

## **Mikro-Computertomographie für die Charakterisierung und Vermessung von Mikrobauteilen**

J. Kastner\*, E. Schlotthauer\*, D. Salaberger\*, M. Simon\*\*, C. Sauerwein\*\*  
\*FH O.Ö. Forschungs- und Entwicklungs GmbH, FH Studiengänge Wels, (A);  
\*\*Hans Wälischmiller, Markdorf

Die Mikrosystemtechnik ist eine Schlüsseltechnologie für viele Industriezweige geworden. Die Palette von Mikrobauteilen beinhaltet elektronische, mechanische, optische und fluidische Produkte, die aus unterschiedlichsten Kunststoffen, Metallen oder aus Silizium hergestellt werden. An die Methoden für die Qualitätssicherung hinsichtlich der Prüfung werkstofflicher Fehlerfreiheit und der Messung geometrischer Maßhaltigkeit sind in der Mikrosystemtechnik außerordentliche Anforderungen gestellt.

Mikro-3D-Röntgen-Computertomographie ( $\mu$ -CT) ist eine radiographische zerstörungsfreie Methode, um Werkstückdetails in drei Dimensionen zu lokalisieren. Ein CT-Scanner erzeugt eine Reihe von Röntgen-Absorptionsmessungen, die benutzt werden, um ein rekonstruiertes 3D-Bild des Objektes zu erzeugen.  $\mu$ -CT kann man einerseits einsetzen, um Bauteile zerstörungsfrei auf eventuelle Fehler zu prüfen und andererseits kann man die Bauteile in drei Dimensionen geometrisch vermessen.

In dieser Publikation untersuchen wir die Anwendungsmöglichkeiten von  $\mu$ -CT für die Charakterisierung und Vermessung von Mikrobauteilen. Wir erörtern diverse Beispiele und berichten über typische Werkstoff- und Bauteilfehler, die mit CT detektiert werden können. Ein weiterer Aspekt ist die Messung von geometrischen Größen wie z.B. Abstände, Dickenprofile und Bohrungsdurchmesser. Wir berichten, auf welche Art und Weise und mit welcher Genauigkeit Geometrien messbar sind. Die Messergebnisse und insbesondere die erreichbaren Genauigkeiten werden mit alternativen Messverfahren verglichen.

Es werden die Grenzen der konventionellen 3D-Computertomographie in Bezug auf Mikrobauteile aufgezeigt und darüber hinaus die Anwendbarkeit einen neuen CT-Messmodus für flache Bauteile (Region of Interest-CT-Modus) auf die Problemstellungen der Mikrosystemtechnik untersucht. Dieser Messmodus ist insbesondere in der Si-basierten Mikrosystemtechnik sehr relevant, weil hier häufig planare Strukturen wie z.B. Elektronikleiterplatten oder Strukturen auf einem Si-Wafer zu prüfen sind.

Key Words: Computertomographie, 3D-Verfahren, Mikrosystemtechnik, Radiographie

Jahrestagung der DGZfP, 2.-4. Mai 2005, Rostock

## 1. Einleitung

Die Mikrosystemtechnik (MST) ist eine Schlüsseltechnologie für viele Industriezweige wie Elektronik, Telekommunikation, Sensorik, Optik, Medizintechnik und dergleichen. Sie beinhaltet eine hohe Wertschöpfung und hat hohe Wachstumsraten im zweistelligen Prozentbereich[1]. In der MST werden diverse Technologien wie LIGA-Technik (LIGA=Lithographie, Galvanoformung, Abformung), Mikrospritzguss, Mikrobearbeitung (Mikrofräsen, Mikrobohren, Laserbearbeitung,...) und verschiedene Silizium-basierte Technologien (Lithographie, Epitaxie, Ätzen,...) eingesetzt. Aufgrund der engen Toleranzen sind hierbei sehr hohe Anforderungen an die Prozessbeherrschung und an die Mess- und Prüftechnik gestellt.

Mikro-Röntgen-Computertomographie ( $\mu$ -CT) ist eine radiographische zerstörungsfreie Methode, um Bauteil- und Werkstoffdetails in drei Dimensionen zu lokalisieren und zu vermessen[2,3]. Ein CT-Scanner erzeugt eine Reihe von Röntgen-Absorptionsmessungen, die benutzt werden, um ein rekonstruiertes 3D-Bild des Objektes zu erzeugen.

