

# Vom organischen Transistor zum Plastik-Chip

Integrierte Schaltungen auf Polymerbasis könnten einmal den Alltag revolutionieren.

Wolfgang Clemens und Walter Fix

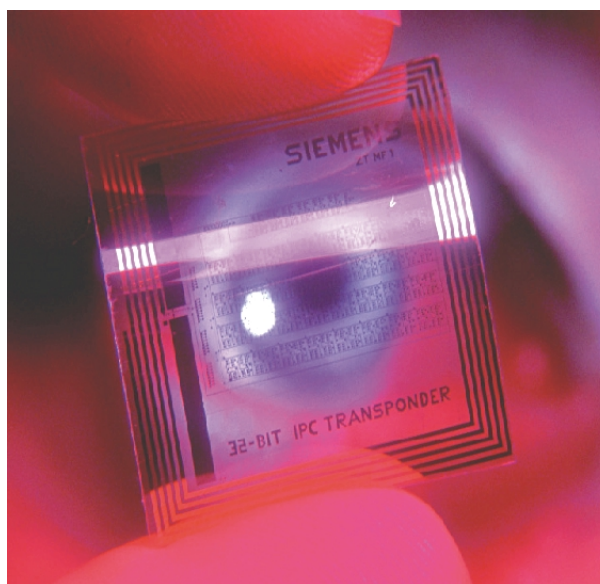
Mit Silizium konkurrieren können halbleitende Polymere aufgrund ihrer deutlich schlechteren elektrischen Eigenschaften zwar nicht. Daher wird es auf absehbare Zeit auch keinen „Plastik-Computer“ geben. Sie ermöglichen aber eine „Wegwerf-Elektronik“ aus Plastik-Chips, die sich durch Drucken herstellen lassen und Bereiche erobern werden, in denen heute noch keine Elektronik zu finden ist. Dazu gehört zum Beispiel der elektronische Strichcode auf Verpackungen – der Plastik-Chip auf der Chips-Tüte.

Die rasante Entwicklung der Mikroelektronik, die fast alle Bereiche des täglichen Lebens entscheidend geprägt und verändert hat, begann mit der Erfindung des Halbleitertransistors 1947. Der Erfolg der Mikroelektronik beruht letztlich auf dem raffinierten Umgang mit halbleitenden Kristallen, allen voran Silizium. Neben Silizium gibt es nur wenige halbleitende Materialien, die wie z. B. Galliumarsenid (GaAs) in opto-elektronische Bauelementen ebenfalls eine wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben.

Organische Halbleiter und Leiter, deren Entdecker mit dem Chemie-Nobelpreis im Jahr 2000 ausgezeichnet wurden, öffnen nun ganz neue Perspektiven für die Mikroelektronik. In der Herstellung bieten organische Halbleiter und Leiter enorme Vorteile, da viele von ihnen in Lösung, d. h. flüssig verarbeitet werden können und nicht als hochreine Kristalle vorliegen müssen. Daher lässt sich organische Elektronik durch Drucken herstellen, wodurch extrem preisgünstige Anwendungen möglich sind. Allerdings bewegen sich die Ladungsträger durch organische Halbleiter wesentlich langsamer als durch Silizium, weshalb organische Schaltkreise auch deutlich langsamer sind. Neben den bereits existierenden organischen Leuchtdioden und der Umkehrung des Effektes in organischen Photovoltaikzellen beinhalten gerade Plastik-Chips (Abb. 1), aufgebaut aus organischen Transistoren, ein großes Potenzial für neue Produkte, das in seiner Fülle noch nicht abzusehen ist. Dazu gehören z. B. elektronische Funketiketten als Ersatz für den Barcode.

## Was ist ein organischer Transistor?

Ein Feld-Effekt-Transistor (FET) besteht im Wesentlichen aus vier verschiedenen Komponenten: einem elektrisch leitenden, einem isolierenden und einem



**Abb. 1:** So könnte ein Transponder-Chip aus „Plastik“ aussehen, mit dem sich zum Beispiel die Waren an der Supermarktkasse berührungslos erfassen ließen.

halbleitenden Material sowie einem Substrat als Träger. Ein FET wird schon dann als „organisch“ bezeichnet, wenn nur die halbleitende Schicht aus organischen Molekülen oder Polymeren besteht, obwohl alle Komponenten durch organische Materialien ersetzt werden können.

Die Bezeichnung „organischer Transistor“ ist somit nicht klar definiert, sondern ein Sammelbegriff für höchst unterschiedliche Konzepte: vom Transistor mit nur einem organischen Halbleiter bis hin zum voll-organischen Transistor [1]. Diese verschiedenen Konzepte lassen sich unterscheiden nach dem Halbleitermaterial (kleine Moleküle oder Polymere, Abb. 2b), nach dem Anteil der anorganischen Komponenten (Substrat, Isolator, Elektroden) und nach dem Aufbau (Gate-Elektrode oben oder unten, engl. *top gate*, *bottom gate*).

