

# Gedruckte Halbleiter: ein Polymertransistor entsteht

Hans Martin Sauer

5. Februar 2021



www.sauerampfer-online.de  
Das Physik & Elektronik Archiv

## 1 Elektronische Schaltungen drucken?

Jawohl, das kann man tun! Wie man einen Zeitungstext druckt, so kann man auch elektronische Bauelemente mit Tinte und Druckplatte herstellen. Ganz besondere Tinten und besondere Druckplatten natürlich. Wer das kann, der kann auch komplexe Schaltungen aus vielen Elementen herstellen. Bild 1 zeigt eine Plastikfolie mit Transistoren. Doch wie geht das ganz genau? Gedruckte elektronische Bauelemente kann man nicht im Versandhandel bestellen. Auch Datenblätter findet man im Internet nicht.

Ich möchte hier einen recht bewährten Fertigungsprozess für Polymertransistoren vorstellen, an dem ich vor ein paar Jahren selbst mitgearbeitet habe. Und zwar von den molekularen Wurzeln an, von der Chemie über die Drucktechnologie bis zum elektrischen Schaltkreis. Anschließend zeige ich ein paar einfache Schaltungsbeispiele, die sich mit diesen Transistoren realisieren lassen. Die zahlreichen Details würden den Rahmen dieses Artikels sprengen. Sie sind in der Doktorarbeit von *S. Ganz* [1] nachzulesen, von wo auch zahlreiche Bilder stammen. Die URL der Online-Version dieser Arbeit ist im Literaturverzeichnis angegeben. Polymertransistoren drucken kann man gleichwohl nicht einfach in der Küche oder im Bastelkeller. Man benötigt durchaus die Infrastruktur, die technischen Möglichkeiten und die Finanzkraft eines mittleren Unternehmens oder eines Universitätsinstituts, um sicher reproduzierbare Resultate zu erhalten [2]. Was man *nicht* zwingend braucht – und das ist der Reiz gedruckter Elektronik – ist ein zweites

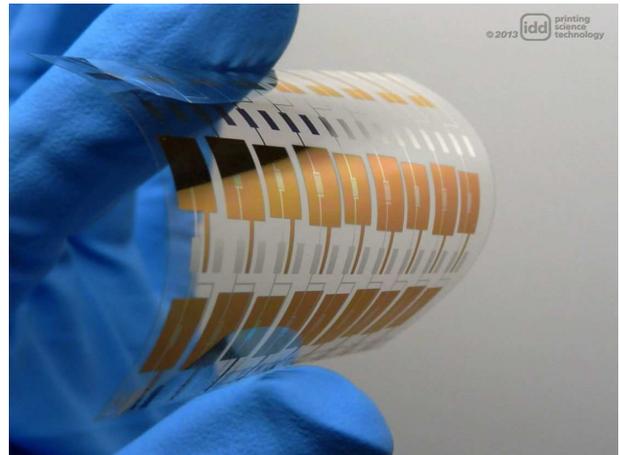


Abbildung 1: Folienstück mit aufgedruckten Dünnschicht-Transistoren von unterschiedlicher Struktur und Größe.

*Silicon Valley* oder einen ähnlich Milliarden Dollar schweren Industriepark.

## 2 Was ist ein TGBC-OTFT ?

### 2.1 ... und wie sieht er aus ?

Ein organischer Dünnschichttransistor, zu englisch *Organic Thin Film Transistor*, kurz OTFT, in *Top-Gate-Bottom-Contact*-Bauweise ist damit gemeint. Dieser ist der Gegenstand dieses Artikels. Unser Exemplar ist nur ein kleiner Fleck auf einer visitenkartengroßen PET-Folie, der ungefähr 2 mal 6 mm groß und 0,5  $\mu\text{m}$  dick ist. Auch er hat drei Kontakte, die als *Source* (S), *Drain* (D) und *Gate* (G) bezeichnet werden. Natürlich hat unsere Folie nicht nur diesen einen Fleck. Sie enthält 27 Transistoren, deren Kontakte alle mittels filigraner, silbernen schimmernder Leiterbahnen mit besonderen Kontaktierungsflächen verbunden sind. Die Folie dient für zur Erprobung verschiedener Source- und Drain-Strukturen im Labor. Hunderte solcher Folien wurden hergestellt. Dabei wurden ganz unterschiedliche Transistorbauformen in verschiedenen Fertigungsprozessen hergestellt. Wenn man diesen Transistor unter das Mikroskop legt, erkennt man zuerst Source und Drain, siehe Bild 2. Der Halbleiter selbst ist durchsichtig, das Gate noch nicht auf-

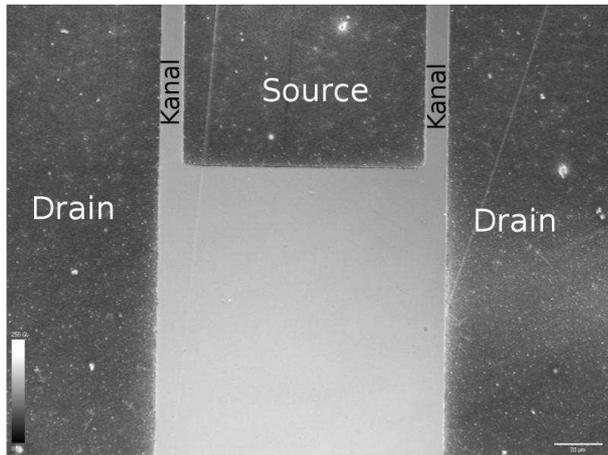


Abbildung 2: Source und Drain bestehen aus je  $100\ \mu\text{m}$  breiten,  $0,1\ \mu\text{m}$  dicken Metallstreifen. In dem nur  $10\ \mu\text{m}$  breiten, freien Kanal leitet das Polymer den Strom. Dieser Kanal ist bis zu 10.000 mal länger als er breit ist.