Bei der konventionellen CT muss sich das Objekt während der Messung immer im Strahlkegel befinden. Daher ist die maximale Auflösung durch den verwendeten Detektor und den Objektdurchmesser beschränkt. Bei einem 1024x1024 Matrixdetektor ist die typische Auflösung etwa 1/1000 des Objektdurchmessers bzw. minimal etwa 5  $\mu$ m, was dem minimalen Spotdurchmesser der Mikrofokusröhre entspricht[2-4]. Es gibt eine Reihe von Anwendungen in der Industrie, wo diese Einschränkung von großem Nachteil ist. Die Firma Wälischmiller entwickelte vor kurzem eine erweiterte Rekonstruktionsmethode, die auch Region of Interest-CT (ROI-CT) genannt wird[5]. Diese CT-Methode ist vor allem für flache Teile gut geeignet. Hierbei ist es möglich sich in das Objekt zu „zoomen“ und eine Auflösung von 1/10.000 des Objektdurchmessers und mehr zu erreichen. ROI-CT ist vor allem für Mikrosystemtechnik- und Elektronikbauteile sehr relevant, weil hier viele planare Technologien eingesetzt werden.

Im Rahmen dieser Publikation untersuchten wir verschiedene Applikationen für konventionelle 3D-CT und für ROI-CT aus der Mikrosystemtechnik (LIGA-Bauteile, mikrogebohrte Bauteile und Dickschichtstrukturen) und aus der Elektronik (PC-Leiterplatte und Handy-Elektronik). Hierbei ging es einerseits um zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, wobei Defekte und Materialstrukturen im 10  $\mu$ m-Bereich charakterisiert wurden und andererseits um die geometrische Information von verborgenen Flächen und steilen Flanken, die sonst mit keiner Messmethode zerstörungsfrei erreichbar sind.

## 2. Experimentelles

Die untersuchten Bauteile waren eine Zahnradformstruktur aus Kunststoff und ein Zahnrad aus Metall, die mittels LIGA-Technik hergestellt wurden. Kritische Größen sind hierbei die materialfreien Zwischenräume der Polymerstruktur, die in einem nachfolgenden galvanischen Prozessschritt mit Metall ausgefüllt werden. Die kritischen Dimensionen sind hierbei 35  $\mu$ m bei einer Höhe von 1 mm. Weiters wurden ein Aluminiumbauteil mit mehreren Bohrungen (Durchmesser etwa 1 mm, 0,3 mm und 0,2 mm), die mit einer präzisen Hochgeschwindigkeits-Mikrobohrmaschine hergestellt worden sind, untersucht. Die Streuung der Durchmesser der verschiedenen Bohrungen beträgt  $\pm 3 \mu$ m bis  $\pm 1,5 \mu$ m je nach Bohrungsdurchmesser. Dies wurde durch optische Messungen überprüft. Für die

Bestimmung der mittleren Durchmesser aus den CT-Daten wurden ein Standardgradientenverfahren, ein Verfahren von Otsu[6] und das kürzlich publizierte Thresholding-Verfahren von Obrist et al[7] verwendet. Darüber hinaus wurde die Schichtstruktur aus verschiedenen Materialien eines Standardlaminatbodens untersucht. Aus dem Elektronikbereich wurden eine Leiterplatte eines Personalcomputers (Größe 290 mm x 220 mm) mit diversen Elektronikbauteilen und die Elektronik eines kommerziellen Mobiltelefons untersucht.

Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenfassung der untersuchten Objekte:

Bauteil	Material	Herstellungsverfahren	Auflösung ( $\mu\text{m}/\text{Voxel}$ )
Mikrozahnradformstruktur	Polymer	LIGA	13
Mikrozahnrad	Metall	LIGA	6,6
Mikrobohrbauteil	Aluminium	Mikrobohren	29
Laminat-Schichtstruktur	Melamin/ Korund/ Holz		6,6
PC-Leiterplatte	Diverse		74 (ROI-CT)
Handy-Elektronik	Diverse		62 ( $\mu$ -CT) 16 (ROI-CT)

