

# Organische Elektronik

Eine Schüler-experimentieren-Arbeit von Sebastian Benden

23. Februar 2005

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Bedeutung und Grundlagen der organischen Elektronik</b>	<b>2</b>
1.1	Bedeutung . . . . .	2
1.2	Leitfähige Polymere . . . . .	2
1.3	OFET . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Experimente mit organischen Leitern</b>	<b>3</b>
2.1	Einleitung . . . . .	3
2.2	Herstellung eines organischen Leiters aus Baytron . . . . .	3
2.3	Untersuchungen . . . . .	4
2.3.1	Vorwort . . . . .	4
2.3.2	Ergebnisse: . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Baytron-OFET</b>	<b>5</b>
3.1	Herstellung . . . . .	5
3.2	Auswertung: . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Tieferegehende Theorie</b>	<b>6</b>
4.1	Allgemeine Leitungsmechanismen . . . . .	6
4.2	Einfluss des induktiven Effekts und des Resonanzeffekts . . . . .	7
4.2.1	Allgemein . . . . .	7
4.2.2	In sich selbst leitende Polymere . . . . .	7
4.2.3	PEDOT und P3HT . . . . .	7
4.3	Funktionsweise eines OFETs . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Planung und Bau des P3HT-OFETs</b>	<b>9</b>
5.1	Planung des P3HT-OFET . . . . .	9
5.1.1	Anmerkung . . . . .	9
5.1.2	Plan I . . . . .	9
5.1.3	Vorversuch . . . . .	9
5.2	Bau des OFETs . . . . .	10
5.3	Messungen . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Rückblick und Ausblick</b>	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>14</b>
7.1	Messaufbauten der Baytronversuche . . . . .	14
7.1.1	Messung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur . . . . .	14
7.1.2	Messung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Beleuchtung . . . . .	14
7.1.3	Messung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit . . . . .	15
7.1.4	Aufnahme einer Stromspannungskurve bei konstanter Temperatur . . . . .	16
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>16</b>

# 1 Bedeutung und Grundlagen der organischen Elektronik

## 1.1 Bedeutung

Unter Polymerelektronik versteht man die Herstellung und den Einsatz von elektronischen Bauteilen aus Polymeren. Die Polymere sollen konventionelle Materialien wie Silizium in der Low-Budget-Branche ablösen. So wird z. B. die Herstellung von intelligenten Etiketten an Waren im Supermarkt in Zukunft sehr preiswert werden. Eine Massenproduktion ist zur Zeit noch nicht vorstellbar, da die Haltbarkeit der Bauelementen immer noch sehr kurz und die Leistung und der Wirkungsgrad zu niedrig ist. Es wird wahrscheinlich noch mindestens ein Jahrzehnt dauern, bis die bisherigen Probleme der Polymerelektronik gelöst werden.

## 1.2 Leitfähige Polymere

Im Allgemeinen sind Polymere Isolatoren, weil ihre Elektronen ortsgebunden sind. Durch entsprechende Bearbeitung kann man sie jedoch in n- oder p-Leiter verwandeln. Beim n-Leiter wird die Ladung mit Hilfe von freien Ladungselektronen geleitet, beim p-Leiter wird die Ladung mit Hilfe von sogenannten „Defektelektronen“ (Elektronenlücke) übertragen. Es kommen meistens p-Leiter unter den Polymeren vor. Ein p-Leiter kann man aus organischen Stoffen im Gegensatz zu den Siliziumhalbleitern ohne Dotieren herstellen. Die p-Leiter aus Polymeren besitzen konjugierte Doppelbindungen. Das bedeutet, dass sich Einfach- und Doppelbindungen abwechseln. Alternativ kann man auch sagen, dass die Elektronen ein gemeinsames Orbital besitzen. Die Einfachbindung ist in der konjugierten Struktur immer eine s-Bindung. Die Doppelbindung besteht aus einer s-Bindung und einer p-Bindung. Die Elektronen, die die s-Bindung bilden, sind immer fest an das Atom gebunden. Normalerweise gilt dies auch für die p-Bindung. Aber wegen der konjugierten Struktur sind die Elektronen frei und elektrischer Strom kann durch die Polymerkette fließen. Allerdings kann der Strom nicht zwischen verschiedenen Ketten fließen, wenn die neue Kette nicht die andere an ihrem Kettenende berührt. Der Strom kann auch nicht durch verschiedene Schichten fließen. Das bedeutet, dass das Material selber, das aus verschiedenen Molekülen besteht, nicht unbedingt leitfähig ist. Damit die Elektronen von einer Polymerkette zur nächsten springen können, müssen die Ketten dicht genug zueinander liegen. Man kann aus Polymeren Leiterbahnen herstellen. Dabei muss man beachten, dass Leiterbahnen aus Polymeren bisher eine sehr kurze Lebensdauer im Vergleich zu Leiterbahnen aus Metallen haben. Zur Herstellung wird das Polymer mit Hilfe eines Lösungsmittels gelöst. Dabei muss eine stark übersättigte Lösung entstehen, da man sonst keine Leiterbahnen herstellen kann. Dann zieht man mit einer Pipette Leiterbahnen auf einem Trägermaterial. Nachdem das Lösungsmittel verdunstet ist, sind die Leiterbahnen fertig.

## 1.3 OFET

Organische Feldeffekttransistoren (OFET) bestehen aus einer Substratschicht, gefolgt von einer Schicht aus einem organischen Halbleiter mit der Drain- und Source-Elektrode und einer Isolatorschicht. Die organische Schicht besteht meistens aus p-Halbleitern. An den Source- und Drain-Anschluss wird die Quellspannung angeschlossen. An den Gate-Anschluss wird die Steuerspannung angeschlossen. Ohne die Steuerspannung an der Gate ist der Eigenwiderstand der Halbleiterschicht so hoch, dass kein Stromfluss zwischen Source und Drain möglich ist. Durch die Steuerspannung sammeln sich Elektronen oder Defektelektronen direkt unter der Isolatorschicht im Halbleitermaterial. Dadurch kann ein Strom zwischen Source und Drain fließen. In dem organischen p-Halbleiter bewegen sich die Ladungen durch Defektelektronen.

## 2 Experimente mit organischen Leitern

### 2.1 Einleitung

In meinen ersten Versuchen beschäftige PEDOT mich mit den elektrischen Eigenschaften eines organischen Leiters, den ich aus Baytron hergestellt habe. Die Versuche habe ich mit einfachen Mitteln zu Hause und in der Schule durchgeführt.

