

## Mobil anwendbares Messverfahren für orthopädische Indikationen

### Ausgangssituation

Auf die überwiegend handwerklich arbeitenden Orthopädietechniker (OT) und Orthopädieschuhtechniker (OST) kommen zunehmend neue Anforderungen zu, die durch die Gesundheitsreform ausgelöst werden. Die orthopädiotechnischen und orthopädieschuhtechnischen Versorgungen werden zur Prophylaxe, Therapie, Rehabilitation eingesetzt und individuell für den betroffenen Fuß des Patienten angefertigt. Diese individuelle Versorgung hat ihren Preis.

Die Firmen müssen aber jetzt nach neuen Technologien suchen, um ihre Arbeitsweise zu optimieren und kostengünstiger zu gestalten. Voraussetzung für die Fertigung der orthopädischen Versorgungen ist die Kenntnis über die Maße der Füße und Beine. Auch bestimmte Forminformationen sind erforderlich.

Die derzeit manuell erfolgende Erfassung der Fußmaße erfordert einen Zeitaufwand von ca. 20 Minuten pro Fuß. Hier liegen Reserven, die mit Hilfe moderner Messtechnik zu einer wesentlichen Verkürzung dieses Zeitaufwandes führen können.

Für die Gewinnung der notwendigen Fußdaten werden zurzeit verschiedene Methoden angewandt, die sich auch nach dem Krankheitsbild und der Art der Versorgungen richten. So fertigt der Orthopädieschuhtechniker (OST) eine Trittspur mit Fußumriss an /2, 3, 4/. Sie ist immer noch das wichtigste Arbeitsmittel, um Aussagen über die Form und die Belastungsverhältnisse am ruhenden Fuß zu erhalten. Für die Anfertigung stehen verschiedene Hilfsmittel zur Verfügung. Am häufigsten angewandt wird der Trittspurkasten. Er besteht aus einem großen Stempelkissen, das zur Einfärbung einer Gummiplatte genutzt wird. Unter diese Gummiplatte wird ein Blatt Papier gelegt und der Fuß auf die Platte gestellt. Durch gleichmäßigen Druck des stehenden oder sitzenden Patienten wird die Kontaktfläche der Fußsohle auf das Papier übertragen. Häufig genutzt wird auch ein dreidimensionaler Fußabdruck in Trittschaum /4/. Dazu wird ein industriell gefertigter Schaumblock verwendet, in den der Patient hineintritt und den jeweiligen Fuß möglichst gleichmäßig belasten muss. Dieser Trittschaum bietet den Vorteil, dass auch Höhenmaße entnommen werden können. Der Einsatz erfordert aber etwas Erfahrung, da jede Bewegung des Fußes eine bleibende Verformung des Schaums bewirkt, die bei der weiteren Fertigung Fehler nach sich ziehen kann. Weitere Maße, vor allem Umfangsmaße, werden mit dem Maßband abgenommen. In besonderen Fällen wird von den Füßen ein Gipsmodell angefertigt, dem umfassende Forminformationen entnommen werden können. Gleichzeitig bietet dieses Verfahren die Möglichkeit, den Fuß in bereits korrigierter Form zu erfassen /9/. Basierend auf diesem Gipsmodell wird der entsprechende Leisten, die Orthese, Prothese oder Einlage gefertigt /3, 4, 9/.

Zunehmend werden auch CAD-Systeme für die Erarbeitung der Versorgungen genutzt. Dazu werden laut /10/ die Trittspur oder die Fußsohle gescannt und die Fußmaße in das System eingegeben. Auch 3D-Scanner wurden entwickelt, die aber aus verschiedenen Gründen nicht optimal für den Einsatz in der OT und OST sind. Ein Grund ist das Gewicht der Messgeräte, welches teilweise 40 bis 80 kg beträgt. Viele Orthopädieschuhtechniker und Orthopädietechniker sind vor Ort beim Arzt in der Sprechstunde oder im Krankenhaus tätig. Ein transportables, handliches Gerät wäre dann sinnvoll. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren auch zunehmend Geräte entwickelt, die für den mobilen Einsatz geeignet sind /28, 29/. Diese können mit der Hand geführt werden, weisen aber unterschiedliche Nachteile auf. Die Messgenauigkeit weist relativ große Toleranzen aus oder das Gewicht ist noch relativ hoch und das Gerät muss deshalb mit beiden Händen geführt werden. Dies kann die Erfassung der Füße bei bestimmten Körperhaltungen erschweren.

