

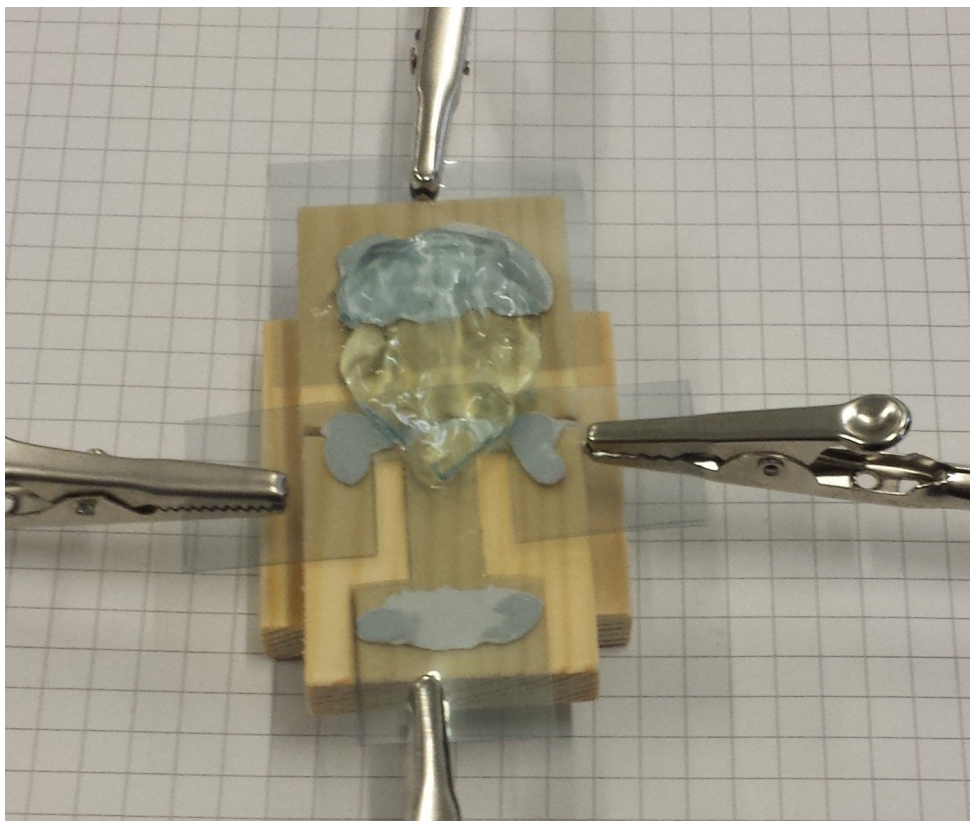


**Linköpings
kommun**
Berzeliussskolan

Gymnasiearbetsrapport

Läsåret 2015/2016

Elektrokemisk transistor



Joel Sjöquist, TE13E
Hajar Rashidi, TE13E

Ana Fahlman, handledare
Andreas Sundenius, medbedömare

Abstract

All electronic devices consists of transistors. One can function, for instacne, as a circuit switch, a voltage regulator or an amplifier. Common types of transistors are field-effect transistor (FET) and bipolar junction transistor (BJT). We have done research on another type of transistor, called organic electrochemical transistor (OECT). It is made of organic material and can easily be printed for use. The semiconducting material used is an modified polymer. This study's objective was to look into how these transistor works and how they can be used, contingently as a replacement for silicon transistors. We decided to build an OECT and perform some measurements on it. Conclusions we have reached is that this sort of transistor may have advantages in some areas of usage, but has by no means capacity to supersede the silicon transistors.

Keywords: organic electrochemical transistor; conductive polymer; PEDOT:PSS;

Innehållsförteckning

Inledning.....	1
Syfte och frågeställningar.....	1
Teoretisk bakgrund.....	1
Grundläggande om transistorer.....	1
Elektrokemiska transistorer.....	2
Elektrolyt.....	2
PEDOT:PSS.....	2
Bistabil eller dynamisk konfiguration.....	3
Tre- eller fympolig transistor.....	3
Metod.....	4
Syfte med laborationen.....	4
Konstruktion av transistor.....	4
Kopplingsschema.....	4
Förberedelser inför laboration.....	5
Utförande av laboration.....	5
Resultat.....	6
Transistor 1.....	6
Transistor 2.....	7
Transistor 3.....	8
Diskussion.....	9
Slutsatser och felkällor.....	9
Användningsområden och nackdelar.....	10
Källförteckning.....	12

Bilagor

Bilaga 1: Originalmått för transistor från en rapport

Bilaga 2: Ritning för transistor 1

Bilaga 3: Ritning för transistor 2

Bilaga 4: Ritning för transistor 3

Inledning

Syfte och frågeställningar

Vi ska undersöka organiska elektrokemiska transistorer (eng. Organic Electrochemical Transistor, OECT). Vi ska göra det genom att bygga en och genomföra mätningar på den.

1. Hur fungerar en elektrokemisk transistor?
2. Vilka fördelar och alternativa användningsområden har denna typ av transistor?
3. Kan denna transistor ersätta dem idag dominerade transistorkretsarna?