### 2.2 Herstellung eines organischen Leiters aus Baytron

**Zielsetzung:** Herstellung eines organischen Leiters aus Baytron

**Materialien:** Kochplatte, Kochtopf, Marmeladenglas, Objektträger, Pipette, Rasierklinge, Schmirgelpapier

**Durchführung:**

An den beiden Enden eines Objektträgers aus Glas habe ich rundum zwei selbstklebende Kupferfolien angebracht. Diese werden mit feinem Schmirgelpapier gereinigt, damit ein guter Kontakt zwischen Baytron und Kupfer entsteht. Auf der Rückseite des Objektträgers wird an die Kupferstreifen auf beiden Seiten ein Kabel angelötet. Nun wird der Objektträger so mit Tesafilm abgeklebt, dass auf der Oberseite ein schmaler Streifen frei bleibt (siehe Abbildung 1). Auf den

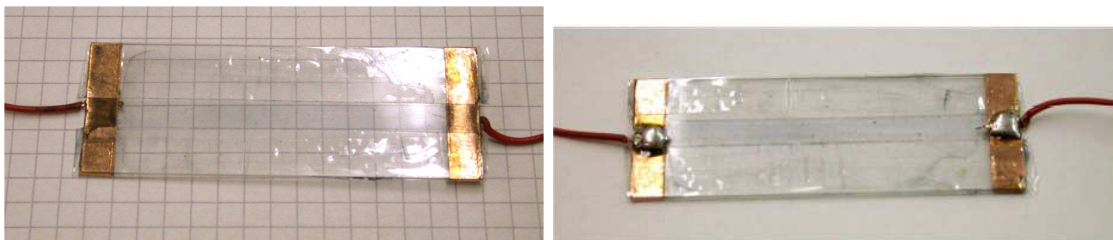


Abbildung 1: Kontaktierter Baytronstreifen auf Objektträger Vorderseite (links) und Rückseite (rechts)

freien Teil des Objektträgers werden 2 ml Baytron mit einer Pipette getropft. Danach verteilte ich es mit einer Rasierklinge und entfernte das überschüssige Baytron. Nun wird der Objektträger in den Wärmeschrank der Schule oder zu Hause in einem Marmeladenglas, welches im kochenden Wasser schwimmt, bei ca. 100°C 15 Minuten lang erhitzt.

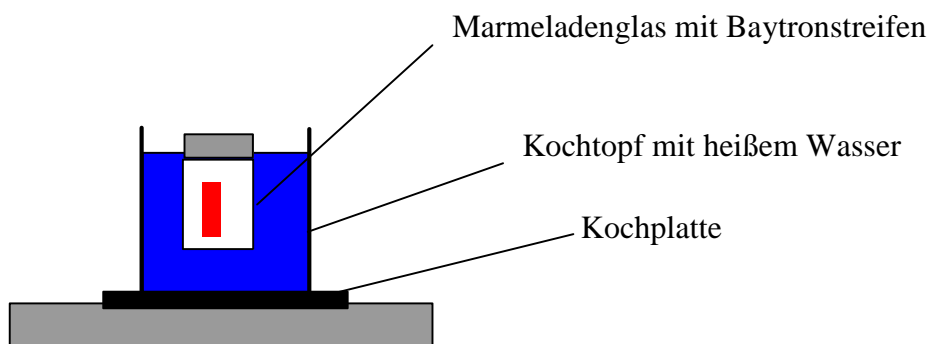


Abbildung 2: Herstellung eines Baytronstreifens

## 2.3 Untersuchungen

### 2.3.1 Vorwort

Im folgenden wurden Messungen zu dem Widerstandsverhalten bezüglich Temperatur, Beleuchtungsintensität und Luftfeuchtigkeit. Zudem wurde eine IU-Kennlinie aufgezeichnet. Die Messaufbauten befinden sich im Anhang, da dies nur eine Vorversuchsreihe darstellt.

### 2.3.2 Ergebnisse:

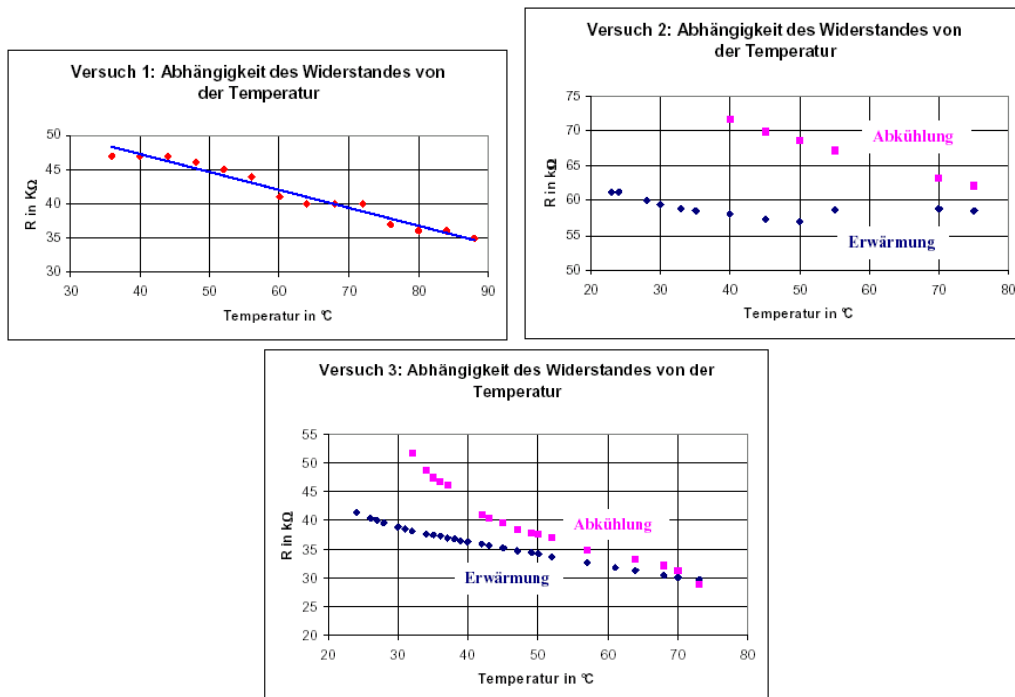


Abbildung 3: Untersuchungen zur Abhängigkeit von der Temperatur

Aus den drei Diagrammen geht hervor, dass sich das PEDOT wie ein Halbleiter verhält. Es ist somit ein Heißleiter. Aus dem unterschiedlichen Verlauf von Erwärmungs- und Abkühlungskurve lässt sich schließen, dass das PEDOT bei höheren Temperaturen instabil wird.

### Zur Lichtmessung:

Aus der Messung geht hervor, dass das Baytron auf verschiedene Lichtintensitäten nicht reagiert

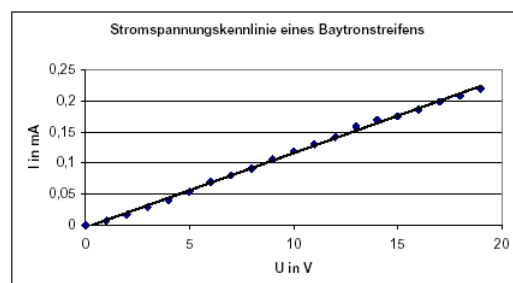


Abbildung 4: UI-Kennlinie des PEDOTs

Die UI-Kennlinie von PEDOT ist bei konstanter Temperatur linear.

**Zur Luftfeuchtigkeit:** Der Widerstand des PEDOTs veränderte sich nicht bei verschiedenen Luftfechtigkeiten.

### 3 Baytron-OFET

#### 3.1 Herstellung

Materialien: Baytron, Deckglas, Objektträger, Leitsilber, selbstklebende Kupferfolie, ITO, Klebeband