Ein weiterer Nachteil aller bisher auf dem Markt verfügbaren Geräte ist der hohe Anschaffungspreis, der bei 20.000 Euro beginnt und oft darüber liegt. Damit sind diese Geräte für die kleinen und mittleren Unternehmen meist unerschwinglich.

Aus diesem Grund wurde ein Forschungsprojekt beantragt, dessen Ziel die Entwicklung eines speziellen Fußmessgerätes für die Orthopädienschuhtechnik war. Dieses Gerät muss alle Informationen über den Fuß und optional den Unterschenkel liefern, die für die Herstellung von orthopädischen Maßschuhen, Einlagen, Orthesen oder anderen Schuhwerks erforderlich sind. Dabei wurden kurze Erfassungszeiten angestrebt werden, um Zwangshaltungen zu vermeiden und der Patient nicht länger als 2 Sekunden regungslos verharren muss.

Das Gerät muss von Gewicht, Größe und Handhabung so gestaltet sein, dass der Orthopädienschuhtechniker es auch bei Einsätzen in Arztpraxen oder Kliniken verwenden kann. Das Messsystem muss Datenschnittstellen zum Austausch der Fußdaten und zur Weiterverarbeitung in CAD/CAM-Systemen besitzen. Das System soll traditionelle Arbeitsweisen der Orthopädienschuhtechniker durch computergestützte Datenerfassung und -verwaltung ergänzen und keine Zwänge zu Änderungen der Arbeitsprozesse induzieren. Automatisiert erfasste, vollständige 3D-Fußmodelle ermöglichen neuartige Datenkommunikationsverfahren im Herstellungsprozess orthopädischen Schuhwerks. Es soll eine solch hohe Datenqualität erreicht werden, dass eine direkte Verwendung der Daten für CNC-Bearbeitungsverfahren möglich ist. Durch konsequente, durchgängige Prozessunterstützung sollen erhebliche Kostenvorteile durch Einsatz des Messsystems erzielt werden. Durch die angestrebte Mobilität und Bedienfreundlichkeit des Messsystems wird dessen wirtschaftlich rentabler Einsatz gewährleistet. Angestrebt wurde eine preiswerte Lösung, deren Anschaffungskosten 10.000,- € nicht übersteigen sollen.

Als Messverfahren für das Fußmesssystem sollte ein aktives Stereoskopieverfahren /19, 20/ gewählt werden. Dieses bekannte Aufnahmeverfahren dreidimensionaler Daten beeindruckt durch kurze Aufnahmezeiten, Robustheit und ist kostengünstig realisierbar. Die Berechnung der Raumkoordinaten erfolgt über Triangulation zwischen Korrespondenzen in den Bildern der eingesetzten Kameras /21, 22, 23/. Das zentrale Problem der Stereo-Verfahren, die Suche korrespondierender Punkte, wird beim aktiven Stereoskopieverfahren durch Einsatz einer zusätzlichen Lichtquelle gelöst. Die Lichtquelle projiziert Einzelmuster oder Musterfolgen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) in die aufzunehmende Szene. Die Mustercharakteristika werden zur Suche der Korrespondenzpunkte genutzt, mit deren Hilfe das Tiefenbild der Szene und somit die Raumkoordinaten berechnet werden können /24, 25/. Das aktive Stereoskopieverfahren benötigt somit mindestens eine strukturierte Beleuchtung zur Ausleuchtung der Szene und 2 Kameras zur Datenerfassung. Mit Hilfe eines Kalibrierkörpers und des Tsai-Algorithmus /27/ ist es möglich alle Kameraparameter der Stereo-Bildpaare zu berechnen. Nach erfolgter, einmaliger Kalibrierung werden epipolare Korrespondenzpunkte der Kamera-paare gesucht. Die Verschiebung der Korrespondenzpunkte zwischen rechtem und linkem Kamerabild ist ein Maß für die Tiefe des Bildpunktes. Somit können die 3D-Punkte eines Kamerapaares berechnet werden. Da ein Fußmodell nicht mit nur einer Aufnahme erfasst werden kann, ist das Modell durch Registrierung (Überlagerung) mehrerer Aufnahmen zu vervollständigen /22, 23, 25/. Das entstandene Rohdatenmaterial, die Punktwolke, muss mit geeigneten Verfahren an den Überlappungsbereichen der Einzelansichten geglättet werden /24/. Zur Generierung eines anthropometrischen 3D-Fußmodelles, sind semantisch hinterlegte Maße (Ferse, Spann, Länge, Breite, Umfang usw.) zu berechnen und dem Modell zuzuordnen.