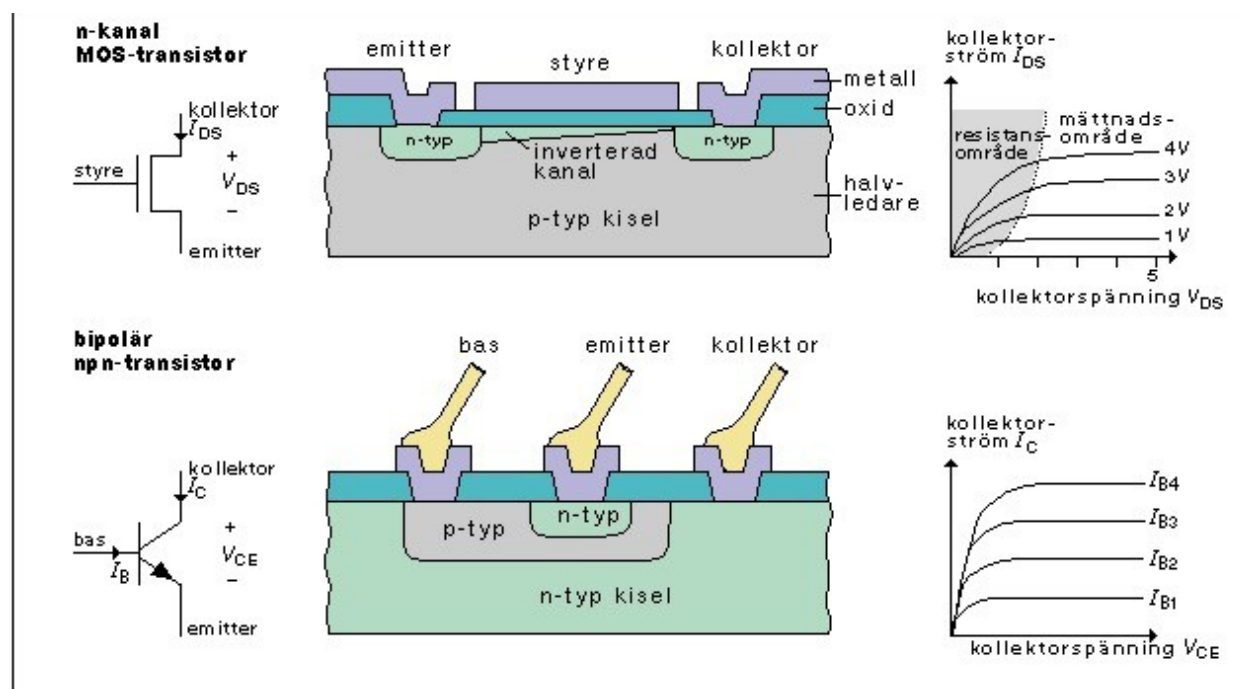
Teoretisk bakgrund

Grundläggande om transistorer

Transistorer är den grundläggande elektroniska komponent som sitter i all elektronisk utrustning. De är uppbyggda av halvledare, vilkas ledningsförmåga kan modifieras. På så vis används transistorer som strömbrytare, spänningsreglerare och signalförstärkare i elektriska kretsar (Jeppson, u.å. a). Spänningsreglerare, exempelvis, kan vara mycket användbart eftersom man i en elektronisk apparat vill ha en stabil potentialskillnad i kretsen. En sådan reglerar och stabiliserar inkommande spänning till att vara konstant (Wikipedia, 2015).

Transistorer kan byggas av många olika material och konstruktionen kan också variera mycket. En vanlig typ kallas bipolär transistor, på engelska bipolar junction transistors (BJT). Den har tre poler (emitter, bas, kollektor) och styrs utav en svag ström på basen som kommer resultera i ett betydligt starkare flöde av laddningar från emittern till kollektorn. Den finns i främst två varianter: NPN och PNP. Den stora skillnaden är att i den första är majoriteten av alla laddningsbärare elektroner, medan dem i den andra är i minoritet. Bland alla typer av transistorkretsar har dessa störst impedans, eller resistans vid likström. Nackdelen med det är att lasten kan bli för hög, alltså att transistor drar för mycket ström från källan (Learning about Electronics, u.å.).

Fälteffekttransistorer, på engelska field-effect transistor (FET), är också en mycket vanlig typ av transistor. Den har också tre poler, men de kallas här för gate, source och drain och tillskillnad från BJT är dessa transistorer spänningsstyrda. En spänning på gate styr flödet av ström från source till drain. Dessa transistorer har mycket hög impedans, eller resistans vid likström, vilket resulterar, enligt ohms lag att strömmarna genom kretsen är mycket svaga. De byggs huvudsakligen i tre varianter: JFET (junction gate field-effect transistor) samt MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) (Learning about Electronics, u.å.).



Källa: Jeppson, u.å. a

Elektrokemiska transistorer

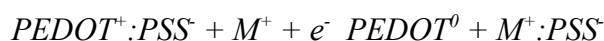
OECT (Organic electrochemical transistor) är en transistor som byggs fullständigt av organiska material. Den består av en modifierad polymer (plast) som används som halvledare. Både joner och elektroner används som laddningsbärare (Nilsson, 2005, Abstract). Transistor har elektroderna source, drain och gate. Genom att applicera en spänning på gate-polen kan resistansen på transistorkanalen (mellan source och drain) förändras genom att elektrokemiskt dopa polymeren (Havener, 2007, s.3). För detta krävs också att elektroderna är anslutna genom en gemensam elektrolyt (Nilsson, 2005, s.22).

Elektrolyt

En elektrolyt är ett ämne som är ledande eftersom det innehåller rörliga joner. Det används alltså för att transportera joner inom transistor (Jeppson, u.å. b). I experimentet använde vi som elektrolyt kallas "Blågel elektrodgel", vilken anskaffades av vår handledare.

