

Entwicklung eines haptischen Sensor-Aktor-Systems für Anwendungen in der virtuellen Realität

Walaa Khaled¹, Stefan Reichling², Otto T. Bruhns², Gareth J. Monkman³,
Stefan Egersdörfer³, Mario Baumann⁴, Holger Böse⁴, Herbert Freimuth⁵,
Abdi Tunayar⁵ und Helmut Ermert¹

¹Institut für Hochfrequenztechnik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

²Lehrstuhl für Technische Mechanik, Ruhr-Universität Bochum, 44780 Bochum

³Fachhochschule Regensburg, 93025 Regensburg

⁴Fraunhofer Institut für Silicatforschung, 97082 Würzburg

⁵Institut für Mikrotechnik Mainz GmbH, 55129 Mainz

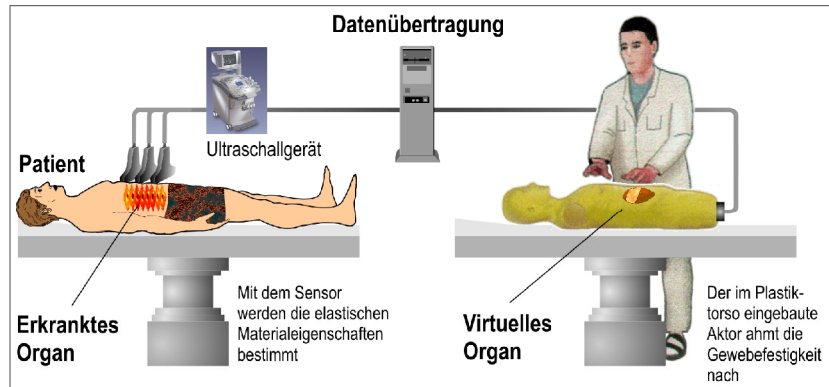
Email: Walaa.Khaled@rub.de

Zusammenfassung. Die mechanischen Eigenschaften des biologischen Gewebes stellen wichtige Diagnoseinformationen dar und sind von großer histologischer und pathologischer Bedeutung. Insbesondere Tumoren stellen sich oft als Gewebeverhärtungen dar. Das Problem ist, dass konventionelle bildgebende Verfahren (Ultraschall, Computertomographie, Magnetresonanztomographie) oftmals keine pathologische Verhärtungen im Gewebe (wie z. B. in Brust- oder Prostatakrebs) erkennen können. In diesem Projekt wird ein neuartiges System für die Erfassung und Darstellung haptischer Informationen in der virtuellen Realität entwickelt. Mit einem haptischen Sensor-Aktor-System soll die Konsistenz eines Objektes orts aufgelöst erfasst und an anderer Stelle für den Benutzer tastbar dargestellt werden. Das haptische System wird als eine Technologieplattform angesehen, auf der anschließend verschiedene Produkte für die Medizintechnik, die Unterhaltungsindustrie oder den Ausbildungssektor entwickelt werden können.

1 Einleitung

Beim ertasten der Festigkeit von Materialien sind beide Formen der haptischen Wahrnehmung, die kinästhetische und taktile Wahrnehmung, betroffen [1]. Besondere Anforderungen werden an ein haptisches System gestellt, wenn das betreffende Objekt inhomogene Materialeigenschaften aufweist. Ein Beispiel für die Bedeutung der haptischen Information von inhomogenen Objekten stellt die in der Medizin weit verbreitete Tastuntersuchung (Palpation) dar. Dabei ertastet der Arzt die Konsistenz von Organen oder Gewebe wie z. B. der Prostata oder der weiblichen Brust, um lokale Verhärtungen zu erfassen, die ein Indikator für pathologische Veränderungen sein können. Die Verfügbarkeit eines haptischen Systems, das durch eine geeignete Sensorik die Konsistenz von Materialien orts aufgelöst erfasst und diese Information auf einer Aktorvorrichtung einem

Abb. 1. Arzt und Patient müssen für Tastuntersuchungen mit dem haptischen Sensor-Aktor-System nicht am gleichen Ort sein



Benutzer fühlbar vermittelt, würde somit eine Vielzahl von neuen technischen Möglichkeiten eröffnen. So könnten medizinische Befunde über den Zustand von Organen eines Patienten an einem Ort detektiert (wie in Abb. 1) und mit einer Datenübertragung einem Arzt an einem anderen Ort fühlbar zugänglich gemacht werden [2, 3].

