

**Contact:**

Diplom-Biologin Michaela Würtz

Tel.: +49 6331 2490 - 550

E-mail: michaela.wuertz@pfi-germany.de

Das PFI kann Behörden und Gewerbetreibenden dank der Labor-Ausstattung und des qualifizierten Fachpersonals Beratungsleistungen zu GVO anbieten und auch die fachgerechte Entsorgung gentechnisch veränderter Organismen übernehmen.

**Kontakt:**

Diplom-Biologin Michaela Würtz

Tel.: +49 6331 2490 - 550

E-Mail: michaela.wuertz@pfi-germany.de

### Production Control of the Internal Dimensions of Shoes

#### Checking the Internal Dimensions of Footwear by Computer Tomography

“Blind faith” has so far been the operating principle of the footwear industry when it comes to dimensional accuracy in the interior of shoes. Because whether the internal dimensions, shape, and volume of a shoe actually comply with those of the last has hitherto eluded precise confirmation in the absence of an appropriate measuring technique. A PFI research project has addressed this topic and set the scene for development of a system for automatic production and quality control of the internal dimensions of footwear. Inspiration came from an entirely different sector: X-ray computer tomography (X-ray CT) solved the problem.

The footwear industry goes to great lengths to optimise the fit of its products. Enormous effort is invested in last development because the last is the basis of the entire footwear production process. It contains all the dimensional and fashion information required for footwear to fulfil its function as an article of clothing satisfying all the demands placed on it. In order to ensure that the shape

### Verfahren zur Produktionskontrolle von Schuhinnenmaßen

#### Schuhinnenmaße mit Computertomographie überprüfen

„Glauben statt wissen“, damit musste die Schuhindustrie bislang leben, wenn es um die Maßhaltigkeit im Inneren von Schuhen ging. Denn ob ein Schuh bezüglich der Innenmaße, der Form und des Volumens tatsächlich so ausfällt, wie es der Leisten vorgibt, das konnte man in Ermangelung eines geeigneten Messverfahrens bis dato nicht mit Sicherheit ermitteln. Ein PFI-Forschungsprojekt hat sich der Thematik angenommen und die Voraussetzungen geschaffen, ein System zur vollautomatischen Produktions- und Qualitätskontrolle von Schuhinnenmaßen zu entwickeln. Die Inspiration kam aus einem ganz anderen Sektor: die Röntgen-Computertomographie (RCT) macht's möglich.

Die Schuhindustrie unternimmt große Anstrengungen, die Passform ihrer Produkte zu optimieren. Erheblicher Aufwand wird in die Leistenentwicklung gesteckt, denn der Leisten ist die Basis für die gesamte Schuhproduktion. Er enthält alle maßlichen und modischen Vorgaben für

of the last is transferred exactly and permanently to the shoe, shape-stabilising components are incorporated into the shoe. In addition, various process steps are necessary for dimensional stabilisation during production – as dictated by the materials used.

Up to now, however, the footwear industry has lacked a non-destructive measuring technique which affords not only the dimensions of the shoe interior with sufficient accuracy but also information about shape and volume. Shoe manufacturers therefore saw no reason to doubt the shape fidelity and dimensional accuracy of their products. However, test measurements of the internal length of footwear then showed that shoes did not necessarily conform to the dimensions of the last and that considerable deviations may occur under some circumstances.

### **X-Ray Computer Tomography Identified as a Suitable Technique**

Yet the problem of measuring difficultly accessible or inaccessible bodies is not unique to footwear production. Such problems are solved in mechanical engineering, in vehicle construction, and in materials engineering by a method originally applied in the area of human medicine: X-ray computer tomography (X-ray CT).

A research project was initiated with the aim of studying whether non-destructive metrology of the interior space of footwear is feasible with the aid of computer tomography. In addition to the Test and Research Institute Pirmasens, the Radiology Department of Tübingen University, Stralsund University of Applied Sciences, and the Berlin-based Society for the Promotion of Applied Computer Science (Gesellschaft für angewandte Informatik – GFal) also participated in the project.

