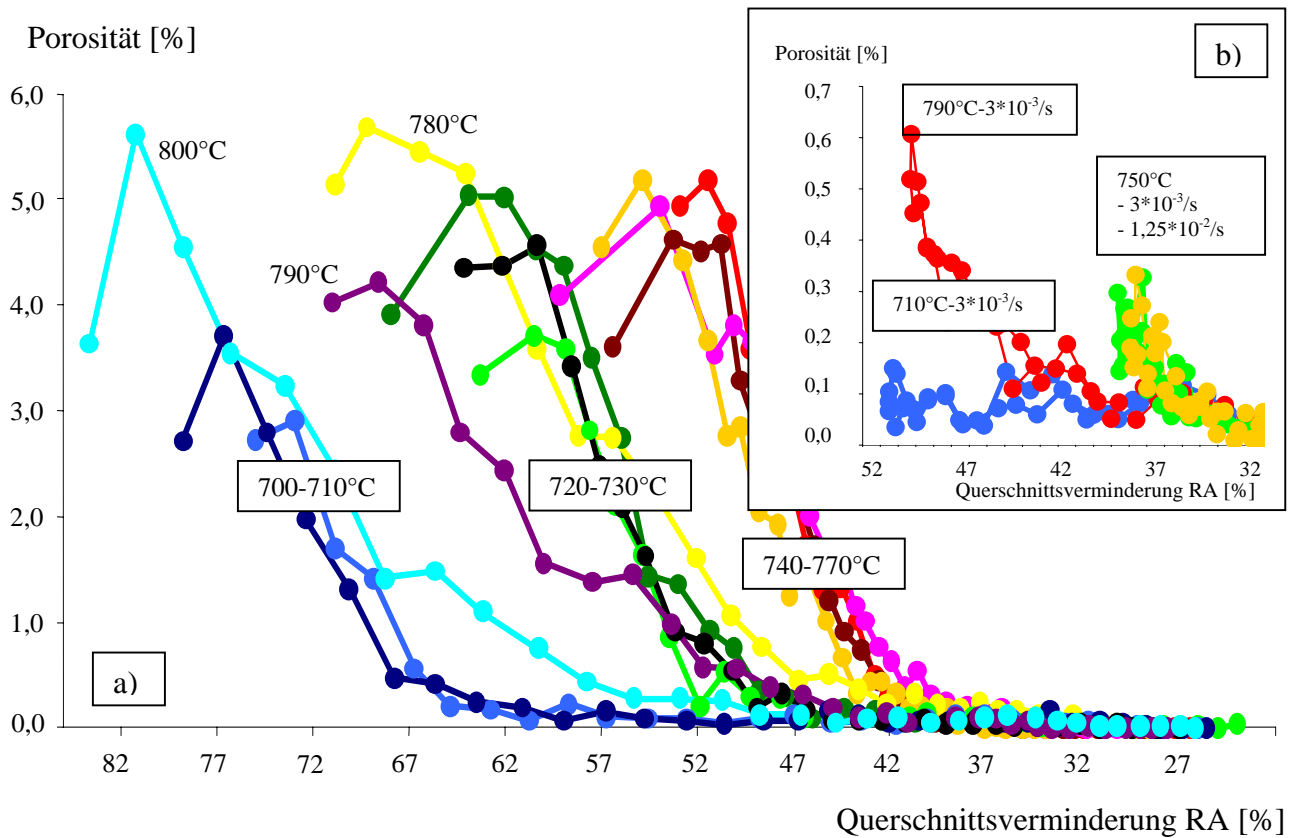
Bild 5: 3D-XCT Rekonstruktion einer bei 790°C bis 0,3 Dehnung gezogenen Probe :

a) Rekonstruktion der unterbrochenen Probe mit segmentierten Poren (in Oberflächennähe heller) und transparenten Oberflächenkontur b) Metallografische Zielpräparation einer unterbrochenen Probe mit Ferrit (weiß) und Poren (schwarz); Zugrichtung vertikal



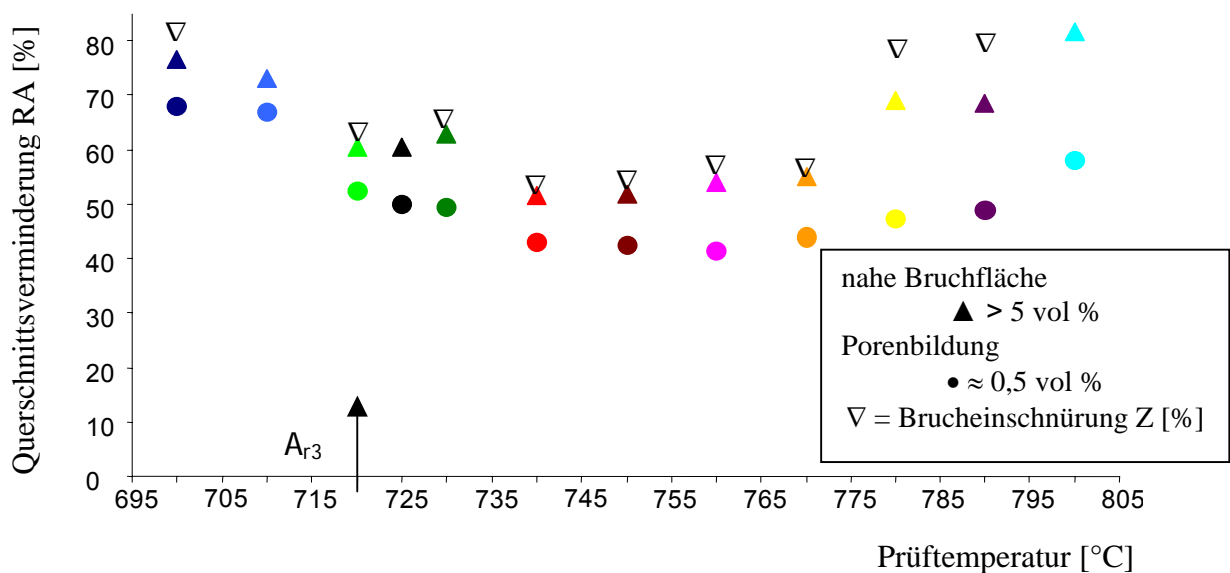
Aus Querschnitten der tomografischen Rekonstruktionen wurden die Volumenanteile der Poren errechnet und den zugehörigen Querschnittsverminderungen zugeordnet. Bild 6a zeigt die Porenverteilung entlang der Zugachse und ihre Abhängigkeit der Prüftemperatur. Bei 740°C-770°C beginnt signifikante Porenbildung schon bei kleineren Verformungen, was durch die Messungen an den unterbrochenen Proben, unabhängig von Verformungsgeschwindigkeiten, mit höherer Auflösung bestätigt wird (siehe Bild 6b). Bei 700°C-710°C und 800°C beginnt die Porenbildung erst bei höheren Verformungen.