gebracht. Der Transistor besteht aus vier übereinander liegenden, sehr dünnen Schichten. Die unterste Schicht bilden Source und Drain. Zwei ineinander gesteckte Heugabeln quasi, deren Zinken ineinander greifen ohne sich gegenseitig zu berühren. Die Schicht besteht aus einer  $0,1\ \mu\text{m}$  dicken Silberauflage. Der nur etwa  $10\ \mu\text{m}$  breite Zwischenraum, der *Kanal*, zwischen den Zinken wurde chemisch weggeätzt. Genau das versteht man unter *Bottom-Contact*. Den Querschnitt eines solchen Transistors zeigt Bild 3. Der geätzte Kanal ist ein wichtiges Merkmal jedes Polymertransistors. Der Abstand zwischen den Rändern von Source- und Drain-Elektrode bezeichnet man als *Kanal-Länge*, oft mit  $L$  abgekürzt, wohingegen man die „Gewässerlänge“ mit den sich gegenüberstehenden Uferkanten als *Kanal-Breite*, kurz  $W$  wie *width* bezeichnet. Je länger  $W$  ist, umso mehr Strom kann der Transistor unter gegebenen Bedingungen über den Kanal transportieren. Je kürzer  $L$  ist, umso höher ist seine Verstärkung, aber auch die Gefahr eines spontanen elektrischen Durchbruchs. Das Verhältnis  $W/L$  sollte dem Verwendungszweck angepasst werden. Wir waren an möglichst großen Werten interessiert.

Silberbeschichtete PET-Folie gibt es im Großhandel günstig zu kaufen. Und sauber im  $\mu\text{m}$ -

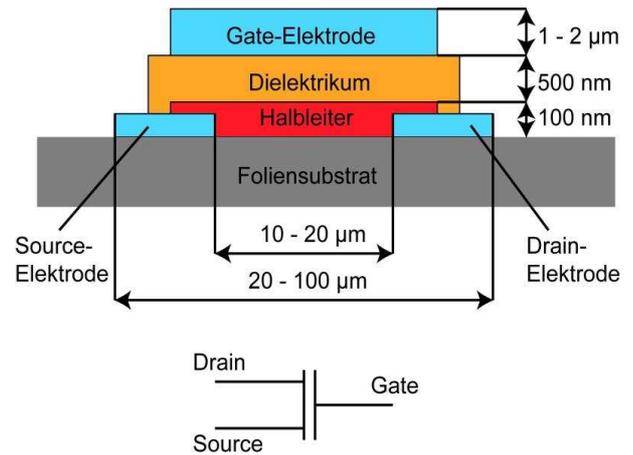


Abbildung 3: Querschnittsskizze eines gedruckten Dünnschichttransistors.

Bereich ätzen können zahlreiche Dienstleister im In- und Ausland auf Bestellung. Das alles bekommt man über die *Gelben Seiten*. Die Chemie der Ätzgalvanik war unsere Sache nicht. Das überließen wir anderen. Natürlich haben wir ein sehr gutes Mikroskop im Labor um zu prüfen, ob das gelieferte Material *tatsächlich* den Anforderungen entspricht. Auch wir haben unsere Erfahrungen sammeln müssen.

## 2.2 Den Polymerhalbleiter richtig auswählen

Nun wird es erst wirklich spannend: Auf die silbernen Elektroden muss ein Polymerhalbleiter aufgetragen werden. Besser gesagt, *müßte!* Zunächst muss entschieden werden, welcher. Anders als in der Siliziumwelt werden für die Polymerelektronik bei den großen Chemieunternehmen wie *Merck*, *BASF*, *Du Pont* und ihren Tochterfirmen nämlich hunderte von *verschiedenen* Halbleitermaterialien produziert und über Vertriebsgesellschaften wie beispielsweise *Sigma Aldrich* in dicken Katalogen angeboten. Zum Beispiel *Poly-Triaryl-Amin*, kurz PTAA, oder eine Weiterentwicklung, *Poly-Indenofluoren-8-Triaryl-Amin*, kurz PIF8-TAA, siehe Bild 4 und 5. Dazu gibt es jeweils chemische Datenblätter, die Auskunft über die chemische Struktur des Polymerhalbleiters, über die empfohlene Verar-

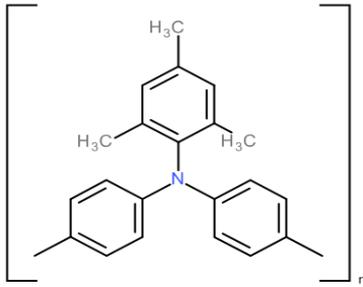


Abbildung 4: Die Struktur eines PTAA-Monomers. Das Halbleiterpolymer ist eine Molekülkette aus einigen tausend solcher chemischer Gruppen.

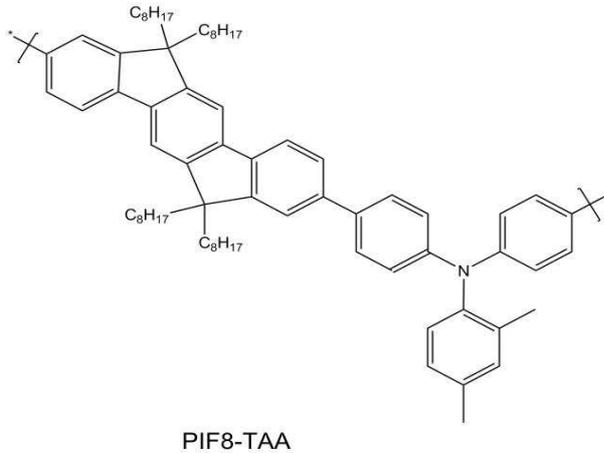


Abbildung 5: Die Struktur eines PIF8-TAA-Monomers.

beitung, geeignete Lösemittel, die Energieniveaus von Valenz- und Leitungsband im Molekül und vieles andere mehr enthalten. Auch wird hier die zu erwartende *Ladungsträgermobilität* angegeben, ein wichtiges Leistungsmerkmal, das die Eigenschaften der späteren Transistoren wesentlich beeinflusst.