### **Foot/Shoe and Shoe/Last Comparisons**

The images obtained with the aid of X-ray CT had to be converted into a form that could be evaluated by image processing systems. The set goal was to accomplish the greatest possible degree of automatic production and

den Schuh, um seine Funktion als Bekleidungsstück mit allen gestellten Anforderungen erfüllen zu können. Damit die Form des Leistens exakt und dauerhaft auf den Schuh übertragen werden kann, baut man Komponenten in den Schuh ein, die die Form stabilisieren sollen. Darüber hinaus sind in der Produktion – je nach verwendetem Material – unterschiedliche Prozessschritte zur Formstabilisierung erforderlich.

Bislang fehlte jedoch ein Messverfahren, das nicht nur die Maße des Schuhinnenraums in entsprechender Genauigkeit, sondern auch Form- und Volumeninformationen liefert, ohne den Schuh zu zerstören. Daher sahen die Schuhhersteller keine Veranlassung, die Form- und Maßtreue ihrer Erzeugnisse anzuzweifeln. Dann aber zeigten Probemessungen der Schuhinnenlänge, dass die Schuhe nicht unbedingt den Leistenmaßen entsprachen und dass unter Umständen starke Abweichungen auftraten.

### **Röntgen-Computertomographie als geeignetes Verfahren identifiziert**

Das Problem, wie man schwer zugängliche oder unzugängliche Körper vermessen kann, stellt sich jedoch nicht nur in der Schuhfertigung. Im Maschinenbau, im Fahrzeugbau und in der Werkstofftechnik wird zur Lösung derartiger Probleme erfolgreich ein Verfahren angewandt, dessen ursprüngliches Anwendungsgebiet die Humanmedizin ist: Die Röntgen-Computertomografie (RCT).

Im Rahmen eines Forschungsprojektes sollte untersucht werden, ob mit Hilfe der Computertomographie die zerstörungsfreie Vermessung des Schuhinnenraums möglich ist. In das Projekt waren neben dem Prüf- und Forschungsinstitut Pirmasens auch die Radiologie der Universität Tübingen, die FH Stralsund und die Gesellschaft für angewandte Informatik (GFal) aus Berlin involviert.

### **Vergleiche Fuß / Schuh und Schuh / Leisten**

Die mit Hilfe der RCT-Technik gewonnen Bilder waren so aufzubereiten, dass sie von Bildverarbeitungssystemen ausgewertet werden konnten. Zielsetzung war eine mög-

quality control of the internal dimensions of footwear. The system to be developed had to perform two tasks: First it should permit comparison of foot and shoe data. Secondly, it should compare the dimensions of a shoe interior given by a last with the actual space available in the shoe produced on this last.

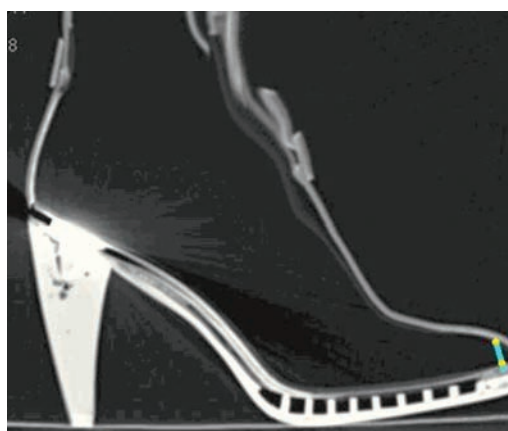
A precondition for the development of a measuring technique was the definition of suitable dimensions within a shoe which permit comparison both with a last as a shape and with a foot as an object to be clothed.

The first test measurements on shoes yielded images which merely showed that a shoe is a highly complicated object of measurement. Dimensions that can be readily defined and measured on a last cannot be so readily found in a shoe. That is because a shoe is made up of a combination of different materials joined together in various thicknesses and on various levels. Resulting cavities, thickness irregularities, and blurred transitions invisible from the outside render the location of defined measuring points difficult (Figure 1). Shoes were therefore assigned to a defined coordinate system and measuring points specified for description of the interior space of the shoe.