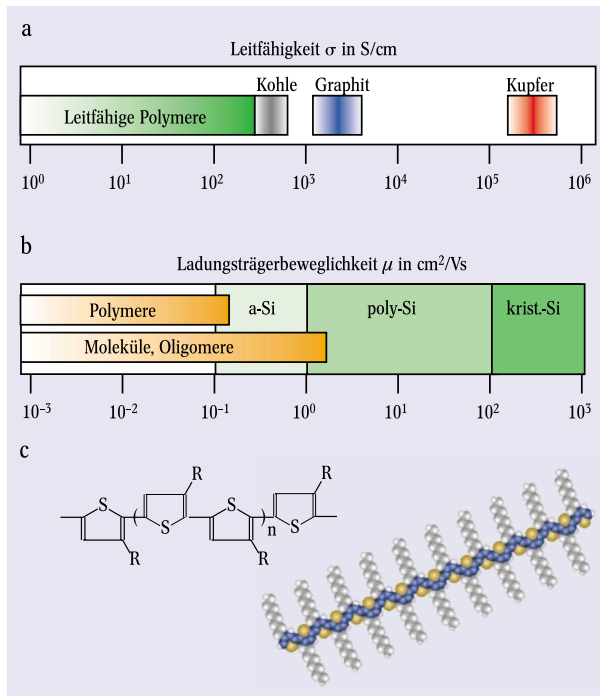
Ein weit verbreitetes Konzept basiert auf einem leitfähigen Silizium-Wafer als Substrat und gleichzeitig Gate-Elektrode und einer darüber liegenden  $\text{SiO}_2$ -Schicht als Isolator. Auf dieser Schicht werden die Source- und Drain-Elektroden aus Gold strukturiert aufgebracht. Die organische Halbleiterschicht wird als oberste Schicht aufgedampft (z. B. Pentacen) oder aufgeschleudert (z. B. Polythiophen). Mit diesem Aufbau lassen sich Halbleiterschichten zwar gut charakterisieren, aber für praktische Anwendungen werden Kon-

Dr. Wolfgang Clemens, Dr. Walter Fix, Siemens AG, Corporate Technology CT MM1, Paul-Gossen-Str. 1, 91052 Erlangen; E-Mail: wolfgang.clemens@siemens.com, walter.fix@siemens.com

zepte benötigt, die eine einfache und sehr schnelle Herstellung integrierter Schaltungen auf flexiblen Substraten ermöglichen.

Ziel sind daher vollorganische Systeme, deren Komponenten sich aus der Lösung heraus verarbeiten lassen, z. B. durch Drucktechniken. Benötigt werden dafür organische Leiter mit einer möglichst hohen

**Abb. 2:**  
 ► a) Vergleich der elektrischen Leitfähigkeit organischer Materialien mit Kupfer  
 ► b) Vergleich der Ladungsträgerbeweglichkeit organischer Halbleiter mit amorphem (a-Si), polykristallinem (poly-Si) und kristallinem (krist.-Si) Silizium  
 ► c) Polythiophen ist das meist verwendete halbleitende (p-Typ) Polymer.



elektrischen Leitfähigkeit (Abb. 2a), organische Halbleiter mit einer möglichst hohen Ladungsträgerbeweglichkeit (Abb. 2b und c) und gute Isolatoren. Eine große Herausforderung liegt dabei in der Kombination geeigneter Materialien und Lösungsmitteln, die sich nicht gegenseitig angreifen oder auflösen.

### Funktionsweise eines organischen Transistors

Die grundlegende Funktionsweise organischer Transistoren ist sehr einfach und mit der herkömmlicher Dünnfilm-Transistoren (TFT) vergleichbar (Abb. 3). Ohne angelegte Gate-Spannung fließt kein Strom zwischen Source- und Drain-Elektrode, da die Halbleiterschicht undotiert und damit nichtleitend ist. Mit angelegter Gate-Spannung entsteht ein sehr dünner, leitfähiger Kanal an der Grenzschicht Halbleiter/Isolator durch Akkumulation von Ladungsträgern, sodass ein Strom von Source- zur Drain-Elektrode fließen kann. Die Stromhöhe hängt ab von der Gate-Spannung, die die Zahl der Ladungsträger bestimmt, sowie von der Ladungsträgerbeweglichkeit, also einer Materialeigenschaft, die ein Maß für die Ladungsträgergeschwindigkeit ist.

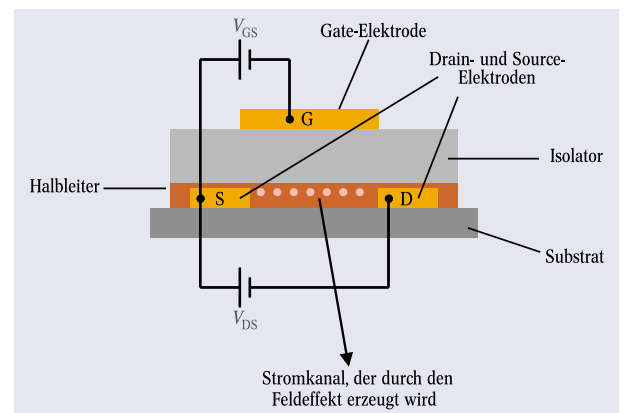
Alle bisherigen organischen Transistoren beruhen auf dem Prinzip der Ladungsträger-Akkumulation. Im Gegensatz dazu basieren anorganische Transistoren fast ausschließlich auf der Ladungsträger-Inversion, d. h. zwischen zwei n-dotierten Bereichen (Source- und Drain-Elektrode) befindet sich eine p-dotierte Schicht. In dieser wird mit der Gate-Elektrode ein n-Kanal erzeugt (das ist die Inversion), und es fließt Strom von Source nach Drain. Bisher ist es in organischen Halbleitern noch nicht gelungen, eine Ladungsträger-Inversion zu beobachten.

