

Rissnachweis in der Fadenlage eines verstärkten Gummibalgs

## Inhaltsverzeichnis

	<i>Seite</i>
Kolumne	2
Neues Messverfahren	3
Nano-Silber gegen Bakterien	7
Vorsicht Erfindung	10
Mitarbeiter	10
Seminare der FFD	12

## Neues Bild gebendes Messverfahren

### Mikro-Röntgen-Computertomographie erweitert Prüfspektrum der FFD

Das Wissen über den inneren Aufbau einer Struktur ist von großem Interesse. In der Bauteilentwicklung liefert beispielsweise der Nachweis der Entstehung innerer Risse wertvolle Hinweise auf Möglichkeiten zur Designverbesserung. Ein anderer Fall ist die Kontrolle der Maßhaltigkeit bei komplexen Strukturen. Die in der Regel eingesetzten Verfahren (z. B. Mikroskopie) liefern lediglich Informationen über visuell zugängliche Bereiche. Dies erfordert eine mehr oder weniger aufwendige Präparation der Probe, um im Inneren liegende Bereiche zugänglich zu machen. Dabei besteht immer die Gefahr, dass gerade der zu untersuchende Bereich durch die Präparation verändert wird (z. B. Verformungen, Einbringen zusätzlicher Risse, etc.). Auch normale Röntgenaufnahmen, die eine Präparation der Probe weitestgehend überflüssig machen, können hier keine Abhilfe schaffen, da sie nur eine ebene Projektion der 3-dimensionalen Struktur liefern.

Eine ganze Reihe von Röntgenaufnahmen aus jeweils verschiedenen Perspektiven kann als Ausgangsdatensatz für eine weiterführende dreidimensionale Analyse verwendet werden. Dieses Verfahren bezeichnet man als Computertomographie.

Die Röntgen-Computertomographie als Bild gebendes Verfahren ist vielen, möglicherweise auch aus eigener Erfahrung, aus der Medizintechnik bekannt. Dass sich diese Methode aber auch zur Analyse von Strukturen eignet und daher auch seit mehreren Jahren verstärkt in der Industrie als zerstörungsfreies Verfahren eingesetzt wird, wissen nur wenige. Der Einsatz dieser Geräte konzentriert sich dabei größtenteils auf die Bereiche Werkstoffprüfung und Vermessung der geometrischen Maßhaltigkeit, wobei die typische Auflösung bei mehreren 10  $\mu\text{m}$  liegt.

Seit wenigen Jahren gibt es nun auch Geräte, die eine wesentlich bessere Auflösung bieten. Die Mikro-Computertomographie ( $\mu\text{CT}$ ) (Abb. 1) erlauben eine Auflösung von bis zu 1  $\mu\text{m}$  und eignen sich auch zur Vermessung von Mikrostrukturen oder Partikelverteilungen. Der Anschaffungspreis dieser Messsysteme liegt bei ca. 240T Euro. Die Auflösung der neuesten Gerätegeneration, so genannte Nano-Computertomographie (nCT), bewegt sich sogar in der Größenordnung von wenigen 100 nm. Allerdings existieren - sicherlich auch aufgrund des noch höheren Anschaffungspreises von ca. 450T Euro - von diesen Messgeräten bislang weltweit nur sehr wenige (z. Zt. 2x Japan, 1x Belgien), so dass Prüfungsdienstleistungen auf diesen Geräten nur sehr begrenzt zu erhalten sind.

Das Prinzip der Messung ist bei allen Geräten gleich. Die Röntgen-Computertomographie bestehen grundsätzlich aus einer Röntgenquelle und einem flächigen CCD-Detektor zwischen denen ein drehbarer Probenhalter angeordnet ist, auf dem die zu untersuchende Probe montiert wird (Abb. 2).