Das Ziel der im folgenden beschriebenen Arbeiten besteht dementsprechend in der Entwicklung eines neuartigen Systems einschließlich der dafür erforderlichen Technologie, mit dem haptische Informationen über die Konsistenzverteilung in einem realen Objekt mit einem Sensor-Teilsystem erfasst und anschließend auf einem Aktor-Teilsystem für den Benutzer ertastbar dargestellt werden.

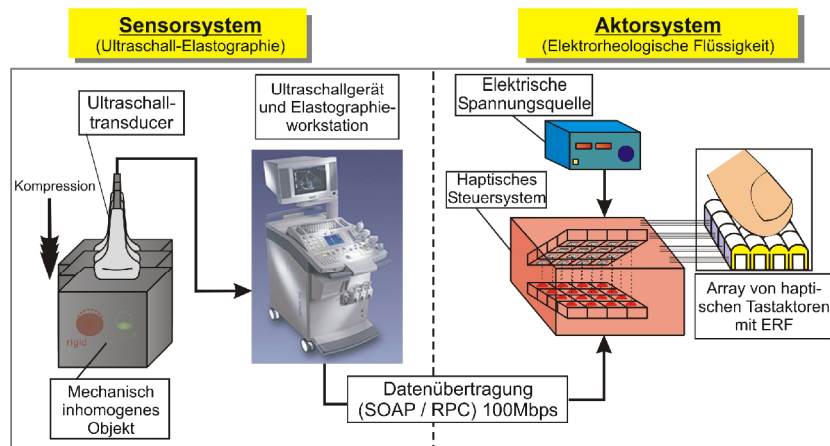
2 System Design

Eine schematische Darstellung des haptischen Sensor-Aktor-Systems (HASA-SEM) ist in Abb. 2 gezeigt. Zur Realisierung des sensorischen Teilsystems wird das Verfahren der Ultraschall-Elastographie eingesetzt. Die Idee besteht darin, simultan zur Ultraschallbildgebung die Objekte geringfügig zu verformen und in aufeinanderfolgenden Bildern die internen Dehnungen auszuwerten, die von der Konsistenzverteilung der Objekte abhängen. Durch eine schnelle Datenaufnahme und -auswertung lassen sich derartige Dehnungsbilder auch in Echtzeit zur Verfügung stellen [4]. Aktoren mit hoher räumlicher Auflösung und Echtzeitfähigkeit sind für eine erfolgreiche Datenübertragung erforderlich. Zur Realisierung der Aktor-Einheit wird eine elektro-rheologische Flüssigkeit (ERF) eingesetzt, deren Konsistenz sich in einem elektrischen Feld steuern lässt [5].

3 Sensorsystem auf Basis der Ultraschall-Elastographie

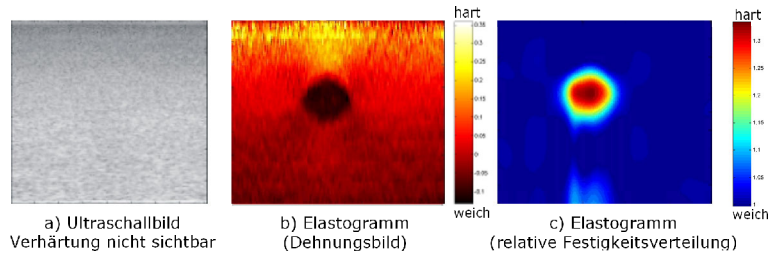
Die Ultraschall-Elastographie ist eine neue Abbildungsmodalität, die im Gegensatz zu anderen bildgebenden Verfahren in der Lage ist, histologisch relevante