Bevor man die Bestellung herausgibt, sollte man daher diese Datenblätter gründlich studieren. Wie auch die wissenschaftliche Literatur, die häufig als Quelle der Messdaten angegeben wird. Worauf gilt es zu achten, wenn man einen Transistor herstellen möchte? Überlegen wir einmal. Im Transistor, wenn er Strom leitet, müssen Elektronen oder Löcher aus der Silberschicht austreten und sich auf ein passendes Energi-

veau im Polymerelement setzen. Dort überwinden sie die ausgeätzte Lücke zwischen Source und Drain, den *Kanal*, und verschwinden dann in der Drain-Elektrode. Das funktioniert ganz offensichtlich dann am glattesten, wenn die Austrittsenergie der Elektronen in der Silberelektrode genau so groß ist wie die Energie des betreffenden Molekülniveaus. In unserem Fall haben wir uns für einen polymeren p-Halbleiter entschieden. Das heißt, wir wünschen, dass der Strom in Halbleiter durch die positiv geladenen Lochzustände des *Valenzbandes* transportiert wird und nicht durch die negativen Elektronen, die man ins *Leitungsband* anheben könnte. Einem Metall wie Silber ist es grundsätzlich egal, ob der Strom, der hindurchfließt, von Elektronen oder von Löchern oder beidem transportiert wird. Beide Arten von Teilchen besitzen dieselbe Energie und sind in frei beweglicher Form im Überfluss vorhanden. In einem Halbleiter ist das anders: frei bewegliche Ladungsträger sind knapp. Die *Löcher* können nur im obersten Energieniveau des *Valenzbandes* bewegt werden, im *Highest occupied molecular level* oder *HOMO*. *Elektronen* dagegen lassen sich nur verschieben, wenn man sie ins unterste freie Niveau des *Leitungsbandes* bringt, das *Lowest unoccupied molecular level* oder *LUMO*. Dazwischen liegt die *Bandlücke* des Halbleiters, die mehrere Volt groß ist.

### 2.3 Der Metall-Halbleiter-Kontakt

Unsere Vorstellungen vom Polymerhalbleiter sind zumindest elektrisch gesehen nun ziemlich klar: ein p-Halbleiter muss es sein, das LUMO-Orbital soll energetisch nahe an der Fermi-Energie von Silber liegen, und, bitte, die Ladungsträgermobilität soll sehr gut sein. Neben den elektrischen gibt es allerdings auch chemische und prozesstechnische Kriterien, die die Wahl weiter einschränken. Das sind die Löslichkeit in einem passenden organischen Lösemittel sowie die Qualität der Schichtbildung während des Trocknens.

Zunächst haben wir ein weiteres kleines Problem zu lösen [3]. Stellen Sie sich die Elektronen im Valenzband der Polymerhalbleiters vor, wenn

sie plötzlich Kontakt mit dem günstig gelegenen, riesigen Fermisee im Silber und alle ihren vielen Artgenossen haben. Was wird wohl passieren? Richtig, sie stürzen sich begeistert hinein. Wie Touristen, die zum ersten Mal an den Strand von Ibiza kommen. Nun sind Elektronen negativ geladen. Im Metall fällt das nicht auf. Aber das verlassene LUMO lädt sich positiv auf, bis keine weiteren Elektronen mehr ins Metall übertreten können. Der Halbleiter wird dadurch zum Isolator, er entwickelt eine Sperrschicht. „*El primero en llegar, el primero en ser atendido*“, wie der Spanier sagt. Wir Physiker bezeichnen das als eine *Schottky-Barriere*. Um genau das in einem OTFT zu verhindern, bauen wir also erst einmal eine Mauer. Das klingt jetzt schlimmer als es ist. Ich erwähne es hier, denn die molekulare Mauer, mit der wir die Silberelektroden überziehen, bewahrt die Grenze paradoxerweise vor der Verstopfung. Sie ist aber auch die Schwachstelle des Polymertransistors, da sie im Betrieb einer allmählichen Degradation unterliegt. Die Mauer besteht aus einer Schicht von stäbchenförmigen, *amphipolaren* Molekülen. Mit dem einen Ende verankern sich diese Moleküle fest auf der Oberfläche der Silberelektrode. Es handelt sich um Merkaptane, die ein Schwefelatom enthalten. Schwefel vermag mit vielen Metallen sehr feste Bindungen einzugehen, wie in Metallsulfiden. Nicht ohne Grund wird Silber ja aufwändig aus Silbererzen erschmolzen, die wesentlich aus natürlichem Silbersulfid bestehen. Jedenfalls, das andere Ende des Mauerbausteins trägt eine elektrische Ladung, die gegen den Halbleiter gerichtet ist. Dadurch wird das elektrische Feld, das die ausgetretenen Elektronen im Halbleiter hinterlassen haben, kompensiert, und der Übergang zwischen Elektrode und Halbleiter bleibt durchlässig.

Diese *Self-assembled monolayer*, kurz *SAM*, wird durch ein kurzes Tauchbad der PET-Folie in einer verdünnten Lösung des Merkaptans aufgetragen. Zuvor muss die Oberfläche der Folie allerdings durch Ultraschall-Tauchbäder in *Aceton*, *Isopropanol* und destilliertem Wasser gründlich von allen Verunreinigungen und Belägen gereinigt werden. Dieser sehr kritische Teilprozess fin-

det in einem *Reinraum* statt, in dem der Partikelgehalt der Luft um Größenordnungen gegenüber dem normalen Labor reduziert ist. Alle Oberflächen darin sind peinlich gereinigt, und die Mitarbeiter tragen einen staubsicheren Schutzanzug und Atemmasken. Überhaupt muss ich hier feststellen, dass absolute Sauberkeit die Voraussetzung für einen reproduzierbaren Fertigungsprozess in der gedruckten Elektronik ist und gleichzeitig der größte Kostenfaktor.

