



universitätsverlag  
ilmenu

---

*Chaykina, Alexandra; Griebel, Stefan; Zentner, Lena:*

**Nachgiebiges Sensorsystem zur Ermittlung von Scherkräften**

**URN:** urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-419-7

**URL:** <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033-419-7>

---

*Erschienen in:*

10. Kolloquium Getriebetechnik : Technische Universität Ilmenau, 11. - 13. September 2013. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2013. - S. 419-436. (Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 2)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-065-5 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013100033>

Universitätsverlag Ilmenau, 2013

<http://www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag/>

## NACHGIEBIGES SENSORSYSTEM ZUR ERMITTLUNG VON SCHERKRÄFTEN

*Alexandra Chaykina, Stefan Griebel, Lena Zentner*

TU Ilmenau, Fachgebiet Mechanismentechnik,

E-Mail: alexandra.chaykina@tu-ilmenau.de

### **Abstract**

In diesem Beitrag wird ein neuartiges, komplett nachgiebiges Sensorsystem zum Erfassen des Betrages und der Richtung einer wirkenden Scherkraft oder der Verteilung von Scherkräften auf einer Oberfläche vorgestellt. Das System besteht aus leitenden und nicht leitenden Silikonen und erreicht seine Funktion über die große Verformbarkeit dieser hochelastischen Materialien. Die Funktionsfähigkeit der vorgeschlagenen geometrischen Gestalt wird mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) geprüft. Anschließend wird das Sensorsystem aufgebaut und mittels Versuche wird das gewählte Prinzip zur Ermittlung der Richtung und des Betrages einer Scherkraft verifiziert.

This paper presents a novel completely flexible sensor system for detecting of magnitude and direction of applied shear force or distribution of shear forces on the surface. The sensor system consists of conductive and nonconductive silicone rubber. The principle is based on the large deformation capacity of these highly elastic materials. The functionality of proposed shape is tested using the finite elements method (FEM). Subsequently the sensor system is constructed and the selected principle for detecting of magnitude and direction of shear force is verified.

## 1 Einführung

Sensorsysteme zur Ermittlung von Scherkräften finden ihre Anwendung vor allem in der Roboter- und Medizintechnik. Beispielsweise zur Realisierung eines sicheren Greifens in der Robotertechnik wird die Information über die zwischen Greifobjekt und Robotergreifer wirkenden Scherkräfte benötigt [1,2]. Für medizintechnische Anwendungen ist die Ermittlung von Scherkräften ebenfalls oft erforderlich. Zum Beispiel die rechtzeitige Erkennung von Scherkräften, welche an den Berührungspunkten zwischen Lagerungssystem und Patienten auftreten, minimiert das Risiko der Dekubitusentstehung [3]. Die Ermittlung von Scherkräften wird bei der Entwicklung von orthopädischen Schuhen, zur Untersuchung der Fußphysiologie sowie zur Vorbeugung von Wunden benötigt [4,5]. Auch in der Prothetik ist die Scherkraftermittlung zur besseren Anpassung der Prothesen denkbar [6].

Eine der wichtigsten Anforderungen, die die Sensorik an der Mensch-Maschine-Schnittstelle vor allem aber in der Medizintechnik gewährleisten muss, ist eine gewisse Nachgiebigkeit. Die aus dem Stand der Technik bekannten Systeme zur Ermittlung von Scherkräften bestehen meist aus vier Teilkomponenten: aus Sensorelementen zur Energiewandlung (z. B. piezoelektrische [4,7], piezoresistive [6,8,9], kapazitive [10,11], optische [12,13], induktive bzw. magnetoresistive [14] Sensorelemente), aus Vorrichtungen zur Übertragung von Kräften zu den Sensorelementen (Kraftübertragungsmechanismen), aus Datenleitungen und aus einer Auswertungs elektronik.

Je nachdem wie Sensorelemente und Kraftübertragungsmechanismen von einem Sensorsystem ausgeführt sind, können diese in starre, teilnachgiebige und nachgiebige Sensorsysteme aufgeteilt werden.

Die meisten der bekannten Lösungen sind teilnachgiebig. In diesem Fall bestehen entweder die Kraftübertragungsmechanismen aus hochelastischen Materialien [1,10,11], oder die fehlende Nachgiebigkeit wird durch Einbettung von Sensorelementen und Kraftübertragungsmechanismen in ein flexibles Substrat erreicht [6,8,9]. Dieser Einbettungsprozess erfordert zusätzlichen Mehraufwand und Mehrkosten, da elastische mit geringer elastischen Materialien verbunden werden müssen. Weiterhin ist aus Gründen der Verletzungsminimierung und des Komforts an der Mensch-Maschine-Schnittstelle eine komplett nachgiebige Variante zu bevorzugen.