Abb. 2. Schema des haptischen Sensor-Aktor-Systems (HASASEM)



mechanische Veränderungen des Gewebes darzustellen, da solche auf einem konventionellen Ultraschallbild, dem sogenannten B-Mode, im Allgemeinen nicht direkt sichtbar sind (Abb. 3a). Die grundlegende Idee der Elastographie besteht nun darin, während der Durchführung der Sonografie das zu untersuchende Objekt geringfügig, z. B. quasistatisch zu verformen, d.h. mit der Ultraschallsonde zu stauchen. Anschließend wird durch Auswertung von zwei aufeinanderfolgenden Bildern, die in unterschiedlichen Belastungszuständen aufgenommen wurden, die axiale Komponente des Verschiebungsfeldes in jedem Bildpunkt bestimmt. Die mit diesem Verfahren aufgenommenen Verschiebungsverteilungen der einzelnen Materialpunkte können einerseits zur Berechnung der Dehnungsverteilung herangezogen, und als ein Dehnungsbild (Abb. 3b) dargestellt werden. Andererseits kann mit Hilfe der ermittelten Verschiebungen durch Lösung des inversen Problems der Elastostatik die Festigkeitsverteilung im betrachteten Querschnitt ermittelt und anschließend sowohl visuell als auch haptisch wiedergegeben werden. Zur Lösung des inversen Problems der Elastostatik lassen sich mit Hilfe der sogenannten direkten Methode die Gleichgewichtsbedingungen der Elastostatik herleiten und in eine lineare, hyperbolische, partielle Differentialgleichung für den Elastizitätsmodul umwandeln, die dann unter der Annahme eines ebenen mechanischen Problems numerisch gelöst werden kann. In diesem Vorhaben wurden unterschiedliche mathematische Ansätze und theoretische Verfahren miteinander verglichen, implementiert und auf ihre Eignung im Rahmen des Projektes hin untersucht [6]. Schließlich wurden mit geeigneten numerischen Lösungsmodellen das inverse Problem gelöst und die relativen mechanischen Eigenschaften (Abb.3c) des Phantoms bestimmt. Dadurch wird mit dem Sensorsystem eine quantitative Erfassung der haptischen Gewebefestigkeiten ermöglicht.

Das Sensorsystem und die Aktoreinheit sind über ein Intranet verbunden. Die haptischen Daten werden mit hoher Auflösung von dem Sensor zu der Aktoreinheit mit Hilfe von Simple Object Access Protokollen (SOAP) übertragen.

Abb. 3. Echtzeit-Elastographie, dargestellt an einem Gewebe-Phantom

4 Das Aktorsystem

Zum Design der Aktoreinheit wird eine elektrorheologische Flüssigkeit eingesetzt, die im elektrischen Feld versteift und nach Abschalten des Feldes wieder flüssig wird (Abb. 4a). Bei einer Variation des Stempelaufbaus (Abb. 4b) wurde festgestellt, dass mit einem metallischen Stempel besonders hohe Widerstandskräfte im Aktor erzeugt werden können.

Um ausreichend starke haptische Effekte in kleinen Aktoren zu generieren, muss eine elektrorheologische Flüssigkeit zur Verfügung stehen, die hohe Schubspannungen unter den Bedingungen aufweist, die im Aktor auftreten. Dementsprechend wurden die elektrorheologischen Eigenschaften verschiedener Fluide untersucht. Abb. 5 zeigt den Anstieg der Schubspannung mit steigender Feldstärke für eine Reihe von elektrorheologischen Flüssigkeiten, von denen die ERF 168-3 als besonders geeignet für den Einsatz in haptischen Aktoren ausgewählt wurde. Man erkennt, dass bei einer angelegten Feldstärke von 2 kV/mm Kräfte bis nahezu 10 N erreicht werden. Bei einer wirksamen Stempeloberfläche von ca. 1 cm² werden damit ausreichend starke haptische Wirkungen erreicht. Somit konnte nachgewiesen werden, dass sich bei einem geeigneten Wirkprinzip mit elektrorheologischen Aktoren deutlich spürbare Konsistenzveränderungen erzeugen lassen.