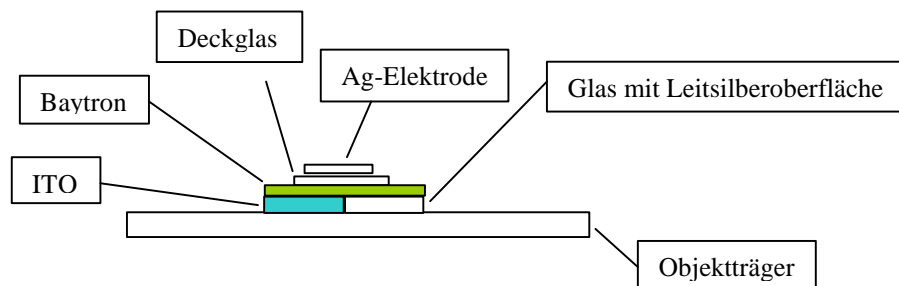


Abbildung 5: Aufbau meines Baytron-OFETs

Auf dem Objektträger wird ein ITO-Plättchen (ITO = Indium-Zinn-Oxid) mit der nicht leitenden Seite nach unten aufgeklebt. Direkt daneben klebt man ein Stück Glas (z.B. von einem Objektträger) auf. Dieses Stück Glas wird mit Leitsilber bestrichen, um es leitbar zu machen. Das ITO-Plättchen und das Glas werden mit Hilfe von selbstklebender Kupferfolie kontaktiert. Dies macht man, indem man neben dem ITO-Plättchen bzw. dem Glasstück Kupferfolie auf dem Objektträger aufbringt und eine Leiterbahn mit Leitsilber zwischen den Materialien anbringt. Am Rand des Objektträgers wird ebenfalls Kupferfolie angebracht um später einen hinreichenden Kontakt zur Gate zu gewährleisten zu können. Wenn dies geschehen ist, wird nach dem Rakel-Verfahren ein Baytronfilm auf das ITO-Plättchen und das Glas aufgetragen. Dazu verwendet man ca. 1ml Baytron. Dann legt man vorsichtig ein Deckglas auf den noch flüssigen Baytronfilm und achtet darauf, dass keine Luftblasen unter dem Deckglas sind. Zum polymerisieren muss dieser halbfertige OFET in einen Backofen bei 100°C etwa 20 Minuten lang erwärmt werden. Nach dem Erwärmen bringt man auf dem Deckglas Leitsilber auf. Nun überklebt man die ITO-Elektrode mit Klebeband und stellt auf dem Klebeband mit Leitsilber eine Leiterbahn zwischen der Gate-Elektrode und der noch nicht kontaktierten Kupferfolie her. Auf dem Objektträger wird das ITO-Plättchen mit der nicht leitenden Seite nach unten aufgeklebt. Direkt daneben klebt man ein Stück Glas (z.B. von einem Objektträger) auf. Dieses Stück Glas wird mit Leitsilber bestrichen, um es leitbar zu machen. Das ITO-Plättchen und das Glas werden mit Hilfe von selbstklebender Kupferfolie kontaktiert. Dies macht man, indem man neben dem ITO-Plättchen bzw. dem Glasstück Kupferfolie auf dem Objektträger aufbringt und eine Leiterbahn mit Leitsilber zwischen den Materialien anbringt. Am Rand des Objektträgers wird ebenfalls Kupferfolie angebracht um später einen hinreichenden Kontakt zur Gate zu gewährleisten zu können.

#### 3.2 Auswertung:

Es konnten mehrmals Veränderungen des Widerstandes beim Baytron festgestellt werden. Leider waren diese Ergebnisse nicht reproduzierbar. Dies lässt darauf schließen, dass die beobachteten Veränderungen ein Zufallsprodukt der Polymerisierungsreaktion ist. D. h., diese Erscheinungen nur kurzzeitig während der Polymerisierungsreaktion stattfinden. So mit ist Baytron für Bau von OFET als Halbleiter nicht geeignet.

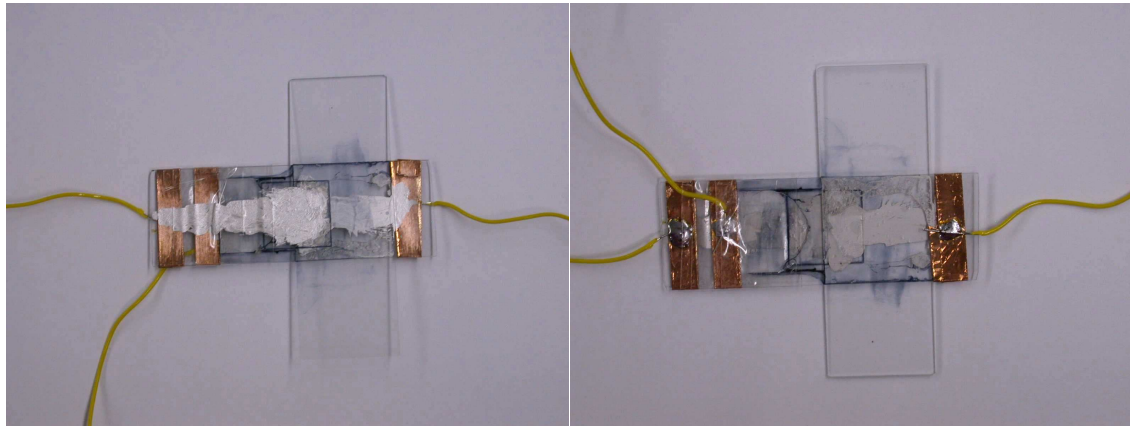


Abbildung 6: Baytron-OFET von oben (links) und von unten (rechts)

## 4 Tiefergehende Theorie

### 4.1 Allgemeine Leitungsmechanismen

Leitfähige Polymere leiten aufgrund ihres  $\pi$ -Elektronensystems. Ihre Kohlenstoffatome besitzen die  $sp^2$ -Hybridisierung. Dies bedeutet, dass das C 3  $\sigma$ -Bindungen und eine  $\pi$ -Bindung eingehen kann. Dabei zeigt der  $2p_z$  senkrecht zur Schicht, und stellt die  $\pi$ -Bindung dar. Die Einfachbindungen bestehen nur aus  $\sigma$ -Bindungen. Die Doppelbindungen bestehen jedoch aus  $\sigma$ -Bindungen und  $\pi$ -Bindung. Daraus lässt sich schließen, dass die  $\sigma$ -Bindungen nur als Grundgerüst dienen, aber nicht für die Leitfähigkeit verantwortlich sind. Tatsächlich ist nur das  $\pi$ -Elektronensystem für die Leitfähigkeit verantwortlich. Dabei sind die Doppelbindungen abwechselnd und man spricht von konjugierten Doppelbindungen, wodurch die die Elektronen im  $\pi$ -Elektronensystem delokalisiert sind. Quantenmechanisch bedeutet das, dass sich die Positionen der bindenen und nichtbindenen  $\pi$ -Orbitale abwechseln. Unter bestimmten Bedingungen können sich die Positionen der Doppelbindungen ändern. Wenn die "verbotene Zone" überwunden wird, kann dies stattfinden. Dies kann mit dem Bändermodell begründen. Das  $\pi$ -Elektronensystem muss dabei, in HOMO's<sup>1</sup> und LUMO's<sup>2</sup> unterschieden werden. Die HOMO's bilden das Valenzband und sind bindend. Die LUMO's bilden das Leitungsband und sind antibindend.

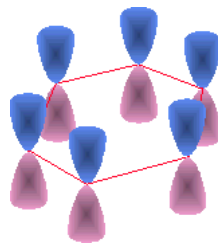


Abbildung 7: Beispiel eines  $\pi$ -Elektronensystems an Hand von Benzol

Die Energie der "verbotenen Zone" bestimmt ob sich das Polymer als Leiter oder Halbleiter verhält. Alle bisher bekannten Polymere haben eine "verbotene Zone", weswegen sie alle Halbleiter sind. Die als leitend bezeichneten Polymere unterscheiden sich von den Halbleiter-Polymeren nur dadurch, dass das Energieniveau ihrer verbotenen Zone niedriger ist. Dieser bandartige Ladungsträgertransport kann auf der ganzen Kette stattfinden (wie z. B. beim Polyacetylen)

<sup>1</sup>Highest Occupied Molecular Orbital

<sup>2</sup>Lowest Unoccupied Molecular Orbital

oder sich nur auf die einzelnen Moleküle beschränken. Als Ladungsträger dienen "Löcher" bzw. Elektronen. Dies hängt davon ab, ob das Polymer ein p- oder n-Leiter ist. Zu den strukturellen Unterschieden zwischen beiden komme ich später.