## 2.4 Jetzt wird gedruckt!



Abbildung 6: Die Tiefdruckmaschine hat das notwendige Fingerspitzengefühl, um feinste Strukturen von Polymerhalbleitern präzise aufzudrucken.

Ist dies aber erst einmal erledigt, dann kann es mit dem Polymerhalbleiter weitergehen. Diesen haben wir in einem organischen Lösemittel, nämlich in *Mesethylen*, aufgelöst und dann mit einer „kleinen“ *Tiefdruckmaschine* flächendeckend auf die vorbehandelte PET-Folie gedruckt, siehe Bild 6. Wir bezeichnen diese Maschine als *klein*, weil sie nur 800 kg wiegt, im Gegensatz zu ihren großen Schwestern aus der Druckindustrie, die es leicht auf 20 Tonnen bringen. Das zentrale Element einer Tiefdruckmaschine ist der hartverchromte *Formzylinder*. Dieser trägt ein mikroskopisch feines Raster von eingravierten Nöpfchen, siehe Bild 7, mit jeweils nur wenigen Picolitern Rauminhalt (1 pL entspricht einem Würfel

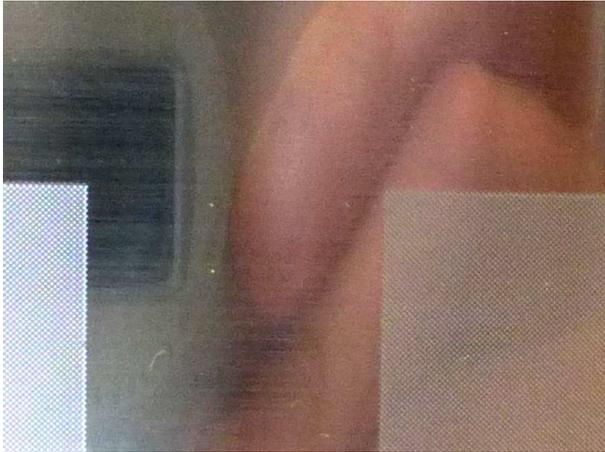


Abbildung 7: Mit meiner Digitalkamera konnte ich die winzigen gravierten Näpfcchen, die den gelösten Halbleiter auf Source und Drain auftragen, auf dem ansonsten spiegelnd glatten Formzylinder noch gerade eben auflösen.

mit 10  $\mu\text{m}$  Kantenlänge). Diese Näpfcchen werden in der Maschine mit dem gelösten Polymerhalbleiter befüllt. Anschließend wird der Zylinder über die PET-Folie abgerollt und setzt dabei die winzigen Flüssigkeitströpfchen an der gewünschten Position auf Elektroden und im Kanal ab. Dort verbleibt ein hauchdünner Flüssigkeitsfilm, der den Polymerhalbleiter in gelöster Form enthält. Wenn das Lösemittel daraus verdunstet, dann bleiben allein die Polymermoleküle dort zurück und bilden eine extrem dünne, glatte und innerhalb des bedruckten Flecks zusammenhängende Polymerhaut. Die Polymerketten verflechten sich untereinander zu elektrisch leitenden Überstrukturen. Die Valenzelektronen ordnen sich in *HOMO* und *LUMO*. Diese spontane Ordnung wird uns von den Polymerchemikern, die das Molekül entwickelt haben, geschenkt! Der kritische Fertigungsschritt ist nun bestanden. Die PET-Folie erhält noch eine Wärmebehandlung, um sicher alles Lösemittel aus dem Halbleiter auszutreiben.

## 2.5 ...und gleich ein zweites Mal

Ist dies geschehen, dann empfiehlt es sich, eine zweite Polymerschicht aufzudrucken, wobei

allerdings kein Halbleiter, sondern ein elektrischer Isolator verwendet wird. Diese Schicht ist elektrisch ebenfalls von großer Bedeutung. Sie spielt im Polymertransistor die gleiche Rolle wie das Gate-Dielektrikum beim Silizium-Feldeffekttransistor. Das Dielektrikum muss chemisch zum Halbleiter passen. Hersteller wie *Merck* oder *BASF* bieten ihren Kunden aus der Elektronikbranche bisweilen komplette „Transistor-Kits“ an, welche passende Halbleiter, Dielektrikum und SAM enthalten.

Beim Drucken muss man natürlich auf perfekte Sauberkeit und insbesondere darauf achten, dass im Dielektrikum keine Durchbrüche entstehen. Schmutz- und Staubpartikel wären für den halbfertigen Transistor an dieser Stelle äußerst gefährlich. Sie bedeuteten einen Kurzschluß zwischen der Gate-Elektrode, die direkt auf das Dielektrikum aufgetragen wird, und dem Halbleiterkanal. Man macht das Dielektrikum daher nicht allzu dünn, um das Risiko gering zu halten. Im vorliegenden Fall hatte das Dielektrikum eine Dicke von 0,4  $\mu\text{m}$ . Auch hier eignet sich die Tiefdruckmaschine vorzüglich, wozu natürlich ein eigener Formzylinder mit entsprechend tieferen Gravuren bestellt werden musste.