PEDOT:PSS

PEDOT kallas p-dopad, (positiv), poly(3,4-ethylenedioxythiophene) (Nilsson, 2005, s.12). Tillsammans med PSS⁻, poly(4-styrenesulfonate), utgör den en av de mest använda ledande polymererna (Isaksson, 2006, s.1). Detta eftersom den har hög ledningsförmåga och ska kemiskt sätt vara stabil. Materialet kan skifta mellan ledande form och halv-ledande tillstånd enligt följande reaktion, där e⁻ representerar en elektron och M⁺ en grupp joner (Nilsson, 2005, s.13-14).



Vilket redoxstillstånd polymern befinner sig avgör ledningsförmågan samt vilket färg den kommer visa. I oxiderat tillstånd ska PEDOT:PSS vara ljus blå, nästan transparent, men när materialet är reducerat ska den vara mörkblå färg (Isaksson, 2006, s.1). Plastfilmen är från början delvis dopad (oxiderad) och delvis neutral (Nilsson, 2005, s.14). Det är denna polymer vi har tillgång till experimentet, i form av en tunn film.

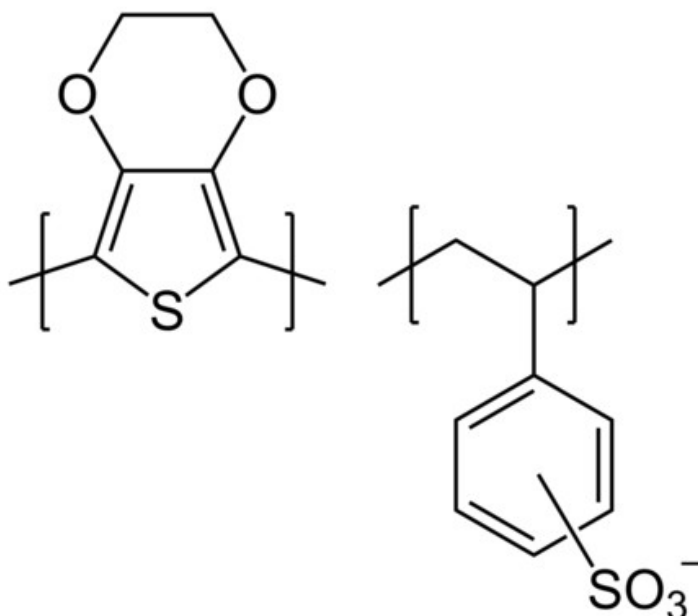


Bild på den kemiska strukturen

Källa: <https://en.wikipedia.org/wiki/PEDOT:PSS>

Bistabil eller dynamisk konfiguration

Transistorer kan konstrueras efter den dynamiska alternativt den bistabila konfigurationen. Vad som i resultat skiljer dem åt är exempelvis att den senare lämpar sig för lägre spänningar och dessutom har en "minnesfunktion" (Nilsson, 2002, s.51-54). Anledningen till det senare är att PEDOT:PSS elektroderna förblir i dess respektive redoxstillstånd ett tag efter att spänningen fränkopplats (Nilsson, 2005, s.23).

Tre- eller fyrpolig transistor

Transistorer kan byggas med tre eller fyra poler, vilka visar på olika beteenden och därmed är lämpar sig för olika användningsområden. Skillnaden är att transistorer med fyra poler har två stycken gate-elektroder, en positiv samt en negativ (Nilsson, 2005, s. 24-32). Vi kommer att bygga en transistor med fyra poler: source, drain, gate⁺ och gate⁻.

Metod

Syfte med laborationen

Vi planerade en laboration för att se hur en transistor av denna typ fungerar. Vi bestämde att vi skulle mäta strömmen genom transistorkanalen (source-drain). Med dessa värden vill vi också, om möjligt, jämföra med resultaten för andras laborationer.

Konstruktion av transistorn

Vi valde att bygga transistorn i enlighet med den fyrpoliga konfigurationen (four-terminal). Vi byggde tre olika varianter av transistorn, med avseende på transistorkanalernas storlek.

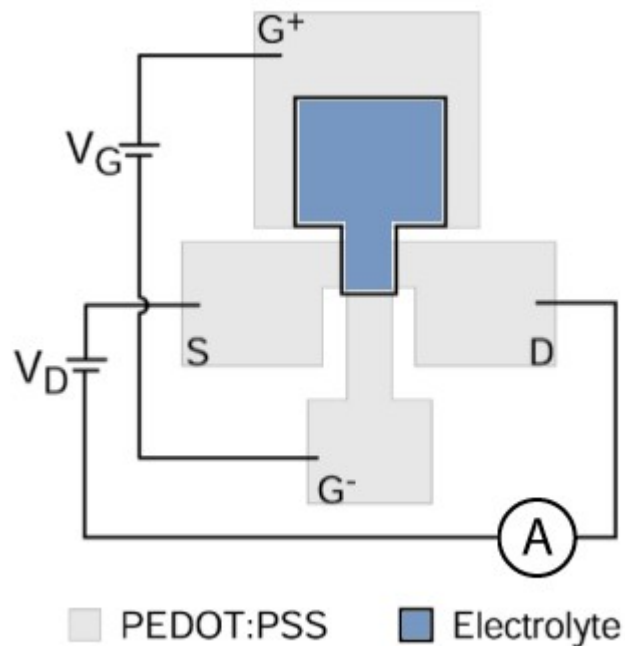
I *Transistor 1* användes samma former och storleksförhållanden mellan de ingående komponenterna som i rapporten "*An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic*" (Nilsson, 2005, s.28). Vi vet inte hur noggran skissen i rapporten är men vi mätte dess storlek, utskriven på ett A4-papper, för att ha storleksförhållanden mellan komponenterna som ska vara bra. Se dem uppmätta originalmått i *Bilaga 1*. Vi ritade sedan transistorn i skala 2:1, se mått i *Bilaga 2*.