Bild 6: Axiale 2D Porositätsverteilung über der Querschnittsverminderung RA bei verschiedenen Prüftemperaturen: a) gebrochene Warmzugproben bei 12 verschiedenen Temperaturen b) bis 0,3 Dehnung gezogene unterbrochene Warmzugproben bei zwei Temperaturen bzw. zwei Dehnraten



Die Brucheinschnürungen zeigen in Bild 7 ein Minimum um 750°C herum, ebenso wie der Beginn der Erkennbarkeit der Verformungsporen. Der Porenvolumenanteil in Bruchflächennähe kann nur soweit gemessen werden als der Querschnitt noch vollständig ist.

Bild 7: RA-Werte ab denen die Poren erkennbar sind (0,5 vol. %) bis zu den Maximalwerten (>vol. 5%) in Abhängigkeit der Prüftemperatur und der Brucheinschnürung.



4. Diskussion

Neben Sekundärausscheidungen (Nitride, Karbonitride) ist im Temperaturbereich um A_{r3} der verformungsinduzierte Ferrit für die Bildung des 2. Duktilitätsminimums verantwortlich. Bei der für diese Untersuchung verwendeten Charge konnte dieses im Temperaturbereich von 740°C - 760°C festgestellt werden. In diesem Bereich kann man anhand einer Bruchflächencharakterisierung mit REM einen interkristallinen Bruch mit Mikrodimpeln entlang der Austenitkörner erkennen (siehe Bild 3b). Die an den Austenitkorn Grenzen gebildeten Ferritsäume stellen die mikroduktilen Risspfade dar [3].

Mit der XCT war es nun möglich den Schädigungsmechanismus bzw. die Bildung von Poren ($>40\mu\text{m}$) dreidimensional an gebrochenen und unterbrochenen Proben darzustellen (siehe Bild 4 und 5).

Die Lokalisierung der Poren wurde mittels einer metallografischen Zielpräparation erreicht, die eine Risseinleitung im Korngrenzenferrit zeigt (siehe Bild 4).

Die Korrelation von Porosität und Querschnittsverminderung ergab eine „schnellere“ Porenbildung bei geringerer Dehnung für den Temperaturbereich des 2. Duktilitätsminimums als bei niedrigeren und höheren Temperaturen (siehe Bild 6a). Ein Einfluss der Dehnrate bezüglich Porenbildung konnte nicht festgestellt werden (siehe Bild 6b).

5. Schlussfolgerungen

- Poren mit Durchmesser $> 40 \mu\text{m}$ sind mit dem verwendeten Röntgen-Computertomograf in Proben $\leq 8\text{mm}$ Durchmesser gut quantifizierbar.
- Mittels Zielpräparation können die Poren im Gefüge lokalisiert und die Rissentstehung an Korngrenzenferrit nachgewiesen werden.
- Korrelation von Porosität und Querschnittsverminderung RA zeigt, dass mit $RA \geq 30\%$ die Porenbildung mit dem eingesetzten XCT ab $0,01\%$ erkennbar ist.
- Porenbildung bei den Temperaturen 740°C - 770°C setzt bei relativ geringer Dehnung ein.
- Bei 700°C - 710°C ist Porenbildung bereits im relativ großem Bereich der Gleichmaßdehnung erkennbar.
- Das Duktilitätsminimum korreliert mit einer Porenbildung bei geringer lokaler Dehnung.

Danksagung

Die Autoren danken der voestalpine Stahl AG für die Bereitstellung der Proben und die finanzielle Unterstützung.

Literaturverzeichnis

- [1] B. Mintz, J. Lewis, J.J. Jonas, “Importance of deformation induced ferrite and factors which control its formation”, Materials Science and Technology, Vol. 13, May 1997, pp 379-388
- [2] B. G. Thomas, J. K. Brimacombe, et al : “The formation of panel cracks in steel ingots: a state-of-the-art review”, ISS Transactions, Vol. 7, 1986, S7-20
- [3] B. Yang, H.P. Degischer, H. Presslinger, G. Xia, P. Reisinger, “Influence of Chemical Composition on High Temperature Tensile Properties of Carbon Steels”, BHM, Heft 9, 150.Jg.(2005), pp 313-320
- [4] B.Harrer, J. Kastner, A. Kottar, H. P. Dgischer,., “Charakterisierung von Inhomogenitäten in metallischen Gusswerkstoffen mittels 3D-Röntgen-Computertomografie“, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., (2007), ISBN: 978-3-931381-98-1; Paper-Nr. 94, 11 S.