

# Einsatz der 3D-Computertomographie für technische, archäologische/restauratorische und zoologische/botanische Anwendungen

## Use of 3D-computerized tomography for technical, archaeological/restorical and zoological/botanical applications

Dr. Irmgard Pfeifer-Schäller, Prof. Dr. Dr. h.c. Friedrich Klein  
Steinbeis TZ ARGE Metallguss/FH Aalen  
Gartenstrasse 131, D - 73430 Aalen  
Tel.: 07361/9274-42, Fax: 07361/9274-99

E-mail: [irmgard.pfeifer-schaeller@arge-metallguss.de](mailto:irmgard.pfeifer-schaeller@arge-metallguss.de), [www.arge-metallguss.de](http://www.arge-metallguss.de)

### Zusammenfassung:

Die dreidimensionale (Röntgen)-Computertomographie (3D-CT) stellt ein zerstörungsfreies Verfahren dar, daß viele Vorteile gegenüber den konventionellen Prüfverfahren wie z.B. die Radioskopie aufweist. Die 3D-CT liefert eine dreidimensionale Darstellung der äußeren Kontur und der inneren Struktur von Objekten. Durch die Konfiguration der verwendeten CT-Anlage kann eine hohe Ortsauflösung (hohe Detailerkennbarkeit) von bis zu 5 µm erreicht werden. In den **technischen Einsatzgebieten** ermöglicht dieses Verfahren u.a. die Qualitätsprüfung von Gußteilen. Außerdem kann es zur dreidimensionalen Porenuntersuchung von metallischen Schäumen genutzt werden. Im Bereich der **Archäologie und Restaurierung** können Fragestellungen bearbeitet werden, zu denen kein anderes Prüfverfahren in der Lage ist. Aufgrund der hohen Ortsauflösung können bei **zoologischen und botanischen Objekten** kleinste innere Strukturen zerstörungsfrei untersucht werden. In diesem Beitrag wird anhand von Beispielen die Einsatzfähigkeit der 3D-CT in oben aufgezeigten Anwendungsgebieten dargestellt.

### Abstract:

The three dimensional (x-ray)-computerized tomography (3D-CT) is a new non-destructive testing procedure which offers many advantages compared with conventional testing procedures (e.g. radioscopy). The 3D-CT offers a three dimensional presentation of internal and external geometries of objects. The configuration of the used CT-unit makes it possible to achieve a high spatial resolution (high detail perceptibility) up to 5 µm. In **technical applications** this procedure enables amongst others, quality testing of casting parts. Furthermore, it can be used for three dimensional testing of pores of metallic foams. It enables **archaeological and restoration** questions, which could not dealt with and answered by any other testing procedure. This is due to the high spatial resolution, which makes it possible to investigate smallest internal structures of **zoological and botanical objects** in a non-destructive way. In this work the usability of 3D-CT in the above mentioned applications will be demonstrated by examples.

## 1 Grundlagen zur (Röntgen)-3D-CT

Der industrielle (Röntgen)-3D-CT der Fachhochschule Aalen ist mit einer Röntgen-Mikrofokusröhre (10 - 225 kV, 0,1 - 3 mA, Brennfleck 2 µm - 230 µm bei 300 W) und einem Flächendetektor (1024 x 1024 Pixel) ausgestattet. Im Vergleich zur konventionellen 2D-CT können mit der 3D-CT kürzere Meßzeiten erreicht werden, wobei ein dreidimensionaler Scanner nach dem Prinzip der Kegelstrahl-Tomographie verwendet wird [1, 4]. Das dreidimensionale Tomogramm beinhaltet sowohl die Geometriedaten der Außenkontur des Bauteils als auch die Geometrie innerer, dreidimensionaler Strukturen. Es können innere Inhomogenitäten bezüglich Art, Größe, Zahl und Verteilung mit hoher Fehlererkennbarkeit dreidimensional erfaßt werden. Weiterhin sind Informationen über verschiedene Materialien innerhalb des Objekts vorhanden. Zur Visualisierung der Ergebnisse (Voxel-Daten) wird die Visualisierungssoftware VG Studio Max eingesetzt. Diese Software ermög-

licht durch entsprechende Tools die dreidimensionale Darstellung des Objektes sowie virtuelle Schnitte in drei Raumrichtungen (axial, frontal, sagittal). Es können Maße von innen liegenden Strukturen und Inhomogenitäten sowie Porositäten (Flächenporosität, Volumenporosität) ermittelt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit aus den Tomographiedaten (Voxel-Daten) Geometriedaten im Stereolithographie (STL)-Format zu erzeugen.