Transistor 2 utgår från *Transistor 1* men har smalare kanaler mellan source och drain, samt till gate. Se mått i *Bilaga 3*.

Transistor 3 utgår från *Transistor 1* men har kortare och bredare kanal mellan source och drain, samt smalare kanal till gate. Rapporten hävdar att kort avstånd mellan source och drain resulterar i snabb transistor (Nilsson, 2005, s.34). Måttan bestämdes så att $gate^+$ skulle vara 10 gånger större än transistorkanalen, i enlighet med en rekommendation i rapporten (Nilsson, 2005, s.32). Se mått i *Bilaga 4*.

Kopplingsschema

Följande kopplingsschema byggde vi transistorn efter. Det är taget ur rapporten (Nilsson, 2005, s.28), med undantag av amperemetern som vi själva placerat ut.

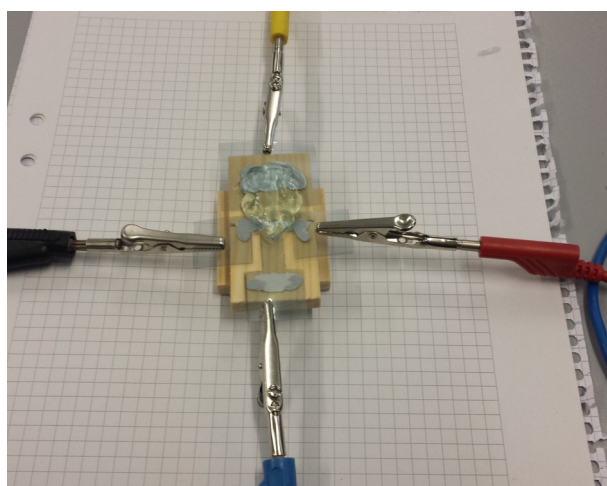
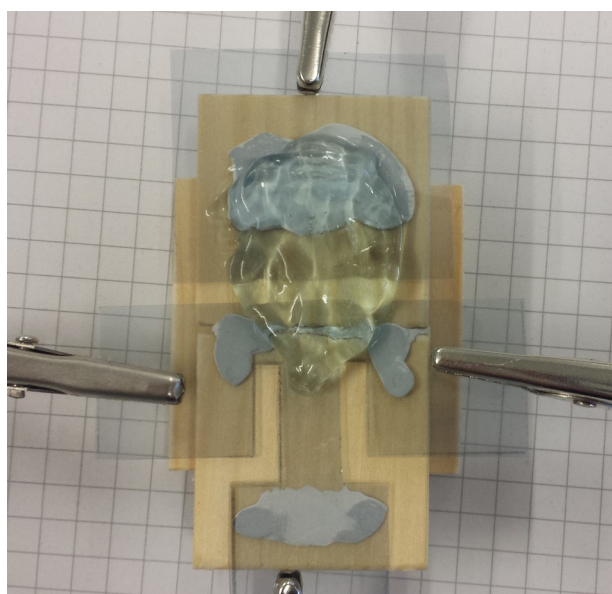
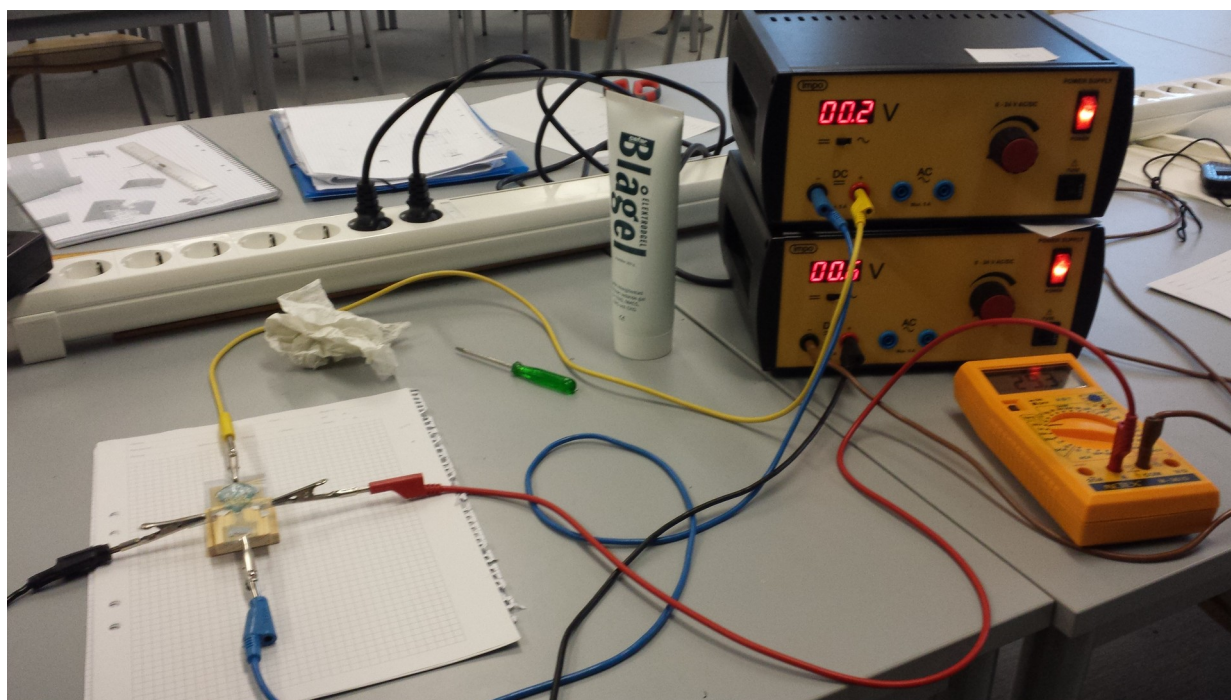