Ein weiterer Unterschied liegt im Typ der Ladungsträger: bei Si oder GaAs haben Elektronenleiter die besseren Eigenschaften, bei organischen Halbleitern ist es umgekehrt. Lochleiter oder p-Typ-Halbleiter können den Strom schneller leiten und sind außerdem wesentlich stabiler als n-Typ-Halbleiter. Daher sind die meisten organischen FETs p-Typ-Transistoren.

Schließlich unterscheiden sich anorganische und organische Halbleiter auch hinsichtlich des physikalischen Mechanismus' des Ladungstransports. Während dieser bei Silizium gut verstanden ist, kann davon bei Polymerschichten keine Rede sein. In Silizium oder anderen kristallinen Halbleitern können sich die Ladungsträger praktisch frei bewegen; ihre Wechselwirkung mit dem periodischen Kristallpotential drückt sich allein in einer effektiven Masse aus. In Polymeren dagegen legt jedes Loch einen komplizierten Weg in einem nicht-periodischen System zurück. Die Löcher können sich nur entlang der Polymerketten bewegen und müssen an ihrem Ende zum nächsten Polymer tuneln. Daher ist die räumliche Anordnung der Polymere für den Transport sehr wichtig; ein höherer Ordnungsgrad führt zu höheren Ladungsträgerbeweglichkeiten [2]. Noch fehlt es an grundlegenden experimentellen und theoretischen Arbeiten, um diesen Transport im Detail zu verstehen.

Die Schaltgeschwindigkeit eines Transistors ist begrenzt durch die Laufzeit der Ladungsträger von der Source-Elektrode durch den Kanal zur Drain-Elektrode. Das Maß für die Ladungsträgergeschwindigkeit pro elektrischem Feld ist die Beweglichkeit  $\mu$  der Ladungsträger. Je kürzer die Kanal-Länge  $L$  und je höher die Ladungsträgerbeweglichkeit, desto schneller schalten die Transistoren, wobei die Kanal-Länge sogar quadratisch eingeht. Für die maximale Schaltfrequenz  $f_{\text{max}}$  gilt:  $f_{\text{max}} \sim \mu \cdot U_{\text{ds}} / L^2$  (mit Drain-Source Spannung  $U_{\text{ds}}$ ).

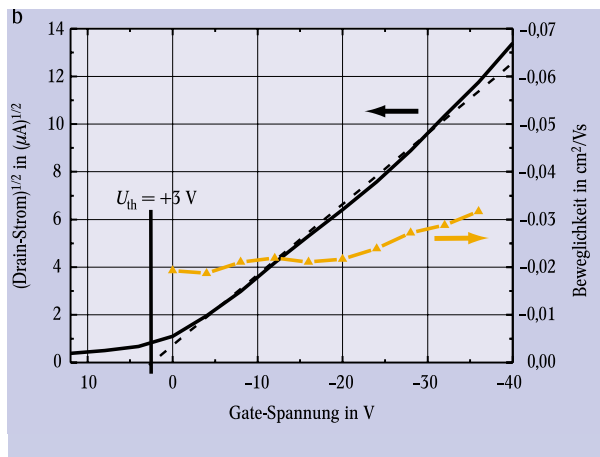
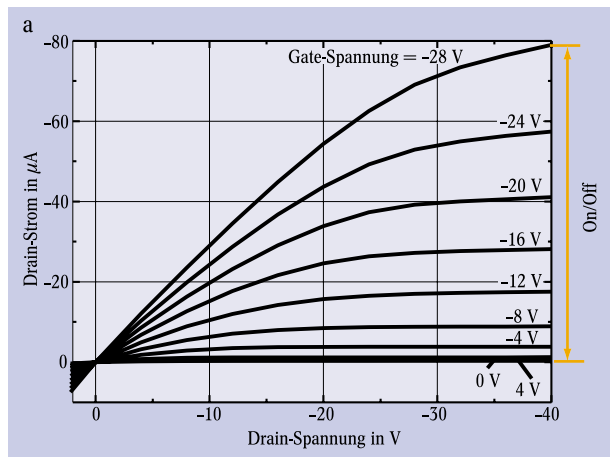
Während die Kanal-Länge durch die Prozesstechnik begrenzt wird, ist die Ladungsträgerbeweglichkeit im Wesentlichen eine Materialeigenschaft, die aber auch vom Ordnungsgrad im organischen Halbleiter abhängt. Die bisher höchsten Löcher-Beweglichkeiten von etwa  $2 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  wurden in aufgedampften kleinen organischen Molekülen (Pentacen) beobachtet, in Polymeren liegen sie typischerweise zwischen  $10^{-4}$  und  $0,1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  (zum Vergleich: kristallines Silizium hat Löcher-Beweglichkeiten bis  $500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ , vgl. Abb. 2b).