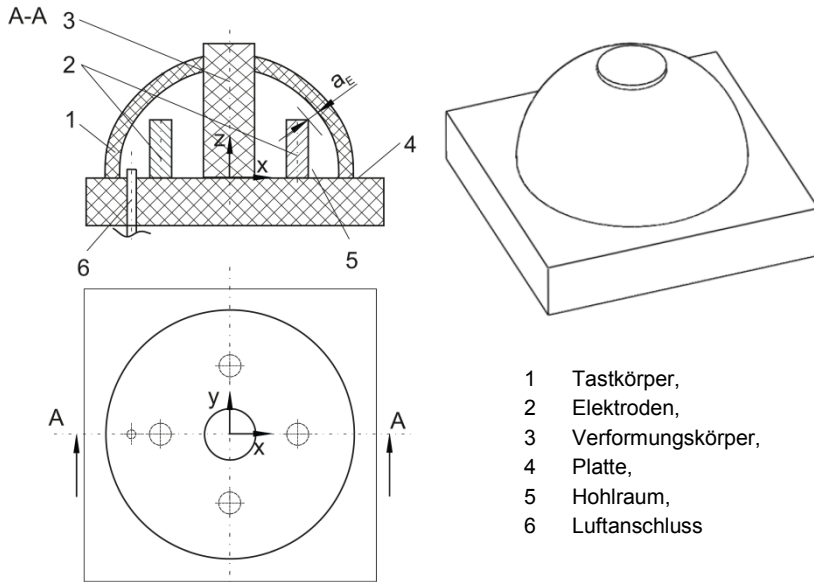
Im vorliegenden Artikel ist ein komplett nachgiebiges Sensorsystem zur Ermittlung von Scherkräften dargestellt. Dieses erlaubt, auf eine einfache Art und Weise den Betrag und die Richtung einer wirkenden Scherkraft oder die Verteilung von Scherkräften auf einer Oberfläche zu erfassen.

## 2 Material und Methoden

Als Grundmaterial des Sensorsystems eignen sich Silikonelastomere, die in verschiedenen Shorehärten kommerziell verfügbar sind. Leitfähige Silikonelastomere, die aufgrund der im Material beinhaltenen Füllstoffe, wie z. B. Ruß, eine elektrische Leitfähigkeit grösser Null aufweisen [15], können unter Dehnung bzw. Stauchung ihren spezifischen Volumenwiderstand erhöhen bzw. verringern. Sie besitzen somit einen Effekt, der für die Sensorisierung genutzt werden kann. Weiterhin können derartige Elastomere auch als elektrische Leiter verwendet werden. Dies ermöglicht einfache prinzipielle Lösungen für die Entwicklung eines nachgiebigen Sensorsystems.

### 2.1 Funktionsprinzip

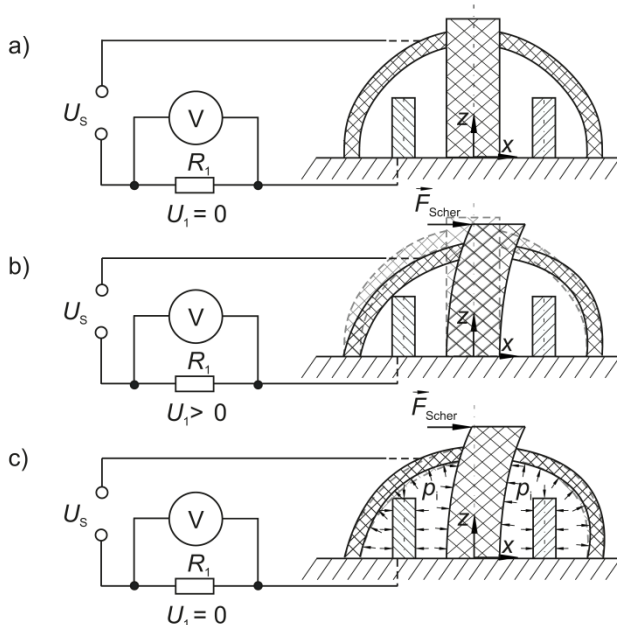
In Abbildung 1 ist der Aufbau des Sensorsystems dargestellt. Das Sensorsystem besteht aus einem elastischen Tastkörper, elastischem Verformungskörper und Elektroden, die zusammen auf einer Platte befestigt sind. Der Tastkörper ist mit dem Verformungskörper und der Platte luftdicht verbunden und bildet einen Hohlraum. Durch einen Luftanschluss ist die Änderung der Druckluft  $p_i$  im Hohlraum möglich. Vier Elektroden sind im gleichen Abstand und in einem Winkel von  $90^\circ$  um den Verformungskörper angeordnet. Die Elektroden erlauben eine Verschiebung in z-Richtung, wodurch der Abstand  $a_E$  zwischen dem Tastkörper und den Elektroden einstellbar ist.



**Abb. 1:** Aufbau des Sensorsystems

Der Verformungskörper und die Platte sind aus nichtleitfähigem Material gefertigt, der Tastkörper und die Elektroden hingegen werden aus leitfähigem Material gefertigt.