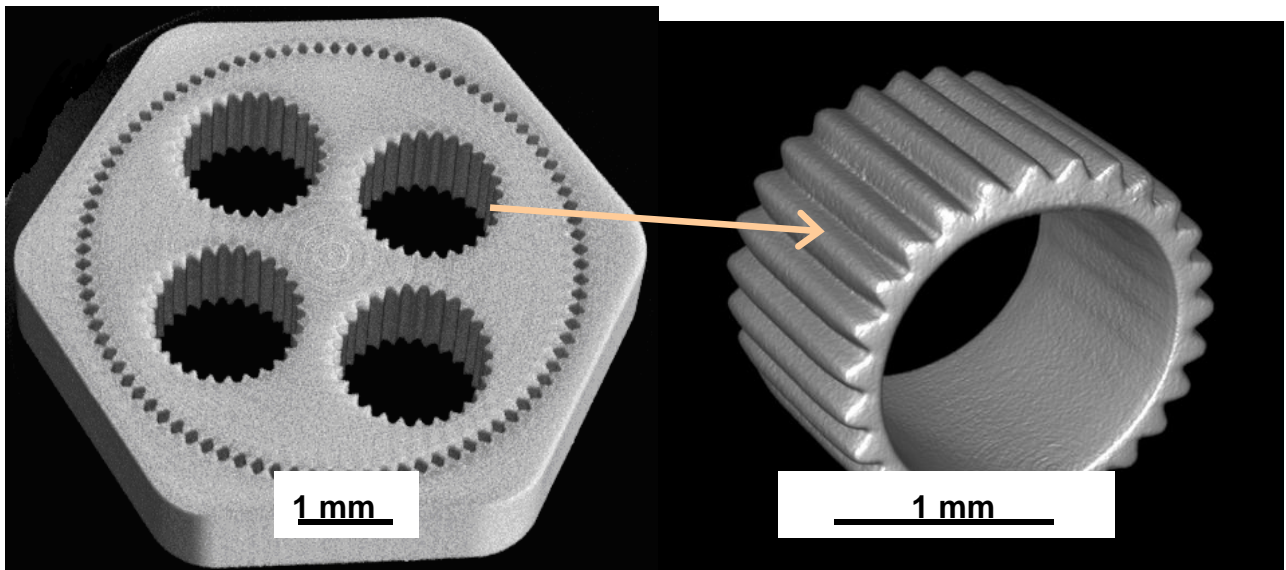
**Tabelle 1:** Übersicht über die untersuchten Bauteile und die erzielten Auflösungen bei den CT-Messungen.

Die Computertomographiemessungen (3D-CT und Region-of-Interest-CT) wurden mit einem Rayscan 250 E 3D-CT-System der Fa. Wälischmiller durchgeführt. Hierbei wurde eine 225 keV Mikrofokusröhre und ein 1024x1024 a-Si Flachbettdetektor verwendet [2,4]. Die verwendete Röntgenenergie der Röhre war im Bereich 160-200 keV. Der Röhrenstrom und die Vergrößerung wurden so gewählt, dass die Gesamtauflösung des Systems in dem in Tabelle 1 angeführten Bereich lagen. Typische Messzeiten waren 25-40 min.

### 3. Ergebnisse

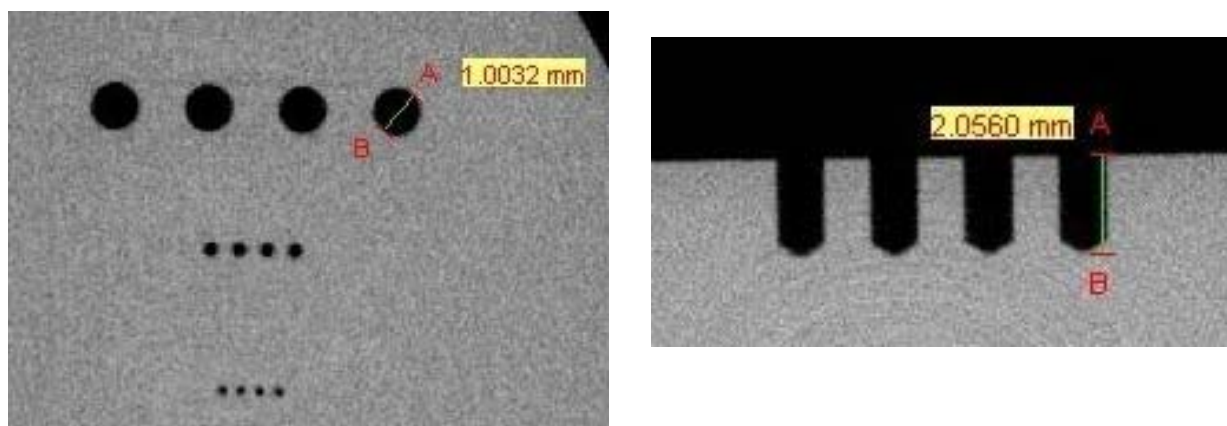
#### Anwendungsbeispiele Mikrosystemtechnik

