

Markus Heß, Adnan Ebrahim, Valentin L. Popov

Modellierung des elektromechanischen Reibkontaktes zwischen Finger und Touchscreen zur gezielten Erzeugung taktiler Effekte

Zusammenfassung:

Durch taktile Rückmeldung an den Benutzer kann die Leistungsfähigkeit berührungsempfindlicher Touchscreens erheblich gesteigert werden. Trotz umfangreicher experimenteller Untersuchungen sind die zugrunde liegenden Prinzipien bis heute noch nicht ausreichend verstanden und eine verlässliche Modellierung fehlt. Wir stellen ein vielversprechendes Modell für den elektromechanischen Reibkontakt vor, welches unter anderem die bekannten klassischen Theorien der molekularen Adhäsion ausnutzt.

Abstract:

By tactile feedback to the user, the performance of touch-sensitive screens can be significantly increased. Despite extensive experimental investigations, the underlying principles are still not sufficiently understood and reliable modeling is lacking. Therefore, we present a promising model for electroadhesive frictional contacts, which exploits, among other things, well-known classical theories of molecular adhesion.

In der heutigen Zeit sind berührungsempfindliche Touchscreens zur Bedienung von Smartphones, Tablets und Navigationsgeräten nicht mehr wegzudenken. Der Kontakt zwischen Finger und Touchscreen ermöglicht dabei die Interaktion mit den auf dem Bildschirm angezeigten Elementen (Text, Bilder, etc.). Durch die kontrollierte Erzeugung taktiler Effekte kann die Leistungsfähigkeit solcher Touchscreens weiter gesteigert werden. Dabei wird die Haut (Fingerkuppe) gezielt stimuliert, um dem Benutzer eine effektive taktile Rückmeldung zu geben. Die Generierung des taktilen Feedbacks kann über die sogenannte *Elektrovibration* erfolgen, die sich das Konzept der Anziehung zwischen der Haut und einer geladenen Oberfläche zunutze macht [1]. Legt man eine Wechselspannung zwischen der leitenden Unterschicht eines Touchscreens und dem Finger an, so wird eine Anziehungskraft zwischen der kapazitiven Touchscreenoberfläche und dem Finger generiert, die wesentlichen Einfluss auf die Reibkraft nimmt. Bild 1 zeigt schematisch einen solchen Kontakt.

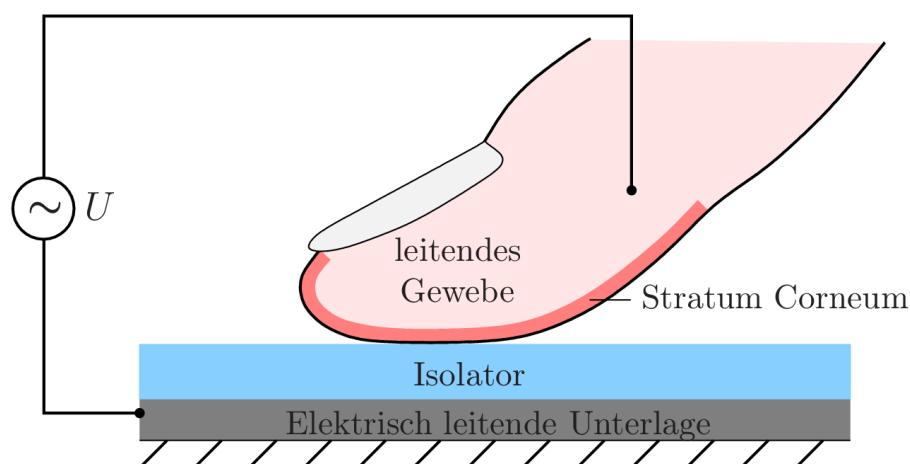


Bild 1 Schematische Darstellung des elektromechanischen Reibkontaktes zwischen Zeigefinger und Touchscreen

Der Finger wird durch eine externe Normalkraft an die isolierende Schicht der elektrisch leitenden Unterlage gedrückt und senkrecht zur Bildebene mit konstanter Geschwindigkeit bewegt. Durch die anliegende Wechselspannung zwischen den tieferen

Hautgewebsschichten und der leitenden Unterlage kommt es zusätzlich zu einer elektrischen Anziehungskraft, die neben der extern aufgebracht Kraft zur Normalkontaktkraft beiträgt. Trotz umfangreicher experimenteller Untersuchungen sind die zugrunde gelegten Prinzipien des elektroadhäsiven Reibkontaktes zwischen Finger und Touchscreen bis heute noch nicht gänzlich verstanden und verlässliche Prinzipien für die präzise Kontrolle des Effektes fehlen [2],[3].