## 2 Versuchsdurchführung

Anhand verschiedener Objekte und Materialien aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen wird die breite Einsatzfähigkeit der 3D-CT aufgezeigt und ein Einblick in hierbei auftretenden Fragestellungen vermittelt. Hierzu werden ausgewählte CT-Abbildungen herangezogen.

Technische Anwendungen	Voxelgröße in mm
1. Gußteil mit Überläufen und Gießsystem aus der Magnesium-Legierung AZ91HP	0,2385
2. Metallischer Schaum aus einer Aluminium-Legierung	0,0827
Archäologische/restauratorische Anwendungen	
1. Löwenmensch aus Mammutzahn	0,3312
2. Fossiler Oberschenkelknochen eines Halbaffen	0,0419
3. Fossiler Innenohrknochen einer Fledermaus	0,0096
4. Mitras-Devotionalie aus einer Silber-Legierung	0,1270
5. Subfossiles Holz (Kiefernholz)	0,1168
Zoologische/botanische Anwendungen	
1. Oberschenkelknochen eines Brüllaffen	0,0732
2. Rezent es Holz mit Mistel (Pappelholz)	0,1168

Tab 1: Untersuchte Objekte und Materialien sowie Voxelgröße der CT-Messungen

Als Prüfverfahren wurde die (Röntgen)-3D-CT-Anlage HWM RayScan 200 (Firma Hans Wälischmiller) eingesetzt. Die einzelnen Meßparameter sind in [4] aufgelistet.

## 3 Ergebnisse der Untersuchung

### 3.1 Technische Anwendungen

#### 3.1.1 Gußteil mit Überläufen und Gießsystem

Stellvertretend für die Untersuchung von Gußteilen aus Leichtmetalllegierungen wurde ein Gußteil mit Überläufen und Gießsystem aus der Mg-Legierung AZ91HP gemessen. Ziel der Untersuchung war die dreidimensionale Erfassung innerer Inhomogenitäten, um im Rahmen der zerstörungsfreien Bauteilprüfung eine Optimierung des Druckgießprozesses und der Formauslegung vornehmen zu können. Die CT-Ergebnisse zeigen, daß im Gußteil Lunker und Einschlüsse vorhanden sind. Im anschnittsfernen Bereich sind große Lunker sichtbar, die durch eine unzureichende Nachspeisung verursacht werden. Die Überläufe sind wirksam positioniert und nehmen die Luft aus dem Formhohlraum auf.

#### 3.1.2 Metallischer Schaum

Am Beispiel eines metallischen Schaumes soll die dreidimensionale Darstellung der Porenverteilung aufgezeigt werden. Die zerstörungsfreie Bauteilprüfung hat das Ziel den Herstellungsprozeß zu optimieren. Metallische Schäume können als Einlegeteile im Automobilbereich z.B. bei Felgen eingesetzt, um Gewicht einzusparen. Das Einlegeteil nimmt durch die Porenwände, ähnlich wie bei Knochen, die wirkenden Kräfte auf und sorgt für ausreichende mechanische Steifigkeit. Die CT-Untersuchung zeigt, daß die Porengröße im metallischen Schaum stark variiert. Eine besonders große Pore weist einen Durchmesser von 17,284 mm auf. Die Wanddicke zwischen den Poren liegt im Bereich von 0,205 mm [4].