The suitability of the CT technique for measuring the interior space of shoes was tested on a very wide range of footwear. The samples included shoes made of dimensionally stable (Figure 2) and supple materials (Figures 3 and 4), shoes with metal components such as safety shoes with steel toecaps and steel soles, and also high-heel shoes containing metal screws, metal nails, and metal shank pieces (see Figure 1). Both children's shoes (Figure 5) and a wide range of adults' shoes of various

lichst vollautomatische Produktions- und Qualitätskontrolle der Schuhinnenmaße. Das zu entwickelnde System sollte zweierlei Dinge können: Ersten sollte es den Abgleich von Fuß- mit Schuhdaten möglich machen. Zweitens sollte es die durch einen Leisten vorgegebenen Maße eines Schuhinnenraums mit dem tatsächlichen Raum vergleichen, der im über diesen Leisten produzierten Schuh zur Verfügung steht.

Voraussetzung für die Entwicklung eines Messverfahrens war die Festlegung geeigneter Maße im Schuh, die sowohl einen Vergleich mit dem Leisten als Form, aber auch mit dem Fuß als zu bekleidendes Objekt ermöglichten.



► Figure 1: CT measurement of a shoe  
► Bild 1: CT-Messung eines Schuhs

Die ersten Testmessungen von Schuhen lieferten Bilder, die erst mal nur zeigten, dass der Schuh ein sehr kompliziertes Messobjekt ist. Die am Leisten noch einfach zu definierenden und zu messenden Maße waren am Schuh nicht so leicht zu finden. Das liegt daran, dass ein Schuh eine Kombination verschiedener Materialien ist, die in verschiedenen Dicken und Ebenen miteinander verbunden sind. Dadurch ergeben sich von außen nicht sichtbare Hohlräume, Unebenheiten und unscharfe Über-

gänge, die das Finden definierter Messpunkte erschweren (Bild 1). Daher wurden die Schuhe einem definierten Koordinatensystem zugeordnet und Messpunkte für die Beschreibung des Schuhinnenraumes festgelegt.

Die Eignung der CT-Messung zur Schuhinnenraumbestimmung wurde an den unterschiedlichsten Schuhtypen getestet. Darunter waren Schuhe aus formstabilen (Bild 2) und biegeschlaffen Materialien (Bild 3 und 4), Schuhe mit Metallteilen wie z. B. Sicherheitsschuhe mit Stahlkappen und Stahlsohlen, aber auch Absatzschuhe mit Metallschrauben, -nägeln und Gelenkteilen aus Metall (siehe



- ▶ Figure 2: Shoe made of dimensionally stable material
- ▶ Bild 2: Schuh aus formstabilem Material



- ▶ Figure 3: Shoe made of supple material
- ▶ Bild 3: Schuh aus biegeschlaffem Material



- ▶ Figure 4: CT image of a shoe made of supple material
- ▶ Bild 4: CT-Bild eines Schuhs aus biegeschlaffem Material

constructions were examined. The results showed that even shoes with metallic components could be measured by this technique. Shoes made of supple material were stuffed in order to obtain better results and to examine whether automatic processing of the measured data is possible in spite of the additional stuffing material.



- ▶ Figure 5: Children's shoes
- ▶ Bild 5: Kinderschuhe

Bild 1). Es wurden sowohl Kinder- (Bild 5) als auch die verschiedensten Erwachsenenschuhe unterschiedlichster Macharten untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass selbst Schuhe mit Metallteilen mit dieser Technik gemessen werden können. Schuhe aus biegeschlaffem Material wurden ausgestopft, um bessere Messergebnisse zu erreichen und zu prüfen, ob trotz dieses zusätzlichen Materials eine automatische Auswertung der Messdaten möglich ist.