Gegenwärtig werden Aktoren mikrotechnisch hergestellt (Abb. 5 b) und in einem Aktorarray erprobt. Eine besondere Aufgabe stellt die individuelle Ansteuerung der Vielzahl von Aktoren mit Spannungen von über 1kV bei sehr ge-

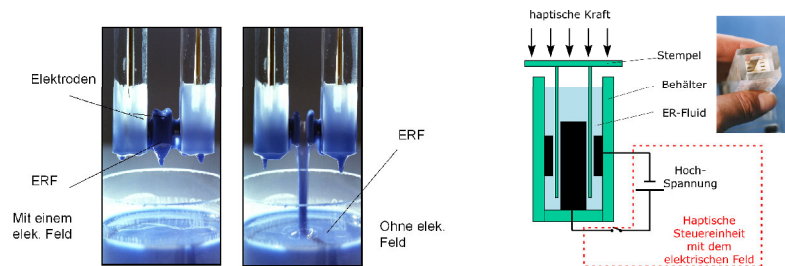
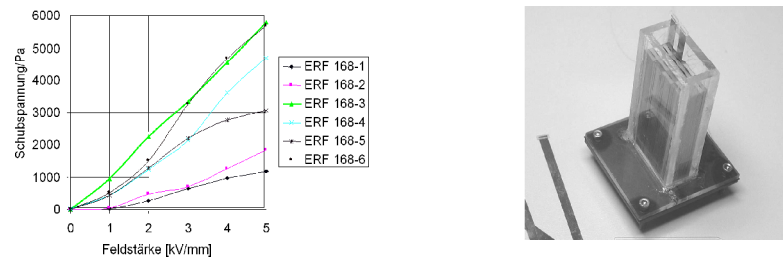
**Abb. 4.** a) ERF Untersuchungen im Labor b) Fluidzelle mit Stempelaktor

Abb. 5. a) ERF Schubspannung mit steigender Feldstärke b) Aktorarray



ringen Stromstärken dar. Ein geeignetes Schaltkonzept mit einem Optokoppler wurde dafür entwickelt.

5 Ergebnisse und Diskussion

Im weiteren Verlauf des Vorhabens wurde ein Prototyp des Sensor-Aktor-Systems aufgebaut, mit dem die prinzipielle Machbarkeit aufgezeigt werden konnte. Die räumliche Auflösung des Systems wurde zu 2.4mm x 2.4mm gemessen. Der Prototyp besteht aus mehr als 16 Elementen und wurde erfolgreich erprobt und getestet. Für eine verbesserte Auflösung wird eine Aktoreinheit mit mehr als 1000 Elementen entwickelt. Dafür wird ein erweitertes Mikroaktorarray mit entsprechender Fertigungs-technik gebaut. Interessante Anwendungsgebiete werden in der Medizintechnik, in der Unterhaltungsindustrie, in der Informations- und Kommunikationstechnik sowie im Ausbildungssektor und in der Telerobotik gesehen.

Literaturverzeichnis

1. Burdea GC. Force and Touch Feedback for Virtual Reality. Wiley, New York; 1996.
2. Khaled W, Bruhns OT, Reichling S, et al. A New Haptic Sensor Actuator System for Virtual Reality Applications in Medicine. In: Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention MICCAI; 2003. p. 132–140.
3. Khaled W, Ermert H, Reichling S, et al. Palpation Imaging using a Haptic System for Virtual Reality Applications in Medicine. In: Studies in Health Technology and Informatics (MMVR). vol. 98. Wiley, New York; 2004. p. 147–153.
4. Pesavento A, Lorenz A, Siebers S, Ermert H. New real-time strain imaging concepts using diagnostic ultrasound. Physics in Medicine Biology 2000;45:1423–1435.
5. Böse H, Trendler A. Smart fluids and their properties - perspectives for new actuators. In: Euromat; 2000. p. 1–6.
6. Rychagov MN, Khaled W, Reichling S, et al. Numerical modeling and experimental investigation of biomedical elastographic problem by using plain strain state model. In: Fortschritte der Akustik DAGA; 2003. p. 586 – 589.