## 2.6 Zuletzt: die Gate-Elektrode

Mit dem Aufdrucken des Dielektrikums sind die funktionskritischen Elemente des TGBC-OTFTs fertiggestellt. Nach sorgfältiger Trocknung kann er den Reinraum verlassen. Zwar fehlt ihm zur Vollständigkeit noch die Gate-Elektrode. Für einen Drucker ist das aber Alltagsarbeit, und es stehen alternative Methoden zur Auswahl, siehe Bild 8: Siebdruck, so ähnlich also wie im Kunstunterricht, oder natürlich mit dem Inkjet. Für die verschiedenen Druckköpfe, die man dazu im Drucker montieren kann, werden spezifische, elektrisch leitende Spezialtinten angeboten. Wir haben uns damals allerdings gegen diese Optionen und statt dessen für einen Sputterprozess im Argon-Plasma-Beschichter entschieden. Auf diese Weise wurde eine 70 Nanometer dicke Elektrode aus Gold als Gate hergestellt. Das geht innerhalb von einer Viertelstunde. Eine geeignete

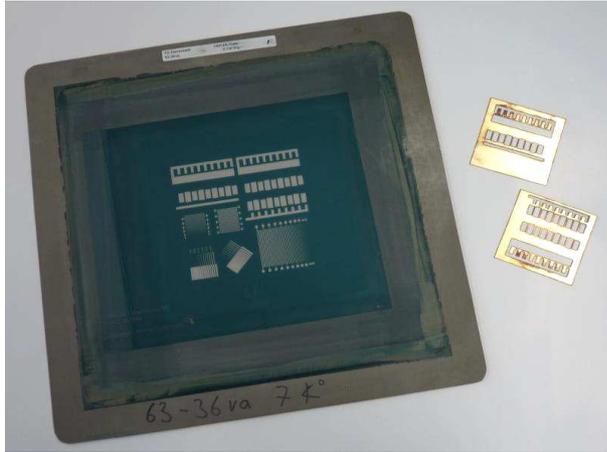


Abbildung 8: Links: Der Rahmen mit dem Drucksieb für eine Siebdruckmaschine, der bereits die Struktur der Gate-Elektroden erkennen läßt. Rechts: Edelstahl-Maskenbleche, die beim Sputtern einfach auf die bedruckten PET-Folien gelegt werden.

Anlage stand uns im Reinraum noch von einem anderen Prozess zur Verfügung. Im Lasercutter wurde eine passende Maske aus dünnem Edelstahlblech herausgeschnitten, und die Mitarbeiter mochten die Sache vor Feierabend dann doch zu Ende bringen.

### 3 Polymertransistor-Kennlinien

Die normale Vorgehensweise in einer F & E-Abteilung oder am Uni-Institut wäre nun, die fertigen Transistorfolien in einen sogenannten Stepper zu legen und alle Transistoren der Reihe nach zu untersuchen. Von besonderem Interesse sind natürlich ihre Kennlinien, der Source-Drain-Strom als Funktion von Source-Drain-Spannung und Gate-Source-Spannung, siehe Bild 9. Die Ströme und Spannungen sind bei einem p-OTFT negativ aufgetragen. Wer mit Silizium vertraut ist, muss hier wie bei PNP-Transistoren denken.

Darüberhinaus interessiert die Exemplarstreuung zwischen den einzelnen Transistoren. Das Ziel der gedruckten Elektronik besteht *nicht* darin, möglichst leistungsfähige Transistoren herzustellen. Es geht vielmehr darum, dass alle

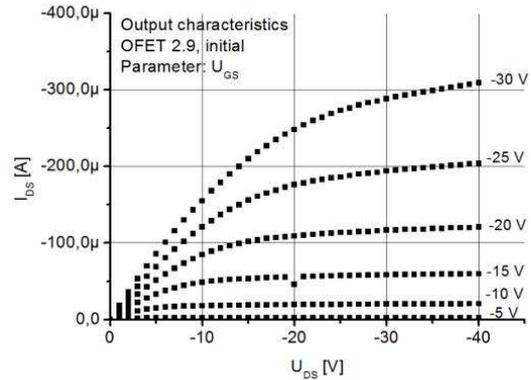


Abbildung 9: Die Kennlinien des Drainstrom  $I_{DS}$  als Funktion der Source-Drain-Spannung  $U_{DS}$  für verschiedene Gate-Spannungen  $U_{GS}$  sehen fast aus wie bei einem Silizium-FET. Allerdings sind die Ströme um Größenordnungen niedriger als bei Silizium.

Transistoren auf einer solchen Folie, auch wenn sie vielleicht nur mittelmäßige Daten aufweisen, tatsächlich funktionstüchtig und für den Schaltungsentwickler verwendbar sind [4]. Ein defekter Transistor unter Hunderten, die auf einer solchen Folie sind, bedeutet, dass die ganze Folie Ausschuß ist und in die Mülltonne kommt. Wenn dagegen der Kunde meint, er brauche mehr *Performance*, dann lösen wir das am Bildschirm mit dem Grafikeditor, indem wir neue Formzylinder und Druckformen entwerfen. Die Transistoren erhalten einen Kanal mit höherem  $W/L$ -Verhältnis, oder wir ändern Anordnung und Gestalt der Gate-Elektroden. Einen einmal solide funktionierenden Herstellungsprozess aber läßt man unangetastet. Ganz genau wie in der Silizium-Welt.

An den Universitäten befindet man mit solchen komplexen Prozessen in einem Dilemma. Doktorarbeiten sind nach drei bis fünf Jahren abgeschlossen. Die Finanzierung ist ausgelaufen. Steuerzahlergeld fließt nicht unbegrenzt. Aber ohne den frisch gebackenen Dr.-Ing., auf den oder die ein lukrativer Posten in einem renommierten Unternehmen wartet (Jawohl, trotz mancher negativen Presse ist der Ingenieurberuf noch immer und gerade heute eine solide Bank), ist im

verwaisten Labor der Herstellungsprozess am Ende. Und Reinraum-Platz ist heiß umkämpft. Das Know-How ist zwar dokumentiert und publiziert. Den stillgelegten Prozess im eigenen Hause mit neuen Studenten wieder in Gang zu bringen dauert ein bis zwei Jahre. Und es kostet soviel wie das ursprüngliche Forschungsprojekt.