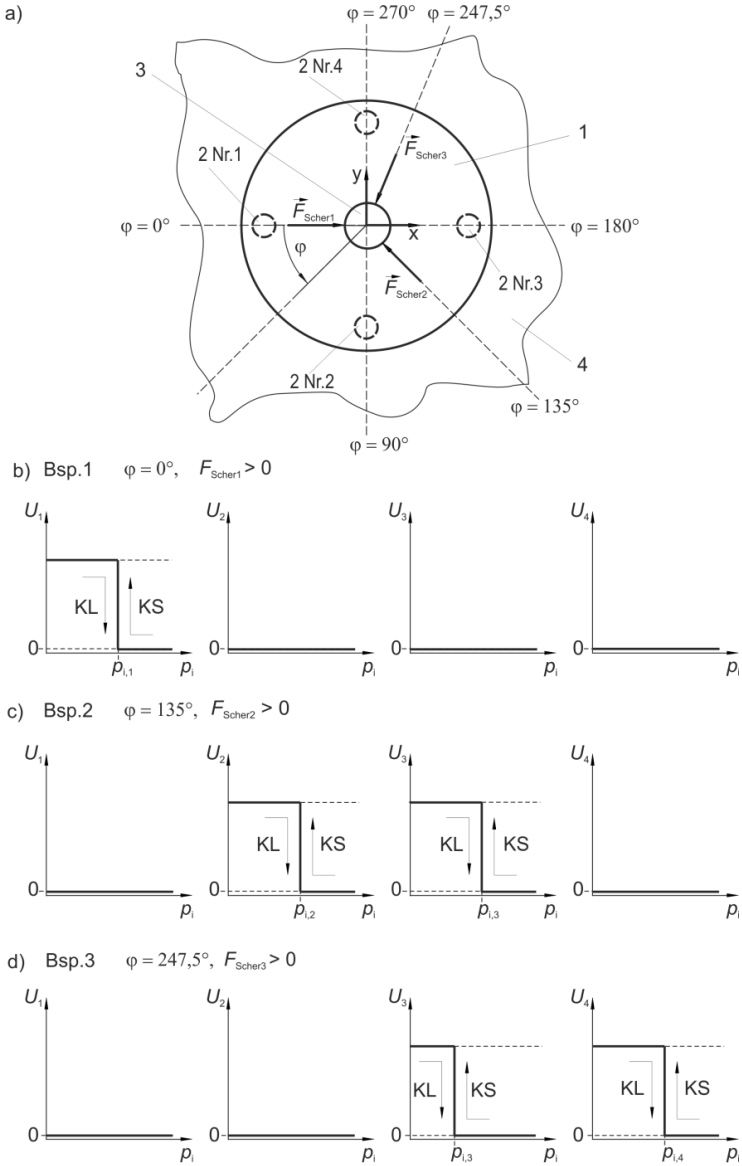
Das Funktionsprinzip des Sensorsystems lässt sich anhand der Abbildung 2 erklären. Beim Angreifen einer Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}}$  wird der Verformungskörper deformiert, was zur Änderung des Abstandes  $a_E$  zwischen dem Tastkörper und der entsprechenden Elektrode führt. Hierbei gibt es eine Minimalkraft  $F_{\text{Scher}}^*$ , ab der die beiden Elemente in Kontakt treten und somit den elektrischen Kreis schließen. Durch die Abhängigkeit des Abstandes  $a_E$  vom Tastkörper-Innendruck  $p_i$ , ist diese Minimalkraft  $F_{\text{Scher}}^*$  ebenfalls vom Tastkörper-Innendruck  $p_i$  abhängig. Unter Nutzung dieses Effektes wird der Betrag der wirkenden Scherkraft  $F_{\text{Scher}}$  über eine Messung des Tastkörper-Innendruckes  $p_i$  im Moment des Kontaktschließens bzw. -löSENS ermittelt. Hierzu wird eine Speisespannung  $U_s$  zwischen dem Tastkörper und Elektrode angelegt (vgl. Abb. 2a).



**Abb. 2:** Schematische Darstellung des Funktionsprinzips: a) Sensorsystem im Ausgangszustand; b) Sensorsystem unter Einwirkung einer Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}}$ ; c) Sensorsystem unter Einwirkung der Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}}$  und des Tastkörper-Innendruckes  $p_i$

Ob ein Kontakt geschlossen ist, kann bspw. durch die Ermittlung der Spannungen  $U_j$  über den Widerständen  $R_j$  festgestellt werden (mit  $j = \text{Elektrodennummer}$ ). Ist beim Wirken einer Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}}$  der Kontakt geschlossen, wird eine von Null verschiedene Spannung  $U_1$  am Widerstand  $R_1$  ermittelt (vgl. Abb. 2b). Wird der Tastkörper-Innendruck  $p_i$  erhöht, löst sich der Kontakt und die Spannung nimmt den Wert 0 V an (vgl. Abb. 2c).

Mit dem Sensorsystem ist es ebenfalls möglich die Richtung der angreifenden Scherkraft zu detektieren. In Abbildung 3a ist das Sensorsystem in der Draufsicht (vgl. Abb. 1) ohne elektrische Verbindungen im Ausgangszustand gezeigt.



**Abb. 3:** Prinzip der Richtungserkennung: a) Sensorsystem in der Draufsicht; b) - d) Diagramme der Spannungsänderung von vier Elektroden bei unterschiedlichen Richtungen der Scherkraft

**Beispiel 1 (Abb. 3b):** Wirkt eine Scherkraft auf den Verformungskörper, so kommt es, in Abhängigkeit der Richtung der Scherkraft, zum Kontaktschließen vom Tastkörper mit einer, maximal zwei Elektroden. Eine von Null verschiedene Spannung  $U_j$  (mit  $j =$  Elektrodennummer) kann nun über die entsprechenden Widerstände  $R_j$ , der durch die Elektroden Nummer  $j$  geschlossenen Stromkreise, ermittelt werden. Ferner ist in allen anderen Stromkreisen ohne Kontakt die Spannung  $U_j$  gleich 0 Volt. Wird anschließend der Tastkörper-Innendruck  $p_i$  erhöht, werden die geschlossenen Kontakte wieder gelöst und die gemessenen Tastkörper-Innendrucke  $p_{i,j}$  mit  $j = 1..4$  entsprechend der Elektrodennummer  $j$  an der Stelle des KontaktlöSENS ermittelt. Die Messung des Betrages erfolgt somit hier, bspw. an der Stelle des KontaktlöSENS. In den Diagrammen ist diese Verlaufsrichtung durch einen Verlaufspfeil und die Abkürzung KL (für KontaktlöSERichtung) gekennzeichnet. Anschließend werden über die Sensorkennlinien  $F_{\text{Scher},j}^*(p_i)$  der jeweiligen Elektrode die Einzelbeiträge ermittelt und die resultierende Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher, res}}^*$  nach Gleichung (2.1) errechnet.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{Scher, res}}^* = & \left( F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1}) - F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3}) \right) \vec{e}_x \\ & + \left( F_{\text{Scher}, 2}^*(p_{i,2}) - F_{\text{Scher}, 4}^*(p_{i,4}) \right) \vec{e}_y \end{aligned} \quad (2.1)$$