## Ergebnisse

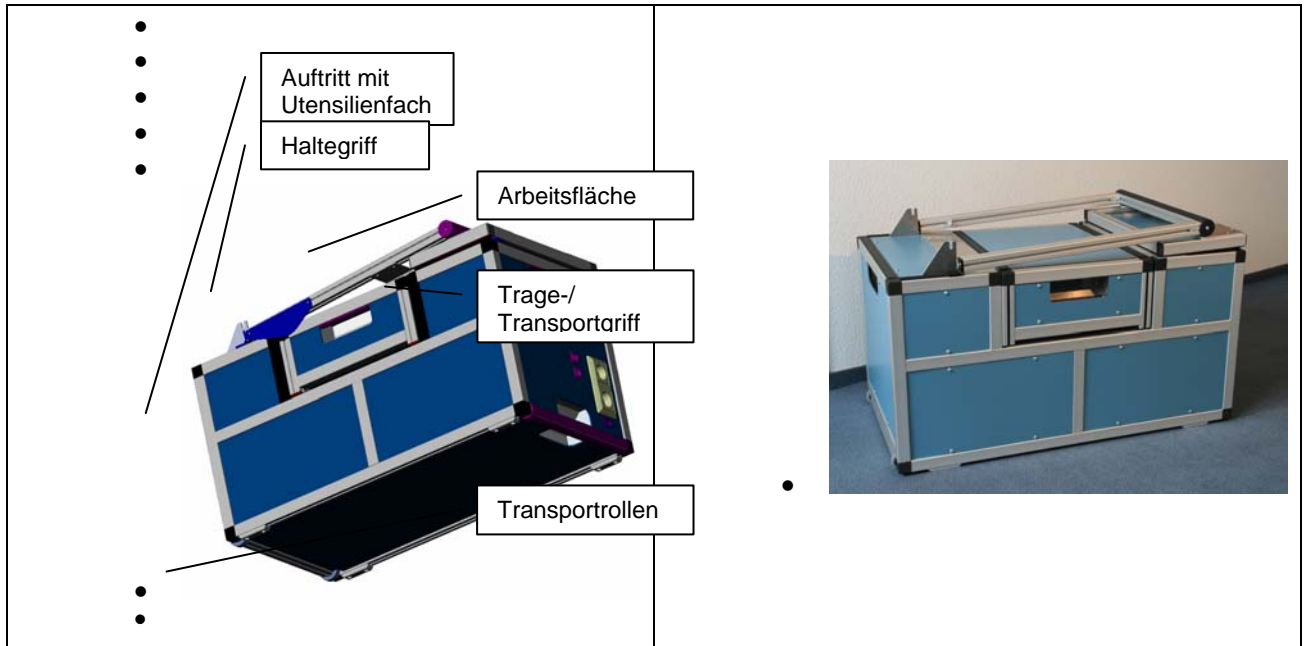
Ergebnis des Forschungsprojektes war das Funktionsmuster eines Fußmessgerätes, das folgende Anforderungen erfüllte:

- kurze Messzeiträume,
- keine Zwangshaltung,
- großzügige Messtiefe,
- robuste Datenqualität und Vollständigkeit,
- Prozessfähigkeit,
- Erstellung eines anthropometrischen 3D-Fußmodells,
- hohe Wirtschaftlichkeit und
- geringe Gerätekosten

Die Erfassung der 3D-Punktwolken erfolgt mittels Stereokameras, welche den Fuß aus drei Ansichten betrachten. Das entstandene Rohdatenmaterial, die Punktwolken, werden mit umfangreichen Verfahren an den Überlappungsbereichen der Einzelansichten geglättet. Zur Generierung eines anthropometrischen 3D-Fußmodelles, werden semantisch hinterlegte Maße (Ferse, Spann, Länge, Breite, Umfang usw.) berechnet und dem Modell zugeordnet.

