

K. Küper
N. Becker
T. Obens
C. Müller-Horvat
H.-H. Ehrlicke
C.D. Claussen

Bestimmung von Schuhinnenmaßen – Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung mittels Computertomographie

Eingegangen: 4. August 2004
Akzeptiert: 13. September 2004

Prof. Dr. med. Klaus Küper (✉)
Radiologische Universitätsklinik
Abteilung für Radiologische Diagnostik
Hoppe-Seyler-Str. 3
72076 Tübingen, Germany
Tel.: 07071/29-87375
E-Mail:
klaus.kueper@med.uni-tuebingen.de

Prof. Dr. med. Claus D. Claussen
Radiologische Universitätsklinik
Abteilung für Radiologische Diagnostik
Hoppe-Seyler-Str. 3
72076 Tübingen, Germany
Tel.: 07071/29-82087
E-Mail:
claus.claussen@med.uni-tuebingen.de

Dr. med. Christian Müller-Horvat
Radiologische Universitätsklinik
Abteilung für Radiologische Diagnostik
Hoppe-Seyler-Str. 3
72076 Tübingen, Germany
Tel.: 07071/29-83422
E-Mail:
christian.mueller@med.uni-tuebingen.de

Dr. med. Norbert Becker
Institut für angewandte Biomechanik
Wilhelmstr. 134
72074 Tübingen, Germany
Tel.: 07071/56090
E-Mail: norbert.becker@uni-tuebingen.de

Dr. rer. soz. Thomas Obens
Institut für angewandte Biomechanik
Wilhelmstr. 134
72074 Tübingen, Germany
Tel.: 07071/550614
E-Mail: thwobens@aol.com

Evaluation of inner shoe dimensions by computed tomography

■ **Summary** An optimal fit is especially important for children's shoes in order to guard against diseases of the support and locomotor system in adult life.

The present study describes a non-destructive procedure for studying shoes by means of uninterrupted computer tomography (CT). The data thus acquired are subsequently processed and analyzed with the help of a computer program (MATLAB) and 3D-software (AMIRA), and dimensions of key importance for the designer are determined automatically. Deviations can then be made visible by comparing the CAD data used to produce the shoe last with a computer tomographic interior model of a shoe created on that last. Measure-

ments with this method have shown that the interior of shoes can be made visible in a non-destructive manner. Any desired number of points in the interior of the shoe can be determined, distances measured, and volumes calculated. We have been able to determine which sizes are important in designing the shoe and must therefore also be incorporated into the final shoe (insole). We have also found it possible to determine dimensions which are especially relevant for the individual foot, e.g., the actual length and width of the interior of the shoe. To this end, a parameter "+ 1 cm" was introduced. It includes, for example, the length and width of the interior of the shoe at a 1 cm height above the insole and also takes into account the actual length, width, and position of the foot.

■ Key words

Computed tomography –
inner shoe dimensions –
shoe construction –
non-destructive testing (NDT) –
quality assurance

■ **Zusammenfassung** Insbesondere beim Kinderschuh kommt der optimalen Anpassung hinsichtlich Erkrankungen des Stütz- und Bewegungsapparates im Erwachsenenleben große Bedeutung zu.

Prof. Dr. Hans-Heino Ehrlicke
Steinbeis-Transferzentrum
Bildverarbeitung und Medizininformatik
Fachhochschule Stralsund
Zur Schwedenschanze 15
18435 Stralsund, Germany
Tel.: 03831/456674
E-Mail: hans.ehrlicke@fh-stralsund.de

Es wird ein Verfahren mittels Computertomographie zur zerstörungsfreien Prüfung beschrieben, bei dem der zu prüfende Schuh lückenlos mittels Computertomographie (CT) untersucht wird. Mit Hilfe von Nachverarbeitungsprogrammen (MATLAB) und 3D-Software (AMIRA) werden die Daten analysiert und die für den Konstrukteur maßgeblichen Maße automatisch bestimmt. Durch Vergleich des für die Herstellung des Leistens verwendeten CAD-Datensatzes mit dem computertomographisch gewonnenen Innenraum eines darauf aufgebauten

Schuhmodells können Abweichungen sichtbar gemacht werden. Messungen mit dem beschriebenen Verfahren zeigten, dass die Innenräume von Schuhen zerstörungsfrei sichtbar gemacht werden können. Beliebige Punkte des Schuhinnenraums konnten bestimmt, Strecken vermessen und Volumen berechnet werden. Es konnten Größen bestimmt werden, die bei der Schuhkonstruktion eine wichtige Rolle spielen und dementsprechend sich auch im fertigen Schuh wieder finden sollten (Brandsohle). Es war aber auch möglich Maße zu ermitteln, die

fußrelevanter sind wie z. B. die tatsächliche Länge und Breite des Schuhinnenraums. Hierfür wurde der Parameter „+1 cm“ eingeführt. Dieser beinhaltet z. B. die Länge und Breite des Schuhinnenraums in 1 cm Höhe über der Brandsohle und berücksichtigt die Lage der tatsächlichen Länge und Breite des Fußes.