## 3.2 Archäologische/restauratorische Anwendungen

### 3.2.1 Löwenmensch

Beim sog. „Löwenmenschen“ handelt es sich um eine Skulptur, die aus ca. 200 Bruchstücken besteht und mit einer Wachsmasse zusammengeklebt wurde. Ein Arm und große Teile des Rückenbereiches fehlen, deshalb ist im Innern ein Stützstab aus Plexiglas eingefügt. Der Löwenmensch wurde in der Altsteinzeit, vor ca. 32.000 Jahren, aus Mammutzahn gefertigt und ist die älteste bekannte Darstellung eines Mensch-Tier-Mischwesens. Gefunden wurde sie 1931 in der Höhle „Hohlenstein-Stadel“ im Lonetal. Sie ist im Ulmer Museum ausgestellt. Ziel der CT-Untersuchung war es mit einem Meßverfahren sowohl den Zusammenbau der einzelnen Bruchstücke zu ermitteln als auch eine Replik des Löwenmenschen berührungslos herzustellen. Das konventionelle Kautschuk-Abdruckverfahren zu Herstellung einer Negativform kann nicht angewendet werden, weil die Oberfläche des Löwenmenschen sehr brüchig ist. Zusätzlich bietet die CT den Vorteil, daß empfindliche Objekte in einer Styropor-Verpackung gemessen werden können. In der frontalen Schnittdarstellung ist der Plexiglasstab, der einen dunkleren Grauwert als das Elfenbein aufweist, deutlich zu erkennen (Abb. 3). Der Grund liegt in der geringeren Dichte des Plexiglasstabes bzw. in der geringeren Absorption für Röntgenstrahlung. Aus den virtuellen, axialen 2D-Schnitten ist der Zwiebelschalenaufbau der Skulptur erkennbar [4]. Die Wachsmasse hebt sich durch den dunkleren Grauwert deutlich vom Elfenbein-Grauwert ab. Der durchgehende Nervenkanal in axialer Richtung zeigt, daß die Bruchstücke im Innern richtig zusammengeklebt wurden [4].

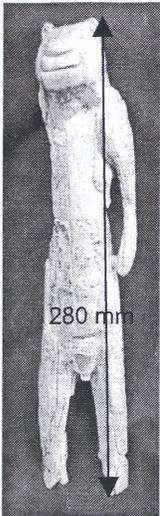


Abb. 1: Löwenmensch aus Mammutzahn

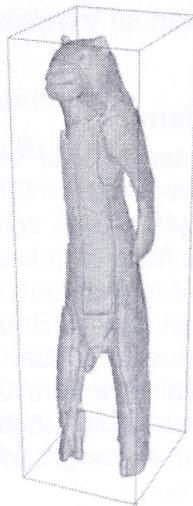


Abb. 2: Virtuelle 3D-Darstellung des Löwenmenschen (Voxel-Daten)



Abb. 3: Virtueller, frontaler 2D-Schnitt

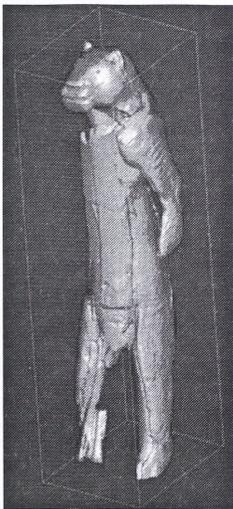


Abb. 4: Erzeugte STL-Daten

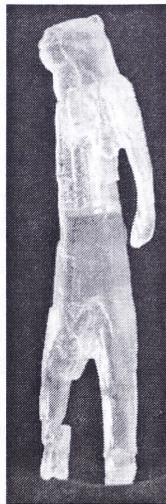


Abb. 5: Kunststoff-Replik

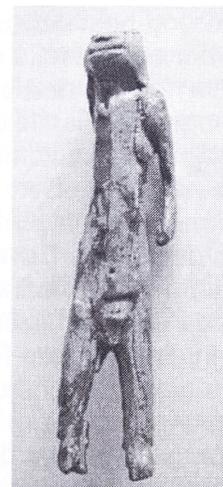


Abb. 6: Kolorierte Kunststoff-Replik

Aus den gemessenen Voxel-Daten können mit der Visualisierungssoftware STL-Daten (Triangulierte Punktwolke) erzeugt werden. Dieses Datenformat kann in die Stereolithographie-Anlage importiert und eine Kunststoff-Replik hergestellt werden. Um das gleiche Aussehen wie das Original zu erhalten, wurde diese Kunststoff-Replik in Handarbeit koloriert.