Hierbei wird über die Elektrode Nummer 1 ( $j = 1$ ) und  $p_{i,1}$  der Betrag der Scherkraftkomponente  $F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1})$  in positive x-Richtung ermittelt, über die Elektrode Nummer 2 ( $j = 2$ ) und  $p_{i,2}$  der Betrag der Scherkraftkomponente  $F_{\text{Scher}, 2}^*(p_{i,2})$  in positive y-Richtung, über die Elektrode Nummer 3 ( $j = 3$ ) und  $p_{i,3}$  der Betrag der Scherkraftkomponente  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3})$  in negative x-Richtung und über die Elektrode Nummer 4 ( $j = 4$ ) und  $p_{i,4}$  der Betrag der Scherkraftkomponente  $F_{\text{Scher}, 4}^*(p_{i,4})$  in negative y-Richtung.

**Beispiel 2 (Abb. 3c):** Wirkt beispielsweise eine Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}, 2}$  in Richtung  $\varphi = 135^\circ$  (vgl. Abb. 3a), kommt es zum Kontaktschließen des Tastkörpers mit der Elektrode Nr.2 und der Elektrode Nr.3. Eine Änderung der Spannung  $U_2$  und  $U_3$  kann über den durch diese Elektrode geschlossenen Stromkreis detektiert werden. Die Stromkreise der Elektrode Nr.1 und Nr.4 sind nicht geschlossen. Die entsprechenden Spannungen  $U_1$



und  $U_4$  sind gleich Null. Es wirkt somit eine Scherkraft zwischen  $\varphi = 90^\circ$  und  $\varphi = 180^\circ$ . Wird nun der Tastkörper-Innendruck  $p_i$  erhöht (entsprechend der Verlaufsrichtung KL), löst sich der Kontakt von Elektrode Nr.2 bei  $p_{i,2}$  und Elektrode Nr.3 bei  $p_{i,3}$ . Über die Kennlinie  $F_{\text{Scher}, 2}^*(p_i)$  kann nun der Betrag der in y-Richtung wirkenden Scherkraftkomponente mit  $F_{\text{Scher}, 2}^*(p_{i,2})$  ermittelt werden. Über die Kennlinie  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_i)$  kann der Betrag der in negative x-Richtung wirkenden Scherkraftkomponente mit  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3})$  bestimmt werden. Da die Kraft aus Richtung  $\varphi = 135^\circ$  wirkt, sind die ermittelten Drücke bei gleichem kürzestem Abstand  $a_E$  gleich groß  $p_{i,2} = p_{i,3}$ . Somit sind die Beträge der beiden ermittelten Scherkraftkomponenten,  $F_{\text{Scher}, 2}^*(p_{i,2})$  und  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3})$ , ebenfalls gleich groß. Durch die vektorielle Addition der beiden Komponenten nach der Gleichung (2.1) werden der Betrag und die Richtung der Scherkraft ermittelt. Ergänzend kann der Winkel  $\varphi$  über die Gleichung (2.2) berechnet werden.

$$\varphi = \left( 1 - \Phi \left( F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1}) \right) \right) \cdot \pi + \arctan \left( \frac{\left( F_{\text{Scher}, 2}^*(p_{i,2}) - F_{\text{Scher}, 4}^*(p_{i,4}) \right)}{\left( F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1}) - F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3}) \right)} \right) \quad 2.2$$

mit der Heaviside-Funktion nach Gleichung 2.3

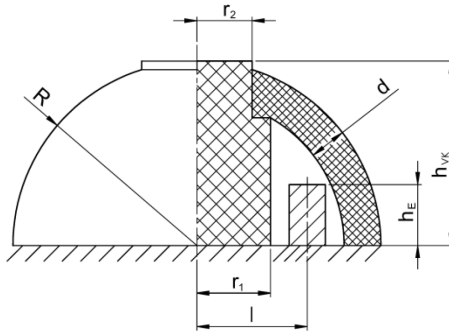
$$\Phi \left( F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1}) \right) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1}) \geq 0 \\ 0, & \text{wenn } F_{\text{Scher}, 1}^*(p_{i,1}) < 0 \end{cases} \quad 2.3$$

**Beispiel 3 (Abb. 3d):** Es ist ebenfalls möglich die Scherkraft anhand des Kontaktschließens zu messen. Hierzu ist der Tastkörper-Innendruck  $p_i$  so hoch zu wählen, dass beim Wirken, bspw. einer Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}, 3}$  in Richtung  $\varphi = 247,5^\circ$ , kein Kontakt geschlossen ist. Die zu messenden Spannungen  $U_1$  bis  $U_4$  sind dann gleich Null. Wird anschließend der Tastkörper-Innendruck  $p_i$  langsam auf  $p_i = 0$  abgelassen (entsprechend der Verlaufsrichtung KS), so kommt es zum Kontaktschließen (KS) des Tastkörpers mit der Elektrode Nr.3 bei  $p_{i,3}$  und der Elektrode Nr.4 bei  $p_{i,4}$ . Folglich kann eine von Null verschiedene Spannung  $U_3$  und  $U_4$  über den durch diese Elektroden geschlossenen Stromkreise detektiert werden. Die