**Abb. 3:** Schematischer Querschnitt durch einen Polymer-Transistor (PFET). Typische Schichtdicken sind dabei für das Polyesterfoliensubstrat  $100 \mu\text{m}$ , für die Elektroden  $40 \text{ nm}$ , für den Halbleiter  $50\text{--}100 \text{ nm}$  und für den Isolator  $300\text{--}1000 \text{ nm}$ .

### Integrated Plastic Circuits – Plastik-Chips

Ziel der Siemens-Gruppe ist die Herstellung vollpolymerer integrierter Schaltungen mit schnellen Rolle-zu-Rolle-Drucktechniken. Ein wichtiger Schritt auf dem Weg dahin war die Entwicklung eines Rapid-Prototyping-Verfahrens, das zwar auf konventionellen Prozesstechniken (d. h. Lithographie) basiert, aber Material- und Systemtests in sehr kurzer Zeit ermöglicht. Mit diesem Verfahren dauert die komplette Herstellung in-



**Abb. 4:**  
 ▶ a) Transistor Ausgangskennlinie: der Drain-Strom in Abhängigkeit der Drain-Spannung mit der Gate-Spannung als Parameter.  
 ▶ b) Übertragungskennlinie (linke y-Achse): die Änderung des Drain-Stromes mit der Gate-Spannung und die daraus berechnete Ladungsträgermobilität (rechte y-Achse)

tegrierter Schaltungen knapp zwei Stunden; inklusive der Lithographie-Maskenerstellung benötigt eine komplette Chip-Generation weniger als eine Woche. Verglichen mit Silizium-Chips, deren Entwicklung pro Generation mindestens zwei Monate dauert, kommt man bei der Herstellung der Plastik-Chips mit wesentlich weniger und sehr viel einfacheren Prozessschritten aus.

Abbildung 3 zeigt den Aufbau eines Polymer-Transistors (PFET), der mittels Rapid-Prototyping hergestellt wurde. Auf ein dünnes Substrat aus Polyester-Folie (PET) wird zunächst eine Goldschicht aufgesputtert, um daraus lithographisch Source- und Drain-Elektrode zu strukturieren. Der Halbleiter, das undotierte aber löcherleitende Polymer Polyalkylthiophen, wird gelöst und aufgeschleudert. Ebenfalls durch Aufschleudern wird die Isolatorschicht als gelöstes Polymer auf die Halbleiterschicht aufgebracht. Letzter Prozessschritt ist das Sputtern und Strukturieren der Gate-Elektrode wiederum aus Gold. Bei diesem Aufbau sind zwar die Elektroden noch aus Metall, aber die Austrittsarbeit von Gold stimmt sehr gut mit der von organischen Leitern wie Polyanilin oder PEDOT überein, d. h. Gold ist ein sehr gutes Modellsystem für organische Elektroden, was Messungen an vollpolymeren Transistoren bestätigen [3].

Elektrische Messungen an diesen PFETs zeigen eine gute Sättigung des Drain-Source-Stromes und ein gutes On/Off-Verhältnis (Abb. 4a). Beides, vor allem aber niedrige Off-Ströme sind wichtig für digitale Schaltungen. Aus der Übertragungskennlinie, d. h. dem Drain-Source-Strom über der Gate-Spannung (Abb. 4b), ergibt sich eine Schwellenwertspannung  $U_{th}$  von +3 V. Oberhalb dieser Spannung ist der Transistor ausgeschaltet, darunter, also mit negativen Spannungen, be-

ginnt er einzuschalten. Wichtig ist, wie schnell er einschaltet, d. h. wie groß die Stromänderung pro Gate-Spannung ist. Diese Steigung (engl. *transconductance*) wird durch die Ladungsträgerbeweglichkeit und die Transistorgeometrie bestimmt, d. h. aus der Messung der Steigung lässt sich bei bekannter Geometrie die Ladungsträgerbeweglichkeit bestimmen (Abb. 4b).

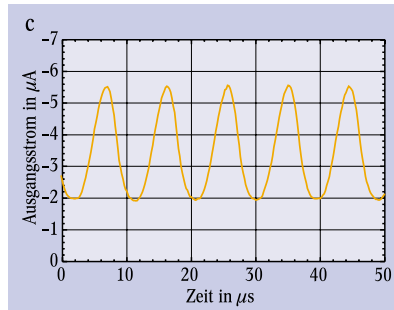
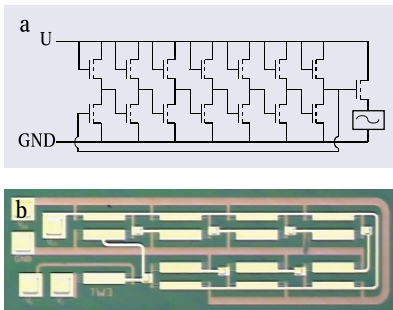
Einzelne Transistoren bilden zwar die Basis, aber erst eine integrierte Schaltung, also die Verknüpfung