### **3.2.2 Fossiler Oberschenkelknochen eines Halbaffen**

Das fossile Bruchstück eines Oberschenkelknochens stammt vom Halbaffen „Notharctus tenebrosus“, der zu einer der ersten höher entwickelten Primatenarten zählt. Er lebte vor ca. 50 Millionen Jahren im tropischen Klima und hat sich kletternd und springend fortbewegt. Der Fund wurde in Süd-Wyoming gemacht und wurde zur Untersuchung vom National History Museum, New York zur Verfügung gestellt. Die Lagerung bewirkte eine Veränderung der chemischen Zusammensetzung des Knochens. Die Knochensubstanz besteht im fossilen Zustand aus Kupfer-Sulfat, in den Hohlräumen im Innern des Knochens hat sich Gips abgelagert. Teilweise sind noch ungefüllte Hohlräume vorhanden. Die CT-Untersuchung diente dem Zweck, die innere Struktur dreidimensional darzustellen. Aus der Verteilung der Knochenbälkchen (Trabekel) sollen Rückschlüsse auf die Bewegungsart dieses Halbaffen gezogen und Vergleiche mit heute noch lebenden Arten angestellt werden. Außerdem sollte der Erhaltungszustand des Knochens (Risse, Füllungen) untersucht werden. In der 3D-Darstellung ist die äußere Kontur des Oberschenkelknochens und die feine Struktur der Bruchstellen sichtbar. Die 2D-Schnitte geben Auskunft über die Trabekelverteilung im Gelenkbereich sowie vorhandene Risse und gefüllte innere Hohlräume. Durch die geringere Dichte und dem damit verbundenen dunkleren Grauwert im Vergleich zur Knochensubstanz hebt sich die Gips-Füllung im Bild deutlich ab [4].

### **3.2.3 Fossiler Innenohrknochen einer Fledermaus**

Die Kleinfledermaus der Gattung „Archäonycteris“ lebte vor ca. 49 Millionen Jahren (mittleres Eozän). Der Fund wurde 1999 in Südfrankreich gemacht. Die isolierte Cochlea (Innenohrknochen) ist bei Fossilien sehr selten zu finden. Das Objekt wurde vom Forschungsinstitut und Naturkundemuseum Senckenberg, Abteilung Messelforschung zur Untersuchung eingereicht. Für die CT-Messung wurde der Innenohrknochen auf einem Metallstift aufgeklebt. Ziel der CT-Messung war die innere Struktur dreidimensional darzustellen. Innere Struktur und Geometrie der Gehörschnecke geben im Vergleich zu lebenden Arten Auskunft über die Frequenz der Echoortung dieser Gattung. Anhand der Ergebnisse kann die exakte, innere Geometrie der Gehörschnecke (Maße der Gehörwindungen) untersucht werden. Damit ist die Möglichkeit gegeben, ohne Zerstörung des Meßobjektes und mit hoher Detaillierbarkeit (Voxelgröße 0,0096 mm) Vergleiche zu Innenohrknochen noch lebender Arten anstellen zu können.

### **3.2.4 Mitras-Devotionalie**

Zu untersuchen war eine verschmutzte und korrodierte Reliefplatte, die aus drei Bruchstücken einer Ag-Legierung bestand. Sie weist eine Dicke von ca. 0,4 mm auf. Die Reliefstruktur war nur teilweise sichtbar und Details der Mitras-Szene waren kaum erkennbar. Die Reliefplatte wurde im Frühjahr 2002 in einem neu entdeckten Mitrasheiligtum in einer ehemaligen römischen Zivilsiedlung bei Güglingen (Kreis Heilbronn) gefunden. Das Alter wurde auf ca. 300 Jahre nach Christus datiert. Das Objekt wurde vom Landesdenkmalamt Stuttgart zur Untersuchung eingereicht. Ziel der Untersuchung war die äußere Struktur dreidimensional darzustellen, um eine virtuelle Restaurierung vorzunehmen und anschließend berührungslos eine Replik herzustellen zu können. Die CT-Untersuchung der Mitras-Devotionalie zeigt, daß die virtuelle Restaurierung und berührungslose Replikerstellung von empfindlichen, korrodierten Metallgegenständen möglich ist. Durch das Ausblenden der Verschmutzung und der Korrosionsprodukte mit geringerer Dichte (geringerem Grauwert) kann eine virtuelle Restaurierung im CT-Tomogramm durchgeführt werden. Die erzeugten STL-Daten dienen dann zur Herstellung der Kunststoff-Replik im STL-Verfahren ohne zeitaufwändige Restaurierung (ca. 3 Wochen). Sie kann außerdem als Vorlage zur fachgerechten Restaurierung herangezogen werden.