In unserem Vortrag präsentieren wir einen Ansatz zur Lösung dieser Problematik, der auf der engen Analogie zwischen elektroadhäsiven Reibkontakten und Tangentialkontakten mit Adhäsion zwischen elektrisch neutralen Körpern beruht. Obwohl die Interaktion zwischen molekularer Adhäsion und Reibung noch nicht gänzlich verstanden scheint, sind in jüngster Zeit vielversprechende Modelle für adhäsive Tangentialkontakte entstanden. Wir werden auf das Modell von Popov und Dimaki [4] zurückgreifen, welches zur Abbildung der Adhäsion von der Maugis-Dugdale Näherung Gebrauch macht und die Reibkraft über das Coulombsche Reibungsgesetz ermittelt. Danach ergibt sich für die Reibkraft F_R ein sehr einfaches Ergebnis

$$F_R = \mu F_K = \mu (F_{\text{ext}} + \sigma_0 \pi b^2). \quad (1)$$

Darin bezeichnen F_{ext} die extern aufgebrachte Normalkraft und σ_0 den konstanten Adhäsionsdruck, der in einem Kreisgebiet wirkt, dessen Radius b vom Spaltabstand zwischen den Oberflächen der kontaktierenden Körper abhängt. Der Zusammenhang zwischen der externen Kraft, dem Wirkradius und dem Adhäsionsdruck ist dabei genau jener, der sich für den adhäsiven Normalkontakt nach Maugis einstellt und nur numerisch berechnet werden kann [5]. Für den elektromechanischen Reibkontakt ist insbesondere die Abhängigkeit der Reibkraft von der extern aufgebrachten Kraft und der Spannung von Interesse. In Gleichung (1) muss dazu b als Funktion der externen Kraft und des Adhäsionsdruckes ersetzt werden.

Das ursprüngliche Modell für den adhäsiven Tangentialkontakt aus [4] setzt zwar elektrisch neutral geladenen Körper voraus, kann aber leicht für die Anwendung auf den elektromechanischen Reibkontakt zwischen Zeigefinger und Touchscreen erweitert werden. In der Arbeit von Popov und Heß [6] wurde ein solches Modell für die Abbildung des elektroadhäsiven Reibkontaktes ausgelegt, wobei anstelle der Adhäsion nach Maugis-Dugdale die verbreitetere Theorie von Johnson Kendall und Roberts genutzt wurde, die eine analytische Lösung zulässt

$$F_R(F_{\text{ext}}) = \mu (F_{\text{ext}} + \sigma_0 \pi a^2) = \mu \left[F_{\text{ext}} + \sigma_0 \pi \left(\sqrt{\frac{9\pi R^2 \Delta\gamma}{8E^*}} + \sqrt{\frac{9\pi R^2 \Delta\gamma}{8E^*} + \frac{3R}{4E^*} F_{\text{ext}}} \right)^{4/3} \right]. \quad (2)$$

E^* , R und $\Delta\gamma$ bezeichnen in dieser Reihenfolge den effektiven elastischen Modul, den Krümmungsradius des parabolisch angenommenen Kontaktes sowie die relative Oberflächenenergie. Letztere ist die Arbeit, die zum Trennen einer Einheitsfläche der Grenzfläche erforderlich ist. Ein üblicher Näherungsansatz zur Berechnung der rein elektrischen Anziehung zwischen Finger und Touchscreen betrachtet den schematisch

in Bild 1 dargestellten Kontakt als Anziehung zwischen zwei parallelen mit Dielektrika beschichteten Kondensatorplatten, die durch einen Luftspalt h_L voneinander getrennt sind. Die Kraft je Einheitsfläche σ_e zwischen den Kondensatorplatten kann in diesem Fall auf elementare Weise ermittelt werden. Während der Adhäsionsdruck σ_0 als Kraft je Einheitsfläche bei direktem Kontakt interpretiert werden kann, ergibt sich die relative Oberflächenenergie per Integration über den Luftspalt:

$$\sigma_0 := \sigma_e(h_L = 0, U) = \frac{\varepsilon_0}{2\varepsilon_{r,L}} \left(\frac{h_{sc}}{\varepsilon_{r,sc}} + \frac{h_i}{\varepsilon_{r,i}} \right)^{-2} U^2, \quad (3)$$

$$\Delta\gamma := \int_0^\infty \sigma_e(h_L, U) dh_L = \frac{\varepsilon_0}{2} \left(\frac{h_{sc}}{\varepsilon_{r,sc}} + \frac{h_i}{\varepsilon_{r,i}} \right)^{-1} U^2. \quad (4)$$