■ Schlüsselwörter

Computertomographie –
Schuhinnenraum –
Schuhkonstruktion –
Zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) –
Qualitätskontrolle

Einleitung

Der Einfluss des Schuhwerks auf den Fuß, auf sein Verhalten im Wachstum wie auch in der Belastung ist unbestritten. So ist bekannt, dass Fußschäden bei Kindern auf in der Form und Funktion nicht passende Schuhe zurückgehen und ursprünglich gesunde Füße erkranken [1]. Durch diese Stauchung wird der Fuß erheblich verkürzt, was in der sensiblen Phase der Entwicklung im Kleinkindalter zu massiven Einschnitten in der Funktionsentwicklung der Füße führt. Problemfördernd wirkt dabei, dass das Kind dabei keine Schmerzen empfindet. Passende Schuhe bieten demnach dem Fuß genügend Platz (Länge) sich unter Belastung auszudehnen ohne am Schuh anzustoßen. Außerdem muss der Schuh in seiner Weite dem Fuß angepasst sein, da sonst der Fuß im Schuh keinen Halt hat und herumrutscht oder zu stark eingeschnürt wird. Um einem Fuß den richtigen Schuh anzupassen ist es daher eigentlich unumgänglich die Maße des Schuhinnenraums zu kennen.

In der Regel werden Schuhe mit Hilfe eines sogenannten Leistens gebaut. Dieser Leisten stellt bei der Herstellung von Konfektionsschuhen ein Abbild eines idealisierten Fußes da bzw. bei der individuellen Fertigung (Maßschuh) das Abbild eines speziellen Fußes mit Zugaben und Freiräumen.

Der Leisten dient als Platzhalter für den Fuß. Um den Leisten herum wird der Schuh gebaut; das heißt, durch die Maße des Leistens wird der Raum im fertigen Schuh bestimmt, der dem Fuß zur Verfügung steht. Ist der Schuh fertig, wird der Leisten aus dem Schuh entfernt und es wird erwartet, dass der verbleibende Innenraum den Vorgaben des Leistens entspricht.

In früheren Zeiten wurden einheitliche Materialien (Leder) und einheitliche Fertigungsverfahren verwendet, durch die gewährleistet war, dass der fertige Schuh die durch den Leisten vorgegebene Form hatte bzw. bekannt war, in wie weit der fertige Schuh von der Formvorgabe durch den Leisten abwich. Neue Materialien und unterschiedliche Fertigungstechniken führten aber immer mehr dazu, dass fertige Schuhe nicht mehr der Leistenform entsprechen. Als Ursachen sind zu nennen u. a. Verwendung von verschiedenen Materialien mit unterschiedlichen Dehnungskoeffizienten (temperaturabhängig bzw. elastisch) bzw. verschiedene Fertigungstechniken- und -verfahren. Wollte man die Unterschiede zwischen den vorgegebenen und den tatsächlichen Maßen des Innenraums eines Schuhs ermitteln musste bisher der Schuh aufgeschnitten und damit zerstört werden. Dass bei der mechanischen „Zerstörung“ des Schuhs Veränderungen speziell an seiner Geometrie auftreten kann nicht ausgeschlossen werden. Damit kann es zu Abweichungen bei den Maßen eines „heilen“ bzw. eines „aufgeschnittenen“ Schuhs kommen.

Zielsetzung bei der Neuentwicklung von Messverfahren zur Bestimmung der Maße des Schuhinnenraums war ein zerstörungsfreies Messverfahren, das Daten über Strecken und Flächen bzw. Volumen im Schuhinnenraum liefert.

Mit der Datenerhebung mittels Computertomographie gibt es eine Möglichkeit den Innenraum eines Schuhs sichtbar zu machen. Bei entsprechendem Messaufbau und nach der Datenaufbereitung kann die Computertomographie nun mit spezieller Auswertesoftware für die Bestimmung von Schuhinnenmaßen genutzt werden.