Um durch Probandenbewegungen verursachte Erfassungsunsicherheiten zu vermeiden, wurden kurze Datenerfassungszeiten realisiert. Die 3D-Datenaufnahme beträgt je Proband nicht länger als 3 s, die nachfolgende, unabhängig vom Proband durchgeführte Berechnung des Volumenmodells und der Profildaten ca. 8 s. Bedingt durch belastungs- und tagesabhängige Schwankungen der Fußmaße wurde die geforderte Messgenauigkeit im Bereich von 1 mm für das Messsystem erreicht. Die Bearbeitung unvollständiger bzw. die Erkennung widersprüchlicher, d.h. fehlerhaft aufgenommener, Datensätze wird vom Messsystem unterstützt. Das Messsystem enthält Datenschnittstellen zum Austausch der Fußdaten und zur Weiterverarbeitung in CAD/CAM-Systemen. Durch den Datenexport im STL-Format (Surface Tesselation Language) ergänzt das System die traditionellen Arbeitsweisen der Orthopädieschuhtechniker durch computergestützte Datenerfassung und -verwaltung und induziert keine Zwänge zu Änderungen von Arbeitsprozessen.

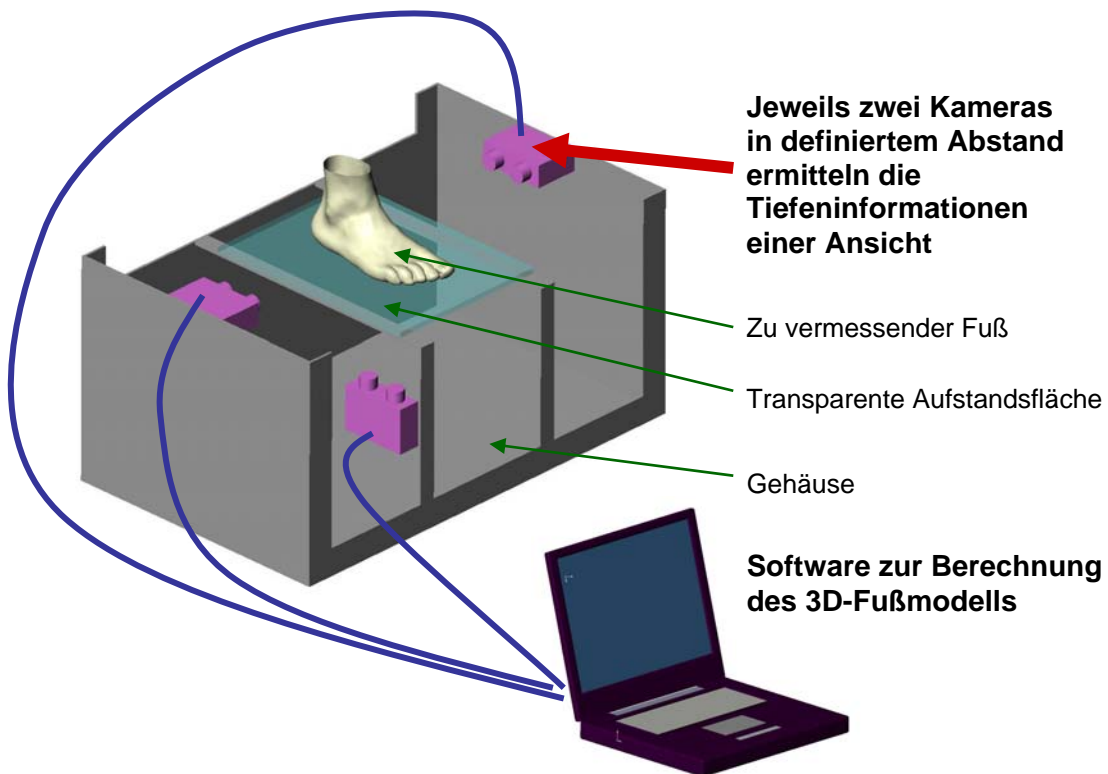
Das Funktionsmuster erfüllt in seinen Abmessungen (Größe im transportbereiten Zustand ca.: LxBxH 900x500x500mm) und der Funktion die Forderung nach Mobilität. Die Abmessungen erlauben eine problemlose Beförderung im Kofferraum eines PKW. Das Messgerät verfügt über Rollen für einen bequemen Transport. Das für die Messungen erforderliche Equipment, wie Laptop, Anschlusskabel, etc. kann im Gerät untergebracht werden. Auf- und Abbau sind mit wenigen Handgriffen erledigt.