vieler Transistoren zu einer logischen Einheit, zu so genannten *Integrated Plastic Circuits* (IPC) oder „Plastik-Chips“, ist als kommerzielles Produkt geeignet. Nicht jeder Transistor mit einer „schönen“ Kennlinie ist auch logiktauglich, also in einem Plastik-Chip einsetzbar. Die einfachste integrierte Schaltung ist ein Inverter. Hierbei werden zwei Transistoren so zusammengesaltet, dass aus einer niedrigen Eingangsspannung (logisch „0“) eine hohe Ausgangsspannung (logisch „1“) erzeugt wird und umgekehrt. Wichtig ist, dass der Inverter das Eingangssignal verstärkt, aber logiktauglich ist der Inverter erst, wenn mit dem Ausgangssignal der Eingang eines weiteren Inverters betrieben werden kann. Das hängt im Wesentlichen von der Lage der Schwellenwert-Spannung der Transistoren ab.

Weitere logische Gatter entstehen aus dem Inverter, indem man zusätzlich einen Transistor parallel (NOR) oder in Reihe (NAND) zum Eingangstransistor schaltet. Damit hat man alle Grundbausteine, die für integrierte Schaltungen nötig sind.

Wichtig bei der Anwendung solcher Schaltungen ist, dass eine unipolare und möglichst niedrige Versorgungsspannung für ihren Betrieb ausreicht. Eine Schaltung, die sowohl positive als auch negative Versorgungsspannungen benötigt, ist nicht in low-cost-Anwendungen einsetzbar. Somit muss der Off-Strom im Transistor auch bei 0 Volt gemessen werden und nicht, wie vielfach praktiziert wird, bei hohen Gegenspannungen. Für den Aufbau von integrierten Schaltungen ist neben den logikfähigen Transistoren auch ein weiterer, bisher wenig beachteter Aspekt von essenzieller Bedeutung: Es werden Vias benötigt, das sind Durchkontakte von der unteren Elektrodenebene (Drain-Source) zur oberen Ebene (Gate). Nur so ist eine entsprechende Verschaltung der einzelnen Transistoren möglich. Bei einfachen Schaltungen wie Invertern lässt sich dies im Labor noch realisieren, indem man die Schaltung mit der Nadel durchsticht, doch integrierte Schaltungen mit vielen Transistoren setzen einen entsprechend schnellen Prozessschritt voraus.

Der entscheidende Durchbruch in Richtung einer integrierten Schaltung ist der Aufbau von Ringoszillatoren. Hierbei wird eine ungerade Anzahl von Invertern so hintereinander geschaltet, dass der Ausgang jedes Inverters mit dem Eingang des jeweils nächsten verknüpft wird. Der Ausgang des letzten Inverters wird mit dem Eingang des ersten Inverters verbunden. Legt man eine Spannung an den Ringoszillator an, so gibt es durch diese ungerade Inverterzahl keinen zeitlich stabilen logischen Zustand. Nun gibt es zwei Möglichkei-



**Abb. 5:**  
 ► a) Schaltplan des siebenstufigen Ringoszillators mit Auskoppel-FET und Strom-Messgerät [2]  
 ► b) Foto eines siebenstufigen integrierten PFET-Ringoszillators mit Goldelektroden

► c) Ausgangssignal des PFET-Ringoszillators mit 106 kHz (das entspricht einer Verzögerung von 0,67  $\mu\text{s}$ ). Das annähernd sinusförmige Signal entsteht durch das RC-begrenzte Umladen der Inverterstufen. Je mehr Stufen ein Ringoszillator hat, desto rechteckiger wird das Signal.

ten: Entweder geht die Schaltung insgesamt auf ein mittleres Niveau des Signals, dann ist sie nicht logikfähig; oder sie beginnt zu oszillieren und macht dadurch ihrem Namen alle Ehre. Ein oszillierender Ringoszillator setzt für einen Schaltungsaufbau in vieler Hinsicht entscheidende Maßstäbe, denn

- ein Oszillieren zeigt die Logikfähigkeit der Schaltung;
- die Spannung, bei der ein Ringoszillator anschwingt, kennzeichnet die minimal notwendige Versorgungsspannung (so niedrig wie möglich);
- aus der Ringoszillator-Frequenz lässt sich die Schaltgeschwindigkeit einer logischen Stufe bestimmen (so hoch wie möglich); und schließlich
- charakterisiert das On/Off-Verhältnis (Symmetrie, Rauschen etc.) sowie die Form des Signals die Signalqualität.