Das linke Bild in Abb. 1 zeigt eine 3 D-CT-Aufnahme einer Polymerstruktur, die für die Herstellung von Zahnrädern verwendet wird. In den Luftzwischenräumen wird in einem nachfolgenden galvanischen Prozessschritt Metall eingebracht, das zu Zahnrädern wie in Abb 1. rechts dargestellt führt. Die Abstände in den Hohlräumen und die geometrischen Daten des Zahnrades können mit CT gut bestimmt werden. Zusätzlich können eventuelle Verunreinigungen im Polymer oder Hohlräume im Metall detektiert werden. So wurden in der Polymerstruktur vereinzelt Verunreinigungen mit einer höheren Dichte als die der Polymermatrix detektiert. Sie haben einen mittleren Durchmesser von 15-25  $\mu\text{m}$ .



**Abb. 1.** 3D-CT-Aufnahmen der Polymergrundstruktur (Auflösung 13  $\mu\text{m}$ , links) und eines Metallzahnrades, das mittels LIGA-Technik hergestellt wurde (Auflösung 6,6  $\mu\text{m}$ , rechts).

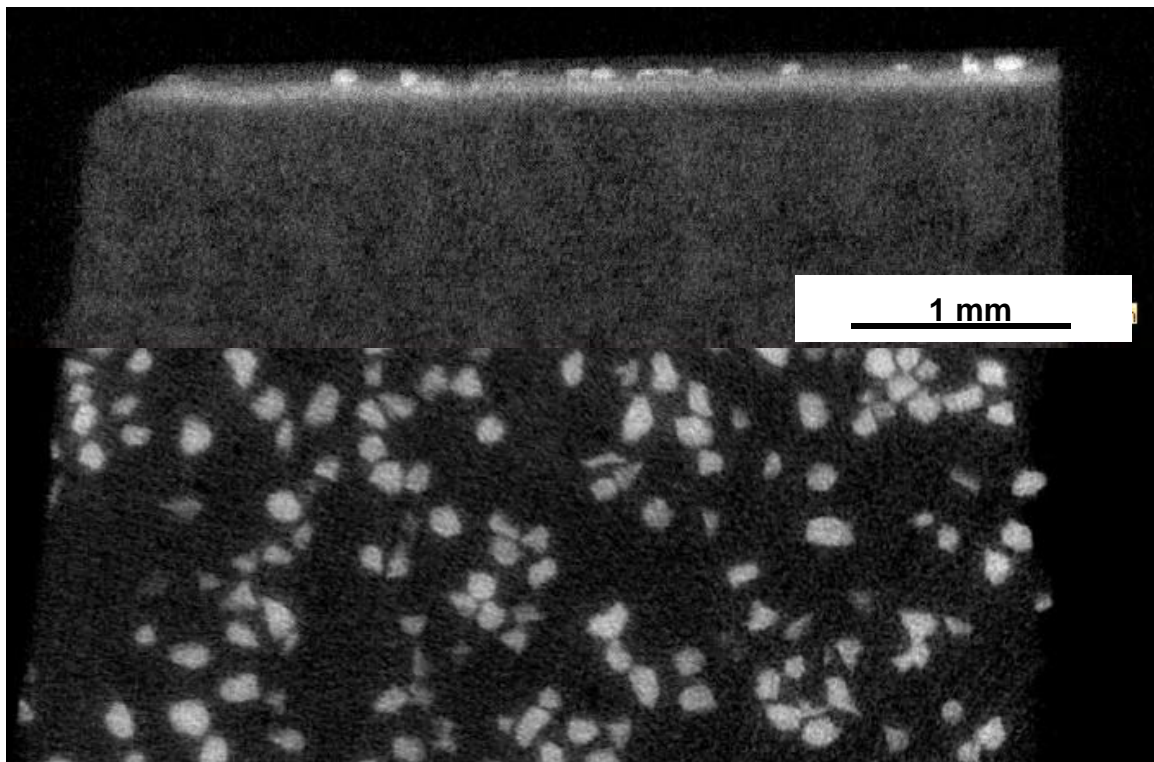
In Abb. 2 sind CT-Schnittbilder parallel und normal zur Bohrebene von verschiedenen Mikrobohrungen in Aluminium dargestellt. Es sind jeweils 4 Bohrungen des gleichen Durchmessers von etwa 1 mm, 0,3 und 0,2 mm vorhanden. In der rechten Abbildung ist gut zu erkennen, dass die Rundheit der Bohrungen über die gesamte Zylindertiefe sehr gut ist. Aus den CT-Daten von Abb.2 wurden die mittleren Durchmesser der Bohrungen mit verschiedenen Verfahren bestimmt und mit optischen Messdaten verglichen. Dies ist in Tab. 2 zusammengefasst. Es ist für alle Bohrungen eine gute Übereinstimmung zwischen den optischen Messungen und den CT-Messungen zu beobachten. Die Unterschiede sind nicht größer als etwa 15  $\mu\text{m}$ , was der halben Auflösung der CT-Messung entspricht.