Stromkreise der Elektrode Nr.1 und Elektrode Nr.2 sind auch am Ende der Messung beim Tastkörper-Innendruck  $p_i = 0$  nicht geschlossen. Die entsprechenden Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  sind somit während der gesamten Messung gleich Null. Schlussfolgernd wirkt eine Scherkraft aus dem Intervall ( $\varphi = 180^\circ$ ,  $\varphi = 270^\circ$ ). Über die Kennlinie  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_i)$  kann nun der Betrag der in negative x-Richtung wirkenden Scherkraftkomponente  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3})$  ermittelt werden und über die Kennlinie  $F_{\text{Scher}, 4}^*(p_i)$  der Betrag der in negative y-Richtung wirkenden Scherkraftkomponente  $F_{\text{Scher}, 4}^*(p_{i,4})$  ermittelt werden. Da die Kraft aus Richtung  $\varphi = 247,5^\circ$  wirkt, sind die ermittelten Drücke bei gleichem kürzesten Abstand  $a_E$  unterschiedlich groß, wobei der Druck  $p_{i,4}$  größer ist als  $p_{i,3}$ . Somit sind die Beträge der beiden ermittelten Scherkraftkomponenten,  $F_{\text{Scher}, 3}^*(p_{i,3})$  und  $F_{\text{Scher}, 4}^*(p_{i,4})$ , unterschiedlich groß. Durch die vektorielle Addition der beiden Komponenten nach Gleichung (2.1) werden der Betrag und die Richtung der Scherkraft bestimmt. Der Winkel  $\varphi$  kann mit Hilfe der Gleichungen (2.2) und (2.3) berechnet werden.

## 2.2 FEM-Analyse

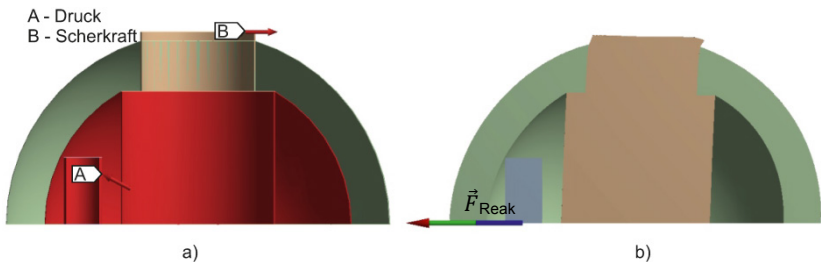
Da es sich um ein System handelt, dessen Funktion auf großer Verformbarkeit basiert und hochelastische Materialien mit einer nichtlinearen Spannungs-Dehnungs-Kennlinie verwendet werden, wurde die vorgeschlagene Geometrie mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) unter Nutzung des Programmes ANSYS-Workbench untersucht. Das Ziel der Simulation war die Ermittlung der minimalen Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^*$ , die bei dem wirkenden Tastkörper-Innendruck  $p_i$  zum mechanischen Kontakt zwischen dem Tastkörper und der entsprechenden Elektrode führt. Dabei wurde das Entstehen des elektrischen Kontaktes durch einen mechanischen Kontakt im Modell interpretiert. In Abbildung 4 ist die Seitenansicht des FEM-Modells mit den geometrischen Parametern dargestellt.



**Abb. 4:** FEM-Modell:  $R = 20$  mm,  $r_1 = 4$  mm,  $r_2 = 3$  mm,  $l = 6$  mm,  $d = 2$  mm,  $h_E = 3,5$  mm,  $h_{VK} = 10$  mm

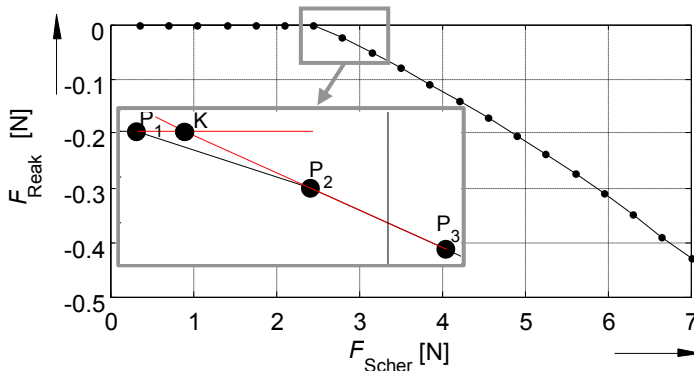
Das FEM-Modell besteht aus drei Körpern (Verformungskörper, Tastkörper und Elektrode), die am Boden fest eingespannt sind. Die Kontaktstellen zwischen dem Verformungs- und dem Tastkörper sind als fest und zwischen dem Tastkörper und Elektrode als reibungslos definiert. Als Material für die Fertigung eines späteren Funktionsmusters wurden die Silikonelastomere Elastosil® 420/30 (nicht leitfähig) und Elastosil® 570/50 (leitfähig) gewählt. Um das Verhalten des Funktionsmusters möglichst genau abzubilden, wurden im Vorfeld der Simulation für beide Silikonelastomere uniaxiale Zugversuche durchgeführt. Für die Approximation der Messdaten wurde das nichtlineare Materialgesetz Ogden 3. Ordnung ausgewählt. Weiterhin wurde dem Verformungskörper das ermittelte Materialmodell für Elastosil® 420/30 und dem Tastkörper das Materialmodell für Elastosil® 570/50 zugewiesen. Als Material der Elektroden wurde Baustahl gewählt. Die Simulation wurde in zwei Lastschritte unterteilt. Im ersten Lastschritt wurde der Innendruck  $p_i$ , der auf alle inneren Flächen des Sensorkörpers wirkte, erhöht. Im zweiten Lastschritt wurde die Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}}$  angelegt.