Abbildung 5 zeigt einen siebenstufigen Ringoszillator aus PFETs mit Kanallängen von 2 und 5  $\mu\text{m}$  [4]. Die maximale Schaltfrequenz von 106 kHz wird bei einer Versorgungsspannung von 80 V erreicht, bei niedrigeren Spannungen ist der Ringoszillator entsprechend langsamer. Dies ist bisher die mit Abstand schnellste integrierte Schaltung, die auf einem organischen Halbleiter basiert [5–7]. Neben der Frequenz ist die Verzögerungszeit, die ein logisches Signal von einem zum nächsten logischen Gatter benötigt (engl. *stage delay*), ein wichtiges Vergleichsmaß. Für eine Schwingung am Ausgang des Ringoszillators muss das Signal zweimal durch alle Inverterstufen laufen: Beim ersten Durchlauf ist am Ausgang eine „0“, beim zweiten eine „1“. Bei einer Frequenz von 106 kHz ergibt sich daraus bei sieben Stufen eine *stage delay* von 0,67  $\mu\text{s}$ , d. h. eine logische Schaltung, die auf solchen Invertern aufbaut, ließe sich extern mit 1,4 MHz Taktfrequenz betreiben.

Eine polymerbasierte Schaltung im MHz-Bereich ist somit möglich, jedoch wurde dies erst bei einer Span-

nung von 80 Volt erreicht, was für low-cost-Anwendungen noch viel zu hoch ist. Außerdem ist ein Lithographieprozess, um die Auflösung von 2  $\mu\text{m}$  zu erreichen, noch zu aufwändig. Allerdings zeigt dies die prinzipiellen Möglichkeiten der Polymerelektronik. Für reale Anwendungen, d. h. niedrige Spannungen und größere Kanalabstände (siehe unten), wird man mit Frequenzen im kHz-Bereich oder sogar darunter rechnen müssen. Dies zeigt auch klar den Unterschied zur Siliziumelektronik, bei der heute GHz möglich sind. Doch für viele Anwendungen reichen niedrige Frequenzen vollkommen aus. Analog zur Frequenz ist auch der Strom, den solch eine Schaltung treiben kann, vergleichsweise gering, somit ist kaum an eine preiswerte Hochleistungselektronik zu denken, sondern eher an einfachere Logikschaltungen.

### Stabilität der Polymer-Schaltungen

Das Thema Stabilität oder Lebensdauer ist sicher sehr kritisch für die meisten Anwendungen. Von organischen Leuchtdioden (OLEDs) kennt man das Problem des Degradierens leider nur zu gut, ebenso von organischen Transistoren.

Zu bedenken ist jedoch, dass bei den OLEDs insbesondere das Kathodenmetall, z. B. Kalzium degradiert. Solche unedlen Metalle werden bei Plastik-Chips nicht eingesetzt, da hier (abgesehen von Gold im Laborstadium) keinerlei Metalle mehr verwendet werden. Ferner hat sich gezeigt, dass durch den oben beschriebenen *top-gate*-Aufbau im PFET der Halbleiter schon intrinsisch durch den Isolator und das Gate geschützt ist. Dieser Aufbau ist wesentlich stabiler gegen äußere Einflüsse als der häufig verwendete *bottom-gate*-Aufbau, bei dem der Halbleiter frei an der Oberfläche liegt.



**Abb. 6:** Testmuster einer Leiterbahnebene, also einer wichtigen Funktionsschicht eines Plastik-Chips, die aus elektrisch leitender Druckfarbe in einem Rolle-zu-Rolle Offset-Verfahren gedruckt wurde.

Mit den PFETs und Plastik-Chips wurden schon diverse Untersuchungen bezüglich der Lebensdauer durchgeführt. Sie sind erstaunlich stabil, auch ohne Verkapselung. So funktionieren zahlreiche Transistoren auch nach über zwei Jahren Lagerung in Laboratmosphäre. Daneben zeigen verschiedene Temperatur- und Klimatests, wie diese Proben die Lagerung bei einer Temperatur von 85 °C und einer Luftfeuchtigkeit von 85 % erfolgreich überstehen. Für konkrete Anwendungen müssen solche Versuche natürlich noch genauer spezifiziert werden.

Diese Stabilität ist auch essenziell, da eine aufwändige Verkapselung ein K.-o.-Kriterium für alle low-cost-Anwendungen wäre.

### Mit Druckprozessen zu kostengünstigen Plastik-Chips

Das oben beschriebene Lithographieverfahren zeigt zwar schon, wie einfach die Plastik-Chips herzustellen sind, jedoch lassen sich wirkliche low-cost-Anwendungen nur mit einem kontinuierlichen Herstellungsverfahren realisieren, wie es bei Drucktechniken eingesetzt wird. Moderne Druckmaschinen können in wenigen Minuten eine Fläche bedrucken, die der Jahresproduktion an Chips einer ganzen Silizium-Fabrik entspricht. Natürlich ist diese Rechnung zu einfach, aber dennoch eröffnen sich mit dem Einsatz kontinuierlicher Druckverfahren neue Welten in der Elektronikherstellung. Diese Druckverfahren sind bei Plastik-Chips prinzipiell möglich, wenn lösliche Materialien wie Polymere als „elektronische Tinte“ verwendet werden. Anstelle der üblichen Farben wird dann die leitfähige, halbleitende und isolierende Polymer-tinte aufgedruckt.