**Abb. 2.** CT-Aufnahmen von Mikrobohrungen in Aluminium mit einer Auflösung von 29  $\mu\text{m}$ . Das CT-Schnittbild zeigt jeweils 4 Mikrobohrungen mit einem Durchmesser von etwa 1 mm, 0,3 und 0,2 mm. Das Bild rechts zeigt das CT-Schnittbild parallel zu den Bohrungen.

Durchmesser optisch bestimmt [ $\mu\text{m}$ ]	Durchmesser mit CT bestimmt [ $\mu\text{m}$ ]	Mittlere Abweichung [ $\mu\text{m}$ ]
$1040 \pm 3 \mu\text{m}$	$1035 \pm 18 \mu\text{m}$	-5
$320 \pm 2,2 \mu\text{m}$	$310 \pm 13 \mu\text{m}$	-10
$206 \pm 1,5 \mu\text{m}$	$214 \pm 16 \mu\text{m}$	8

**Tabelle 2:** Bestimmung der Durchmesser der Mikrobohrungen mit einem optischen Mikroskop und aus den CT-Messungen. Die Auswertung der CT-Messung erfolgte mit drei verschiedenen Verfahren. Der Mittelwert der Ergebnisse ist hier angeführt.



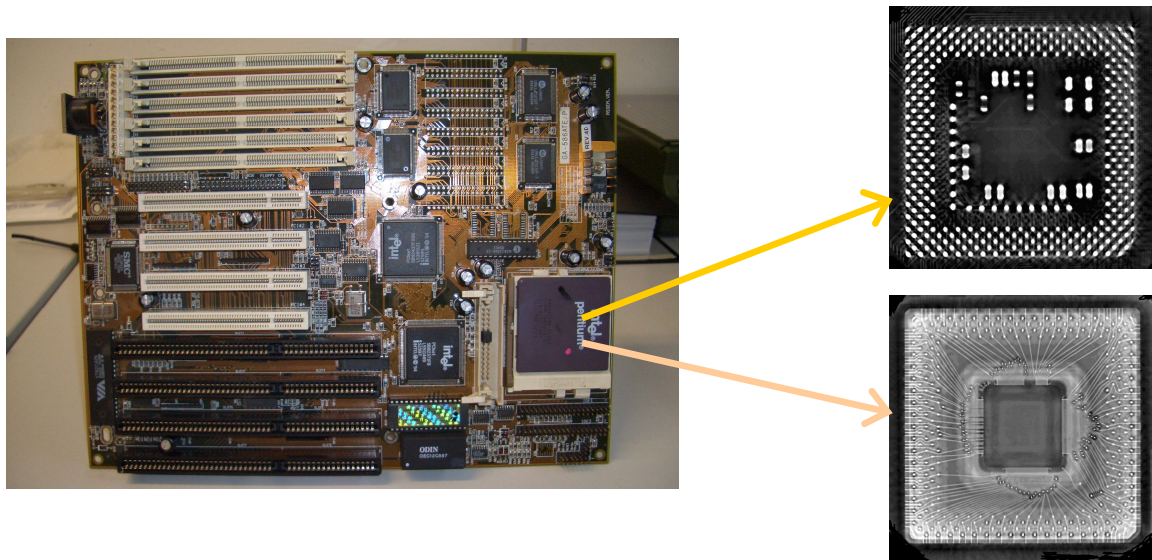
**Abb. 3:** CT-Schnittbilder (Auflösung  $6,6 \mu\text{m}$ ) eines Laminatbodens, normal (oben) und parallel (unten) zur Oberfläche. Der Laminatboden besteht aus einer Melaminschutzschicht mit Korundpartikeln, darunter aus einer Dekorationsschicht mit etwas höherer Dichte und dem Substrat, das aus einem Holzgrundwerkstoff besteht.

