

Die neue Welt der weichen Elektronik:

## Elastisch dehnbare Elektronikbauteile



von / by

Prof. Dr.-Ing. Patrick Görrn

goerrn@uni-wuppertal.de

Die Leistungsfähigkeit der Mikroelektronik erhöht sich seit Jahrzehnten mit der Gesetzmäßigkeit des Mooreschen Gesetzes. Dies ist auf eine fortschreitende Miniaturisierung zurückzuführen. Gleichzeitig erleben wir aber bei der sogenannten „Makroelektronik“ – zum Beispiel Displays und Solarzellen – einen Trend hin zu immer größeren Flächen. Dadurch werden die Oberflächen verschiedener Alltagsgegenstände prinzipiell zugänglich für eine elektronische Funktionalität. Allerdings basiert heutige Makroelektronik meist auf starren ebenen Glassubstraten. Viele uns umgebende Gegenstände sind aber komplex gekrümmt oder sogar verformbar. Will man moderne Architektur, Fahrzeuge, Möbel oder Kleidung mit großflächiger Elektronik wie Leuchtdioden, Displays, Solarzellen oder Sensoren verknüpfen, so benötigt man weichere und verformbare Elektronik.



{ The new world of soft electronics – Stretchable electronic devices }

Ongoing miniaturization has boosted the performance of microelectronic components over the last few decades in line with Moore's law. At the same time we are experiencing at the macroelectronic level – for example in displays and solar cells – a trend to ever larger devices. As a result of these developments the surfaces of many everyday objects are beginning to offer scope, in principle, for electronic functionality. Up to now, however, macroelectronics has generally been based on rigid glass

substrates, and many of the objects surrounding us are bent in complex ways, or may even be flexible. Against this background, soft, stretchable electronics opens the way to equipping modern architecture, automobiles, furniture and clothing with large surface area devices such as LEDs, displays, solar cells and sensors.

Wenn es um Technik und Maschinen geht, hat der Mensch im Lauf der Geschichte auf immer härtere Materialien gesetzt, von Bronze über Eisen bis zum modernen Stahl. Allerdings ist der härteste Gegenstand nicht unbedingt auch der widerstandsfähigste. Man kann das leicht prüfen, indem man z.B. eine Blechdose und einen Gummiball von einem Hochhaus fallen lässt. Der Gummiball kann dem Aufprall nachgeben und ihn letztlich unbeschadet überstehen. Will man in diesem Sinn ein sicheres Fahrzeug bauen, wird man entsprechend nicht versuchen, die Insassen in einen möglichst stabilen Käfig zu sperren. Im Gegenteil, Knautschzone und Airbag geben nach und schaffen gewissermaßen einen Ausgleich zwischen dem harten Fahrzeug und dem viel weicheeren Menschen am Steuer.

Eine ähnliche Funktion haben Polstermöbel. Die Polster schaffen einen Ausgleich zwischen dem harten Möbel und dem vergleichsweise weichen Menschen. Auch Kleidung ist vor allem wegen ihrer Verformbarkeit angenehm zu tragen. In anderen Fällen ist die Verformbarkeit vor allem während der Herstellung und des Transportes von Vorteil. So wäre das Verlegen eines großen, zusammenhängenden Teppichs schwer durchführbar, könnte man ihn nicht aufrollen.

Die geringe Zerbrechlichkeit, die hohe Kompatibilität mit biologischem Gewebe, die Verformbarkeit – viele Eigenschaften weicher Materialien sind auch für elektronische Anwendungen interessant, wie zum Beispiel Solarzellen „von der Rolle“ oder intelligente Textilien. Allerdings basiert die klassische Elektronik auf harten, spröden Materialien. Die Unterlage eines Chips, die auch als Substrat bezeichnet wird, ist ein

kristalliner „Wafer“, beispielsweise aus Silizium oder Galliumarsenid. Da die elektronischen Prozesse innerhalb des kristallinen Substrates stattfinden müssen, kann die Mikroelektronik nicht ohne Wafer funktionieren. „weiche Mikrochips“ sind nicht realisierbar. Dass man in Zukunft dennoch mit immer weicherer Elektronik rechnen darf, ist vor allem auf die Fortschritte der Dünnschichttechnologie und die Entwicklung organischer Halbleiter zurückzuführen.