## 4.2 Einfluss des induktiven Effekts und des Resonanzeffekts

### 4.2.1 Allgemein

Die Leitfähigkeit der Polymere kann auch durch weitere intramolekulare Kräfte bestimmt werden. Dazu zählt der induktive Effekt und der Resonanzeffekt. Diese beiden Effekte beeinflussen das  $\pi$ -Elektronensystem. Substituenten können im Rahmen des Resonanzeffektes als Elektronenakzeptoren und als Elektronendonatoren im  $\pi$ -Elektronensystem dienen. Dafür müssen sie freie Elektronenpaare, die nicht hybridisiert sind, zu Verfügung stellen. Zudem müssen diese Elektronenpaare in einem  $2p_z$ -Orbital sein. Der induktive Effekt wirkt sich auf die  $\sigma$ -Bindungen und wirkt elektronenziehend. Der induktive Effekt beruht auf der Elektronegativität. Wenn der induktive Effekt stärker ist als der Resonanzeffekt, werden dem  $\pi$ -Elektronensystem Elektronen entzogen, und falls es umgekehrt ist, wird es mit Elektronen angereichert. Dies gilt nur wenn der Resonanzeffekt eine elektronenreichernde Wirkung hat und der induktive Effekt elektronenentziehend wirkt. So ist es möglich, Polymere durch Substitutionen zu dotieren. Durch die Substituenten kann zudem bestimmt werden, ob das Polymer ein n- oder p-Leiter ist. Metallische und elektronenreiche Substituenten können bewirken, dass bevorzugt negative Ladungsträger injiziert werden. Allerdings kann dieses Verhalten auch über Elektroden erzeugt werden.

### 4.2.2 In sich selbst leitende Polymere

Bei komplexen Polymeren wie Pentacen oder Polythiophen kann aufgrund der ringförmigen Strukturen keine rein kettenförmige Leitung stattfinden. Dies bedeutet, dass sich die Elektronen bzw. Löcher durch die Ringstruktur durchbewegen müssen. Damit dies möglich ist, müssen sich die  $2p_z$ -Orbitale den Monomeren überlagern und so ein komplexes  $\pi$ -Elektronensystem bilden oder es muss energetisch ermöglicht werden, dass Ladungsträger von den Ketten aus in den Ring eintreten können bzw. ihn verlassen können. Die Überlagerung der  $\pi$ -Elektronensysteme der Monomeren findet z. B. bei Pentacen statt. Diese Struktur gestattet einen fast hindernislosen Ladungsträgertransport. Um in einer kettenförmigen Anreihung von Monomeren auf der Basis von Heteroaromen, einen Ladungsträgertransport zu ermöglichen, muss der Transport zwischen den Ketten und den Monomeren möglich sein. Dies geschieht durch die Aktivierung der Ringe, die auf den oben genannten intramolekularen Kräften beruht. Somit können die Substituenten dieser Moleküle aufgrund des Resonanzeffektes ihre Elektronendichte im Ring erhöhen und somit die Ringspannung herabsetzen. Wenn mehrere aktivierende Substituenten vorhanden sind, addiert sich ihre Wirkung. Wenn aktivierende und deaktivierende Substituenten aufeinandertreffen, subtrahiert sich ihre Wirkung. Demnach muss man den Grad der Aktivierung abschätzen. Dadurch wird der Ladungsträgertransport möglich. Dabei muss man beachten dass nur aromatische Heteroarome leitfähig sein können, da sich sonst die Position der bindenden  $\pi$ -Bindungen nicht ändern kann.

### 4.2.3 PEDOT und P3HT

Der nach Kapitel 4 gebaute Baytron-OFET kann, nach der hier neu erfahrenen Theorie, nicht funktionieren, weil der Ring durch die Sauerstoffsubstituenten stark aktiviert ist und das elektrische Feld schlecht an dem Sauerstoff angreifen kann. Wie man, aus der in Abbildung 8 zu sehenden Struktur, erkennen kann, ist die Ringstruktur des PEDOT's durch die Sauerstoffsubstituenten ausreichend aktiviert.

Daraus lässt sich schließen, dass das PEDOT nur sehr wenig oder gar nicht auf ein elektrisches Feld reagiert. Bei P3HT, einer des PEDOT's ähnlichen Verbindung, fehlen jedoch auf dem



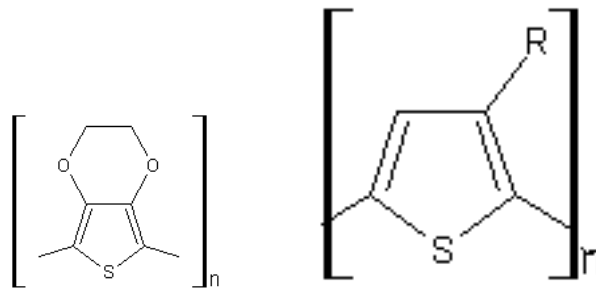


Abbildung 8: Strukturen von PEDOT und P3HT

ersten Blick ausreichende aktivierende Substituenten. So könnte man annehmen, dass nur das Schwefelatom den Ring schwach aktiviert. Dies ist allerdings nicht der Fall. Durch die Hyperkonjugation der Hexylkette erhöht sich die Elektronendichte im Ring. Dies führt dazu, dass der Ring ebenfalls gut leitend wird. Die Hyperkonjugation findet erst bei Anwesenheit eines elektrischen Feldes ausreichend statt. Zudem ist der Angriff des elektrischen Feldes an der Hexylkette einfacher. Deswegen leitet PEDOT unter Normalbedingungen gut, P3HT hingegen schlecht.

### 4.3 Funktionsweise eines OFETs

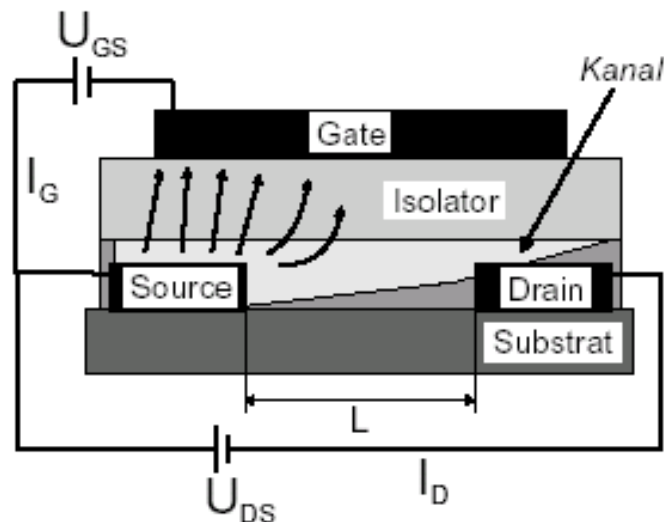


Abbildung 9: Aufbau eines organischen Feldeffekttransistors

Ein OFET kann im Prinzip wie veränderbarer Widerstand über ein elektrisches Feld geregelt, sowie an und aus geschaltet werden. Der Bereich zwischen Drain und Source nennt man Kanal. Im Kanal fließt bei selbstsperrenden FETs nur ein schwacher Strom, wenn keine  $U_{GS}$ -Spannung angelegt wird. Wenn man nun eine negative Gate-Spannung anlegt, wird dieser Kanal auf Grund der Akkumulation mit Ladungsträgern aus der Source-Elektrode angereichert. Dadurch baut sich direkt unterhalb der Isolatorschicht ein leitfähiger Kanal auf. Die Leitfähigkeit nimmt zu, je stärker die negative Gate-Spannung ist. Wenn man eine positive Gate-Spannung anlegt, wird der Kanal abgeschnürt und er wird somit hochohmig. Mit der Erhöhung von  $U_{DS}$  steigt der Strom  $I_{DS}$  an bis die Spannung  $U_{DS}$  gleich groß ist wie die Spannung  $U_{GS}$ . Der die Sättigungsspannung übersteigende Teil fällt über den Abschnürpunkt ab. Somit steigt der Strom  $I_{DS}$  nicht mehr an.