Abb. 3. zeigt die CT-Schnittbilder normal und parallel zur Oberfläche einer Laminatstruktur. Im Schnittbild normal zur Oberfläche ist die Schichtstruktur bestehend aus Melaminschutzschicht mit Korundpartikeln, aus der darunterliegenden Dekorationsschicht und der Holzgrundplatte gut zu erkennen. Die Korundpartikel heben sich deutlich von der umgebenden Matrix ab, weil sie eine viel höhere Dichte haben. Das CT-Schnittbild parallel zur Oberfläche zeigt gut die Verteilung der Korundpartikel. Diese Partikel haben eine mittlere Größe von etwa  $50 \mu\text{m}$ .

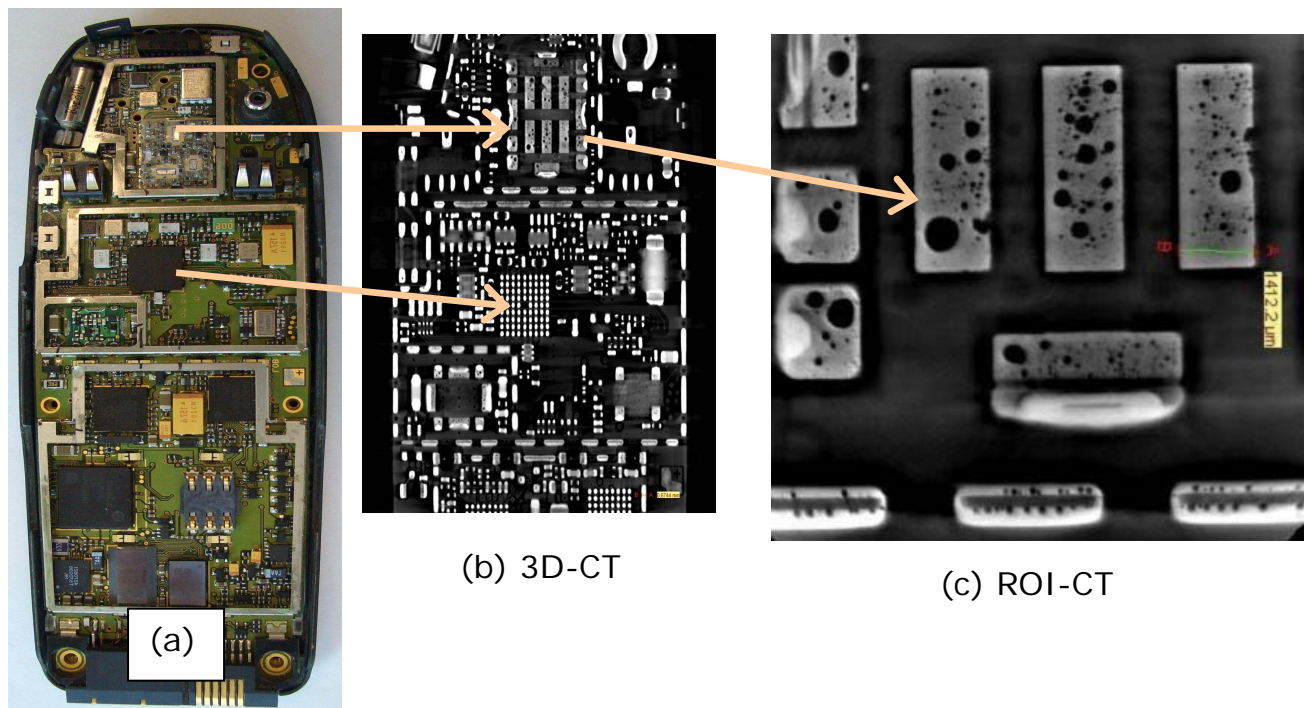
### Anwendungsbeispiele Elektronik

In Abb 4. links ist ein optisches Bild eines Motherboards für einen PCs inklusive diverser elektronischer Bauelemente und einem Intel Pentium-Prozessor abgebildet.

Rechts davon sind zwei ROI-CT-Schnittbilder des Pentium ICs aus verschiedenen Tiefen dargestellt. Die erreichte Auflösung war hierbei  $74\ \mu\text{m}$ , was 1:4000 (=Verhältnis Auflösung zu Objektdimension) entspricht. Dies ist deutlich höher als bei konventioneller 3D-CT. In den CT-Schnittbildern sind deutlich die Leiterbahnen, Kontaktierungen und Metalldrähte zu erkennen.



**Abb. 4.** Motherboard (Größe 290 mm x 220 mm) eines PCs mit Pentium IC und zwei ROI-CT-Schnittbilder des Pentium-ICs. Die CT-Aufnahmen wurden mit einer Auflösung von  $74\ \mu\text{m}$  gescannt.



**Fig. 5.** Optisches Bild des elektronischen Innenlebens eines Handys (a), 3D-CT-Schnittbild der Elektronik des Handys, Auflösung  $62\ \mu\text{m}$  (b) und ROI-CT-Schnittbild der Elektronik des Handys mit Darstellung von porösen Klebeflächen, Auflösung  $14\ \mu\text{m}$ , 1:6000 (c).