Anders als in der Mikroelektronik können Dünnschichtbauelemente prinzipiell auf beliebigen Substraten hergestellt werden. So wurden hochauflösende LED/LCD-Displays erst möglich durch die Fähigkeit, Dünnschichttransistoren (thin film transistors, TFTs) auf großflächigen Glassubstraten herzustellen. Der Begriff TFT wird inzwischen häufig sogar als Synonym für Flüssigkristalldisplays verwendet. Mit den Fortschritten dieser neuen Makroelektronik, allen voran der Displays, wurden auch biegbare Bauelemente auf flexiblen Folien realisierbar. Heute sind flexible Dünnschichtsolarellen, die wie Teppich ausgerollt werden können, schon im Handel erhältlich. Flexible Smartphones wurden bereits von Samsung angekündigt.

Man kann sich aber leicht vorstellen, dass flexible Elektronik nicht auf beliebig kleine Krümmungsradien gebogen werden darf. Krümmt man eine Folie der Dicke  $d$  auf den Radius  $R$ , so entsteht an der Außenseite, wo sich die Dünnschichtanordnung befindet, eine Ausdehnung von etwa  $=d/2R$ . Bedenkt man, dass Dünnschichten aus starren Materialien bei Ausdehnungen von etwa 1% reißen, so ergibt sich für typische flexible Substrate einer Dicke von 50 Mikrometern ein möglicher Biegeradius von immerhin nur »

## Die neue Welt der weichen Elektronik: Elastisch dehnbare Elektronikbauteile

## { The new world of soft electronics – Stretchable electronic devices }

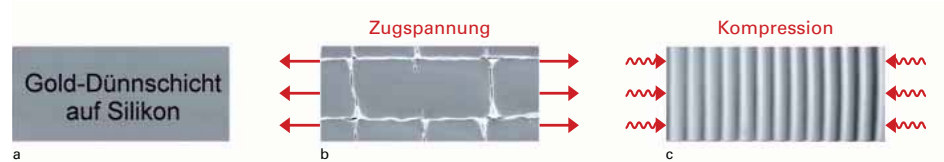


Abb. 1: Gezeigt ist eine Gold-Dünnschicht auf dem Silikon Polydimethylsiloxan (PDMS): nach dem Aufdampfen, idealisiert (a), durch eine Zugspannung aufgerissen (b) und durch eine Schubspannung gefaltet (c).

Fig. 1: A thin gold film evaporated onto the silicone polydimethylsiloxane (PDMS): (a) idealized, (b) fracturing under tension, (c) wrinkling under compression.

» 2,5 Millimetern. Zukünftige mobile Geräte könnten also wie ein Kugelschreiber (Durchmesser > 5 mm) aufgebaut sein und aufgerollte Displays zum Herausziehen beinhalten. Das Telefon bliebe transportabel und könnte trotzdem ein großes Display bieten. Wie die vereinfachte Rechnung zeigt, kann jede noch so starre Anordnung biegsam werden, sofern sie nur dünn genug ist. Allerdings ist die Verformbarkeit biegsamer Folien beschränkt. Einmal gebogen wird die Folie bezüglich anderer Biegerichtungen starr.

Der Vorteil noch weicherer, elastisch dehnbarer Bauelemente wäre vielfältig. Genau wie flexible Folien könnten sie gebogen und somit in Rollen- oder Rollen-Verfahren (R2R) kostengünstig beschichtet und gerollt transportiert werden. Anders als klassische Plastikfolien können sie aber anschließend auf praktisch beliebig geformte Oberflächen aufgebracht werden. Eine Glasscheibe passt nur auf eine perfekte Ebene. Biegsame Folien können ausschließlich in eine Zylinderform gebogen werden. Will man aber eine komplex gebogene Oberfläche wie die Tragfläche eines

Flugzeuges mit einer Solarzelle bedecken, so muss diese eine gewisse Dehnbarkeit besitzen. Geschwungene Oberflächen sind nicht nur in aerodynamischen Flug- oder Fahrzeugen üblich, sondern auch in moderner Architektur, Möbeln und vielem anderen. Erst mit dehnbaren Bauelementen werden praktisch beliebige Oberflächen für elektronische Anwendungen zugänglich. Um abzuschätzen, welche Möglichkeiten sich daraus ergeben werden, kann man sich fragen, was die Oberfläche seiner Umgebung ganz allgemein für den Menschen bedeutet. Die Oberfläche eines Körpers ist es, die der Mensch sieht oder ertastet. Er hört akustische Wellen, die ebenfalls von Oberflächen ausgehen. Da die wichtigsten Sinneswahrnehmungen auf den Größenskalen des menschlichen Körpers stattfinden, können typische Schnittstellen zwischen Mensch und Maschine, z.B. Displays, Mikrophone, Lautsprecher, Tastaturen oder andere Drucksensoren von (opto-) elektronischer Funktionalität auf beliebigen Oberflächen profitieren. Dabei könnten gerade die Drucksensoren in besonderem Maße Vorteile von einer weichen

Abb. 2 u. 3: Beispiele für Falten in der Natur.