Es wurden neun Simulationsreihen durchgeführt, für den Maximaldruck  $p_{\text{imax}}$  von 0 bis 0,04 MPa in Schritten von 0,005 MPa. Die maximale Scherkraft  $F_{\text{Scher max}}$  betrug für alle Simulationsreihen 7 N. Um die zum Kontakt führende Kraft  $F_{\text{Scher}}^*$  durch Simulationen ermitteln zu können, wurde der zweite Lastschritt in 20 gleichgroße Unterschritte geteilt. Beim diskreten Erhöhen der Scherkraft von 0 bis 7 N kommt es ab einem bestimmten Wert zum Kontakt zwischen dem Tastkörper und der Elektrode, wodurch auch ein Teil der Scherkraft auf die Elektrode übertragen wird (vgl. Abb. 5).



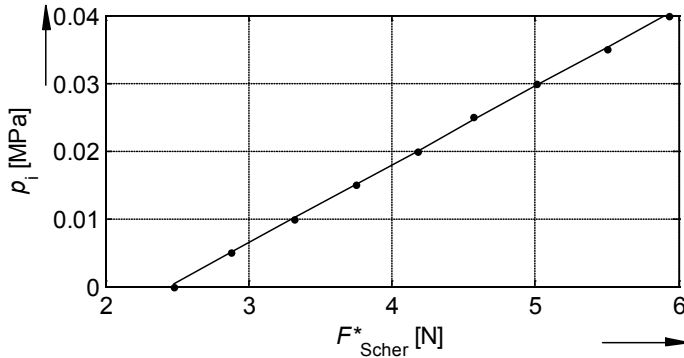
**Abb. 5:** Simulationsmodell: a) im Ausgangszustand mit Anweisung von Belastungen; b) im verformten Zustand mit der Reaktionskraft  $\vec{F}_{\text{Reak}}$  am Elektrodenboden

Das bedeutet, dass das Entstehen des Kontaktes und somit der Wert der Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^*$ , anhand der Reaktionskraft  $\vec{F}_{\text{Reak}}$  am Elektrodenboden detektiert werden kann. In Abbildung 6 ist die Änderung der Reaktionskraft  $\vec{F}_{\text{Reak}}$  bezüglich der Änderung der Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^*$  bei einem Innendruck  $p_i$  von 0 MPa dargestellt. Um die Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^*$  zu finden, wird eine Gerade durch die nächsten zwei Punkte  $P_2$  und  $P_3$  so gelegt, dass diese Gerade die Nullachse schneidet. Der Schnittpunkt  $K$  entspricht der Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^* = F_{\text{Scher}}|_K$ , die zum Kontakt führt (vgl. Abb. 6). Eine notwendige Bedingung ist dabei:  $F_{\text{Scher}}^* > F_{\text{Scher}}|_{P1}$ .



**Abb. 6:** Änderung der Reaktionskraft  $\vec{F}_{\text{Reak}}$  in der Abhängigkeit von der Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^*$

Anhand der neun durchgeführten Simulationsreihen wurden neun Punkte, die der Sensorkennlinie  $F_{\text{Scher}}^*(\rho_i)$  angehören, ermittelt. In Abbildung 7 sind die ermittelten Punkte, die durch eine Gerade approximiert sind, zu sehen.



**Abb. 7:** Punkte  $F_{\text{Scher}}^*(\rho_i)$  approximiert mit einer Geraden

Wie es dem Bild 7 zu entnehmen ist, lassen sich die ermittelten Punkte durch eine Gerade mit einer annehmbaren Abweichung, die 1,2 % nicht übersteigt, approximieren. Somit kann die Approximationsgerade als eine Sensorkennlinie von dem vorgeschlagenen System angenommen werden.

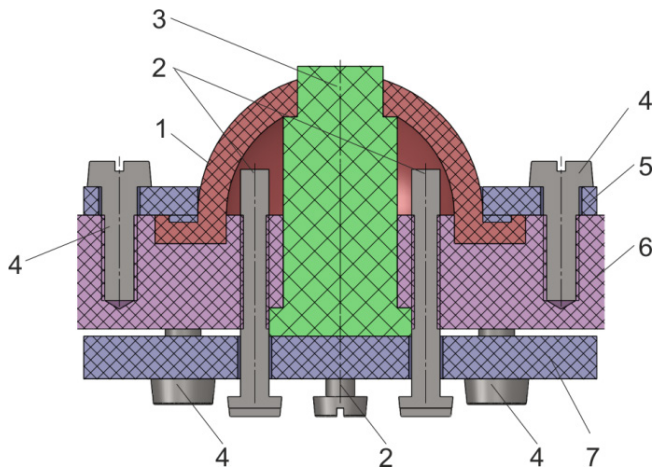
### 3 Funktionsnachweis

Um die Funktionstüchtigkeit des entwickelten Sensorsystems nachzuweisen, wurde ein Funktionsmuster aufgebaut und messtechnisch untersucht. Aus Fertigungsgründen wurden nicht alle Bestandteile des Funktionsmusters aus hochelastischen Materialien hergestellt.

Im Weiteren können komplett nachgiebige Einzelsensoren in eine Matrix aufgebaut werden, wodurch beliebig große Sensorflächen zur Ermittlung der Verteilung von Scherkräften auf einer Oberfläche erstellt werden.