Material und Methode

Neben zerstörenden Prüfungen wie beispielsweise Druck- oder Zugprüfungen ist innerhalb der Werkstoffanalytik und -prüfung die zerstörungsfreie Prüfung (ZfP) eine attraktive Studienmöglichkeit. Dazu kennt man u. a. Verfahren mit Ultraschall oder Röntgen und hier insbesondere die Computertomographie (CT).

Besonders bei räumlichen Zusammenhängen bietet die CT nicht nur eine bildliche Darstellung, sondern auch durch die Nachverarbeitung der gewonnenen Daten die Möglichkeit metrische Daten zu gewinnen.

Die Computertomographie (CT) ist ein in der Radiologischen Diagnostik gebräuchliches Verfahren zur überlagerungsfreien Röntgenuntersuchung bei menschlichen Erkrankungen. Bei diesem Verfahren rotiert eine Röntgenröhre um den zu untersuchenden Gegenstand (oder Patienten), die hinter dem Gegenstand austretende entsprechend den durchstrahlten Dichtewerten geschwächte Röntgenstrahlung wird durch mitrotierende Detektorenringe aufgezeichnet und mit einem mathematischen Rekonstruktionsver-

fahren in Schnittbilder wählbarer Schichtdicke umgewandelt.

Dieses Verfahren wurde zur Untersuchung und sekundären Rekonstruktion des Schuhinnenraumes angewandt. Dazu wird der zu untersuchende Schuh in dem CT quer zur Schichtrichtung positioniert (Abb. 1) und in lückenloser Schichtfolge untersucht. Bei dem Untersuchungsgang von etwa 1 min Dauer ergeben sich je nach Schuhgröße etwa 100 bis 130 Bilder in sagittaler Schnittführung von jeweils 1 mm Schichtdicke (Abb. 2a) und eine Auflösung in der Bildebene von etwa 0,45 mm.

Nachträglich können aus diesen Daten Bilder beliebiger Schnittrichtung erzeugt werden (Sekundärrekonstruktion), hierzu werden die Daten im DICOM3 Format an ein Bildnachverarbeitungsprogramm (MATLAB 6.5, Mathworks Inc.) übertragen.

Unter Sichtkontrolle werden in dem medianen Sagittalschnitt des Schuhs (Abb. 2a) die vordere und hintere Begrenzung der Brandsohle markiert. Durch Konturfundungstechniken werden per Software die relevanten Maße der Brandsohle und des Schuhinnenraumes (Abb. 3) berechnet und in einer übersichtlichen Form (Abb. 4) ausgegeben. Dabei werden zur verwechslungsfreien Dokumentation und zur Interpretation der errechneten Daten eine Realansicht des Schuhs, der mediane Sagittalschnitt und der Schrägschnitt in der Ebene ECF (s. Abb. 2b, 3a) mit-abbildet.

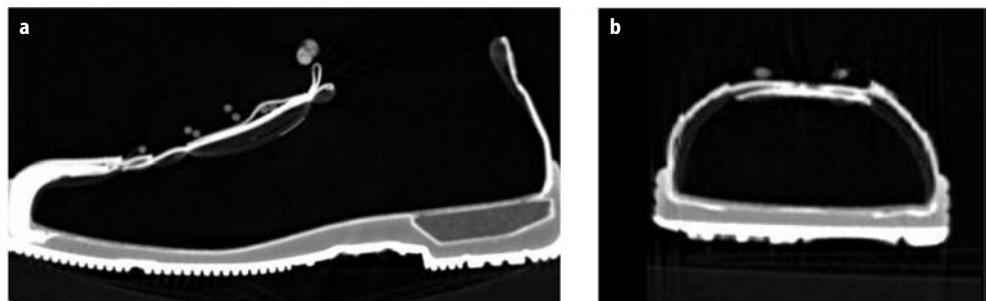
Zur experimentellen Abschätzung der Messgenauigkeit wurden insgesamt 4 Prüfkörper (Abb. 5a), untersucht, die jeweils in einen Schuh eingebracht wurden (Abb. 5b). Bei diesen Prüfkörpern waren gerade, schwach und stark gekrümmte Grenzflächen in mehreren Schnittebenen bildgebend. Der nach dem beschriebenen Messverfahren ermittelte Wert erbrachte im Vergleich zu dem metrisch gemessenen Wert je nach Form des Prüfkörpers eine Genauigkeit zwischen 0,15 und 0,6 mm (0,15 bis 0,7%).