The shoe measurements were performed at the Radiology Department of Tübingen University on Siemens 16-line and 40-line human CT scanners (Figure 6). These permit a maximum resolution of 0.75 mm layer thickness. An accuracy of  $\pm 1$  mm is adequate for measurements on footwear. An image resolution of 1 mm was chosen for manual image evaluation. Owing to the blurring of the material transitions in a shoe, use of a higher resolution does not lead to better results. The X-ray tubes operate at 120 kV and 150 mAs; the maximum permissible voltage for human CT scanners is 140 kV. Industrial CT scanners can operate at up to 450 kV, leading to improved image detail with greater contrasts.

Stralsund University of Applied Sciences had the task of developing software for automatic image evaluation of the footwear examined. The main emphasis was on

Die Schuhmessungen wurden durch die Universität Tübingen, Abteilung Radiologie durchgeführt. Dafür standen Human-CT-Geräte, 16 Zeilen und 40-Zeilen, der Firma Siemens zur Verfügung (Bild 6). Damit ist eine Auflösung von maximal 0,75 mm Schichtdicke möglich. Für die Schuhmessungen ist die Genauigkeit der Maße von  $\pm 1$  mm ausreichend. Für die manuelle Bildauswertung wurde eine Bildauflösung von 1 mm gewählt. Auf Grund der Unschärfe bei den Materialübergängen im Schuh führte eine höhere Auflösung nicht zu besseren Messergebnissen. Die Leistung der Röhren beträgt 120 kV mit 150 mAs, maximal zulässig sind 140 kV bei Human-CT. Industrie-CT können über eine Leistung von bis zu 450 kV verfügen, was zu einem detaillierteren Bild mit schärferen Kontrasten führt.

recognition and separation of the individual shoes.

In order to distinguish individual shoes in the volume data set, partition planes are first introduced between the shoes. These partition planes can be regarded as sections through the data volume almost orthogonal to the z axis (the longitudinal axis of the scanner). The partition planes characteristically show a low average grey value. They divide the data volume into segments, with each segment corresponding precisely to one shoe (see Figure 7). A search for the interior space of the shoe within the data set is performed by analysing the grey value distribution of the data set.

### Automatic Shoe Measurement Feasible

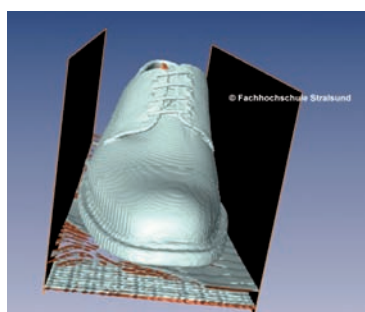
The measuring procedure was implemented as a software solution and evaluated on the basis of data sets provided by Tübingen University. The results show that the algorithms developed satisfy real-world demands and do indeed permit automatic measurement of footwear. The results also indicate that the overall procedure still has to be adapted to accomplish specific tasks, depending upon the shape of the shoe and the material used. The algorithms for particular tasks (textile shoes without insoles, open ladies' shoes with high heels) are also expected to need further refinement. The technique is well suited for development of an industrially applicable product for the measurement of shoes.

### Comparison of Shoe Interior with Last Volume

Another task included in the research project consists in comparison of the shoe interior with the last. This was undertaken by the Society for the Promotion of Applied



► Figure 6: Measurement of shoes with a human CT unit  
► Bild 6: Schuhmessung mit einem Human-CT-Gerät



► Figure 7: Segmentation of the data volume by partition planes  
► Bild 7: Aufteilung des Datenvolumens in Segmente durch Trennebenen

Aufgabe der FH Stralsund war die Entwicklung einer Software zur automatischen Bildauswertung der gemessenen Schuhe. Schwerpunkte waren dabei die Erkennung und Separierung der einzelnen Schuhe.