## 5 Planung und Bau des P3HT-OFETs

### 5.1 Planung des P3HT-OFET

#### 5.1.1 Anmerkung

Wie in Kapitel 4 besprochen, ist P3HT aufgrund hoher Feldeffektbeweglichkeit hervorragend zum Bau eines OFETs geeignet. Deswegen beschloss ich diese Chemikalie einzusetzen. Als Isolator wollte ich PVP verwenden.

#### 5.1.2 Plan I

Beim Bau meines OFETs ging ich wie folgt vor. Erst müssen die Polymerlösungen angesetzt werden. So werden 1g P3HT in 100ml Tetrahydrofuran gelöst und 5g PVP in 50ml Ethylacetat. Danach wird der Transistor nach Bild 7 aufgebaut.

Auf dem Objektträger habe ich per Spincoating eine PEDOT-Elektrode aufgebracht.

Auf der PEDOT-Elektrode wird nun eine PVP-Schicht als Isolator aufgebracht. Nachdem der Polymerfilm gedrocknet ist, werden mit Hilfe von Leitsilber Silberelektroden aufgepinselt. Wenn das Leitsilber trocken ist, wird die P3HT-Schicht auch per Spincoating hergestellt. Bei meinem OFET dient die PEDOT-Schicht als Gate-Elektrode. Das Leitsilber stellt die Source- und Drain-Elektrode dar. PVP dient als Gatedieltrikum und P3HT als Halbleiter. Die Kanalbreite sollte im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen, da sonst der Kanalwiderstand unendlich hoch ist und man sogar mit einem starken elektrischen Feld keinen Unterschied merken wird.

#### 5.1.3 Vorversuch

In der Praxis traten erwartungsgemäß einige Probleme auf. So besaß ich keine Zentrifuge und auch keinen Reinraum. Deshalb baute ich mir aus einer alten Festplatte eine preiswerte Spincoating-Zentrifuge. Über die Drehzahl des Festplatte wollte ich die Dicke der PVP-Schicht kontrolliert einstellen.

Da die Festplatte im Grundzustand zu schnell ist, baute ich mit Legotechnik eine Übersetzung. Die fertige Zentrifuge ist in Abb. 11 zusehen.

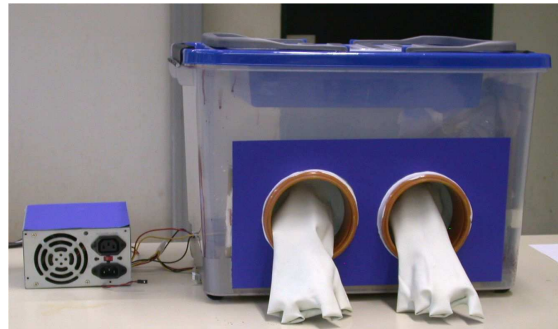
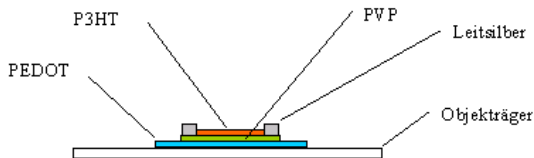


Abbildung 10: a) Aufbau meines ersten OFETs b) Mein Reinraum

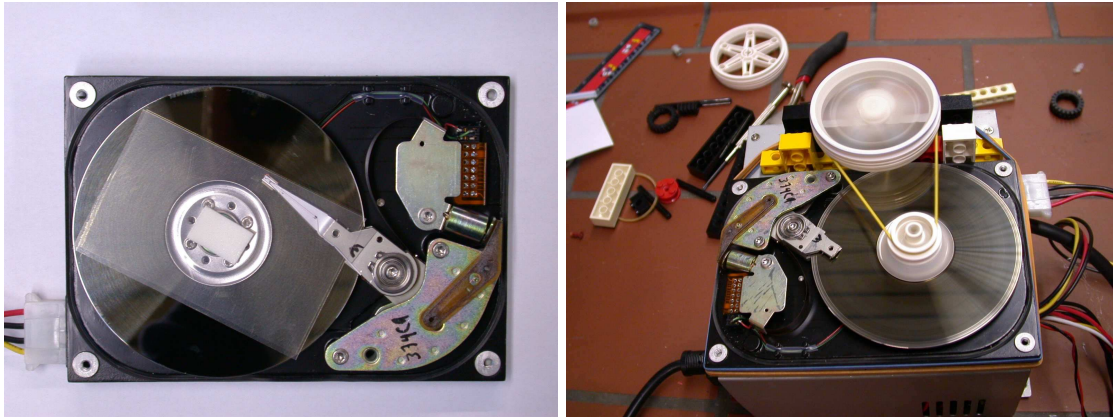


Abbildung 11: Meine Festplattenzentrifuge ohne und mit Übersetzung

## 5.2 Bau des OFETs

Nachdem ich die oben genannten Probleme gelöst hatte, begann ich nun mit der Herstellung des OFETs nach dem Bottom-Gate-Aufbau, der in Abbildung 10a. zusehen ist. Zuerst wurde das Baytron auf eine hitzebeständige Folie für Laserdrucker aufgeschleudert. Danach stellte ich die PVP-Schicht her. Nachdem dies geschehen war, befestigte ich Blattgold-Elektroden auf der Isolatorschicht. Auf die Elektroden schleuderte ich das P3HT. Die Herstellung erwies sich als sehr schwierig, da ich die Blattgold-Elektroden nicht haltbar auf der Isolatorschicht aufbringen konnte. Auch mit Leitsilber-Elektroden konnte ich keine guten Ergebnisse erzielen, da durch das Lösungsmittel des Leitsilbers die Isolatorschicht zerstört wurde. Deswegen verwendete ich später einen Top-Gate-Aufbau. Dabei wurde zuerst versucht, die bereits benutzten Materialien wie Leitsilber, Alufolie und Blattgold auch für die Source- und Drain-Elektrode zu verwenden. Jedoch erwiesen sich diese Materialien als unbrauchbar, weil sie eine zu hohe Oberflächenrauigkeit hatten und somit die Isolatorschicht durch Mikrosplitzen zerstörten. So kam mir die Idee mit Indiumzinnoxid (kurz ITO) beschichtetes Glas zu verwenden. Dieses ITO-Plättchen, die ich in der Jufo-"Wühlliste" der Schule fand, besitzen eine recht glatte Oberfläche und eine gute Leitfähigkeit. Außerdem ist es mit diesem Glas möglich, eine Kanalbreite von weniger als  $20\mu\text{m}$  zu erreichen. Somit ist es mir nach Abbildung 12. gelungen meinen ersten funktionstüchtigen Organischen Feldeffekttransistor herzustellen.

Bei der Herstellung  
zweimal mit Tesafilm  
abkleben, damit das  
Baytron nicht ans  
P3HT kommt.