#### 3.1 Herstellung des Funktionsmusters

Für die Fertigung von Verformungs- und Tastkörper, welche aus Silikon bestehen, wurden zwei Formwerkzeuge hergestellt. Die gefertigten Silikonteile wurden auf einer Kunststoffplatte befestigt. In Abbildung 8 ist das aufgebaute System im Querschnitt dargestellt.



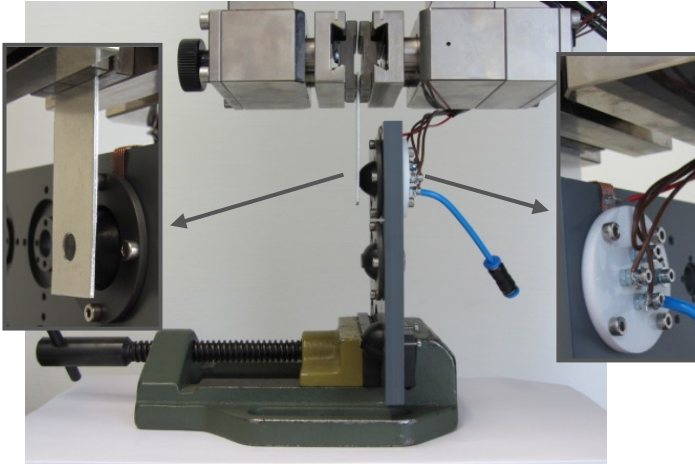
**Abb. 8:** Funktionsmuster: 1 Tastkörper; 2 Elektroden=Schrauben; 3 Verformungskörper; 4 Befestigungsschrauben; 5 oberer Befestigungsring; 6 Kunststoffplatte; 7 unterer Befestigungsring

Das Funktionsprinzip des Sensors setzt eine luftdichte Verbindung der Einzelteile voraus. Im Funktionsmuster wurde dies erreicht, indem die Einzelteile miteinander verschraubt und verklebt wurden. Durch das Ineinandergreifen der Bauteile und die Elastizität des Silikons ist die notwendige Luftdichtigkeit gewährleistet. Als Elektroden dienen hier einfache Schrauben. Die Kunststoffplatte erhielt im Tastkörperhohlraumbereich zusätzlich eine Durchgangsbohrung, die auf dem Bild nicht dargestellt ist. Diese Bohrung diente als Anschluss für die Druckluft.

### 3.2 Messtechnische Untersuchungen

Das Ziel der messtechnischen Untersuchungen war die Ermittlung der zum Kontakt zwischen dem Tastkörper und Elektrode führenden Kräfte  $F_{\text{Scher}}^*$  bei verschiedenen Tastkörperinnendrücken  $p_i$ . Zur Einbringung der Kraft auf das Funktionsmuster wurde eine Materialprüfmaschine der Firma Zwick Roell (ProLine Tisch-Prüfmaschine Z005), die mit einem Mess- und Steuerrechner ausgestattet ist, eingesetzt. Dafür wurde eine Aluminiumplatte, die am Ende eine Bohrung mit dem Durchmesser von 6 mm aufwies, in den Backen der Materialprüfmaschine eingespannt. Der Sensor wurde so positioniert, dass

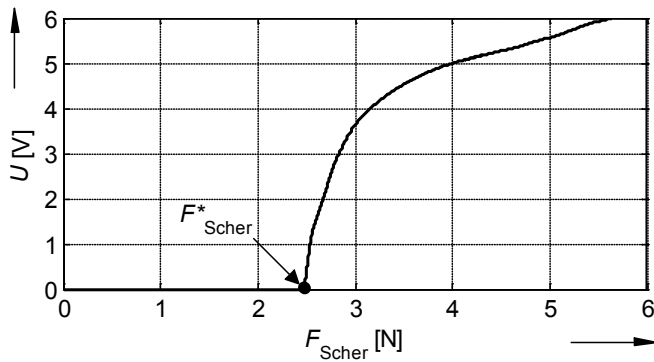
der Verformungskörper bis zur Verbindungsstelle mit dem Tastkörper in der Bohrung der Aluminiumplatte lag (vgl. Abb.9).



**Abb. 9:** Versuchsstand

Durch den in der Kunststoffplatte vorgesehenen Druckanschluss konnte der Sensor mit dem Druckluft beaufschlagt werden. Das Entstehen des elektrischen Kontaktes zwischen dem Tastkörper und der Elektrode wurde anhand der Spannungsermittlung zwischen diesen detektiert.

Der Verformungskörper wurde um 3 mm mit der Geschwindigkeit von 3 mm/min verschoben. Gleichzeitig wurden die dabei entstehende Kraft und elektrische Spannung ermittelt. In Abbildung 10 ist die Abhängigkeit der Spannung von der angebrachten Scherkraft  $\vec{F}_{\text{Scher}}$  für den Tastkörper-Innendruck  $p_i=0$  MPa zu sehen.



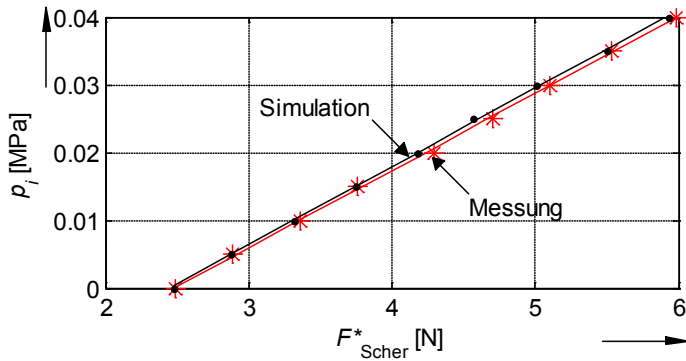
**Abb. 10:** Abhängigkeit der elektrischen Spannung von der angelegten Scherkraft

Die Messungen wurden für Tastkörper-Innendrucke  $p_i$  von 0 bis 0,04 MPa in Schritten von 0,005 MPa durchgeführt.