Abb. 5(a) zeigt das elektronische Innenleben eines kommerziellen Mobiltelefons. Es sind verschiedene Bauelemente wie Sendeeinheit, Mikroprozessor, BGA-Gehäuse und dergleichen zu erkennen. Abb.5(b) zeigt eine konventionelle 3D-CT-Aufnahme des Mobiltelefons mit einer Auflösung von  $62\ \mu\text{m}$  und Abb. 5(c) eine ROI-CT-Aufnahme eines Detailbereichs, wo eine Auflösung von  $14\ \mu\text{m}$  erreicht wurde, was 1:6000 entspricht. Die Darstellungen der CT-Messungen zeigen alle den Bereich einer Klebestelle mit Klebstoff und großen Luftporen. Durch die bedeutend höhere Auflösung sind in der ROI-CT-Aufnahme viel mehr Details zu erkennen.

#### 4. Diskussion

Die angeführten Beispiele zeigen, dass CT sehr sinnvoll für die Charakterisierung und Vermessung von Mikrobauteilen aus der Mikrosystemtechnik und für die Charakterisierung von Elektronikbauteilen eingesetzt werden kann. Neben der Zerstörungsfreiheit bietet die Computertomographie eine Reihe von zusätzlichen Vorteilen.

Zum einen können mit CT viele Werkstofffehler detektiert werden wie z.B. metallische Einschlüsse in einer Polymermatrix oder Poren in einem Klebstoff. Im Normalfall kann man Defekte ab einer Größe, die der doppelten CT-Auflösung entspricht, detektieren. Zum anderen kann man mit CT die Materialverteilungen studieren, ohne die Probe zerstören zu müssen. Allerdings ist hier ein Unterschied in der Röntgenabsorption der verschiedenen Materialien notwendig. So hat man in dem Laminatboden die Verteilung der Korundpartikel und den Aufbau der Einzelschichten gut charakterisieren können, weil hier ein deutlicher Dichte- und damit Röntgenabsorptionsunterschied vorhanden ist.