Zur Abgrenzung individueller Schuhe im Volumendatensatz werden zunächst Trennebenen zwischen den Schuhen errichtet. Diese Trennebenen können als Schnitte durch das Datenvolumen betrachtet werden, wobei die Schnittebene annähernd senkrecht zur z-Achse (Scanner-Längsachse) steht. Die Trennebenen zeichnen sich durch einen niedrigen durchschnittlichen Grauwert aus. Die Trennebenen teilen das Datenvolumen in Segmente, wobei jedes Segment genau einen Schuh beinhaltet (siehe Bild 7). Innerhalb des Datensatzes wird nun nach dem Schuhinnenraum gesucht, indem der Grauwerteverlauf des Datensatzes analysiert wird.

### Automatisierte Schuhvermessung möglich

Das Verfahren wurde als Softwarelösung realisiert und anhand von Datensätzen, die durch die Universität Tübingen zur

Verfügung gestellt wurden, evaluiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelten Algorithmen praxistauglich sind und mit ihnen tatsächlich eine automatisierte Schuhvermessung möglich wird. Die Ergebnisse zeigen auch, dass das Gesamtverfahren in Abhängigkeit von der Schuhform und vom verwendeten Material an spezifische Aufgabenstellungen angepasst werden muss. Auch ist zu erwarten, dass die Algorithmen für besondere Aufgaben (Stoffschuh ohne Brandsohle, offener Damenschuh mit hohem Absatz) weiterentwickelt werden müssen. Für die Entwicklung eines industriell nutzbaren Produkts der Schuhvermessung ist das bereitgestellte Verfahren der automatisierten Bildanalyse gut geeignet.

Computer Science (GFal). Here too, the interior space was first measured in order to compare it with the surface of the last. The last data can be supplied in digital form by the last manufacturer.

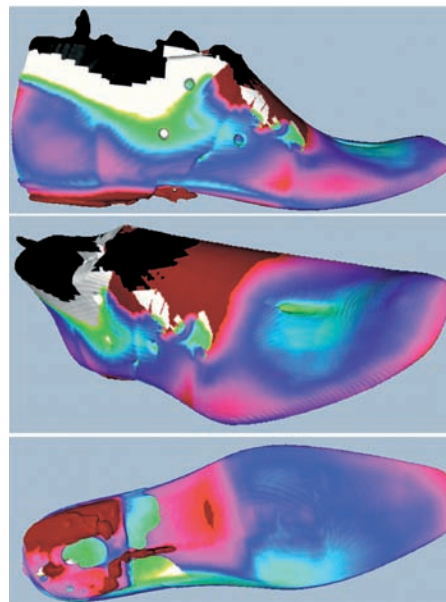
This task was also made more difficult by the shape of the shoe. The procedure adopted did not give good results for all the imported shoe data: Problems frequently occurred with shoes made of widely differing materials. Moreover, complete virtual removal of the insole was not always possible because use of too strong a filter in the calculation of the threshold values leads to holes in the surface model. The interior space differs very widely from shoe to shoe in the region of the tongue and lacks an exact boundary which could be triangulated. Agreement on standard rules is necessary for the upper boundary of the interior and for the elimination of the lace-up region.

For comparison of the shoe interior with the last, the two objects positioned relative to each other are read into an adapted octree data structure (octree is a term from computer graphics; octrees are used for hierarchical ordering of 3D data sets) and local distances calculated. The result of comparison is represented with the aid of colour coding. Deviations are normalised via an adjustable colour scale and represented in colour by colouring of the mesh (Figure 8). The comparison yields graphic information about the gradual deviation of the shoe from the last. Display of local absolute distances is possible, as is a summation of the differential volume deviations. This permits assessment of variations in shoes and conclusions to be drawn regarding production and storage.

## Schuhinnenraum mit Leistenvolumen abgleichen

Eine weitere Aufgabe des Forschungsprojektes beinhaltet den Vergleich des Schuhinnenraums mit dem Leisten. Diese wurde von der Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GFal) bearbeitet. Auch hier wurde zunächst der Schuhinnenraum bestimmt, um ihn mit der Leistenoberfläche vergleichen zu können. Die Daten der Leisten können bereits durch die Leistenhersteller in digitaler Form zur Verfügung gestellt werden.