- **Abbildung 1:**
- **Messgerät zum Transport zusammengelegt**

- **Abbildung 2:**
- **aufgebautes Funktionsmuster in transportbarem Zustand**

In dem Funktionsmuster wurden insgesamt drei Sensorsysteme, sowie drei Beleuchtungseinheiten zusammen mit der erforderlichen Steuerungshardware verbaut. Die Steuerung des Aufnahmeablaufs erfolgt durch die Software.





**Abbildung 3: Messgerät bei der Erprobung**

### Grenzen des Funktionsmusters

Während der Erprobung zeigte sich, dass die ursprünglich angedachte optische Anordnung der Sensoren über drei Spiegel aus unterschiedlichen Gründen nicht realisierbar ist. Damit verkürzten sich die optischen Entfernungen zwischen dem Objekt und den oberen Sensoren erheblich. Die Folge ist ein stark eingegrenztes Sichtfeld, was die mögliche Erfassungshöhe über der Auftrittsfläche auf max. 200 mm beschränkt. Damit konnte die ursprüngliche Forderung nach einer Aufnahmehöhe bis einschließlich Unterschenkel (350 bis 400 mm) nicht realisiert werden. Des Weiteren lässt sich das 3D-Modell auf Grund fehlender Sichtbereiche nicht vollständig ableiten. Im Bereich von Ferse und Fußspitze, sowie an der Fußoberseite (Rist) verbleiben nicht vollständig erkennbare Oberflächenbereiche. Um ein komplettes 3D-Modell des Fußes erstellen zu können, sind unter den gegebenen Bedingungen zwei weitere Kameras erforderlich, wodurch sich der Raumbedarf des Gerätes ebenfalls vergrößern würde. Das mobile Handling einer solchen Messeinrichtung wird erheblich eingeschränkt bzw. unmöglich.

Die vom projektbegleitenden Ausschuss geforderten Abmessungen des Aufnahmebereiches und die absolut vollständige Darstellung des Fußes können deshalb nur in einem stationären Gerät realisiert werden, welches eine größere räumliche Ausdehnung zulässt.

Aus den genannten Gründen erfolgten im Verlauf der Projektbearbeitung Softwaremodifikationen und -weiterentwicklungen, die es zukünftig erlauben eine unbegrenzte Anzahl von Aufnahmen aus unterschiedlichen Richtungen zu einem 3D-Modell zusammenzuführen. Unter Verwendung eines optischen Trackingsystems wird eine Reihe von Sensoraufnahmen in ein einheitliches Koordinatensystem transferiert und als geschlossenes 3D-Modell dargestellt. Dazu ist als Hilfsmittel ein im Scan-Raum aufgestellter, unverrückbarer Trackingkörper erforderlich.

Mit diesem Verfahren kann weiterführend ein kompaktes Handgerät entwickelt werden. Durch die unbegrenzte Anzahl von Einzelaufnahmen aus differenzierten Perspektiven ist auch die Erfassung von orthopädisch besonders schwierigen Fällen, z. B. mit Hinterschneidungen, realisierbar. Nachteilig bei diesem Verfahren ist der relativ lange Zeitraum zur Erstellung der einzelnen Aufnahmen, in dem der Fuß nicht bewegt werden darf.