Den optimalen Vergleich eines Leistens mit einem Schuh, der auf diesem Leisten produziert wurde, bietet die folgende Möglichkeit: Der Datensatz, der zur Steuerung der CAD-Werkzeugmaschine für die Herstellung des Leistens verwendet wurde und der damit



Abb. 1 Messanordnung zur computertomographischen Aufnahme primärer sagittaler Schichten des Schuhinnenraumes

Abb. 2 Medianer Sagittalschnitt (a) und Ballenschnitt (b), 120 KV, Schichtdicke 1 mm



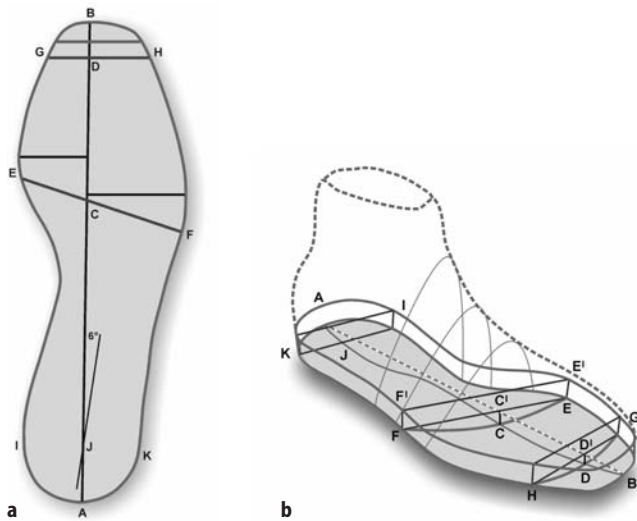


Abb. 3 Schuhinnenmaße gemessen in Höhe der Brandsohle (a) und 1 cm oberhalb (b)

exakt die Ausmaße des Leistens widerspiegelt, wird mit dem Schuhinnenraum, der mit Hilfe der Computertomographie rekonstruiert wurde, verglichen (matching). Einfach ausgedrückt wird der Leisten *virtuell* in den Schuh eingebracht.

Als Softwarepaket wurde dazu das 3D-Visualisierungsprogramm Amira 3.1.1 (Indeed – Visual Concepts GmbH) eingesetzt.

Der Schuhinnenraum wird mit dem Volumen des Leistens verglichen; dort, wo der Leisten größer ist als der Schuh, wird das überstehende Volumen blau dargestellt, Zonen, in denen das Schuhvolumen über den Leisten hinausreicht, sind rot eingefärbt.

Somit kann die Passform des auf einem Leisten produzierten Schuhs gemessen und mit wählbarer Abstufung (in Prozent) sichtbar gemacht werden.

Das abgebildete Beispiel (Abb. 6) zeigt den Vergleich eines längere Zeit getragenen Schuhs mit dem Leisten, auf dem er produziert wurde: Die „ausgetre-

Eberhard-Karle-Universität Tübingen
 Abteilung für Radiologische Diagnostik
 (Ärztlicher Direktor Prof. Dr. C.D.Claussen)

Institut für angewandte Biomechanik
 Dr. T. Obens und Dr. N. Becker

Schuh_ID:

Datum:

Groesse:

Winkel ECD:

Kinderschuh schwarz

Sohle

Der Schuhgröße zugeordnete Fusslänge AD: mm

Der Schuhgröße zugeordnete Ballenpunkt AC: mm

Brandsohlenlänge AB real: mm

Schuhinnenlängereal 1 cm über Brandsohle: mm

Brandsohlenlänge AB direkt: mm

Zugabe BD: mm

Vorfuß

Höhe bei D: mm

Breite GH real: mm

Breite GH direkt: mm

Balligkeit bei D: mm

Umfang bei D: mm

Höhe bei D + 6 mm: mm

Umfang bei D + 6 mm: mm

Ballen

Ballenbreite technisch: mm

Ballenbreite real E C F: mm

Ballenbreite direkt E C' F: mm

Balligkeit bei C: mm

Ballenbreite direkt in 1 cm Höhe E'F': mm

Fläche E C F F' E': qcm

Ferse

Fersenradius: mm

Fersenbreite: mm

Schuhbreite Ferse: mm

Datum, Unterschrift

Abb. 4 Ergebnisausdruck einer Schuhinnenraumvermessung

Abb. 5 Prüfung der Messgenauigkeit mit Hilfe von Plexiglas-Prüfkörpern, 4 verschiedene Prüfkörper (a), sagittale Computertomographie mit dem schwach gekrümmtem Prüfkörper (b)