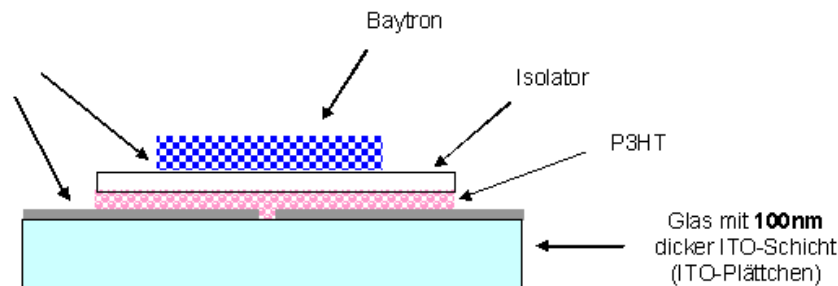


Abbildung 12: Aufbau meines OFETs

Die besondere Schwierigkeit bei der Herstellung eines ITO-OFETs liegt bei der Erzeugung des Kanals. Man kann keinen vernünftigen Kanal mit der Rasierklinge in das ITO-Glas schneiden, da die Beschichtung zu hart ist. Deswegen bin ich wie folgt vorgegangen. Zuerst habe ich das ITO-Glas auf den nichtleitenden Seite angeritzt und dann gebrochen. Dann wird die eine Hälfte des ITO-Plättchen mit der leitenden Seite nach oben mit Sekundenkleber auf einen Objekträger geklebt. Nun gibt man ein zweites Tröpfchen Sekundenkleber auf den Objekträger und drückt danach die 2. Hälfte des ITO-Plättchen passgenau an die erste. Jetzt füllt man den Kanal etwas mit Sekundenkleber aus um die Kanaltiefe zu verringern und kratzt den überflüssigen Kleber ab. Wenn dies geschehen ist, stellt man den OFET nach dem üblichem Verfahren her. Zuerst schleudert man mit der Zentrifuge das P3HT auf, dann das PVP und letztendlich das Baytron. Allerdings muss man vor dem Aufschleudern des Baytrons den OFET so abkleben, dass das Baytron nicht an die Source- und Drain-Elektrode gelangen kann. Durch weitere Versuche kam ich zudem zur Erkenntnis, dass man das Baytron auch für die Source- und Drain-Elektrode verwenden kann.

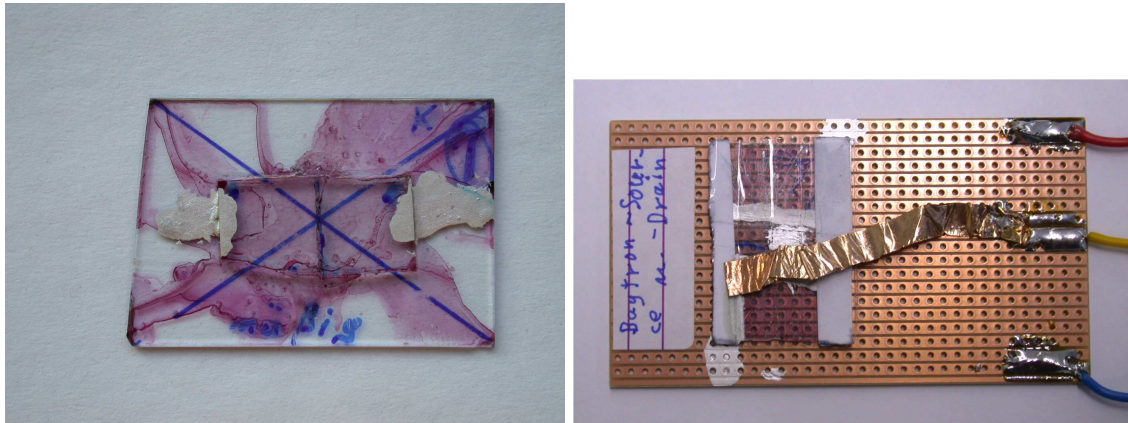


Abbildung 13: Meine organischen Feldeffekttransistoren mit ITO-Source und -Drain (links) und mit Baytron-Source und -Drain (rechts)

### 5.3 Messungen

Die nun folgende Charakterisierung meiner OFETs gelang mir mit der folgenden Schaltung.

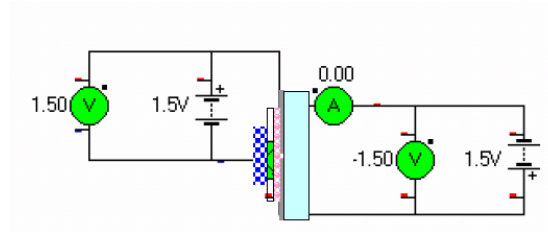


Abbildung 14: OFET-Schaltung

Zuerst habe ich den OFET mit ITO-Source und -Drain untersucht. Dabei kamen folgende Ergebnisse heraus.

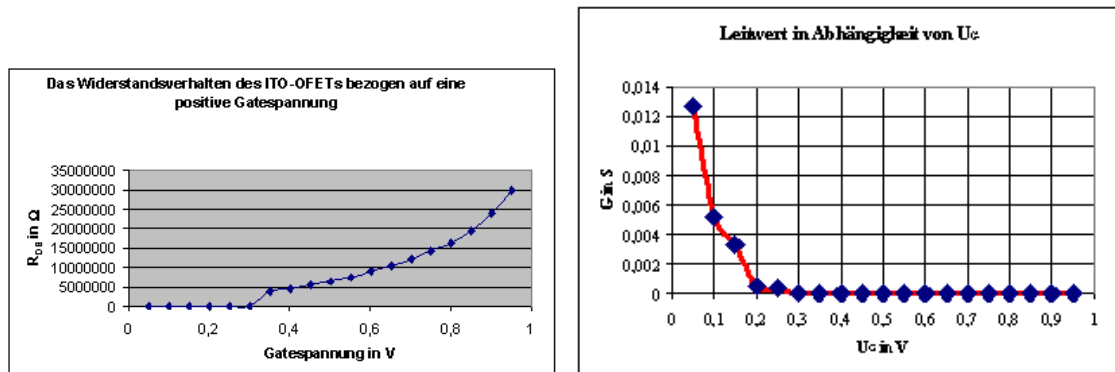


Abbildung 15: Messung des ITO-OFETs bei einer positiven Gate-Spannung  $U_{GS}$  bezogen auf den Widerstand (links) und auf den Leitwert(rechts)

Beschreibung:

Dieses Diagram zeigt das Widerstandsverhalten meines ersten ITO-OFETs bei einer positiven Gatespannung. Auf der x-Achse ist die Spannung  $U_{GS}$  in V angegeben und auf der y-Achse der Kanalwiderstand. Der Kanalwiderstand steigt mit steigender Gatespannung immer stärker an. Der wesentliche Bereich - dies ist der Bereich der scheinbar nicht größer als 0 ist - kann in dieser Darstellung leider nicht genauer untersucht werden. Deswegen ist in einem weiteren Diagramm statt dem Widerstand der Leitwert aufgetragen. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, sperrt der Transistor schon bei 0,3 V. D. h. mein erster organischer Feldeffektransistor ist voll funktionstüchtig. Bei der folgenden Messung habe ich die Messung mit einem weiterem ITO-OFET wiederholt und wie man in Abb. 16 sieht, ist das Ergebnis reproduzierbar.

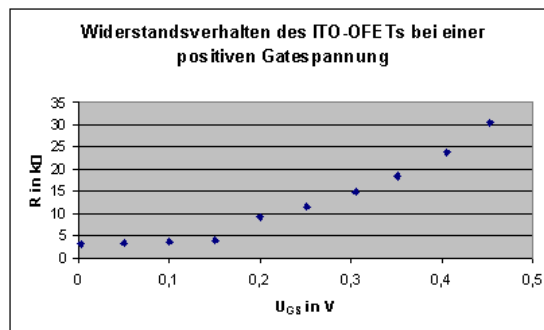


Abbildung 16: Reproduzierbarkeit meiner Messung

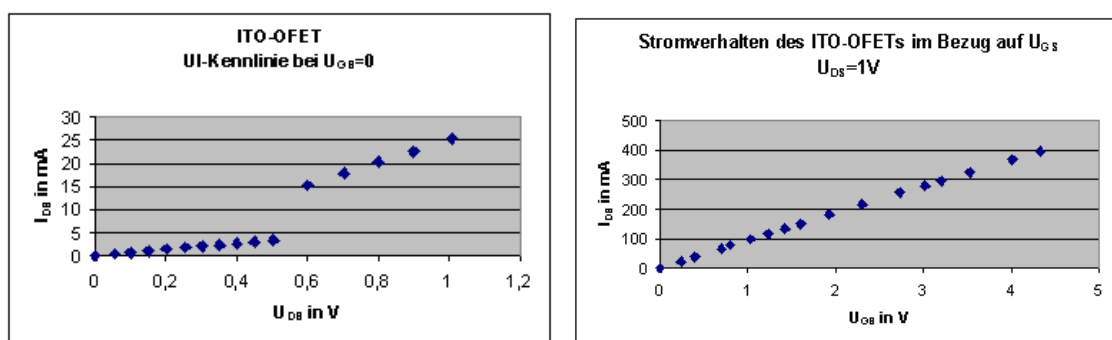


Abbildung 17: a) Messung bei Spannung  $U_{GS} = 0$  bei Erhöhung von  $U_{DS}$  b) Messung des Stromverhaltens meines OFETs bei einer negativen Gatespannung  $U_{GS}$

Beschreibung:

Abb. 17a zeigt das Verhalten des OFETs bei der Erhöhung der Spannung  $U_{DS}$ . Bei dieser Messung wurde eine Spannung  $U_{GS}$  von 0V eingesetzt. Auf der x-Achse ist die Spannung  $U_{DS}$  aufgelistet und auf der y-Achse der Strom  $I_{DS}$ . Die Messkurve ist weitgehend linear, allerdings ist ein Sprung zuerkennen.

Deutung:

Dieser beruht darauf, dass das Messgerät den Messbereich geändert hat und somit auch seinen Innenwiderstand. Die Linearität zeigt, dass sich die Halbleiterschicht wie ein ohmscher Widerstand verhält

Beschreibung:

Abb. 17b zeigt das Verhalten eines OFETs bei einer negativen Gatespannung. Es wurde eine konstante Spannung  $U_{DS}$  von 1V verwendet. Auf der x-Achse ist die Spannung  $U_{GS}$  angegeben und auf der y-Achse der Strom  $I_{DS}$ . Auch hier ist der Graph linear.

## 6 Rückblick und Ausblick

Im Rahmen meiner Schüex-Arbeit ist mir die Herstellung und Charakterisierung von organischen Leitern und organischen Feldeffekttransistoren gelungen. Zudem habe ich viel über organischen Halbleiterchemie gelernt. So habe ich experimentell herausgefunden, dass PEDOT im Gegensatz zu P3HT nicht als Halbleitermaterial in OFETs geeignet ist. Meine mit P3HT hergestellten OFETs besitzen schon recht gute FET-Eigenschaften, sodass sie für Logikschaltungen eingesetzt werden können. Somit denke ich darüber, nach eine organische Logikschaltung herzustellen. Wenn die Zeit reicht, werde ich mich noch an die Herstellung von organischen Leuchtdioden und

Kondensatoren mit einfachen Mitteln wagen. Als Nebenprodukt meiner Arbeit entstand ein Reinraum mit einer Festplattenzentrifuge.

## 7 Anhang

### 7.1 Messaufbauten der Baytronversuche

#### 7.1.1 Messung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

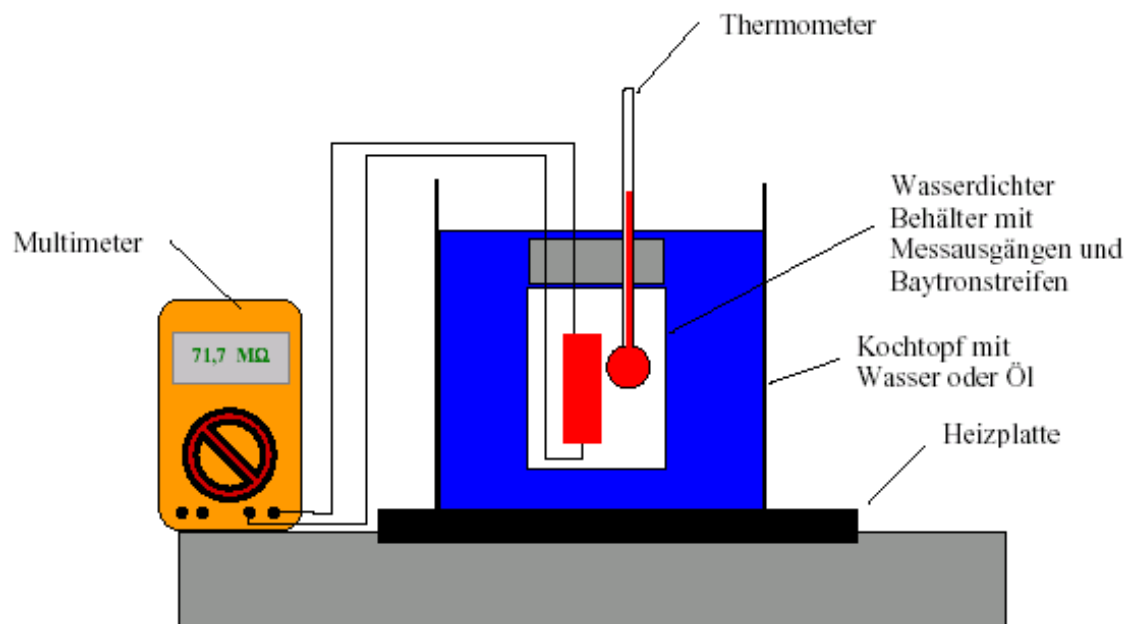


Abbildung 18: Messung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur

**Zielsetzung:** Messung des elektrischen Widerstandes eines Baytronstreifens in Abhängigkeit von der Temperatur

**Materialien:** Baytronstreifen, Stativmaterial, Multimeter, Thermometer, Heizplatte mit Thermostat, Kochtopf

**Versuchsdurchführung:**

Die Versuchsanordnung wird gemäß der Abbildung 18 aufgebaut. Als Behälter kann ein Marmeladenglas mit Deckel eingesetzt werden. Die Temperatur wurde schrittweise erhöht. Vor einer Messung wartete ich ca. eine Minute, damit die Temperatur sich einpendeln konnte. Jede Messreihe wurde mit einem neu hergestellten Baytronstreifen durchgeführt.

Insgesamt führte ich drei Messungen durch. Beim ersten Versuch erhöhte ich die Temperatur von  $36^{\circ}\text{C}$  auf  $88^{\circ}\text{C}$  und zeichnete den elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur auf. Bei den beiden anderen Messungen erhöhte ich während der Widerstandsmessung die Temperatur von  $23^{\circ}\text{C}$  ( $24^{\circ}\text{C}$ ) auf  $75^{\circ}\text{C}$  ( $73^{\circ}\text{C}$ ) und zeichnete danach auch noch den Widerstand beim absinken der Temperatur auf.

#### 7.1.2 Messung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Beleuchtung

**Zielsetzung:** Messung des elektrischen Widerstandes eines Baytronstreifens in Abhängigkeit von der Beleuchtung.



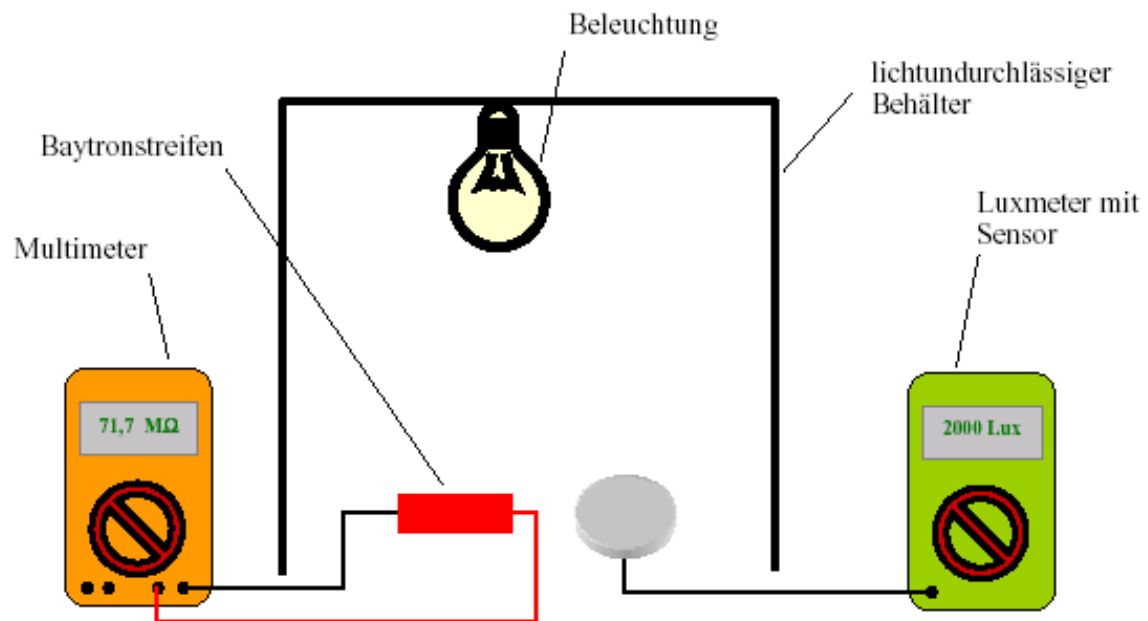


Abbildung 19: Messung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Beleuchtung

**Materialien:** Baytronstreifen, Stativmaterial, Multimeter, Lampe

**Versuchsdurchführung:**

Die Versuchsanordnung wird gemäß Abb. 19 aufgebaut. Die Beleuchtungsstärke wird schrittweise erhöht und dazu wird der Widerstand notiert. Dabei muss beachtet werden, dass die Glühlampe den Baytronstreifen nicht zu stark erwärmt, da sonst die Messung verfälscht wird (siehe Kapitel 3). In einem zweiten Versuch wird statt der Glühlampe eine UV-Lampe ( $\lambda_1=254\text{nm}$  und  $\lambda_2=366\text{nm}$ ) verwendet.

**7.1.3 Messung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit**

**Zielsetzung:** Messung des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit

**Materialien:** Heizplatte, Kochtopf, Wasser, Thermometer, Baytronstreifen, Multimeter

**Versuchsdurchführung:**

Die Versuchsanordnung wird gemäß Abbildung 20 aufgebaut. Das Wasser wird nun zum Sieden gebracht. Vor dem Messen muss der Baytronstreifen auf die gleiche Temperatur wie der Wasserdampf gebracht werden. Dann wird ein Startwert ohne Wasserdampf gemessen. Nun misst man den Widerstand bei Wasserdampf.



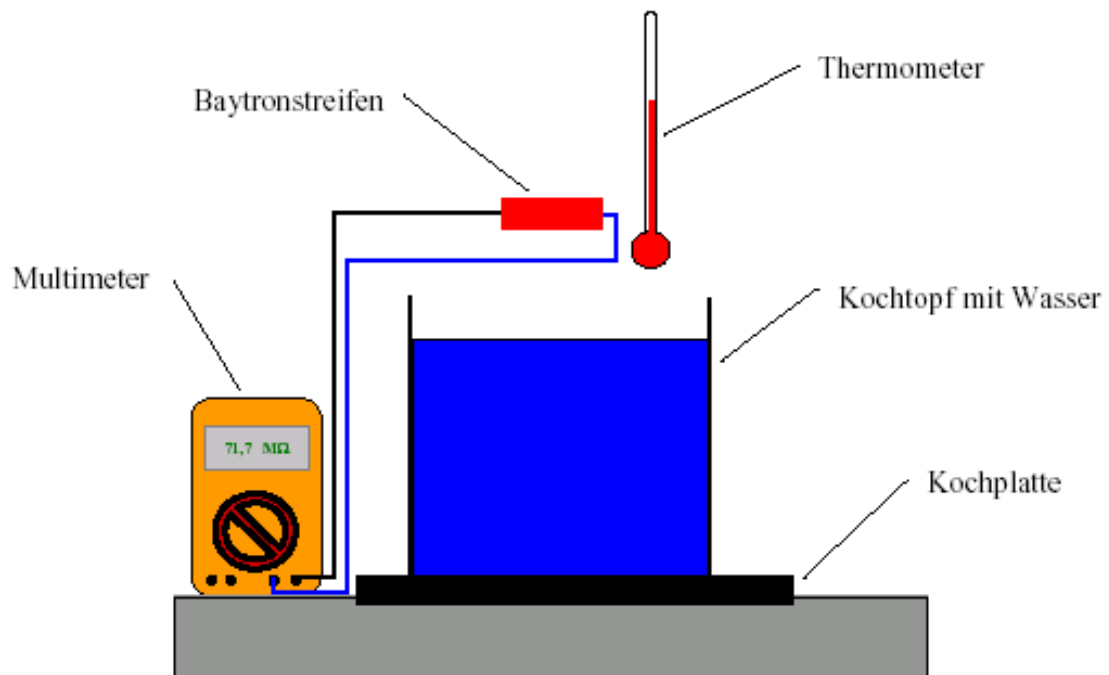


Abbildung 20: Messung des Widerstandes in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit

#### 7.1.4 Aufnahme einer Stromspannungskurve bei konstanter Temperatur

**Zielsetzung:** Aufnahme der Widerstandskennlinie von Baytron

**Versuchsdurchführung:**

Die Spannung wird schrittweise erhöht und gleichzeitig wird der Strom gemessen. Die Versuchsdaten werden in ein I-U-Diagramm eingetragen.

## 8 Literatur

- 1 Blässing, Jörg ; Organische Leuchtdioden auf der Basis von Polymermischungen; Erlangen ; 2002
- 2 Ficker, Jürgen; Stabilität und Lebensdauer polymerer Transistoren und integrierter Schaltungen; Darmstadt ; 2004
- 3 Diekmann, T., Pannemann, C. und Hilleringmann U.; Organic Field-Effekt-Transistors with Pentacene for radio-controlled-price-tag applications; Erscheinungsort unbekannt; 2003
- 4 Heil, Holger; Injektion, Transport und Elektrolumineszenz in organischen Halbleiterbauelementen; Darmstadt; 2004
- 5 Küflüoğlu, Haldun; Organic Thin Film Transistors; West Lafayette; 2003
- 6 Autor unbekannt; Advanced Materials; Ort unbekannt; 2004, 16, No. 13, July 5