Förberedelser inför laboration

Transistordelarna klipptes ut noggrant efter ritade mallar. Enbart en sida av plastfilmen är ledande. Vilken sida vi ska använda som halvledare kontrolleras med en multimeter. För att det ska vara smidigare att ansluta denna väldigt tunna plastfilm höjde vi upp den med några tråklossar. Träet och filmen fästes med häftmassa.

Utförande av laboration

Transistorn kopplades efter schemat till polerna på två spanningsaggregat, V_G och V_D , med hjälp av "krokodilklämmor". Vi lade dit en klump av elektrolyten över både G^+ och transistorkanalen. Se bild för tydliggörande. Amperemetern kopplades in mellan drain och negativa polen på V_D , för att den ska visa strömmen genom transistorkanalen. Vi valde att mäta strömmen (I_D) mellan *source* (S) och *drain* (D) och variera värdena på V_G och V_D .

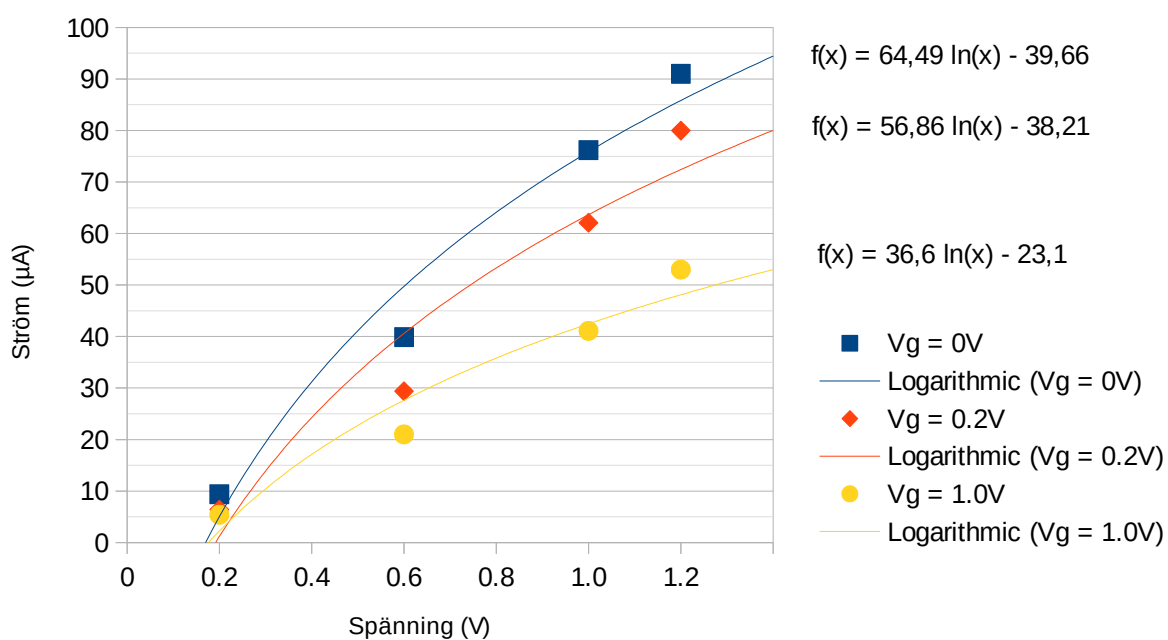


Resultat

Transistor 1

Gate V_G (V)	Drain V_D (V)	Ström I_D (μA)
0.0	0.2	9.4

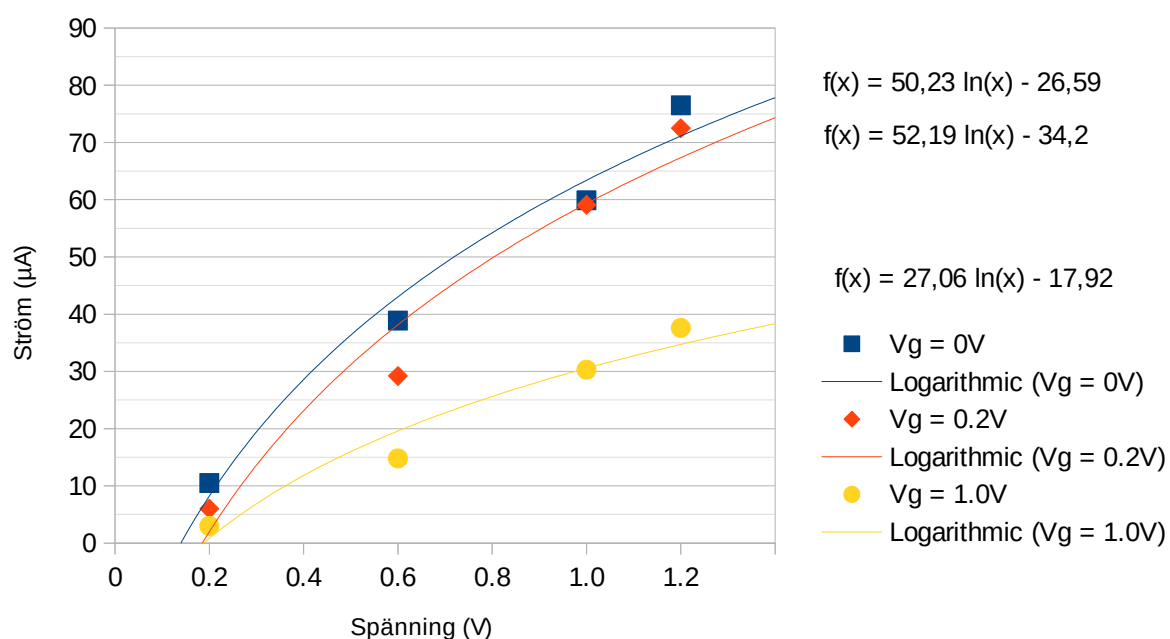
Gate V_G (V)	Drain V_D (V)	Ström I_D (μA)
0.0	0.6	39.9
0.0	1.0	76.2
0.0	1.2	91.0
0.2	0.2	6.4
0.2	0.6	29.4
0.2	1.0	62.1
0.2	1.2	80.0
1.0	0.2	5.4
1.0	0.6	21.0
1.0	1.0	41.1
1.0	1.2	53.0



Transistor 2

Gate V_G (V)	Drain V_D (V)	Ström I_D (μA)
0.0	0.2	10.5
0.0	0.6	38.9
0.0	1.0	59.5
0.0	1.2	76.5
0.2	0.2	6.0

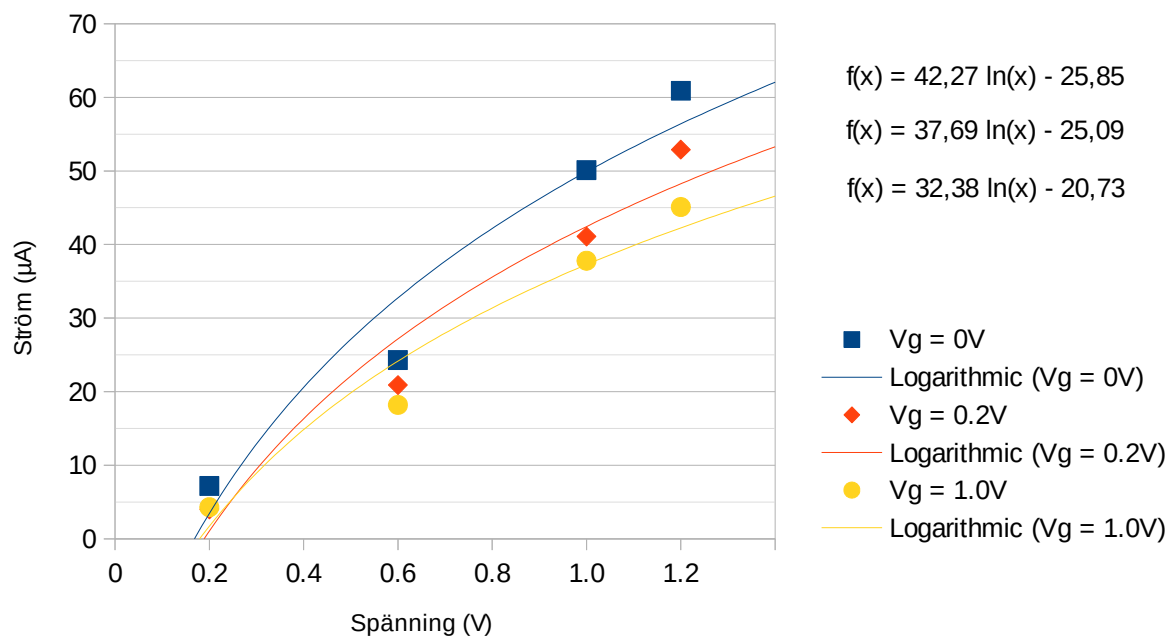
Gate V_G (V)	Drain V_D (V)	Ström I_D (μ A)
0.2	0.6	29.2
0.2	1.0	59.1
0.2	1.2	72.5
1.0	0.2	3.0
1.0	0.6	14.8
1.0	1.0	30.3
1.0	1.2	37.6



Transistor 3

Gate V_G (V)	Drain V_D (V)	Ström I_D (μ A)
0.0	0.2	7.2
0.0	0.6	24.3
0.0	1.0	50.1
0.0	1.2	60.9
0.2	0.2	4.0
0.2	0.6	20.9
0.2	1.0	41.1
0.2	1.2	52.9
1.0	0.2	4.3