Figs. 2 & 3: Natural examples of wrinkled and folded surfaces.

Ausführung haben, da dehnbare Substrate bei ihrer Verformung schon geringe Kräfte auf die eigentlichen Dünnschichten weiterleiten. Eine weiche, Druck detektierende, „elektronische Haut“, die der des Menschen nachempfunden ist, könnte Robotern zu völlig neuer Feinfühligkeit verhelfen.

Um dehnbare Elektronik zu realisieren, müssen die entsprechenden Dünnschichtbauelemente zunächst auf ein weiches Substrat, meist Silikon, abgeschieden werden. Anders als bei flexiblen Substraten, die nicht gedehnt sondern nur gebogen werden können, werden hier Ausdehnungen im Bereich einiger zehn Prozent unmittelbar auf die Dünnschicht übertragen. Wie schon erwähnt, reißen starre Materialien bei einer Dehnung um etwa 1%. Die Folge sind Risse in den Dünnschichten, wie in Abbildung 1b dargestellt. Anders als eine Ausdehnung der Schicht führt eine Kompression nicht zum Aufreißen, sondern zur Faltenbildung (Abbildung 1c). Solche Falten treten auch in der Natur in vielfältiger Weise auf, wie die Abbildungen 2 und 3 untermauern sollen. Immer wenn eine härtere Haut auf einem weichen Volumen zusammengestaucht wird, entstehen Falten. Nur so kann beispielsweise die Haut einer schrumpelnden Paprika (Abbildung 2) weiterhin das während der Alterung kleiner werdende Volumen bedecken.

In Hinblick auf dehnbare Elektronik bietet dieser Mechanismus einen Ansatz, auch starre Oberflächen dehnbar zu machen. Wird das elastische Substrat ausgedehnt und an der Oberfläche gehärtet oder beschichtet, so bildet die entstandene „Haut“ bei anschließender Entspannung des Substrates Falten. So gefaltete Oberflächen sind, vergleichbar einem Akkordeon, »



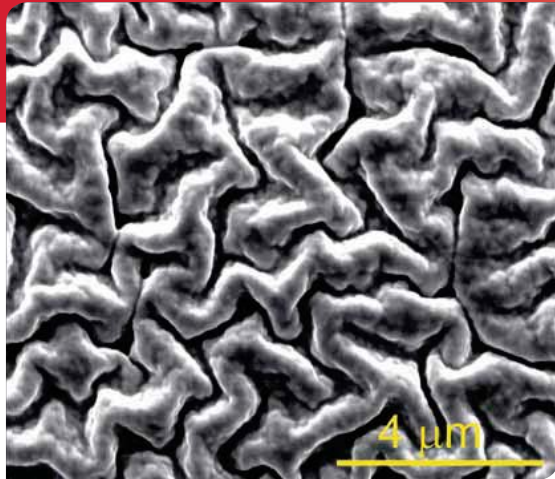


Abb. 4: Faltenstruktur einer so in beliebige Richtungen dehnbaren Goldschicht.

Fig. 4: Wrinkling in a gold layer stretchable in any direction.

» bis zur ursprünglichen Spannung dehnbar (Abbildung 4). Während sich das Substrat tatsächlich ausdehnt und zusammenzieht, werden die Dünnschichten lediglich gebogen und entspannt.

Gemeinsam mit meinen damaligen Kollegen an der Princeton University konnte ich zeigen, dass mikroskopisch gefaltete Gold-Schichten einer Dicke von 20 Nanometern (Abbildung 4) in beliebige Richtungen zerstörungsfrei über 40 % dehnbar sind, während glatte Schichten bereits bei etwa 1% reißen (Abbildung 1b). Sie behalten dabei eine Querleitfähigkeit, wie man sie zum Bau effizienter Leuchtdioden, Solarzellen und anderer Bauelemente braucht. Es zeigt sich, dass Gold vor allem wegen seiner im Vergleich zu anderen Metallen geringen Härte dehnbare Strukturen bilden kann. Mit der Verfügbarkeit leitfähiger Gold-Elektroden werden auch komplexe dehnbare Bauelemente denkbar, weil alle anderen funktionalen Schichten aus deutlich weicheren organischen Materialien gebildet werden können.