### 3.2.5 Subfossiles Holz

Die subfossile Probe aus Kiefernholz wurde einem Baumstamm entnommen, der 2001 in einer Kiesgrube im Donautal (Tapfheim) gefunden wurde. Das Alter ist auf 12.000 Jahre datiert. Aufgrund der Lagerung mußte mit einem teilweisen Abbau des Holzes gerechnet werden. Das Holzstück weist im Vergleich zu einem rezenten Kiefernholz eine veränderte Holzzusammensetzung und Struktur auf. Auftraggeber der CT-Untersuchung war die Universität Hohenheim, Institut für Botanik. Ziel war die dreidimensionale Darstellung der inneren Struktur von subfossilem Holz, um Informationen zum Erhaltungszustand und zur Bestimmung der Holzart zu erhalten. Außerdem sollte die Einsatzfähigkeit zur Erzeugung von dendrochronologischen Schnitten getestet werden. Die Ergebnisse zeigen, daß mit der CT Risse und Verschmutzungen im Holz nachgewiesen werden können. Die unterschiedlichen Grauwerte der Maxima innerhalb des Querschnittes geben Hinweise zum Grad des Holzabbaus. Im helleren Bereich der Maxima (d.h. höhere Dichte des Holzes) kann von einem geringeren Holzabbau ausgegangen werden. Vergleichsmessungen an anderen Holzarten haben ergeben, daß die virtuellen 2D-Schnitte charakteristische Strukturen der Jahresringe aufweisen, die eine Holzartenbestimmung ermöglichen. Die CT-Untersuchung zeigt ebenfalls, dass die virtuellen, axialen Schnitte für die zerstörungsfreie Dendrochronologie genutzt werden können. Bei der klassischen Dendrochronologie müssen die Objekte zersägt werden, wodurch dieses Verfahren häufig nicht zur direkten Altersbestimmung von archäologischen Objekten eingesetzt werden kann. Hier bietet die hochauflösende 3D-CT neue Möglichkeiten an, um an jeder beliebigen Stelle von sehr wertvollen archäologischen Holzobjekten eine zerstörungsfreie Altersbestimmung vornehmen zu können [4].

## 3.3 Zoologische/botanische Anwendungen

### 3.3.1 Oberschenkelknochen eines Brüllaffen

Der rezente (neuzeitliches) Oberschenkelknochen des weiblichen roten Brüllaffen „*Alouatta seniculus*“ stammt aus neuerer Zeit. Das Tier wurde im Amazonasgebiet als Wildfang geschossen. Das Objekt wurde vom Forschungsinstitut und Naturkundemuseum Senckenberg, Abteilung Paläoanthropologie zur CT-Messung eingereicht. Ziel der Untersuchung war die Trabekelverteilung dreidimensional zu erfassen, um Rückschlüsse auf die Fortbewegungsart ziehen zu können. Mit Hilfe dieser Informationen können Rückschlüsse auf die Fortbewegungsart ausgestorbener Arten gezogen werden. Beim rezenten Knochen ist in den 2D-Schnitten Knorpelmasse sichtbar, die einen geringeren Grauwert (geringere Dichte) als der Knochen hat. Aufgrund der Voxelgröße von 0,0732 mm sind sehr dünne Trabekel und sehr kleine Hohlräume im Knochen erkennbar [4].

### 3.3.2 Rezentes Holz mit Mistel

Bei diesem Objekt handelt es sich um ein rezentes Pappelholzstück mit einer Mistel. Der Baum wurde im Juni 2001 bei Meistratzheim (Elsaß) gefällt. Um das Holz gegen Austrocknung zu schützen, war es in einer Verpackungsfolie eingeschweißt. Es wurde von der Universität Hohenheim, Institut für Botanik zur Verfügung gestellt. Bei dieser CT-Untersuchung war die innere Struktur von Interesse. Es sollte das Mistelwachstum im Wirt untersucht werden. Die CT eignet sich zur Untersuchung des Mistelwachstums im Wirtsholz. Der Aufbau des Pappelholzes und das Haustorium (wurzelförmiges Organ) der Mistel ist gut erkennbar. Im Vergleich zur konventionellen Methode, bei der die Struktur als dünner Schnitt im Mikroskop betrachtet wird, liefern die CT-Schnitte zusätzlich Dichteinformationen in Form von Grauwerten. Der helle Bereich mit höherer Dichte um das Haustorium ist bei der konventionellen Untersuchungsmethode nicht sichtbar und stellt deshalb eine neue Information für die Botaniker dar. Die Mistel bewirkt eine deutliche Dichteerhöhung beim Wirtsholz im Bereich des Haustoriems [4].

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die CT eignet sich zur Untersuchung von Prototypen, zur Stichprobenprüfung bei der Serienfertigung von Bauteilen oder für werkstoffkundliche Fragestellungen im Werkstofflabor [2,3]. Sie gibt Auskunft über Speisung, Gasporosität, Risse und Einschlüsse. Die Inhomogenitäten können dreidimensional dargestellt sowie hinsichtlich ihrer Größe und Verteilung untersucht werden. Diese Ergebnisse können zur Prozessoptimierung und für die konstruktive und wärmetechnische Formoptimierung von Gußteilen genutzt werden.

Metallische Schäume zeichnen sich durch hohe Energieabsorptionsfähigkeit und Steifigkeit sowie geringe Dichte aus. Diese Eigenschaften sind von der Größenverteilung der Poren, der Porenform und von der Schaumdichte abhängig. Mit der CT können die Poren dreidimensional dargestellt werden. Damit steht ein zerstörungsfreies Verfahren zur Verfügung, das die Optimierung des Herstellungsprozesses ermöglicht. Neben den o.g. technischen Anwendungen hat sich die CT auch für die zerstörungsfreie Untersuchung von Zugproben [2], Schweißnähten, Verbundwerkstoffen, Sensoren, Kunststoffteilen, Probestücken aus Bauteilen (Mikro-CT als Alternative für die metallographische Schliiffuntersuchung) bewährt. Die zunehmende Nachfrage bei technischen Teilen verschiedenster Art, mit den unterschiedlichsten Fragestellungen, weist darauf hin, daß das Einsatzgebiet der CT bei technischen Anwendungen sehr breit ist. Häufig können diese Fragestellungen nicht mit konventionellen Prüfverfahren (z.B. Radioskopie, metallographische Schliiffuntersuchung) bearbeitet werden.

Bei den archäologischen/restauratorischen Anwendungen bietet die CT dreidimensionale Informationen über innere und äußere Strukturen. Beispielsweise kann das Zusammenfügen von Bruchstücken, der Erhaltungszustand von Holzobjekten oder der Aufbau von Knochen untersucht werden. Die CT eignet sich auch für die zerstörungsfreie Dendrochronologie. Die erzeugten Geometriedaten der äußeren Kontur können zur Herstellung von Replikaten im Stereolithographieverfahren verwendet werden. Außerdem können korrodierte und verschmutzte Metallobjekte virtuell restauriert werden. Die Vorteile der CT sind im Bereich der Archäologie und Restaurierung noch wenig bekannt. Jedoch zeigt das zunehmende Interesse an diesem Verfahren, daß die Möglichkeiten in diesem Bereich noch lange nicht ausgeschöpft sind. Auch im Hinblick auf die „virtuelle Archäologie“, bei der archäologische Gegenstände in einer virtuellen Welt betrachtet werden können, kann die CT einen wichtigen Betrag leisten. Auch bei der Präsentation von Objekten im Museum z.B. in Form von Computeranimationen oder Filmpräsentationen bietet die CT neue Horizonte. Zusätzlich könnte die CT das Museumsmarketing unterstützen, so können z.B. maßstabgerechte oder verkleinerte Replikate für gewerbliche Zwecke erstellt werden.

Im Bereich der zoologisch/botanischen Anwendungen ermöglicht die CT die zerstörungsfreie Untersuchung der inneren Struktur. Der Vergleich der Knochenstruktur von ausgestorbenen zu lebenden Arten läßt Rückschlüsse zur Fortbewegungsart zu. Die CT bietet neben zerstörungslosen Schnitten in einem Wirtsholz zusätzlich noch Dichteinformationen z.B. über das Mistelwachstum.

## 5 Literaturverzeichnis

[1] M. Simon, u.a.: 3D-Computertomographie, 22. Aalener Gießereisymposium, 09./10.05.2001, bei der ARGE-Metallguss in Aalen

[2] I. Pfeifer-Schäller u.a.: Werkstoffeigenschaften bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten, Einsatz eines Laserextensometers, 23. Aalener Gießereisymposium, 24./25.04.2002, bei der ARGE-Metallguss in Aalen

[3] I. Pfeifer-Schäller u.a.: Erfahrungen beim Einsatz der Computertomographie, Zerstörungsfreie Bauteilprüfung, 23. Aalener Gießereisymposium, 24./25.04.2002, bei der ARGE-Metallguss in Aalen

[4] I. Pfeifer-Schäller u.a.: Erfahrungen beim Einsatz der Computertomographie, Beispiele für technische, archäologische/restauratorische und zoologische/botanische Anwendungen, 24. Aalener Gießereisymposium, 09./10.04.2003, bei der ARGE-Metallguss in Aalen