Doch leider ist dieser Prozess nicht ganz so einfach, wie es zunächst erscheint. Die üblichen Druckverfahren sind für Bilder optimiert, die zur Betrachtung mit dem menschlichen Auge gedacht sind. Hierbei reichen einerseits Auflösungen im Bereich von  $100\ \mu\text{m}$  aus und andererseits werden die Bilder durch einzelne nebeneinander liegende oder nur leicht überlappende Bildpunkte zusammengesetzt, die im Auge „zusammenwachsen“. Beim Drucken von Plastik-Chips herrschen ganz andere Voraussetzungen: Zunächst werden durchgängige Linienstrukturen für die Drain/Source-Elektroden mit Auflösungen im  $\mu\text{m}$ -Bereich benötigt. Der Halbleiter und der Isolator müssen als sehr dünne, homogene und defektfreie Schichten übereinanderliegen, und die Gatestruktur muss möglichst passgenau über den Drain/Source-Strukturen aufgebracht werden. Dies sind enorme Anforderungen sowohl an die Maschinen als auch an die Materialien.

Um diese zu erreichen, gibt es viele verschiedene Ansätze. Bei Siemens wird in einem Zwischenschritt solch ein Aufbau mit Tampon- und Siebdruckmethoden im Labormaßstab realisiert. Mit dem Tampondruckverfahren, einem indirekten Tiefdruckverfahren, werden die Drain/Source- und die Gate-Strukturen gedruckt, wobei sich Auflösungen bis etwa  $20\ \mu\text{m}$  erreichen lassen. Dies reicht zunächst aus, um entsprechende Schaltungen aufzubauen. Die Halbleiter- und Isolatorschichten werden typischerweise im Siebdruckverfahren gedruckt, da hier keine besondere Auflösung nötig ist.

In einem weiteren Schritt sollen dann diese Ergebnisse auf kontinuierliche Rolle-zu-Rolle-Verfahren umgesetzt werden, die eine low-cost-Produktion für neue Massenmärkte ermöglichen. Neben den niedrigen Produktionskosten und dem hohen möglichen Volumen bieten solche Druckprozesse auch den Vorteil, durch einen einfachen Austausch der Druckplatten innerhalb kurzer Zeit die Elektronik wechseln zu können. Somit wird es demnächst möglich sein, Elektronik in hohen Volumina in täglich änderbarer Ausführung zu drucken – wie heutzutage eine Zeitung. Prinzipiell ist auch ein digitaler Druck denkbar, bei dem sich jede Schaltung von der zuvor gedruckten unterscheiden kann, vergleichbar mit Laser- oder Tintenstrahldruck.

### Anwendungen

Aufgrund ihrer vergleichsweise geringen Performance ist ganz klar davon auszugehen, dass die Plastik-Chips nicht die Silizium-Elektronik verdrängen werden. In absehbarer Zukunft wird es keine Plastik-Computer geben. Plastik-Chips werden aber überall dort zu finden sein, wo sie Vorteile gegenüber herkömmlicher Elektronik haben. Diese Vorteile sind:

- ▶ niedrige Kosten – also auch Einweg-Elektronikprodukte sind denkbar;
- ▶ dünner flexibler Aufbau – die Chips können wie eine Plastikfolie aufgeklebt oder integriert werden und nehmen keinen Platz weg;
- ▶ kurze Entwicklungszeiten – die Elektronik lässt sich so schnell wie Druckerzeugnisse neu entwickeln.



**Abb. 7:** Der Chip auf der Chipstüte: Billige Plastik-Chips könnten einmal den Strichcode auf Verpackungen ersetzen.

Somit werden die Plastik-Chips voraussichtlich dort angewendet werden, wo heute noch keine Elektronik vorhanden ist, beispielsweise als intelligente Verpackung, als elektronisches Spiel im Überraschungsei, als „wearable electronics“ in Kleidung oder auch als elektronischer Strichcode auf dem Joghurtbecher. Denkbar sind eine Vielzahl weiterer Produkte im Bereich der low-cost-Elektronik, Sensorik oder Ansteuerung flexibler Bildschirme, aber das interessanteste Produkt sind Funketiketten, auch *Radio Frequency Identification Tags*, kurz RFID-Tags, genannt. Hiermit lassen sich über Funkwellen kontaktlos Informationen übertragen. Solche Funketiketten sind heute schon vielfach im Einsatz z. B. als Ausweis in Sicherheitsbereichen. Am bekanntesten ist jedoch ihr Einsatz als kontaktlos auslesbarer Skipass [8].

Solche Funketiketten bestehen im Wesentlichen aus einer Spule, über die in induktiver Kopplung ein Sendelesegerät bei einer bestimmten Frequenz (typischerweise  $125\ \text{kHz}$  oder  $13,56\ \text{MHz}$ ) Radiowellen einstrahlt. Die Spule ist mit einem Kondensator auf die entsprechende Resonanzfrequenz abgestimmt. Über einen Gleichrichter wird beim Auslesen ein Chip mit Leistung versorgt, der dann seine gespeicherte Information über die Spule kontaktlos zurück an das Lesegerät geben kann.