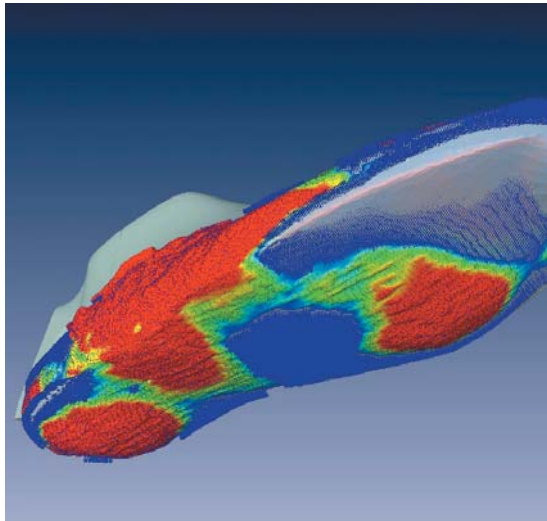
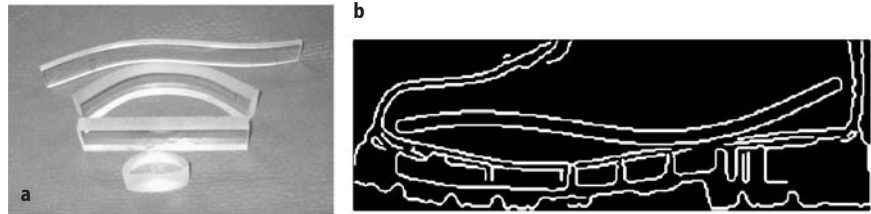


Abb. 6 Virtuell auf den Leisten „angezogener“ Schuh (s. Text)

tenen“ Zonen im Bereich des Ballens und der Ferse sind gut erkennbar.

Ergebnisse

Erste Messungen mit dem beschriebenen Verfahren zeigen, dass die Innenräume von Schuhen zerstörungsfrei sichtbar gemacht werden können. Damit können beliebige Punkte des Schuhinnenraums bestimmt, Strecken vermessen und Volumen berechnet werden.

Es können Größen bestimmt werden, die bei der Schuhkonstruktion eine wichtige Rolle spielen und dementsprechend sich auch im fertigen Schuh wiederfinden sollten (Brandsohle). Es ist aber auch möglich Maße zu ermitteln, die fußrelevanter sind wie z.B. die tatsächliche Länge und Breite des

Schuhinnenraums. Hierfür wurde der Parameter „+ 1 cm“ eingeführt. Dieser beinhaltet z.B. die Länge und Breite des Schuhinnenraums in 1 cm Höhe über der Brandsohle und berücksichtigt die Lage der tatsächlichen Länge und Breite des Fußes.

Ein Vergleich der Innenmaße von 5 verschiedenen Schuhen, die alle mit der Größe 41 (Musterschuhgröße) gekennzeichnet waren, ergab u.a. eine Variabilität der Schuhinnenlänge von 26,8 cm bis 27,8 cm und der Schuhinnenbreite im Vorfußbereich von 9,5 cm bis 10,1 cm.

Dies entspricht nach den Richtlinien der Schuhindustrie einer Spanne von nahezu 3 Schuhgrößen.

Diskussion

Füße messen gehört heute zum Alltag zumindest beim Kauf von Kinderschuhen. Hierfür gibt es relativ einfache Messverfahren, die zu mindest die Länge und Breite des Fußes anzeigen. Damit ist festgelegt, wie viel Platz der Fuß im Schuh braucht. Den passenden Schuh zu finden macht aber häufig leider einige Probleme, da die Schuhe trotz gleicher Kennzeichnung (Größenangabe) unterschiedliche Innenräume zur Verfügung stellen. Diese zum Teil durch die Fertigung bedingte „Ungenauigkeit“ kann durch das vorgestellte Verfahren zur Bestimmung der Schuhinnenmaße mit Hilfe von CT-Analysen minimiert werden. Es lassen sich am fertigen Schuh die Abmessungen des Innenraums bestimmen, der dem Fuß zur Verfügung steht.

Ein weiterer wichtiger Vorteil der Kenntnis der Schuhinnenmaße besteht darin, dass auch Füße mit eingeschränktem Schmerzempfinden richtig beschuht werden können und damit z.B. bei Kindern Entwicklungseinschränkungen und bei neuropathischen Füßen mechanischen Schädigungen entgegen gewirkt wird.

Literatur

1. Maier E, Killmann M (2003) Kinderfuß und Kinderschuh. Verlag Neuer Merkur, München