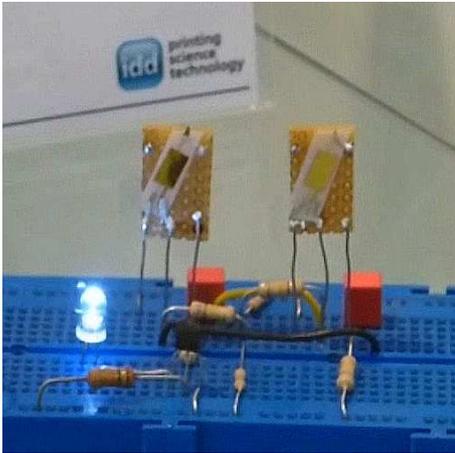


Abbildung 10: Ein astabiler 1-Hz-Multivibrator mit zwei OTFTs (neben den roten Kondensatoren). Drainstrom je maximal  $150 \mu\text{A}$ . Die LED-Ansteuerung erledigt ein BC547.

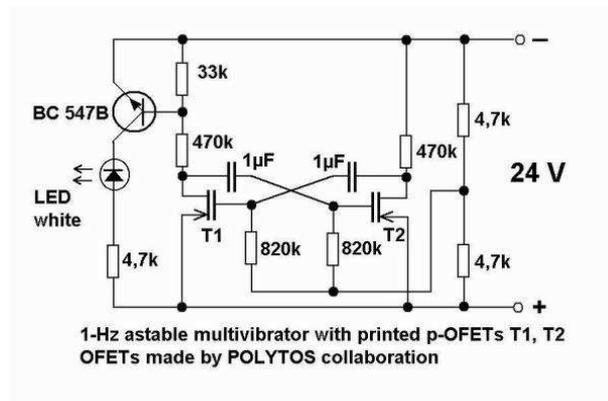


Abbildung 11: Der Schaltplan des Multivibrators.

Für die elektrischen Experimente, denen wir uns hier widmen, sind diese Probleme aber uninteressant. Hier genügen ein paar der eingelagerten Überbleibsel, sowie eine Schere. Damit schneiden wir uns ein paar brauchbare Transistoren aus einer Folie heraus und kontaktieren sie mit Silbertinte auf einem Stück Leiterplatte.

Diese setzten wir mit gewöhnlichen Widerständen, Kondensatoren und Transistoren auf das Elektronik-Experimentierbrett. Das sieht dann wie in Bild 10 aus. Die beiden Polymertransistoren arbeiten mit dem Silizium perfekt zusammen. Den genauen Schaltplan zeigt Bild 11.

### 3.1 Haltbarkeit im Betrieb

Der Multivibrator mit den beiden Polymertransistoren arbeiteten anstandslos über zwei Tage auf einer Industriemesse, bei der das Projekt vorgestellt wurde. Ein Härtetest, da die Kennlinie voll ausgefahren wird. Ich erwähnte bereits, dass eine langsame Degradation stattfindet. Diese hängt nicht vom generellen Alter, sondern von der Betriebsstundenzahl und der elektrischen Belastung der Transistoren ab. Moderne Halblei-

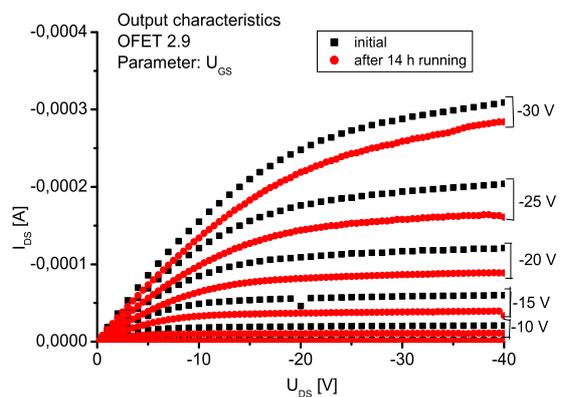


Abbildung 12: Die Kennlinien der Polymertransistoren im Neuzustand (schwarz) und nach 14 Stunden Betriebszeit (rot).

terpolymere wie PTAA und PIF8-TAA sind chemisch an sich äußerst robust. Schließlich halten ähnliche Stoffe in den OLED-Displays unserer Smartphones über viele Jahre. Die Schwachstelle ist der Metall-Halbleiter-Kontakt an Source und Drain. Sobald Strom fließt, findet an den Metall-Polymer-Übergängen in Gegenwart von Feuchtigkeit eine elektrolytische Oxidation statt. Und PET-Folie ist nun einmal keine perfekte Wasserbarriere. Man erkennt die Veränderung an der Transistorkennlinie, siehe Bild 12.

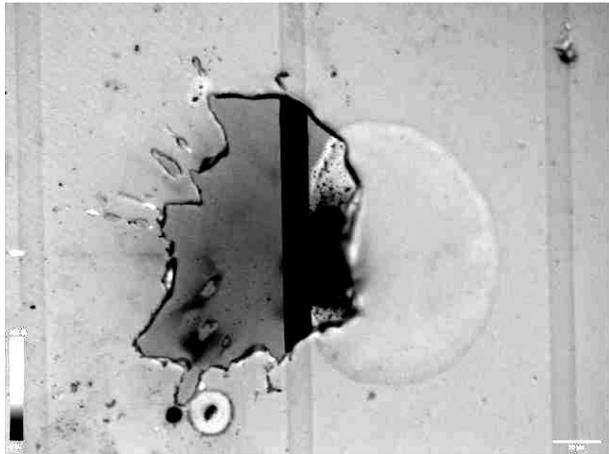


Abbildung 13: Spannungsdurchschlag zwischen Source und Drain, etwa  $120 \mu\text{m}$  groß.