### 3.3 Ergebnisse

Anhand der messtechnischen Untersuchungen wurden die Punkte der Scherkraft  $F_{\text{Scher}}^*$ , die den Kontakt zwischen dem Tastkörper und der Elektrode verursacht, für verschiedene Tastkörper-Innendrucke  $p_i$  ermittelt. Anschließend wurden diese Punkte durch eine Gerade approximiert. Der Approximationsfehler ist dabei kleiner als 1,5 %. In Abbildung 11 sind die Punkte, die während der Simulation und messtechnischen Untersuchungen ermittelt wurden, miteinander verglichen. Dabei beträgt der größte relative Fehler zwischen den Punkten 3,1 %.





**Abb. 11:** Punkte  $F_{\text{Scher}}^*(p_i)$  der Simulation und der Messung approximiert mit einer Geraden

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem vorgeschlagenen Sensorsystem die Scherkräfte im Bereich von 2,5 N bis 6 N ermittelt werden können. Dafür muss der Tastkörper-Innendruck im Bereich von 0 bis 0,04 MPa variiert werden. Der Einfluss der Normalkraft auf die Sensorkennlinie wurde dabei nicht berücksichtigt.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde ein nachgiebiges Sensorsystem zur Ermittlung der Scherkräfte entwickelt, mit dem der Betrag und die Richtung einer wirkenden Scherkraft und / oder die Verteilung von Scherkräften auf einer Oberfläche erfasst werden können.

Das Funktionsprinzip des Sensorsystems basiert auf großer Verformbarkeit hochelastischer Materialien. Die Ermittlung des Betrages der wirkenden Scherkraft erfolgt mittels der Messung des Innendruckes  $p_i$  im Tastkörper-Hohlraum im Moment des Kontaktschließens bzw. -lösens. Zum Detektieren der Richtung der Scherkraft dienen vier Elektroden.

Das vorgestellte Sensorsystem ist einfach, kostengünstig, hat eine nahezu lineare Sensorkennlinie und besteht aus hochelastischen Materialien. Dies stellt ein großes Potenzial für die Anwendung an der Mensch-Maschine-Schnittstelle in der Medizintechnik und in der Robotertechnik dar.

Es ist offensichtlich, dass der Einfluss von eventuell auftretenden Normalkräften die Kennlinie des Sensorsystems ändern würde. Die entsprechenden Untersuchungen dieses Einflusses sowie Erarbeitung der Lösungen zu seiner Minimierung sind eingeplant.

## Literatur

- [1] Noda, K. et al.: A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever standing in elastic material. In: *Sensors and Actuators A* 127 (2006), S. 295–301
- [2] Yamada, D. et al: Artificial finger skin having ridges and distributed tactile sensors used for grasp force control. In: *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (2001), S. 686–691
- [3] Diesing, P.: Prüf- und Bewertungsmethoden für Antidekubitus-Systeme. *Dissertation, Technische Universität Berlin*, 2006
- [4] Kärki, S. et al.: Development of a piezoelectric polymer film sensor for plantar normal and shear stress measurements. In: *Sensors and Actuators A* 154 (2009), S. 57–64
- [5] Heywood, E. et al.: Tri-axial plantar pressure sensor: design, calibration and characterization. In: *Annual International Conference of the IEEE EMBS* (2004), S. 2010 - 2013
- [6] Beccai, L. et al.: Design and fabrication of a hybrid silicon three-axial force sensor for biomechanical applications. In: *Sensors and Actuators A* 120 (2005), S. 370–382
- [7] Dargahi, J.: A piezoelectric tactile sensor with three sensing elements for robotic, endoscopic and prosthetic applications. In: *Sensors and Actuators* 80 (2000), S. 23–30
- [8] Kim, K.: A silicon-based flexible tactile sensor for ubiquitous robot companion applications. In: *Journal of Physics: Conference Series* 34 (2006), S. 399–403
- [9] Vasarhelyi, G. et al.: Characterization of an integrable single-crystalline 3-D tactile sensor. In: *Sensors Journal, IEEE* (2006), Nr. 4, S. 928–934
- [10] Lee, H.-K. et al.: Real-time measurement of the three-axis contact force distribution using a flexible capacitive polymer tactile sensor. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* (2011), Nr. 21, S. 1-9

- [11] Novak, J. et al.: Initial Design and Analysis of a Capacitive Sensor for Shear and Normal Force Measurement. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE* (1989), S. 137-144
- [12] Ohka, M. et al.: Sensing Precision of an Optical Three-axis Tactile Sensor for a Robotic Finger. In: *The 15th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, (2006), S. 214–219
- [13] Wang, W.-C. et al.: A shear and plantar pressure sensor based on fiber-optic bend loss. In: *The Journal of Rehabilitation Research and Development* (2005), Nr. 3, S. 315–326
- [14] Lord, M.; Hosein R.; Williams R.B.: Method for in-shoe shear stress measurement. In: *Journal of Biomedical Engineering vol. 14, Nr. 3* (1992), S. 181–186
- [15] Mair, H. J., Roth, S.: *Elektrisch leitende Kunststoffe, 2. voll-ständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Carl Hanser Verlag, München Wien*, 1989