Ein weiterer Anwendungsbereich von CT ist die geometrische Vermessung insbesondere von verborgenen Innenflächen oder von Strukturen, die von außen kaum zugänglich sind wie etwa Bohrungen. So konnte gezeigt werden, dass es mit CT möglich ist, den mittleren Innendurchmesser von Bohrungen mit einer Genauigkeit von  $15\ \mu\text{m}$  zu messen. Diese Genauigkeit entspricht in etwa der halben Auflösung der CT-Messung. Ob es möglich ist noch höhere Genauigkeiten zu erreichen, ist nicht bekannt, da derzeit die Streuung zwischen den einzelnen Auswerteverfahren noch zu groß ist und ein genaues und gleichzeitig robustes Auswerteverfahren noch nicht entwickelt worden ist.

In der Mikrosystemtechnik und in der Elektronik gibt es eine Reihe von flachen Bauteilen, wo die Grenzen der CT-Messmethode in Bezug auf das Verhältnis Objektgröße zu minimaler Auflösung die Anwendungsmöglichkeiten stark einschränken. Hier erweitert der ROI-CT-Messmodus sinnvolle Anwendungsbereiche beträchtlich. Dies ist für die Elektronikindustrie ein sehr großer Vorteil, weil es hier sehr viele planare Objekte wie Leiterplatten oder Si-Wafer gibt. Als Beispiel wurden eine Leiterplatte und die Elektronik eines Mobiltelefons tomographiert. Mit ROI-CT sind Auflösungen von bis zu 1:10.000 (=Verhältnis Auflösung zu Objektdurchmesser) und besser möglich, im Vergleich dazu erreicht man mit herkömmlicher 3D-Computertomographie 1:1000.

## 5. Zusammenfassung

Wir haben die Anwendungsmöglichkeiten von  $\mu$ -CT und des Region-of-Interest-CT-Messmodus in der Mikrosystemtechnik und Elektronik untersucht. Für  $\mu$ -CT gibt es eine Reihe von sehr sinnvollen Anwendungen in der Mikro-Systemtechnik und Mikroelektronik wie die geometrische Vermessung von verborgenen Flächen und Bohrungen und die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung (Defekte, Materialverteilungen udgl.). Die Region-of-Interest-CT für flache Bauteile erweitert aufgrund der „Zoom-Möglichkeit“ die Anwendungsbereiche von CT beträchtlich. Es sind hiermit Auflösungen bis zu 1:10000 (=Verhältnis Auflösung zu Objektgröße) sehr gut möglich. In der Zukunft werden sicher noch eine Reihe von weiteren Applikationen gefunden werden, wo CT-Verfahren deutliche Vorteile bieten.

**Danksagung:** Diese Arbeit wurde vom FH-Plus Programm der FFG als auch von der europäischen Union (IPC-OCT CRAFT: COOP-CT-2003-507825) unterstützt. Wir danken den Firmen micro resist technology GmbH und UAR GmbH für das Überlassen der Proben aus Abbildung 1 und 3.

## Referenzen

- (1) MST news, International Newsletter on Microsystems and MEMS, VDI/VDE-IT, Teltow, Germany, [www.mstnews.de](http://www.mstnews.de)
- (2) M. Simon and Ch. Sauerwein, „Cone Beam Tomography for Quality Control and Rapid Product Development“, Insight 42, 651-655, 2000.
- (3) J. Kastner, E. Schlotthauer, P. Burgholzer and D. Stifter, „Comparison of optical coherence tomography and X-ray computed tomography for characterisation of glass-fibre polymer matrix composites“, World Conference on Nondestructive Testing, August 30 – September 3, 2004, Montreal, Canada.
- (4) Proceedings International Symposium on Computerized Tomography for Industrial Applications and Image Processing in Radiology, edited by. J. Goebbels and Z. Zscherpel, ISBN 3-931381-48-X, Berlin, June 23-25, 2003.
- (5) M. Simon, C. Sauerwein, and I. Tiseanu, „Extended 3D CT Method for the Inspection of Large Components“, World Conference on Nondestructive Testing, August 30 – September 3, 2004, Montreal, Canada.
- (6) NA. Otsu; „Threshold selections methods from gray-level histogram“, IEEE Trans. Syst. Man. Cybern 9, 63-68, 1979.
- (7) A. Obrist, A. Flisch and J. Hofmann, „Point cloud reconstruction with sub-pixel accuracy by slice-adaptive thresholding of x-ray computed tomography images“, NDT&E International 37, 373-380, 2004.