Je sauberer man im Herstellungsprozess gearbeitet hat, desto länger währt allerdings die Freude an den OTFTs. Man möge dieses Phänomen aber nicht überbewerten. Gedruckte Polymertransistoren sind vor allem für die Verwendung in digitalen Speicher- und Logikelementen konzipiert. Hier wird man mit elektrischer Energie betont sparsam umgehen, was auch das Degradationsproblem mindert.

Gleichwohl ertragen Polymertransistoren auch ungeheure Lastspitzen, die selbst einen Siliziumtransistor zerschmelzen würden. Bild 13 zeigt einen Durchschlag im Kanal eines OTFTs. Ein kurzzeitiger Überstrom zwischen Source und Drain hat einen Hot Spot kreierte und ein Loch ins Gate gebrannt. Gleichwohl hat sich der Brandschaden elektrisch nicht weiter bemerkbar gemacht. Die gegenüber Siliziumhalbleitern recht große Bauform der Polymertransistoren hat auch ihr Gutes.

## 4 Schaltungsbeispiele

Eine höchst interessante Frage ist, ob man mit Polymertransistoren nach den gleichen Grundsätzen Schaltungen entwerfen kann wie mit gewöhnlichen Silizium-Transistoren. Dies ist in der Tat der Fall, vorausgesetzt, die Dimensionierung der übrigen Bauelemente wird an die Verhältnisse angepaßt. Sehr vieles hängt natürlich von

der Transistorbauart ab. Hier hat der OTFT-Designer weite Freiheiten.

### 4.1 Kippschaltungen

Die hier betrachteten Exemplare zeichnen sich durch ein großes  $W/L$ -Verhältnis von bis zu 10.000 aus, das heißt, sie leiten die Ladungsträger durch einen sehr breiten Kanal und sind für relativ hohe Drainströme von maximal einigen  $100 \mu\text{A}$  prädestiniert. Gleichwohl sind die Schaltungen ziemlich hochohmig ausgelegt. Arbeitswiderstände am Drain in Höhe von  $500 \text{ k}\Omega$  sind realistisch. Die Kippschaltung aus Abbildung 10 zeigt bereits die wesentlichen Merkmale. Am Oszilloskop, Bild 14, zeigt sich das einwandfreie Schaltverhalten. Der OTFT könnte auch ohne Weite-



Abbildung 14: Der Multivibrator am Oszilloskop: die Drain-Spannungen der beiden Transistoren.

res eine hocheffiziente LED treiben. Bei einem Strombedarf jenseits von  $100 \mu\text{A}$  ist eine siliziumbasierte Boosterstufe jedoch sinnvoll. Auch ein digitales RS-Flipflop ist wie in Abbildung 15 leicht zu realisieren.

### 4.2 LC-Oszillatoren

Klassische Grundschaltungen aus der analogen Radio- und Fernsehtechnik wie der transformatorgekoppelte LC-Oszillator in Bild 16 sind ebenfalls möglich. Kenner der historischen Schaltungsentwicklung in der Kommunikationselektro-

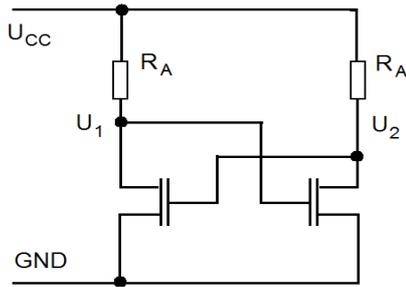


Abbildung 15: Ein RS-Flipflop mit zwei OTFTs.  
 $R_A \sim 500 \text{ k}\Omega$

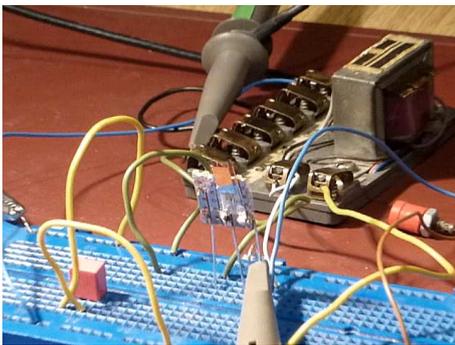


Abbildung 16: Ein rückgekoppelter LC-Oszillator. Der Trafo stammt aus einem alten KOSMOS Elektronikbaukasten XG der 1970er Jahre und harmoniert sehr gut mit der Polymerelektronik.

nik mögen sich hier durchaus an die Batterieröhrentechnik aus der Mitte des 20. Jahrhunderts erinnern fühlen. Der Schaltplan ist in Bild 17 gezeigt. Das Oszillogramm in Bild 18 zeigt auch hier die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten gedruckter aktiver Bauelemente. Die Schwingungsfrequenz betrug hier immerhin 2,77 kHz und ist sicherlich noch nicht die Grenze. Aufgrund der relativ geringen Drainströme und den hohen Gate-Kapazitäten tun sich Polymertransistoren bei höheren Frequenzen mit Schaltkapazitäten zur Zeit noch relativ schwer. Und die 1-MHz-Grenze scheint mit den aktuell verfügbaren Materialien auch bei Logikschaltungen noch nicht in Sicht.

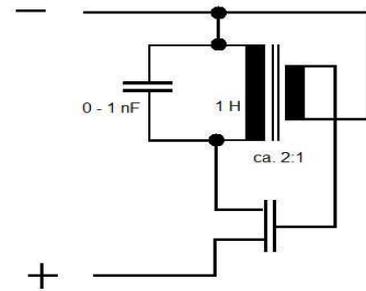


Abbildung 17: Der Schaltplan des LC-Oszillators.