Funketiketten bieten also eine sicht- und kontaktlose Informationsübertragung mit passiver Elektronik, d. h. ohne eigene Energieversorgung. Sie lassen sich demnach unsichtbar in Checkkarten, Gehäuse, Verpackung oder Kleidung integrieren und erobern auch in der heute schon erhältlichen konventionellen Version mit Si-Chips zunehmend neue Märkte. Interessant wäre ihr Einsatz auch in der automatischen Produktion, in der Logistik, als elektronisches Ticket oder als

Ersatz für den elektronischen Strichcode im Supermarkt. Jedoch lassen sich solche Anwendungen häufig nur bei extrem niedrigen Herstellungskosten realisieren. Mit Plastik-Chips sind Funketiketten im Cent-Bereich denkbar.

Vielleicht müssen wir dann demnächst nicht mehr unsere Waren auf das Band an der Supermarktkasse legen, sondern können einfach mit dem gefüllten Warenkorb durch ein Lesegerät gehen, ähnlich dem Metalldetektor beim Check-in im Flughafen. Solch ein Szenario lässt sich sogar noch weiter „spinnen“, wenn man bedenkt, dass auch im Kühlschrank ein Lesegerät integriert werden kann, das erkennt, welche Produkte darin sind und ob deren Haltbarkeitsdatum bereits überschritten ist. Prinzipiell ist es also möglich, dass Gegenstände miteinander kommunizieren können. In solchen Szenarien wird auch vom „Internet of things“ oder „thing to thing“ gesprochen. Technisch möglich ist dies bereits heute, aber erst mit low-cost-Elektronik wie Plastik-Chips kann es sich im Alltag durchsetzen.

### Ausblick

Die organische Elektronik eröffnet mit dem Einsatz von leitfähigen und halbleitenden Polymeren ein riesiges Feld neuer Anwendungen. Neben den organischen Leuchtdioden und den Solarzellen bieten gerade Plastik-Chips die Möglichkeit, viele neuartige elektronische Produkte zu realisieren. Wenn sich die Preis- und Performanceerwartungen erfüllen, lässt sich hiermit die Vision von der überall verfügbaren Elektronik realisieren. Die Polymerelektronik wird keine neuen Supercomputer hervorbringen, sondern sich in Produkten mit intelligenten Verpackungen, elektronischem Papier, bis hin zum Plastik-Chip im Hemd und auf dem Joghurtbecher zeigen.

Doch bis diese neue elektronische Revolution stattfinden kann, sind noch einige Hindernisse zu überwinden. Besonders gefragt ist das physikalische Verständnis der Polymer-Transistoren, speziell des Ladungstransports in Polymerschichten und des Einflusses der Grenzflächen auf die Transistoreigenschaften. Darauf aufbauend müssen Simulationsmodelle entwickelt werden, die als Grundlage für komplexe Schaltungen unerlässlich sind. Ebenfalls ist eine weitgreifende Interdisziplinarität zwischen Physik, Chemie und Drucktechnik nötig, um die derzeitigen Grenzen der Drucktechnik zu überwinden, mit dem Ziel, die leistungsfähigen Schal-

tungen aus dem Labor mittels kontinuierlicher Rolle-zu-Rolle-Druckprozesse herzustellen.

Dieses Ziel lässt sich nur durch gemeinsame Anstrengungen erreichen. Dann steht uns eine neue Art von Elektronik zur Verfügung, die unser Leben in vielen Bereichen vereinfachen kann.

### Danksagung

Der Dank gilt allen, die zu den beschriebenen Ergebnissen beigetragen haben, sowie dem BMBF, das durch Förderprojekte diese Entwicklung unterstützt.

### Literatur

- [1] C. D. Dimitrakopoulos und D. J. Maseo, IBM J. RES. & DEV. **45** (1), 11 (2001)
- [2] H. Sirringhaus, P.J. Brown, R.H. Friend et al., Nature **401**, 685 (1999)
- [3] H. Rost, A. Bernds, W. Clemens et al., Proc. Mat. Week (CD veröffentlicht durch Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, ISBN 3-88355-302-6) (2001)
- [4] W. Fix, A. Ullmann, J. Ficker et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 1735 (2002)
- [5] G. H. Gelinck, T. C. T. Geuns und D. M. de Leeuw, Appl. Phys. Lett. **77**, 1487 (2000)
- [6] B. Crone, A. Dodabalapur, Y. Y. Lin et al., Nature **403**, 521 (2000)
- [7] D. J. Gundlach, L. Zhou, J. A. Nichols et al., IEDM, 34.1.1 (2001)
- [8] U. Kilian, Physik Journal, Dezember 2002, S. 64

### Die Autoren

**Wolfgang Clemens** hat in Köln Physik studiert und am Forschungszentrum Jülich über die Spektroskopie an dünnen magnetischen Schichten promoviert. 1995 ging er zu Siemens Corporate Technology in Erlangen, zunächst als Postdoc und seit 1996 als Festangestellter. Hier war er bis Ende 1999 Projektleiter für



Magnetsensorik und seitdem für Polymerelektronik.



**Walter Fix** hat in Erlangen Physik und Mathematik studiert und über optische Transistoren promoviert. Seit Anfang 2000 ist er bei Siemens Corporate Technology im Projekt Polymerelektronik zuständig für Chip-Design und Herstellung integrierter Schaltungen.