Die Erforschung organischer Halbleiter, insbesondere halbleitender Polymere hat an der Bergischen Universität Wuppertal eine lange Tradition. So vereint das Institut für Polymertechnologie unter Leitung von Prof. Dr. Ullrich Scherf Arbeitsgruppen aus verschiedenen Fachbereichen, die sich mit unterschiedlichen Aspekten dieser Materialien beschäftigen, von der Synthese über physikalische Aspekte bis hin zur Dünnschichttechnologie von Polymeren insbesondere mit Hilfe der Drucktechnik.

Schon 2010 konnte ich in Zusammenarbeit mit der Professur für Elektronische Bauelemente an der Bergischen Universität Wuppertal (Prof. Dr. Thomas Riedl) einen dehnbaren organischen Laser demonstrieren, der vollständig aus Polymeren bestand. Der Laserfarbstoff wurde auch hier durch eine Faltenstruktur dehnbar gemacht. Durch eine spezielle Technik wurden die Falten aber zusätzlich veranlasst, sich selbstorganisiert parallel in einem Abstand von exakt 320 Nanometern anzuordnen. Das so entstandene Gitter bildet einen

DFB („distributed feedback“-) Resonator für den organischen Laser. Dieser Resonator bestimmt, welche Wellenlänge – also welche Farbe – der Laser emittiert. Dabei ist die Wellenlänge proportional zum Abstand der Falten. Dehnt man das Bauelement, wird die Farbe entsprechend zu größeren Wellenlängen (Rot) verschoben. Man kann also an der Farbe des Lasers berührungslos und kontinuierlich die an jedem Punkt einer großen Fläche exakte lokale mechanische Ausdehnung messen. Der Laser bildet letztlich eine „optische Haut“ und könnte Anwendungen beispielsweise in der Bauwerksüberwachung finden.

Optische Gitter sind aber nicht nur für Laser interessant. Sie können die Effizienz verschiedener optoelektronischer Dünnschichtbauelemente verbessern, indem sie einerseits die Auskopplung des Lichtes von Leuchtdioden und Displays erhöhen und andererseits die Absorption gerade sehr dünner Solarzellen deutlich steigern. So könnte man die Effizienz der derzeit besten organischen Solarzellen durch Plasmonen-Anregung auf Gittern um bis zu 100 % erhöhen. Allerdings sind großflächige submikrometergroße Strukturen wie optische Gitter auf harten Substraten nur langsam und mit erheblichem technischem Aufwand herstellbar. Andererseits erlauben weiche Substrate die Möglichkeit der sekundenschnellen Bildung optischer Gitter auf praktisch beliebigen Flächen durch selbstorganisierte Faltenbildung. Allein durch die Wahl weicherer Substrate ergeben sich also neue technologische Möglichkeiten, von denen auch Anwendungen profitieren können, die überhaupt nicht dehnbar sein müssen, beispielsweise flache Solarmodule auf einem Häuserdach.

Seit März 2012 wird meine Forschung an dehnbaren Solarzellen durch das Emmy-Noether-Programm der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Während die ersten beschriebenen dehnbaren Anordnungen aus einzelnen Metall- oder Polymerschichten auf Silikonfolien bestanden, gilt es nun die Herausforderungen einer nicht nur technologisch, sondern auch physikalisch vielschichtigeren Anordnung zu bewältigen. Dabei greift die Arbeitsgruppe auch auf die Erfahrungen an der Professur für Elektronische Bauelemente zurück, an der sie angesiedelt ist. Hier werden bereits seit 2009 organische Solarzellen auf Glassubstraten erforscht. Die Ziele dieser Forschungsaktivitäten sind kostengünstige, großflächig herstellbare Solarzellen, die nicht nur elastisch dehnbar und somit auf beliebige Oberflächen platzierbar sind, sondern auch effizienter als ihre starren und flexiblen Vorgänger.

Solarzellen bilden einen idealen Einstieg in die dehnbare Elektronik, da man auf eine Strukturierung der Dünnschichten praktisch verzichten kann. Letzteres wird notwendig, sobald man an schaltungstechnisch aufwendigere dehnbare Anwendungen, wie Displays, Sensoren und Ähnliches, denkt. Dabei wird gerade die Drucktechnik eine entscheidende Rolle spielen. Es bleibt also ein weiter Weg, bis z. B. ein Smartphone vollständig in intelligente Kleidung integrierbar ist. Doch eines ist heute schon sicher: Elektronik wird weicher werden! ☉