Während der eigentlichen Messung werden Transmissions-Röntgenbilder der Probe aus verschiedenen Perspektiven aufgenommen. Dazu wird der Probenhalter mit der Probe schrittweise gedreht. Aus diesen Projektionen der Probe (Abb. 3) wird dann in der Rekonstruktionsphase die innere Struktur der Probe berechnet. Dieser rechenintensive Vorgang muss auf einem leistungsfähigen PC durchgeführt werden. Als Ergebnis erhält man Schnittansichten der Proben, üblicherweise in Ebenen senkrecht zur Drehachse des Probenhalters. Es können grundsätzlich aber auch beliebig andere Schnittansichten berechnet werden.

Im Gegensatz zu den einzelnen Transmissions-Röntgen Aufnahmen, in denen die räumliche Struktur der Probe auf eine 2-dimensionale Projektion reduziert wird, liefert die Rekonstruktion unter Verwendung aller Röntgen-Aufnahmen eine Näherung des 3-dimensionalen Aufbaus der Probe.



Abbildung 1: Scyscan Mikro Computertomograph (Quelle: DKI).

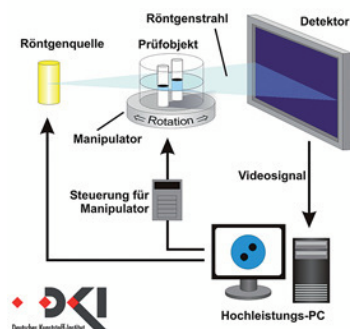


Abbildung 2: Messprinzip (Quelle: DKI).

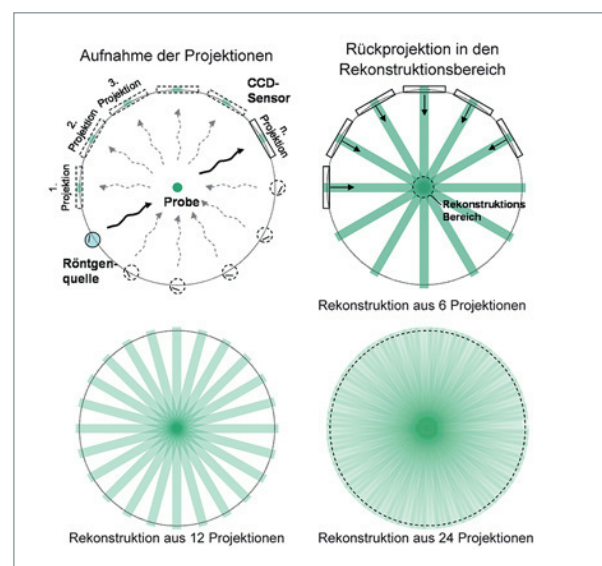


Abbildung 3: Rekonstruktion der Probe aus den Projektionen.

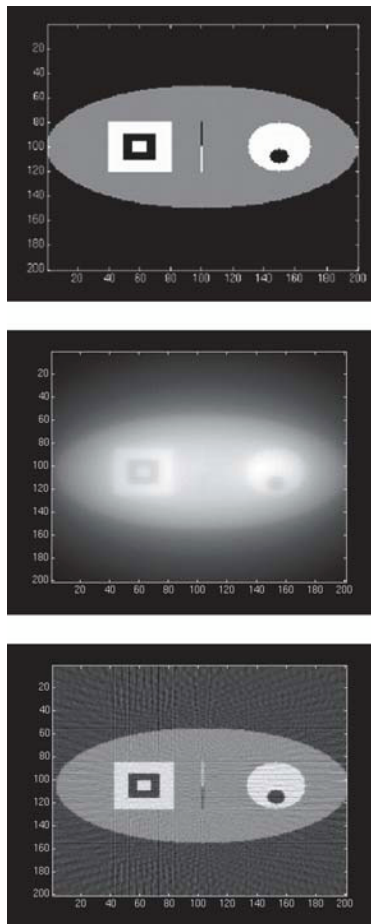


Abbildung 4: Simulation der Rekonstruktion: Original (oben), Konstruktion ohne Filterung (Mitte) und mit Filterung (unten) (Quelle: Bachelorarbeit, Institut für Numerische und Angewandte Mathematik, Georg-August-Universität Göttingen).

Zur Rekonstruktion werden alle Projektionen rechnerisch in den Rekonstruktionsbereich zurückprojiziert und überlagert.

Die Qualität der Rekonstruktion hängt dabei von mehreren Parametern ab. Einen entscheidenden Einfluss hat die Anzahl der zur Verfügung stehenden Projektionen. Je mehr unterschiedliche Projektionen der Probe zur Verfügung stehen, desto genauer stimmt die Rekonstruktion mit dem inneren Aufbau der Probe überein. Einen mindestens genauso entscheidenden Anteil hat die Aufbereitung (Filterung) der Projektionsdaten vor der Rekonstruktion. Nach einer Fast-Fourier-Transformation der Daten in den Frequenzraum werden über einen Hochpass verstärkte niedrige Frequenzanteile herausgefiltert, um eine schärfere Detailtreue zu erhalten. Würde man die Rekonstruktion ohne Filter durchführen, so würde man ein „weich gezeichnetes“ Abbild der Probe mit mehr oder weniger fließenden Übergängen erhalten (Abb. 4).

Natürlich kann die Rekonstruktion keine bessere Auflösung bieten, als die zugrunde liegenden Projektionen (Transmissions-Röntgenaufnahmen). Deren Auflösung hängt in erster Linie vom eingesetzten Röntgendetektor ab und reicht bei weitem noch nicht an die Auflösung von Röntgenfilmen heran. Von großer Bedeutung ist auch die eingesetzte Röntgenquelle. Die meisten Mikro-CT Geräte nutzen eine Röntgenröhre, deren Brennfleck als „punktförmige“ Strahlenquelle betrachtet wird. Nun ist der Brennfleck jedoch nicht wirklich punktförmig, sondern hat eine endliche Ausdehnung von ca. 5 -10  $\mu\text{m}$ . Dies verursacht eine Unschärfe und damit eine reduzierte Auflösung. Neuartige Nanofocus-Röhren können mittlerweile einen Brennpunkt mit einer Ausdehnung von wenigen 100nm erzeugen, derartige Röhren sind aber vergleichsweise sehr teuer.

Eine andere Möglichkeit die Unschärfe zu reduzieren, ist die Verwendung paralleler, monochromer Synchrotronstrahlung, die in Speicherringen von Teilchenbeschleunigern bei der Umlenkung elektrisch geladener Teilchen in Magnetfeldern als „Abfall“-Produkt anfällt. Derartige Röntgenstrahlungsquellen stehen jedoch nur in geringer Anzahl zur Verfügung, so dass Prüfungen entsprechend teuer sind.

Im Zusammenhang mit der Auflösung ist natürlich auch die Vergrößerung von Bedeutung. Bei normalen Röntgenröhren liegen die Transmissionsbilder infolge der „punktförmigen“ Strahlungsquelle als Zentralprojektionen vor. Eine Parallelisierung durch ein Linsensystem, wie aus der Optik bekannt, ist bei Röntgenstrahlung nicht möglich.

Die Zentralprojektion führt nun zu einer Verzerrung des durchstrahlten Objekts auf dem CCD-Detektor, die rechnerisch kompensiert werden muss, bietet aber andererseits auch die Möglichkeit der Vergrößerung der Probe. Hier ist das Verhältnis der Abstände von Quelle-Probe und Quelle-Detektor von Bedeutung (Abb. 5).

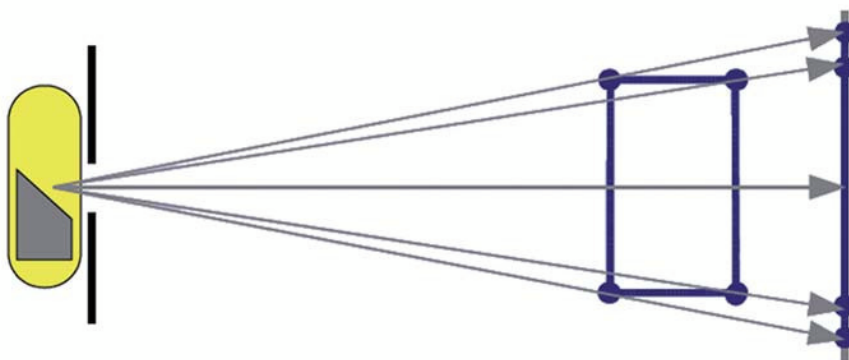


Abbildung 5: Zentralprojektion, Verzerrung und Vergrößerung des Objekts auf dem Sensor.

Aus diesem Grund ist die realisierbare Auflösung indirekt auch von der Probengröße abhängig, da diese bestimmt, wie dicht die Röntgenquelle an die Probe gefahren werden kann.

Je kleiner die Probe desto besser die Auflösung. Um tatsächlich eine Auflösung von  $1\mu\text{m}$  zu erzielen, darf die Probenabmessung daher nur ein Millimeter betragen (als Faustformel gilt:  $\text{Auflösung} = \text{Probengröße}/1000$ ).

Dieser Effekt führt häufig dazu, dass die eigentlich zerstörungsfreie Prüfung trotzdem eine Präparation der Probe verlangt.

Bei Verwendung von Synchrotronstrahlung ist eine Vergrößerung aufgrund der Parallelität der Strahlung übrigens nicht möglich. Hier wird die Auflösung alleine durch den Detektor bestimmt.

Die Qualität der Messungen hängt aber nicht nur von der verwendeten Messapparatur (Röntgenquelle, Sensor, etc.), sondern auch vom Aufbau der Probe selbst ab. So können beispielsweise Partikel mit deutlich höherer Dichte als das umgebende Material (z. B. Metallfragmente) infolge einer stärkeren Streuung die Auflösung reduzieren. Auch verursacht der Effekt der Strahlaufhärtung Störungen bei der Rekonstruktion (so genannte Artefakte).

Die derzeitigen Einsatzgebiete der Mikro-CT finden sich überwiegend im Bereich Schadensanalyse und Qualitätssicherung:

- Detektierung von Fehlstellen in Bauteilen (Risse, Lunken, Poren, Materialdopplungen) (Abb. 6)
- Prüfung der Qualität von Verbindungsstellen (Schweißen, Lötten, Kleben)
- Bestimmung der Partikelverteilung und Porengrößenverteilung
- Messung von Dichteverteilungen
- Vermessung 3-dimensionaler Mikrostrukturen (z. B. Leiterbahnen, Vliesstoffe, etc.)
- Vermessung verdeckter geometrischer Strukturen (Rundungsradien, Konturverläufe, Winkel, Wandstärken, etc.)
- Prüfung auf vollständige Montage

Untersuchen lassen sich grundsätzlich alle Materialien, die eine ausreichende Transparenz für Röntgenstrahlung bieten (z. B. Kunststoffe, metallische oder keramische Materialien). Bei Materialien mit hohem Abschwächungskoeffizienten müssen die Probenabmessungen gegebenenfalls auf die Leistung der Röntgenröhre abgestimmt sein, um das Durchstrahlen der Probe sicherzustellen. Unterschiedliche Materialien können allerdings nur dann in den Messungen unterschieden werden, wenn sich auch deren Abschwächungskoeffizienten nennenswert unterscheiden.

Die Messzeiten inkl. Rekonstruktion liegen derzeit je nach geforderter Qualität im Bereich von wenigen Stunden.

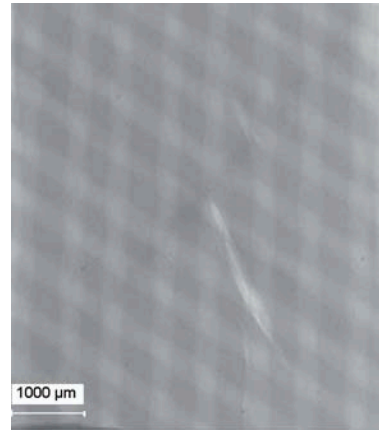


Abbildung 6: Risse in der Fadenlage eines Balgs, Transmissionsaufnahme (oben), Rekonstruierte Schnittansicht (Mitte), 3D-Rendering der Fäden (unten).

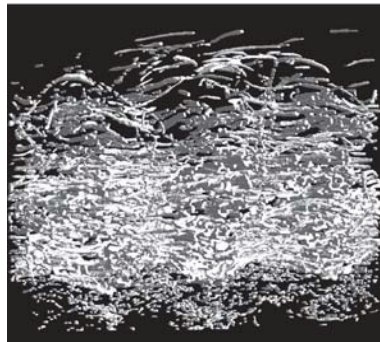
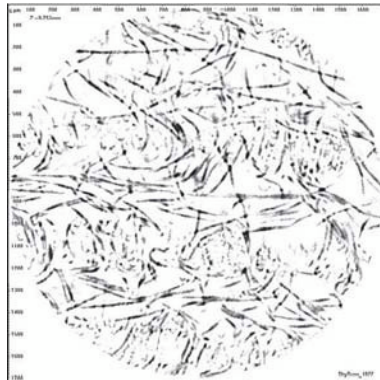


Abbildung 7: Faserverlauf in einer Vliesstoffprobe.  
Rekonstruierte Schnittansicht in der Vliesebene (oben), 3D-Rendering (unten).

Die FFD hat im vergangenen Jahr begonnen, die Einsatzmöglichkeiten der Mikro-CT auf typische Fragestellungen der Freudenberg KGen zu evaluieren. Dazu wurden am Deutschen Kunststoff Institut (DKI) in Darmstadt Mikro-CT-Messungen an verschiedenen Materialien bzw. Bauteilen durchgeführt und ein entsprechender Rahmenvertrag abgeschlossen.

Bei dem am DKI eingesetzten Gerät handelt es sich um einen SkyScan1072 Röntgen-Tomographen der belgischen Fa. SkyScan. Die 100kV Röntgenröhre erzeugt einen Brennpunkt von 5µm Durchmesser und erlaubt mit einem 1,3 Megapixel CCD-Röntgendetektor (1280x1024x12 Bit) eine Auflösung von bestenfalls 1,9µm/Pixel. Dazu darf der Probendurchmesser 1,9mm jedoch nicht überschreiten. Die maximal zulässige Probengröße beträgt 35mm, dann allerdings bei einer Auflösung von nur noch 17µm/Pixel.

Als Ergebnis einer Messung erhält man neben den Transmissionsaufnahmen (tiff-Format) die rekonstruierten Schnittansichten der Probe (bmp-Format (Abb. 7)). Mittels einer mitgelieferten Software kann der Kunde die Daten anschließend selbst analysieren und andere Schnittansichten erzeugen. Auf Wunsch können auch gerenderte 3D-Bilder der untersuchten Struktur erstellt werden, wobei sich bestimmte Grauwerte der Rekonstruktion transparent machen lassen, um im Inneren liegende Strukturen darzustellen.

Untersucht wurden bisher:

- Schadensstellen an Balgs (Abb. 6) und Brennstoffzellen
- Kontakte an flexiblen Leiterbahnen
- die Anwendbarkeit des Verfahrens zur Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen, z. B. die räumliche Füllstoffverteilung in Elastomeren
- Strukturen von Vliesstoffen (Abb. 7) bzw. Partikelverteilung in beladenen Filter-Vliesstoffen

Die Kosten einer Messung belaufen sich je nach Aufwand derzeit auf ca. 700 Euro.

Ihr Ansprechpartner zu diesem Thema:

Dr. Thomas Fischer  
Physikalische Prüfungen  
Tel: 0 62 01 - 80 41 50  
Fax: 0 62 01 - 88 51 92  
thomas.fischer@freudenberg.de

**Impressum**

Herausgeber: Freudenberg Forschungsdienste KG, D-69465 Weinheim  
Redaktionsleitung: Ulrike Kast  
Redaktion: Lars Gerding, Dr. Markus Grass, Ulrike Kast, Maike Kreichgauer, Kristina Margarit-Puri  
Gestaltung: Ehret Design, www.ehretdesign.de