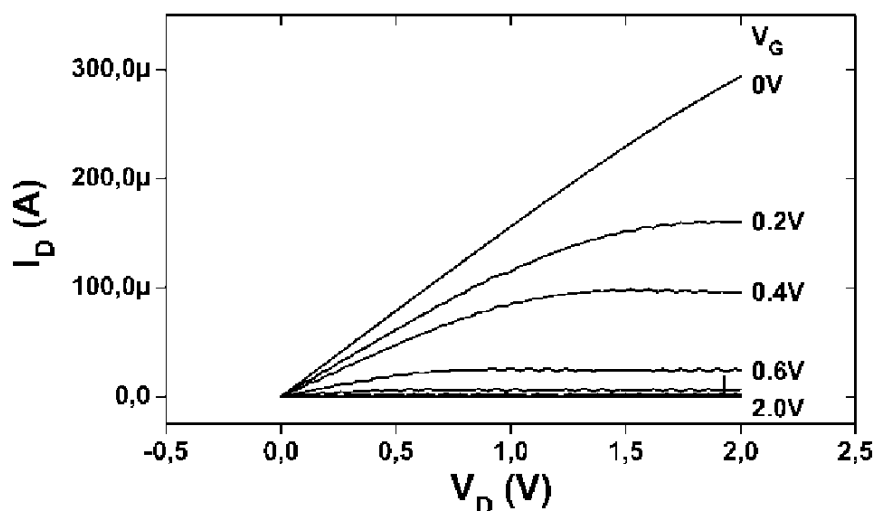
Gate V_G (V)	Drain V_D (V)	Ström I_D (μ A)
1.0	0.6	18.2
1.0	1.0	37.8
1.0	1.2	45.1



Diskussion

Slutsatser och felkällor

Vi skapade resultatkurvorna genom logaritmisk regression av mätvärdena, då tidigare rapporter visat på en sådan kurva (Nilsson, Havener etc.). Vi jämförde dem med den graf som presenterats i David Nilssons rapport (2005, s.29). Våra kurvor var ungefär vad vi förväntade oss, eftersom de i sin böjning var någorlunda lika dem i nämnda rapporten. Derivatan (förändringshastigheten) $f'(x)$ är som störst vid de lägre värdena på V_D och avtar därefter med högre spänningar. Däremot avtar I_D i deras kurvor fortare när V_D ökar om spänningen $V_G \neq 0$.



Vi ser tydligt att avvikelserna från kurvan ibland kan vara relativt stora. I dem extrema fallen rör det sig om cirka $\pm 10 \mu A$ i avvikelse från regressionen. Dessa avvikelser bedömer vi dock som slumpmässiga och inte systematiska. Noggrannheten kan brista på grund av att värdena på I_D hade svårt att stabilisera sig. Anledningen kan vara att med väldigt små strömmar kan vissa, kanske till synes oviktiga, omständigheter göra påverka resultatet relativt mycket. Exempelvis kan det påverka resultatet om vi skulle flytta något på kablarna. Det bör också nämnas att spänningsaggregaten brister i noggrannhet när det kommer till så små spänningsskillnader mellan olika mätningar.

Vi kan se en skillnad i att med samma spänningar på både V_D och V_G har grafen i rapporten högre värden på I_D än vad vi har i vår graf. Anledningen till detta kan rimligen antas vara att våra respektive transistorer helt enkelt är två olika byggen. Vi vet inte vilka mått dem använde i konstruktionen eller vilken elektrolyt de använde. Dessutom finns många mindre faktorer som kan ge, till synes, stora stora skillnader när det kommer till så små strömmar som det handlar om.

För nästan alla mätvärden är I_D större på Transistor 1 än 2 samt på 2 än 3. Detta var till vår förvåning då dem två senare var våra omkonstruktioner av den första. Transistor 3 byggdes enligt rekommendationer gällande areaförhållanden från en rapport, vilket tidigare nämnts. Den borde ge högre värden på I_D , men kanske att vi gjorde kanalen till gate för smal och på så vis bromsar strömflödet.

När vi mätte på transistor 3 kunde vi se hur polymern färgades mer blå, men enbart i transistorkanalen mellan source och drain, där elektrolyten ligger på plasten. Färgändringen sågs dock enbart vid högre spänningar på V_G (ex. 1.2V) och alltså inte på dem två första transistorerna.

Nämnvärt är också att vi fick uppfattningen att transistoren har mycket långa "switch tider". Vi genomförde inga ordentliga mätningar på dessa tider men noterade att det kunde röra sig om uppåt 20 sekunder från att spänningsaggregaten stängdes av tills $I_D = 0A$.

Användningsområden och nackdelar

Vad kan nu en transistor av denna typ användas till? Varför skulle den vara bättre än dem som idag oftast sitter i all elektronik idag? Den har flera fördelar i jämförelse med andra sorter av transistorer. Det hävdas att exempelvis sensorer ska vara mycket billigare att tillverka om dem baseras på denna transistortyp (Nilsson, 2005, s.35). Till skillnad från fälteffekt transistorer

kräver inte denna extremt små dimensioner i konstruktionen. Det är alltså möjligt att bygga stora, men också väldigt små komponenter. I jämförelse kan de också användas med lägre spänningar (Isaksson, 2006, s.1).

En nackdel med organiska elektrokemiska transistorer är att de är långsamma, vilket tidigare nämnts att vi noterade i laborationen. Materialen är dessutom känsliga mot exempelvis ändringar i fuktighet, degradering och över-oxidation (Isaksson, 2006, s.1). Därför kan ifrågasättas hurvida komponenter konstruerade av dessa material kommer vara fungerande längre tidsperioder.