Darin bezeichnen h_i und h_{sc} die Dicken der isolierenden Schicht und des Stratum Corneums (oberflächliche Hornschicht des Fingers). $\varepsilon_{r,i}$ und $\varepsilon_{r,sc}$ sind die zugehörigen relativen Permittivitäten (Dielektrizitätszahlen), $\varepsilon_{r,L} \approx 1$ jene für Luft und ε_0 die elektrische Feldkonstante. Durch Einsetzen der Glgn. (3) und (4) in Glg. (2) ist eine Abhängigkeit der Reibkraft von der extern aufgebrachten Normalkraft und der elektrischen Spannung gefunden. Dies ist nur einer der wesentlichen Zusammenhänge, die wir in unserem Vortrag diskutieren und deren Güte wir anhand der zur Verfügung stehenden experimentellen Daten aktueller Literaturbeiträge messen werden. Weitere Untersuchungen betreffen die (scheinbare) Kontaktfläche und den Einfluss der Frequenz der Wechselspannung. Für letztere sind insbesondere die Frequenzabhängigkeiten der relativen Permittivität und des spezifischen elektrischen Widerstandes des Stratum Corneums von Bedeutung [7].

Es sei angemerkt, dass wir mit dem vorgeschlagenen Modell natürlich nicht alle experimentell abgesicherten Zusammenhänge zufriedenstellend abbilden können. Dies ist nachvollziehbar, da von zahlreichen vereinfachten Annahmen ausgegangen wird. So setzen wir beispielsweise linear elastisches Materialverhalten voraus (viskoelastische Effekte oder die unterschiedlichen Materialeigenschaften der einzelnen Hautschichten werden ignoriert), nutzen die Halbraumtheorie und berücksichtigen keinerlei Oberflächenrauheiten. Die Grundidee der Modellierung als Fundament für erweiterte Modelle birgt jedoch großes Potenzial – auf einige Möglichkeiten werden wir eingehen.

Quellenangaben

- [1] Bau, O., Poupyrev, I., Israr, A., Harrison, C. (2010). TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 283-292.
- [2] Vardar, Y., Güçlü, B., Basdogan, C. (2017). Effect of waveform on tactile perception by electrovibration displayed on touch screens. *IEEE transactions on haptics*, 10(4), pp. 488-499.

- [3] Shultz, C. D., Peshkin, M. A., Colgate, J. E. (2015). Surface haptics via electroadhesion: Expanding electrovibration with Johnsen and Rahbek. In *World Haptics Conference (WHC), 2015 IEEE*, pp. 57-62.
- [4] Popov, V. L., Dimaki, A. V. (2017). Friction in an adhesive tangential contact in the Coulomb-Dugdale approximation. *The Journal of Adhesion*, 93(14), pp. 1131-1145.
- [5] Popov, V. L., Heß, M., Willert, E. (2019). *Handbook of Contact Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-662-58709-6.
- [6] Popov, V. L., Heß, M. (2018). Voltage induced friction in a contact of a finger and a touchscreen with a thin dielectric coating. *arXiv preprint arXiv:1805.08714*.
- [7] Yamamoto, T., Yamamoto, Y. (1976). Dielectric constant and resistivity of epidermal stratum corneum. *Medical and biological engineering*, 14(5), pp. 494-500.

Autoren

Dr.-Ing. Markus Heß
Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik
Fachgebiet Systemdynamik und Reibungsphysik, Sekr. C8-4
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin

M.Sc. Adnan Ebrahim
Leibniz Universität Hannover, Institut für Baumechanik und Numerische Mechanik
Appelstraße 9a, 30167 Hannover

Prof. Dr. rer. nat. Valentin L. Popov
Technische Universität Berlin, Institut für Mechanik
Fachgebiet Systemdynamik und Reibungsphysik, Sekr. C8-4
Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin