

Papiertransistor (10 Punkte)

Die elektronische Technologie in der modernen Gesellschaft basiert auf einem einfachen, aber erfolgreichen Bauteil: dem Transistor, der sowohl als Schalter als auch Verstärker verwendet werden kann. Die Funktion als Schalter wird für Speicherung und Bearbeitung von digitaler Information verwendet.

Im Folgenden untersuchen wir zwei Typen des sogenannten Feldeffekt Transistors (FET), den JFET (Junction Field Effect Transistor) und den TFT (Thin Field Transistor).

Wir wollen hier kurz erklären, wie ein FET funktioniert. Ein FET ist ein nichtlineares Bauteil mit 3 Anschlüssen (die Anschlüsse heißen Gate: G; Source: S; und Drain: D), das den Stromfluss zwischen Source und Drain steuern kann, indem es auf die zwischen Gate und Source angelegte Spannung einwirkt. In einer einfachen, wenn auch unvollständigen Analogie funktioniert ein FET ähnlich wie ein Wasserhahn, wobei das Durchflussventil als das Gate wirkt, das den Wasserfluss steuert.

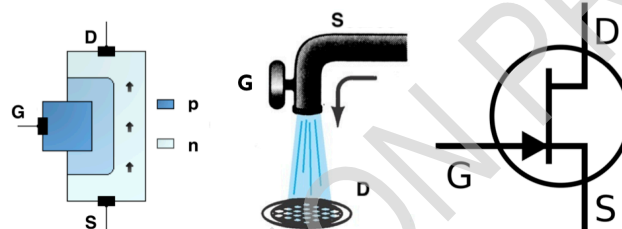


Abbildung 1: Schema eines n-Kanal-JFETs (links), seiner hydraulischen Analogie (Mitte) und seinem elektrischen Schaltsymbol (rechts). Die Pfeile in dem JFET-Schema zeigen den Fluss des elektrischen Stroms zwischen Source (S) und Drain (D) durch den schmalen n-Kanal an. Die Breite des Kanals hängt von der angelegten Spannung zwischen dem Gate (G) und der Source (S) ab.

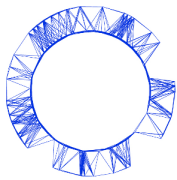
Der Junction-FET (JFET) beruht auf den Eigenschaften des Übergangs zwischen zwei Arten eines halbleitenden Materials, wie etwa p- und n-dotiertem Silizium, daher der Name. Ein JFET hat einen schmalen Kanal, durch den der Strom zwischen Source und Drain fließt, und in einem n-Kanal-FET besteht dieser Kanal aus n-leitendem Material. Die Breite eines solchen Kanals kann durch Anlegen einer **negativen** Spannung $V_{GS} = V_G - V_S$ zwischen dem Gate und der Source genau gesteuert werden. Bei einem festen Wert für V_{GS} hängt der zwischen Source und Drain fließende Strom nichtlinear von der angelegten Spannung $V_{DS} = V_D - V_S$ zwischen Drain und Source ab. Für kleine Werte von V_{DS} jedoch hängt der Strom linear von der angelegten Spannung ab, so dass der JFET ein ohmsches Verhalten zeigt. Der Ausgangswiderstand $R_{DS} = V_{DS}/I_{DS}$ hängt jedoch stark von der angelegten Spannung V_{GS} ab und folgt streng dem Gesetz:

$$R_{DS} = \frac{R_{DS}^0}{1 - V_{GS}/V_P}. \quad (1)$$

Dabei ist R_{DS}^0 der Ausgangswiderstand bei $V_{GS} = 0$ und $V_P < 0$ ein JFET-Parameter, der Abschnürspannung (*pinch-off voltage*) genannt wird. Daher blockiert der FET bei der Abschnürspannung den Stromfluss.

Für einen beliebigen festen Wert $V_{GS} > V_P$ entfernt sich irgendwann der Strom zwischen Source und Drain vom linearen Verhalten, wenn V_{DS} erhöht wird, und schließlich tritt Sättigung an einem nahezu konstanten Wert ein. Sei I_{DSS} der Sättigungsstrom für den Fall $V_{GS} = 0$. Im Sättigungsbereich (großer Wert von V_{DS}) hängt der Sättigungsstrom auf folgende Weise von V_{GS} ab:

$$I_{DS} = I_{DSS} (1 - V_{GS}/V_P)^2. \quad (2)$$



Zwei sehr wichtige Eigenschaften eines JFET sollten noch erwähnt werden. Obwohl sein spannungsgesteuerter Ausgangswiderstand ziemlich niedrig sein kann, ist der Eingangswiderstand ($R_{GS} = V_{GS}/I_{GS}$) extrem hoch, typischerweise größer als $10^9 \Omega$, so dass dieser Bauteil sehr wenig Eingangsstrom benötigt. Außerdem ist die Kapazität eines kleinen JFET ziemlich niedrig, was ihn zu einem sehr schnellen Gerät macht, das jenseits von MHz-Raten "öffnen und schließen" kann.

Im folgenden beschreiben wir die Funktionsweise eines anderen FET-Typs, des TFT.

Wie bei jedem anderen FET erlaubt der TFT die Steuerung eines Stroms zwischen zwei Kontakten, den Drain- und Source-Elektroden, mittels eines Potentials, das an der dritten Elektrode, dem Gate, anliegt.

Die Gate-Elektrode ist physikalisch von der Halbleiterschicht durch ein Dielektrikum getrennt, das die Bildung eines vertikalen elektrischen Feldes ermöglicht, das die im Halbleiter vorhandenen freien Ladungsträger steuert (Feldeffekt). Die dielektrische Schicht kann durch eine elektrolytische Membran wie etwa Papier ersetzt werden, in der bewegliche Ionen existieren (siehe Abbildung 2), und in diesem Fall schiebt die am Gate angelegte Spannung Ionen mit entgegengesetzter Ladung an die Halbleitergrenzfläche, wodurch eine Schicht ionischer Ladungen erzeugt wird, die die Dichte der freien Ladungsträger innerhalb des Halbleiters moduliert (Electrolyte Gated Transistors - EGTs). Forscher an der *Universidade de Nova* in Lissabon sind seit 2008 Pioniere bei der Entwicklung des "Papiertransistors" und auf diesem Gebiet weltweit führend.

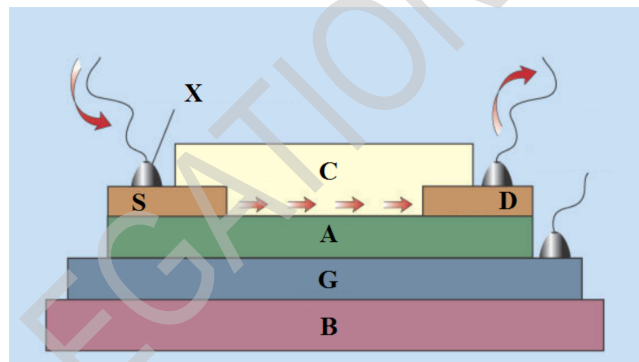


Abbildung 2. Schema eines Dünnschichttransistors (TFT) aus Papier, der in dieser Aufgabe verwendet wird. S - Source; D - Drain; G - Gate; A - Papier (dielektrisch); B - Substrat; C - Halbleiterschicht (Gallium-Indium-Zink-Oxid (GIZO)); X - Metallkontakte. Die Pfeile zeigen die Richtung des Stromflusses an.

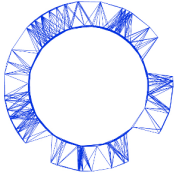
Ähnlich wie JFETs können TFT-Transistoren in zwei grundlegenden Betriebsmodi arbeiten: ein linearer Modus und im Sättigungsmodus. Im Unterschied zum JFET ist beim TFT die eigene Kapazität des Bauteils ein wichtiger Parameter für die Anwendung.

In diesem Experiment wirst du untersuchen, wie ein n-Kanal-JFET und ein Papier-TFT funktionieren.

Du bestimmst die Kennlinien (Characteristic Curves, CCs) dieser Bauteile durch Messung des Stromes zwischen Source und Drain (I_{DS}) beim Anlegen ausgewählter Spannungen an Gate (V_{GS}) und Drain (V_{DS}).

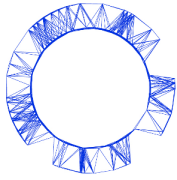
Die zwei wichtigsten CCs sind die Ausgabe- und die Transferkurve:

- **Ausgangskurve:** Für diese Kurve wird der Strom I_{DS} zwischen Source und Drain gemessen und als Funktion der Spannung V_{GS} zwischen Source und Drain aufgetragen, während V_{DS} schrittweise von 0 V auf +3 V erhöht und V_{DS} dabei konstant gehalten wird.
- **Transferkurve:** Für diese Kurve wird I_{DS} gemessen und gegen V_{GS} aufgetragen. V_{DS} wird auf einem



geeigneten konstanten Wert gehalten, damit der Transistor im **Sättigungsmodus** arbeitet, und V_{GS} wird schrittweise von -3 V auf 0 V erhöht.

DELEGATION PRINT



Equipment

Für diese experimentelle Aufgabe wird folgende Ausrüstung zur Verfügung gestellt (Abbildung 3):

1. 1 Multimeter
2. 1 JFET-Transistor (in einem beschrifteten Plastikbeutel)
3. 10 Verbindungsleitungen mit Krokodilklemmen
4. 4 flache Krokodilklemmen (in einer Plastikbeutel)
5. 1 Satz Batterien ($4 \times 1,5$ V)
6. 1 Batteriehalter
7. 1 Mini-Steckplatine mit Unterlage
8. 3 Überbrückungsleitungen zum Anschluss an die Steckplatine
9. 1 Bleistift, Härte HB
10. 1 Stift mit leitfähiger Silbertinte (*Circuit Scribe*)
11. 1 Stoppuhr
12. 1 Blatt Papier mit gedruckten Schaltungen und einem eingebetteten TFT, der Papier als dielektrische Schicht verwendet (Abbildung 4)
13. 1 Etui mit Schreibmaterial (1 Stift, 1 Bleistift 1 Radierer / Spitzer, 1 Lineal)

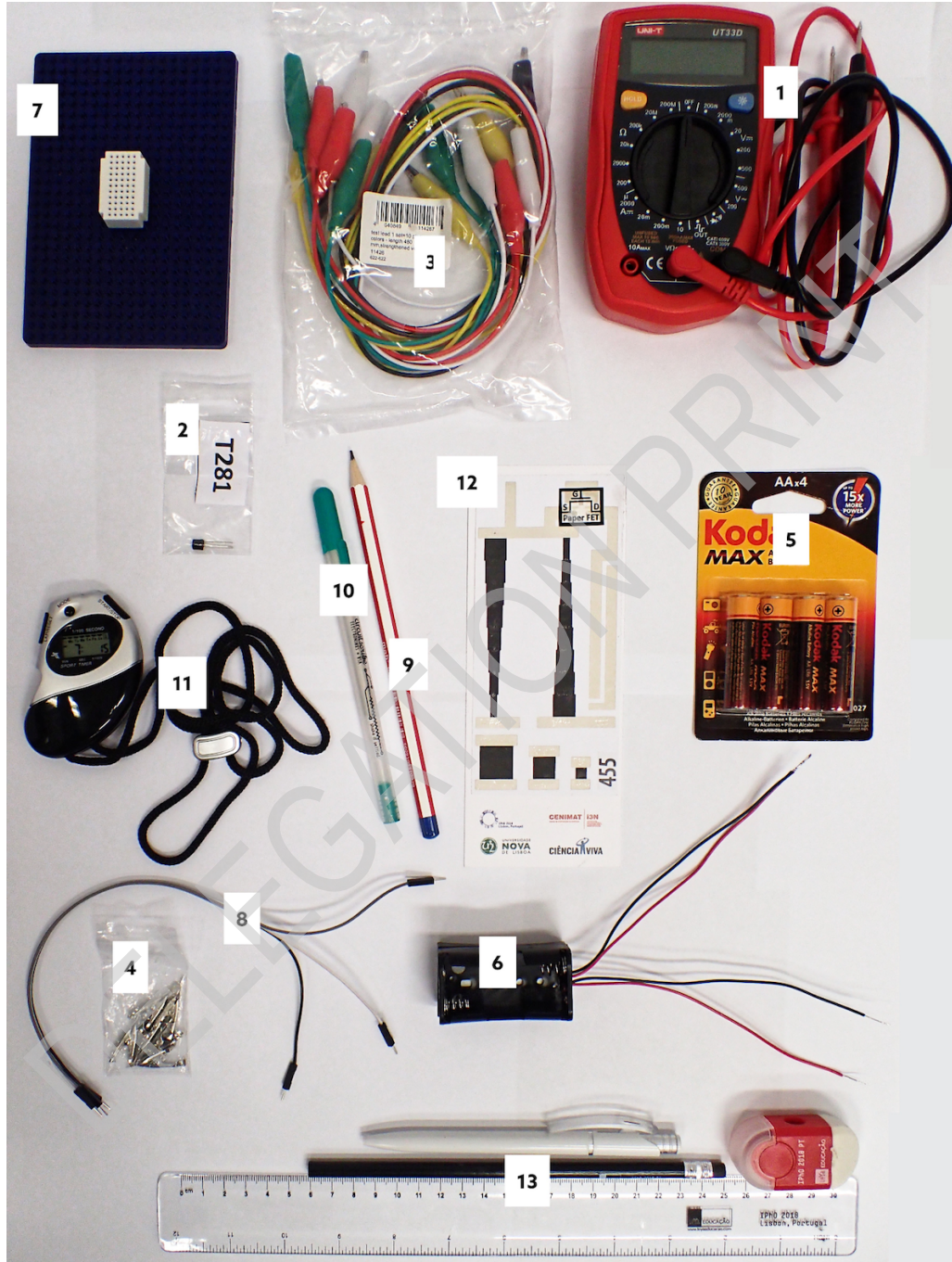
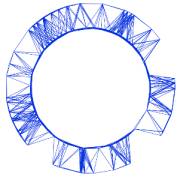


Figure 3. Experimentelle Ausrüstung

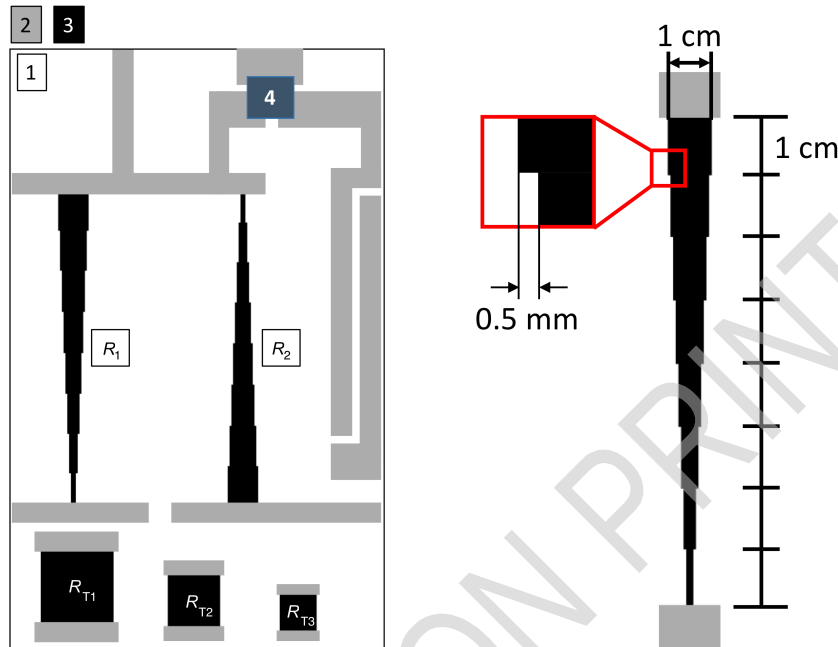
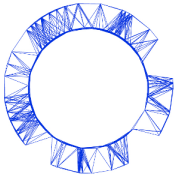
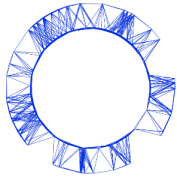


Abbildung 4. Links: Papierbogen mit aufgedruckten Schaltungen: Papier (1), Silberleiterbahnen (2), Kohlenstoffwiderstandsbahnen (3), Papiertransistor (4), Widerstände des Spannungsteilers (R_1 und R_2). Rechts: Physikalische Abmessungen der Widerstände des Spannungsteilers (mit einer konstanten Schrittweite von 0.5 mm für jedes Segment).

Wichtige Vorsichtsmaßnahme: Das Blatt Papier mit den aufgedruckten Schaltungen und dem eingebetteten Transistor **darf nicht gefaltet werden**, da es damit leicht beschädigt werden kann. Versuche es während der Messungen so glatt wie möglich zu halten, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Bei der Durchführung der Messungen **achte unbedingt auf die folgenden Punkte:**



- Das Multimeter sollte immer im **DC-Mode** betrieben werden.
- Das Multimeter stellt den Wertebereich nicht automatisch ein, und du solltest die für deine Messungen am besten geeigneten Bereiche sorgfältig auswählen. Im Falle eines Überlaufs zeigt das Display entweder "1" oder "-1" (linksbündig auf dem Display) entsprechend positivem oder negativem Wert an, und du solltest einen höheren Bereich einstellen.
- Die Niedrigstrombereiche sind durch eine 315-mA-Sicherung abgesichert. **Vermeide unbedingt einen Kurzschluss** zwischen Batterie und Multimeter, da bei einem hohen Strom die Sicherung durchbrennt!
- Der Innenwiderstand des Multimeters beim Betrieb im Voltmeter-Modus beträgt $10\text{ M}\Omega$.
- Beim Betrieb als Amperemeter hängt der Innenwiderstand des Multimeters vom Messbereich ab, gemäß der folgenden Tabelle:

Messbereich	R_{int}/Ω
200 mA	1,0
20 mA	10
2 mA	100

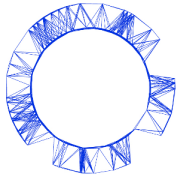
Tabelle 1. Innenwiderstand des bereitgestellten Multimeters beim Betrieb als Amperemeter.

Wenn das Multimeter im DC-Amperemeter-Modus betrieben wird, tritt daher bei Vollausschlag ein Spannungsabfall von bis zu 200 mV zwischen seinen Anschlüssen auf, für jeden der drei verfügbaren DC-Messbereiche.

Teil A. Dimensionierung der Schaltung (2.5 Punkte)

Um die notwendigen Spannungen V_{DS} und V_{GS} zu erreichen, verwende zwei auf Papier aufgedruckte Kohlenstoffwiderstände (R_1 und R_2 , siehe Abb. 4) und eine Spannungsteilerschaltung, um die Schaltung für die richtigen Potentialabfälle zu dimensionieren. R_1 und R_2 sind der Gesamtwiderstand (R_{tot}) einer Spannungsteilerschaltung. Wenn man eine konstante Spannung an R_1 anlegt (in diesem Fall etwa 3 V von der Batterie), beobachtet man zum Beispiel einen Spannungsabfall von 3 V (V_{in} , der positive Kontakt der Batterie) gegen Masse (0 V, von nun an bezeichnen wir als Masse den gemeinsamen Kontakt beider Batteriesätze). R_{tot} kann in im Wesentlichen in zwei Teilwiderstände (R_x und R_y) unterteilt werden, um die gewünschte Spannung V_{out} zu erhalten (Abbildung 5).

Experiment



IPhO 2018
Lisbon, Portugal

Q1-8

Austrian German (Austria)

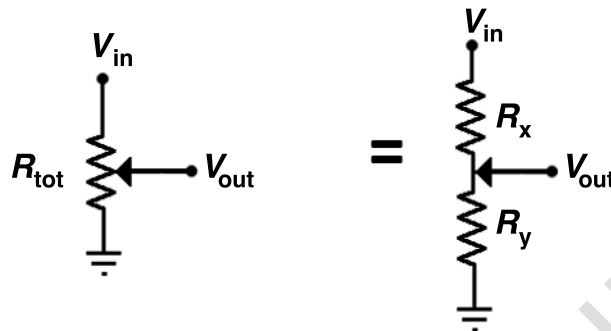


Abbildung 5. Spannungsteilerschaltung.

- | | | |
|------------|---|-------|
| A.1 | Bestimme den Ausdruck für die Ausgangsspannung V_{out} als Funktion der Spannung V_{in} und der Widerstände R_x und R_y . | 0.2pt |
| A.2 | Miss den Widerstand der drei Testwiderstände auf dem unteren Teil des Blattes (R_{T2} , R_{T2} und R_{T3}) mit dem Multimeter. Führe genügend Messungen mit unterschiedlichen Positionen an den Silberkontakten durch. Gib die Werte in das Antwortblatt ein. Berechne den Durchschnittswert und schätze den Fehler für den Widerstand jedes Testwiderstandes ab. | 0.5pt |
| A.3 | Zeige, dass der Widerstand eines quadratischen dünnen Films mit dem spezifischen Widerstand ρ unabhängig von seiner Seitenlänge sein sollte. Dieser größenunabhängige Widerstand wird Flächenwiderstand genannt und mit $R_{\square}$ bezeichnet. | 0.3pt |
| A.4 | Berechne den Durchschnittswert des Flächenwiderstands des Kohlenstofffilms aus den Daten in A.2 und bestimme den spezifischen Widerstand ρ des Kohlenstofffilms zusammen mit einer Schätzung seiner Messunsicherheit (verwende eine Dicke t des Kohlenstofffilms von $20 \pm 1 \mu\text{m}$). | 0.4pt |
| A.5 | Zeige, dass theoretische für die Widerstände R_1 und R_2 gilt: $R_1 = R_2 = \kappa R_{\square}$, $\kappa \sim 14,2897$. Miss R_1 und R_2 und notiere die Werte im Antwortblatt. Bestimme den experimentellen Wert von κ und vergleiche ihn mit dem theoretischen Wert. | 0.5pt |

Ziehe mit dem Silberstift 7 Leiterbahnen mit gleichem Abstand zueinander entlang jedem der bereitgestellten Widerstände (wie in Abbildung 6 beispielhaft dargestellt). Diese einzelnen Linien dienen als Kontaktpunkte für die Spannungsteiler.

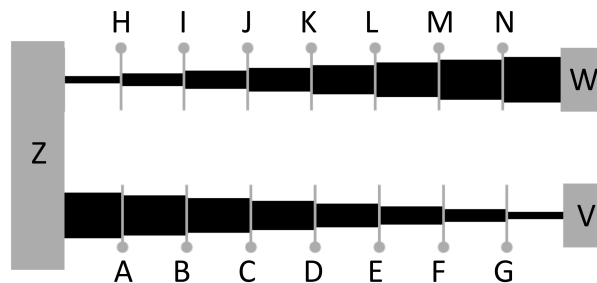
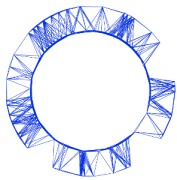


Abbildung 6. Beispiel zum Aufbringen von Leiterbahnen und Benennungsschema der Kontaktpunkte.

- A.6** Miss die Widerstände R_x und R_y für alle Kontaktpunkte. R_x ist definiert als der Widerstand zwischen dem Kontaktpunkt und den Punkten V (Widerstand 1) oder W (Widerstand 2), und R_y als der Widerstand zwischen Kontaktpunkt und Punkt Z. Fülle die bereitgestellten Tabellen im Antwortbogen aus. 0.3pt

Leg die 4 AA-Batterien in den Batteriehalter ein. Bitte beachte die korrekte Polarität der Batterien und stelle sicher, dass du keinen Kurzschluss erzeugst. Schließe dann die Batterieeinheit an, wie in Abbildung 7 dargestellt. Pass auf, dass du die Silberleiter nicht mit den Krokodilklemmen beschädigen.

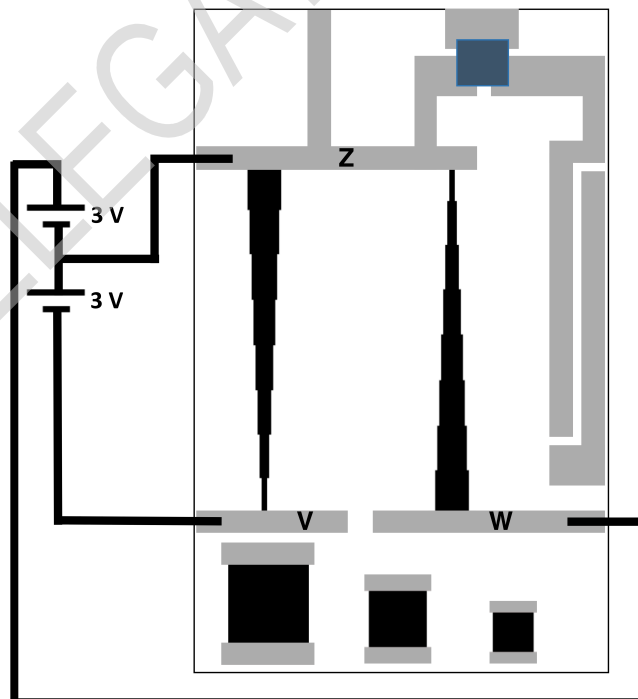
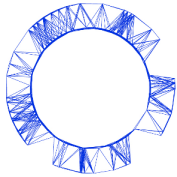


Abbildung 7. Batterieanschluss



- A.7** Miss die Spannung V_{out} an jedem Kontaktpunkt in Bezug auf Punkt Z und gib die Werte in den bereitgestellten Tabellen im Antwortbogen ein. 0.3pt

Damit ist der Schaltungsdimensionierungsteil abgeschlossen, und alles ist vorbereitet für die Messung der Kennlinien des JFET-Transistors.

Teil B. Kennlinien des JFET-Transistors (4.5 Punkte)

Zur Bestimmung der Kennlinien des JFET-Transistors verwende den in Abbildung 8 dargestellten Aufbau. Mach dich zunächst mit den Positionen der drei Kontakte (S, D und G) des JFET-Transistors vertraut - **achte darauf, dass du sie im weiteren nicht verwechselst, der Bauteil ist nicht symmetrisch!** Du kannst die beigelegte Mini-Steckplatine mit Unterlage für die Montage des JFET-Transistors verwenden. Die mitgelieferten Überbrückungsleiter sind für die Verwendung mit der Mini-Steckplatine vorgesehen.

Verbinde mit den mitgelieferten Verbindungsleitern das Gate und die Source des Transistors mit der Masse (Punkt Z der Schaltung, bei 0 V). Während dieser Teilaufgabe sollte die Source des JFET immer mit der Masse verbunden bleiben.

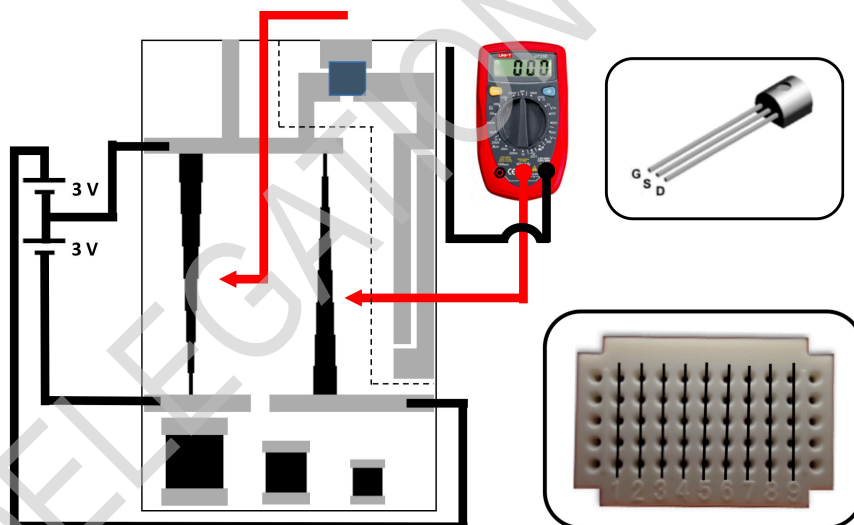
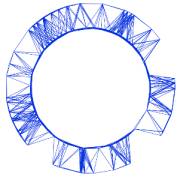


Abbildung 8. Setup zur Ermittlung der JFET-Kennlinien. Der Teil der Schaltung innerhalb des gestrichelten Bereichs, der den TFT enthält, wird in Teil B der Aufgabe nicht verwendet. Das kleine Bild rechts oben zeigt die Positionen von Gate, Source und Drain des JFET-Transistors. Das Bild darunter zeigt, wie die Kontakte des Mini-Steckbrettes verbunden sind. Alle Kontakte in einer nummerierten Spalte sind intern miteinander verbunden und von den Kontakten anderer Spalten isoliert. Das Bild des Multimeters dient nur zur Veranschaulichung; es ist deine Aufgabe, den geeigneten Messmodus und Bereich über den Drehregler des Multimeters auszuwählen.

- B.1** Verbinde das Gate des Transistors mit der Masse ($V_{\text{GS}} = 0$). Verbinde dann eines der Kabel des Multimeters im Gleichstrommodus (DC) mit dem Drain des Transistors und das andere Kabel mit dem Punkt mit der höchsten Spannung, die in den Spannungsteilern verfügbar ist. Notiere den Wert der Stromstärke I_{DS} auf dem Antwortblatt. 0.2pt



- B.2** Miss die Stromstärke I_{DS} für verschiedene an den Drain angelegte positive Spannungen, während $V_{GS} = 0$ ist. Dann ändere die Schaltung durch Anlegung einer negativen Spannung zwischen dem Gate und der Source des Transistors ($V_{GS} < 0$), und wiederhole die Messungen der Stromstärke I_{DS} als Funktion der positiven zwischen Drain und Source angelegten Spannung. Trage diese Werte in die auf dem Antwortblatt dafür vorgesehenen Tabellen ein. 0.8pt

Wenn die Spannungsteilerschaltung mit einer niederohmigen Last verbunden ist (Abbildung 9), weichen die von dem Spannungsteiler gelieferten Spannungswerte V_{out}^L von den Nennwerten V_{out} ab, die man bei Messung mit einer hochohmigen Last erhält, wie im Fall eines Voltmeters mit hoher Impedanz.

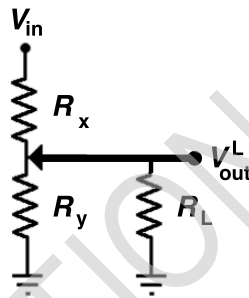


Abbildung 9. Spannungsteilerschaltung mit einer Last.

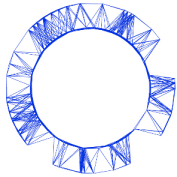
- B.3** Der Spannungsteiler sei an eine Last mit Widerstand R_L angeschlossen. Bestimme einen Ausdruck für den Korrekturfaktor $f = V_{out}^L / V_{out}$ als Funktion von R_L , R_x und R_y . 0.2pt

Der JFET-Transistor hat einen niedrigen Ausgangswiderstand für den Fall $V_{GS} = 0$, nämlich $R_{DS}^0 \sim 50 \Omega$. Dieser Widerstand erhöht sich jedoch signifikant, wenn zwischen Gate und Source eine negative Spannung anliegt. Für $V_{GS} < 0$ folgt der Ausgangswiderstand genau dem durch Gleichung (1) gegebenen Gesetz.

- B.4** Berechne den Spannungsabfall V_{DS} zwischen Drain und Source für alle in B.2 gemessenen Punkte, unter Verwendung der passenden Korrekturfaktoren. Berücksichtige die folgenden Nenndaten für den in dieser Aufgabe verwendeten JFET: $R_{DS}^0 = 50 \Omega$, $V_p = -1.4 \text{ V}$. 1.2pt

- B.5** Stelle Ausgabekurven $I_{DS}(V_{DS})$ für den JFET-Transistor graphisch dar. 0.5pt

- B.6** Betrachten wir nun den Transistor im Betrieb bei kleinen Werten für V_{DS} . Bestimmen Sie die *experimentellen* Werte von R_{DS} Ihres JFET für verschiedene Werte von V_{GS} und stellen Sie sie graphisch dar. 0.5pt



- B.7** Stelle die Transferkurve $I_{DS}(V_{GS})$ des JFET-Transistors für $V_{DS} \sim +3\text{ V}$ graphisch dar. 0.3pt

Wenn der JFET-Transistor im Sättigungsmodus ist, folgt die Stromstärke I_{DS} genau dem durch die Gleichung (2) ausgedrückten Gesetz.

- B.8** Ermittle aus den gemessenen Daten I_{DSS} und die Abschnürspannung V_p für den Bauteil. Vergleiche den erhaltenen Wert von V_p mit dem Nominalwert. 0.4pt

Ein wichtiger Parameter eines JFET-Transistors, insbesondere wenn er in Verstärkern verwendet wird, ist die sogenannte Transkonduktanz (oder Steilheit) g , definiert als

$$g = \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}}. \quad (3)$$

Für eine Funktion zweier Variablen $f(x, y)$ bedeutet die Schreibweise $\frac{\partial f}{\partial x}$ die Ableitung von f gegenüber x , wobei y konstant gehalten wird.

- B.9** Ermittle aus der gemessenen Transferkurve die Transkonduktanz des Transistors für $V_{GS} = -0.50\text{ V}$. Vergleiche sie mit dem aus der Modellgleichung (2) berechneten Wert. 0.4pt

Teil C. Dünnschichttransistor aus Papier (2.0 Punkte)

Von nun an arbeite nicht mehr mit dem JFET. Alle folgenden Aufgaben und Fragen beziehen sich auf den Dünnschichttransistor (TFT) aus Papier, der sich in der oberen Ecke der aufgedruckten Schaltung befindet. Gate, Source und Drain des TFT sind in Abbildung 10 markiert. Verbinde Gate und Source des TFT mit der Masse. Auch in diesem Teil der Aufgabe sollte die Source des Papier-TFT immer am gemeinsamen Kontakt der Batteriesätze angeschlossen sein, d. h. 0 V, wie in Abbildung 10 dargestellt. Lege über einen der Spannungsteiler am Transistor eine Spannung $V_{DS} > 0$ an (Bild 10). Vergewissere dich, dass Strom durch das Amperemeter fließt.

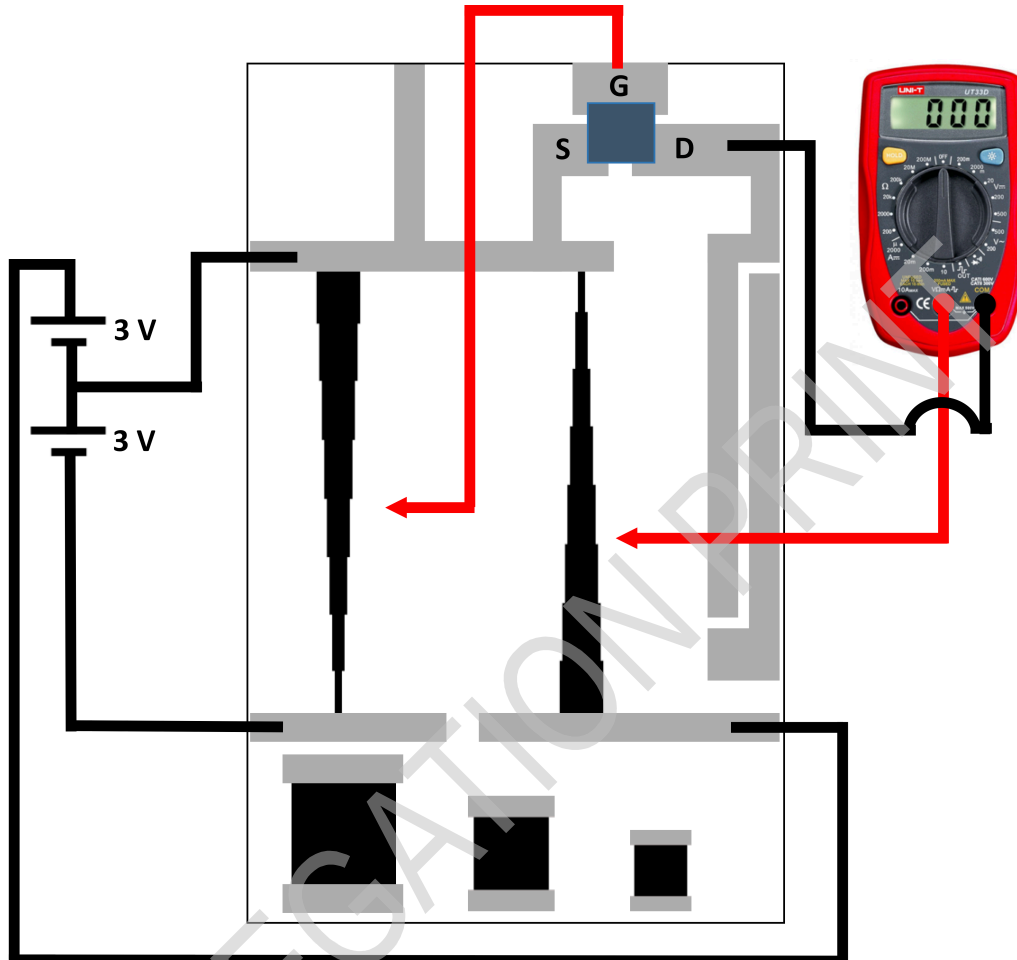
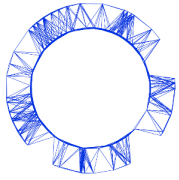


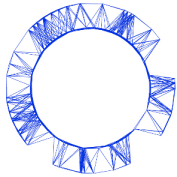
Abbildung 10. Setup für Messungen am Papier-TFT. Das Bild des Multimeters dient nur zur Veranschaulichung. Es ist deine Aufgabe, den geeigneten Messmodus und Bereich über den Drehregler des Multimeters auszuwählen.

C.1 Lege eine Spannung von $V_{DS} = +3.0\text{ V}$ an. Schließe den Transistor durch Anlegen von $V_{GS} = -3.0\text{ V}$. Warte eine Minute, damit der Transistor schließt. Notiere auf dem Antwortblatt den Restwert des Stromes I_{closed} . Öffne dann den Transistor, indem du $V_{GS} = 0$ setzt, während $V_{DS} = +3.0\text{ V}$ bleibt. Miss den Strom als Funktion der Zeit ab dem Zeitpunkt des Öffnens des Transistors für mindestens 5 Minuten und trage die Daten $I_{DS}(t)$ in das Antwortblatt ein. 0.8pt

C.2 Stelle $I_{DS}(t)$ grafisch dar. Man erkennt eine zwei überlagerte, zeitabhängige exponentielle Vorgänge, von denen einer eine viel größere Zeitkonstante (τ_2) hat als der andere (τ_1). Bestimme die kürzere Zeitkonstante τ_1 . 1.2pt

Teil D. Inverter (Non-Gatter) (1.0 Punkte)

Eine der wichtigsten Schaltungen in mikroelektronischen Schaltkreisen ist der Inverter (Non-Gatter), der in der Lage ist, ein digitales Eingangssignal zu invertieren. Wenn beispielsweise V_{in} hoch ist, dann ist V_{out} niedrig und umgekehrt. Ein Transistor ist wiederum die Basis der Schaltung, und eines der einfachsten



Konzepte ist der sogenannte *Common-Source-Amplifier*, der einen Transistor und einen Lastwiderstand R_L verwendet und in Abbildung 11 dargestellt ist. In diesem Fall ist $V_{in} = V_{GS}$, und V_{out} ist die an der Drain-Elektrode des Transistors gemessene Spannung. Wir werden in diesem Teil beobachten, was mit V_{out} passiert, wenn wir V_{GS} von -3 V auf 0 V erhöhen.

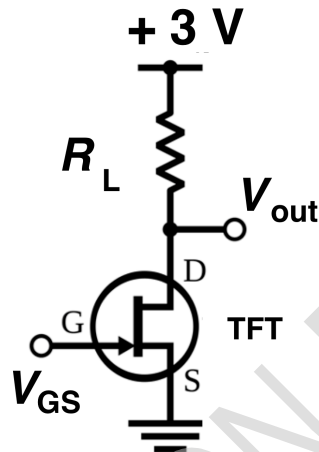


Abbildung 11. Common-Source-Amplifier und Inverter-Schaltkreis.

Beim in Abbildung 11 dargestellten Aufbau ist der Transistor der Papier-TFT und R_L ist ein Lastwiderstand, den du nun manuell hinzufügst, indem du den Drain-Kontakt des Transistors mit Bleistiftstrichen mit dem V_{in} -Kontakt verbindest, wie in Abbildung 12 gezeigt. Dadurch dass du diese Fläche ausmalst, bringst du dünne Schichten aus leitfähigem Graphit auf das Papier auf. Je mehr Schichten du übereinander zeichnest, desto niedriger wird der Widerstand. Achte beim Zeichnen von R_L darauf, den Widerstandswert kontinuierlich zu überwachen. Um V_{out} so nahe wie möglich an 0 V zu bringen, sollte der Lastwiderstand ausreichend groß sein. Versuche daher beim Zeichnen des Widerstands, dem Zielwert $R_L = 200 \text{ k}\Omega$ möglichst nahe zu kommen.

Du kannst dabei den Bleistift verwenden, um R_L zu verringern, oder den Radiergummi, um ihn zu erhöhen. Du sollst versuchen, einen Wert zu erhalten, der nicht mehr als 10

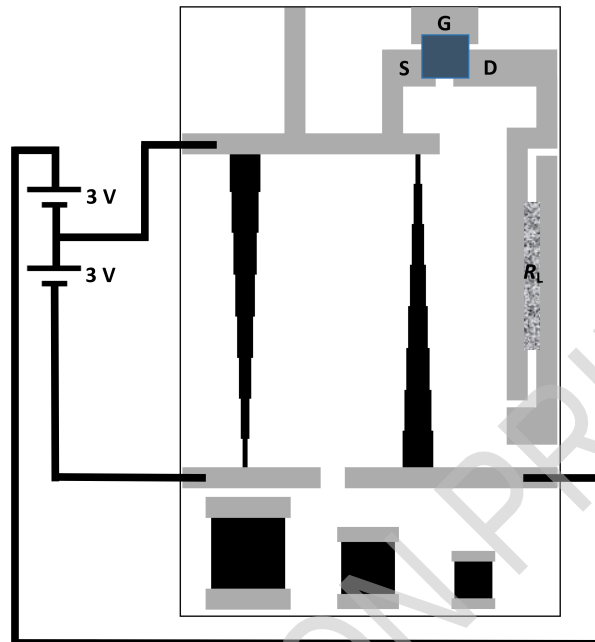
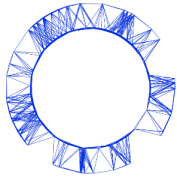


Abbildung 12. Setup für die Konfiguration des Inverters/Common-Source-Amplifier.

Ziehe mit beiliegenden HB-Bleistift von Hand einen Kohlenstoffwiderstand mit einem Wert von $R_L \simeq 200 \text{ k}\Omega$, um ihn als Lastwiderstand des Papier-TFT für den Aufbau des Inverter-Schaltkreises zu verwenden (siehe Abbildung 12).

D.1 Notiere auf dem Antwortblatt den gemessenen Wert von R_L , den Du erreicht hast. Baue den Inverter-Schaltkreis mit dem Bleistiftstrich-Kohlewiderstand und dem Papier-TFT auf (Abbildung 12). Beachte vor der Messung, dass du den Transistor durch Anlegen von $V_{GS} = -3 \text{ V}$ vollständig ausschaltest und etwa eine Minute warten musst. Miss dann V_{out} , während du V_{GS} von -3 V auf 0 V erhöhst. Miss dabei V_{out} mit einer Stabilisierungszeit für jeden Punkt bis zu einem Maximum von 100 s . Trage die gemessenen Werte in das Antwortblatt ein. 0.5pt

D.2 Stelle die gemessene Spannungstransferkurve $V_{out}(V_{in})$ graphisch dar, und zeichne eine glatte Näherungskurve durch die Datenpunkte. 0.5pt