Auch bei dieser Aufgabe erschwerte die Schuhform die Lösung. Nicht für alle übernommenen Schuhdaten konnten mit den angewandten Verfahren gute Ergebnisse erreicht werden: Probleme traten häufig bei den Schuhen auf, die stark unterschiedliche Materialien haben. Weiterhin war es nicht in jedem Fall möglich, die Innensohle vollständig virtuell zu entfernen, da eine zu starke Filterung bei der Berechnung des Schwellwertes zu Löchern im Oberflächenmodell führt. Im Bereich der Lasche ist der Innenraum von Schuh zu Schuh sehr unterschiedlich und besitzt keine exakte Begrenzung, die trianguliert werden könnte. Für die obere Begrenzung des Innenraumes und die Eliminierung des Schürbereiches ist die Vereinbarung von standardisierten Regeln erforderlich.



- ▶ Figure 8: False colour representation of the calculated local distances between the shoe interior and the relevant last
- ▶ Bild 8: Falschfarbendarstellung der berechneten lokalen Abstände zwischen dem Modell eines Innen-Schuhs und des zugehörigen Leistens

Für den Vergleich des Schuhinnenraums mit dem Leisten werden beide zueinander positionierten Objekte in eine angepasste Octree-Datenstruktur (Octree ist ein Begriff aus der Computergrafik; man verwendet Octrees, um 3D-Datensätze hierarchisch zu untergliedern) eingelesen und die lokalen Abstände berechnet. Das Ergebnis des

### **Conclusion: Development of a Measuring System for Production Control Is Feasible**

Further optimisation of the measuring technique will be possible with an industrial CT specially adapted to the needs of footwear measurement. This technology can be applied both to footwear development and to quality assurance during production.

Detailed results of the research project are compiled in a final report which is available from PFI. The research project bearing the number 15269 was funded by the German Federal Ministry of Economics and Technology via the German Federation of Industrial Cooperative Research Associations (AiF).

#### **Contact:**

Dr. Monika Richter  
PFI Pirmasens e.V.  
Marie-Curie-Str. 19  
66953 Pirmasens  
Tel.: +49 6331 2490 - 27  
E-mail: [monika.richter@pfi-germany.de](mailto:monika.richter@pfi-germany.de)



Vergleichs wird mit Hilfe einer Farbkodierung dargestellt. Abweichungen werden über eine einstellbare Farbskala normiert und durch Einfärben des Meshs farbig dargestellt (Bild 8). Der Vergleich liefert anschaulich Auskunft über die graduellen Abweichungen des Schuhs vom Leisten. Eine Anzeige der lokalen absoluten Abstandswerte ist möglich, ebenso ein Aufsummieren der differentiellen Volumenabweichungen. Das ermöglicht eine Beurteilung der Schuhveränderungen und Rückschlüsse auf den Produktions- und Lagerprozess.

### **Fazit: Entwicklung eines Mess-Systems für die Produktionskontrolle möglich**

Durch ein speziell an die Belange der Schuhvermessung angepassten Industrie-CT ist eine weitere Optimierung des Vermessungsprozesses möglich. Diese Technologie kann sowohl im Bereich der Schuhentwicklung als auch zur Qualitätssicherung in der Produktion eingesetzt werden.

Die detaillierten Ergebnisse des Forschungsprojektes sind im Abschlussbericht dargestellt. Der Abschlussbericht kann beim PFI angefordert werden. Das Forschungsprojekt 15269 wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über die AiF gefördert.

#### **Kontakt:**

Dr. Monika Richter  
PFI Pirmasens e.V.  
Marie-Curie-Str. 19  
66953 Pirmasens  
Tel.: 06331 2490 - 27  
E-Mail: [monika.richter@pfi-germany.de](mailto:monika.richter@pfi-germany.de)