## Zusammenfassung

Im Rahmen des FuE-Projektes wurde ein mobil einsetzbares Messverfahren für orthopädische Indikationen entwickelt. Mit dem aufgebauten Funktionsmuster wurde die Funktionsfähigkeit des Verfahrens nachgewiesen.

Zur Erzeugung des anthropometrischen Fußmodells werden Methoden der Stereobildverarbeitung eingesetzt. Der beschränkte Bauraum eines transportablen Gerätes erzwingt Kompromisse bei der Größe des Aufnahmebereiches und der Vollständigkeit des Volumenmodells.

Aus diesen Erkenntnissen heraus sieht das Projektteam weiteren Entwicklungsbedarf. Dabei sollte der Einsatz eines Trackingverfahrens unter Ausnutzung der Methoden der Stereobildverarbeitung intensiver verfolgt werden.

Für die „*Vorrichtung zur Abbildung eines räumlichen Objektes als Volumenmodell*“ wurden im Rahmen des FuE-Projektes beim Deutschen Patent- und Markenamt Schutzrechte beantragt und mit der Registriernummer DE 20 2006 017 254 U 1 gewährt.

Das Forschungsprojekt 15269 wurde durch das Bundeswirtschaftsministerium über die AiF gefördert. Die Bearbeitung erfolgte durch das PFI Pirmasens e.V. und ITW e.V. Chemnitz. Der Abschlussbericht kann im PFI bei Frau Dr. Richter angefordert werden.

## Literatur

- /2/ Werner Mackrodt, Günter Wellmitz  
Der orthopädische Schuh – Lehrbuch für Orthopädienschuhmacher  
Ullstein Mosby GmbH & Co. KG, Berlin/Wiesbaden, 1995, S. 115 ff.
- /3/ Emil Kraus  
Fachkunde Orthopädie-Schuhtechnik  
C. Maurer Druck und Verlag, Geislingen/Steige, 1986, S. 71 ff.
- /4/ Carl R. H. Rabl, Werner Nyga  
Orthopädie des Fußes  
Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1994
- /9/ Gerd M. Ivanic  
Grundlagen der Versorgung mit orthopädischen Einlagen  
Sonderheft der Orthopädienschuhtechnik Mai 2004 – Einlagen  
C. Maurer Druck und Verlag, 2004
- /10/ [www.rothballer.de](http://www.rothballer.de)
- /19/ Helmut Hamfeld  
Aktive Stereoskopie - Neue Verfahren zur dreidimensionalen Vermessung von  
Objekten  
Dissertation im Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern  
Kaiserslautern 2002
- /20/ Karsten Mühlmann  
Design und Implementierung eines Systems zur schnellen Rekonstruktion  
dreidimensionaler Modelle aus Stereobildern  
Dissertation Universität Mannheim, 2002
- /21/ H.-Y. Shum, R. Szeliski  
Stereo reconstruction from multiperspective panoramas  
In: Seventh International Conference on Computer Vision (ICCV'99), S. 14–21  
Kerkyra, Greece, 1999
- /22/ O. Faugeras, Q.-T. Luong

- The Geometry of Multiple Images  
MIT Press, Cambridge, 2001
- /23/ R. I. Hartley, A. Zisserman  
Multiple View Geometry.  
Cambridge University Press  
Cambridge, 2000
- /24/ S. B. Kang, R. Szeliski, J. Chai  
Handling occlusions in dense multi-view stereo  
In: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition  
(CVPR'2001)  
Kauai, Hawaii, 2001
- /25/ K. N. Kutulakos  
Approximate N-viewstereo  
In: Sixth European Conference on Computer, Vision (ECCV 2000), S. 67–83  
Springer-Verlag, Dublin, 2000
- /27/ Roger Tsai  
<http://www-2.cs.cmu.edu/~rgw/TsaiCode.html>
- /28/ Firma Polhemus, 3D-Scanner FastScan  
[www.polhemus.com](http://www.polhemus.com)
- /29/ Abschlussbericht des AiF-Forschungsprojektes 12744  
„Entwicklung eines preiswerten optischen Fußmessgerätes zur sicheren Auswahl passender Schuhe“