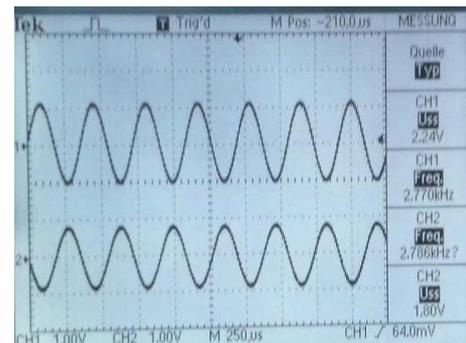


Abbildung 18: Gate- und Drainspannung des LC-Oszillators.

### 4.3 Inverser Betrieb

Eine ungewöhnliche Eigenschaft besitzen Polymertransistoren: Source und Drain darf man vertauschen. Die Funktion bleibt gleich. Das ist eine Besonderheit der Konstruktion. Man kann also auch die Polarität zwischen Source und Drain umdrehen. Und es steht frei, auf welche dieser beiden Elektroden man die Gate-Spannung bezieht. Dagegen kann man die Polarität der Gate-Spannung nicht einfach umkehren. Das ändert die Funktion. Die Polarität der Gatespannung hängt vom Typ des Halbleiters ab. P-OTFTs lassen sich mit negativer Gate-Spannung steuern, N-OTFTs (also solche, wo der Strom durch Elektronen im LUMO-Niveau transportiert wird), nur mit positivem Gate. Aus diesem Grund lohnt ein Blick auf die Vier-Quadranten-Kennlinie in Bild 19. Hier ist der Drainstrom  $I_{DS}$  gegen  $U_{DS}$  im Bereich zwischen minus und plus 40 V aufgetragen, und zwar für verschiedene Gate-Spannungen  $U_{GS}$ , die ebenfalls in diesem Bereich gewählt sind.

Als P-OTFT fließt nur dann ein Strom, wenn  $U_{GS}$  negativ ist. Erst wenn das Drain stark positiv ist, läßt der OTFT bei falsch gepoltem Gate ein wenig Strom passieren. Der normale Arbeitsbereich

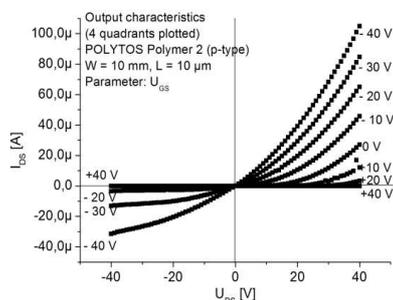


Abbildung 19: Die Vier-Quadranten-Kennlinie eines P-OTFTs.

des OTFTs entspricht dem linken unteren Quadranten. Doch leitet er auch im rechten oberen Viertel des Diagramms einen fast noch größeren inversen Strom.

In digitalen Schaltungen ist ein inverser Betrieb nicht sinnvoll, weil die *Spannungsverstärkung* zu gering ist. Die Spannungsverstärkung eines Transistors ist das Produkt aus *Steilheit* und *Innenwiderstand*. Sie muß deutlich über 1 liegen, damit ein Flipflop oder eine andere Kipp-schaltung funktioniert. Das Problem ist der Innenwiderstand des Drains. Ein hinreichend hoher Wert ist nur im Sättigungsbereich der Drainstromkennlinie zu erreichen. Das entspricht allein dem linken unteren Quadranten der Kennlinie. Im inversen Betrieb ist die Spannungsverstärkung dagegen kleiner als 1. Davon zu unterscheiden ist die *Leistungsverstärkung* des Transistors. Diese ist auch im inversen Betrieb gegeben. Ein LC-Oszillator ließe sich also realisieren, ein entsprechend angepasstes Übersetzungsverhältnis des Rückkopplungs-Trafos vorausgesetzt.

## 5 Schlussbemerkung

Polymerelektronik hat viele interessante und überraschende Aspekte. Die Herstellung von aktiven Komponenten ist nicht übermäßig kompliziert. Es lohnt sich, das Thema im Auge zu be-

halten. Wie mit vielen innovativen Entwicklungen muss man Geduld haben. Die Fortschritte des letzten 15 Jahre aber haben gezeigt, dass es auch hier Schritt für Schritt voran geht. Bei dieser Gelegenheit möchte ich mich auch beim Bundesministerium für Bildung und Forschung bedanken, das unser POLYTOS-Forschungsprojekt über Jahre wohlwollend gefördert hat.

## Literatur

- [1] S. Ganz, *Drucken organischer Feldeffektttransistoren: Prozessbezogene Analyse des Ladungsträgertransports*, Dissertation, TU Darmstadt 2017. Online-Version: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/7314>
- [2] H. M. Sauer, *Rollenfertigung für die gedruckte Elektronik*, Etiketten-Labels, **3**, S. 4-9, 2012
- [3] S. Pankalla, D. Spiehl, H. M. Sauer, E. Dörsam, M. Glesner, *Appl. Phys. Lett.* **102**, 173303 (2013), DOI: 10.1063/1.4804239
- [4] S. Pankalla, R. Ganesan, D. Spiehl, H. M. Sauer, E. Dörsam, M. Glesner, *Organic Electronics* **14**, 676 (2013), DOI: 10.1016/j.orgel.2012.11.033

*Das vorliegende Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kopieren und Weiterverbreiten ist unter den Bedingungen der Creative Commons Lizenz CC BY-NC-SA 4.0 gestattet.*

Dr. Hans Martin Sauer, TU Darmstadt, Magdalenenstraße 2, 64289 Darmstadt

Link zur Originaldatei:

<http://www.sauer-media.net/e-reports/PolyTrans.pdf>

Redaktionsdatum: 20. Mai 2021

Das Video zum Report:

<https://www.youtube.com/watch?v=PoPIcksF99I>