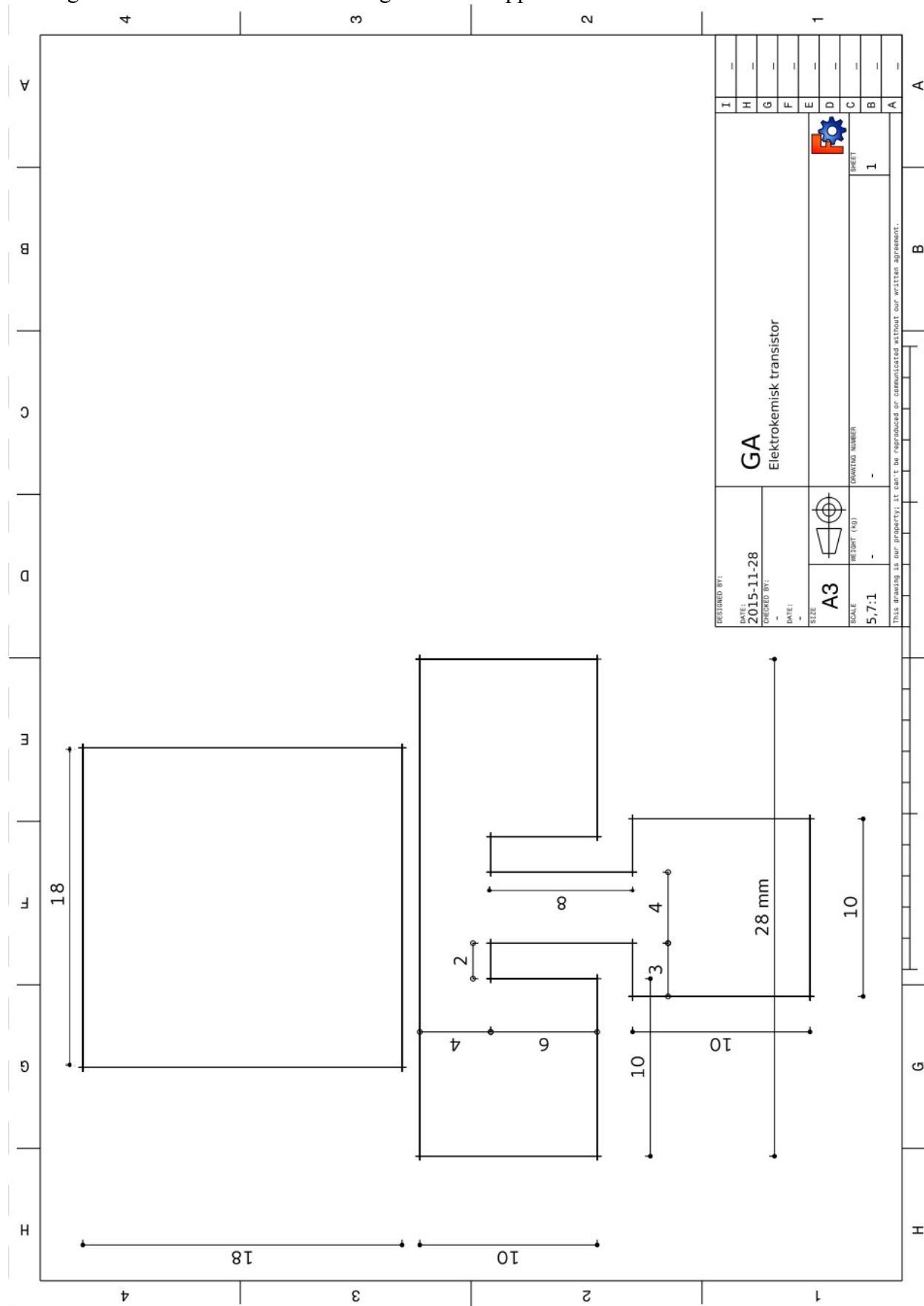
Dessa transistorer skulle i de flesta situationer inte kunna ersätta kiseltransistorer, men det kan finnas andra användningsområden. Materialen som används är unika och kan ge möjlighet att bygga ny typ av apparatur. Ett användningsområde för dessa transistorer som det talas om är biosensorer. Dessa sensorer används inom exempelvis läkemedelsindustrin, medicinsk diagnos och även på flygplatser för att detektion av narkotika och sprängämnen. Tillverkningen blir också billig då klassiska trycktekniker kan användas. Enligt en studie (Basiricò, 2012) ska vanlig bläckstråleteknik vara tillräckligt robust för att användas vid tillverkning av transistorer baserade på PEDOT:PSS.

Källförteckning

- Basiricò, Laura, 2012 University of Cagliari, *"Inkjet Printing of Organic Transistor Devices"*.
- Havener, Robin, 2007 Cornell University NY USA, *"Freeform Fabrication of Organic Electrochemical Transistors"*.
- Isaksson, Joakim, 2006, *"The Organic Electrochemical Transistor"*, LAB TNE049.
- Jeppson, Kjell O. elektrolyt (u.å. b). Nationalencyklopedin.
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/elektrolyt> (Hämtad 2016-03-12)
- Jeppson, Kjell O. transistor (u.å. a). Nationalencyklopedin.
<http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/transistor> (Hämtad 2015-12-07)
- Learning about Electronics. Types of Transistors (u.å.).
<http://www.learningaboutelectronics.com/Articles/Types-of-transistors.php> (Hämtad 2016-01-16)
- Nilsson, David, 2005 Norrköping, *"An Organic Electrochemical Transistor for Printed Sensors and Logic"*.
- Nilsson, David, Chen Miaoxiang, Kugler, Thomas, Remonen, Tommi Armgarth, Mårten, Berggren, Magnus, 2002, *Advanced Materials* 14 (s. 51-54), *"Bi-stable and Dynamic Current modulation in Electrochemical Organic Transistors"*.
- Wikipedia, 2015, Spänningsreglerare.
<https://sv.wikipedia.org/wiki/Sp%C3%A4nningsreglerare> (Hämtad 2016-04-04)

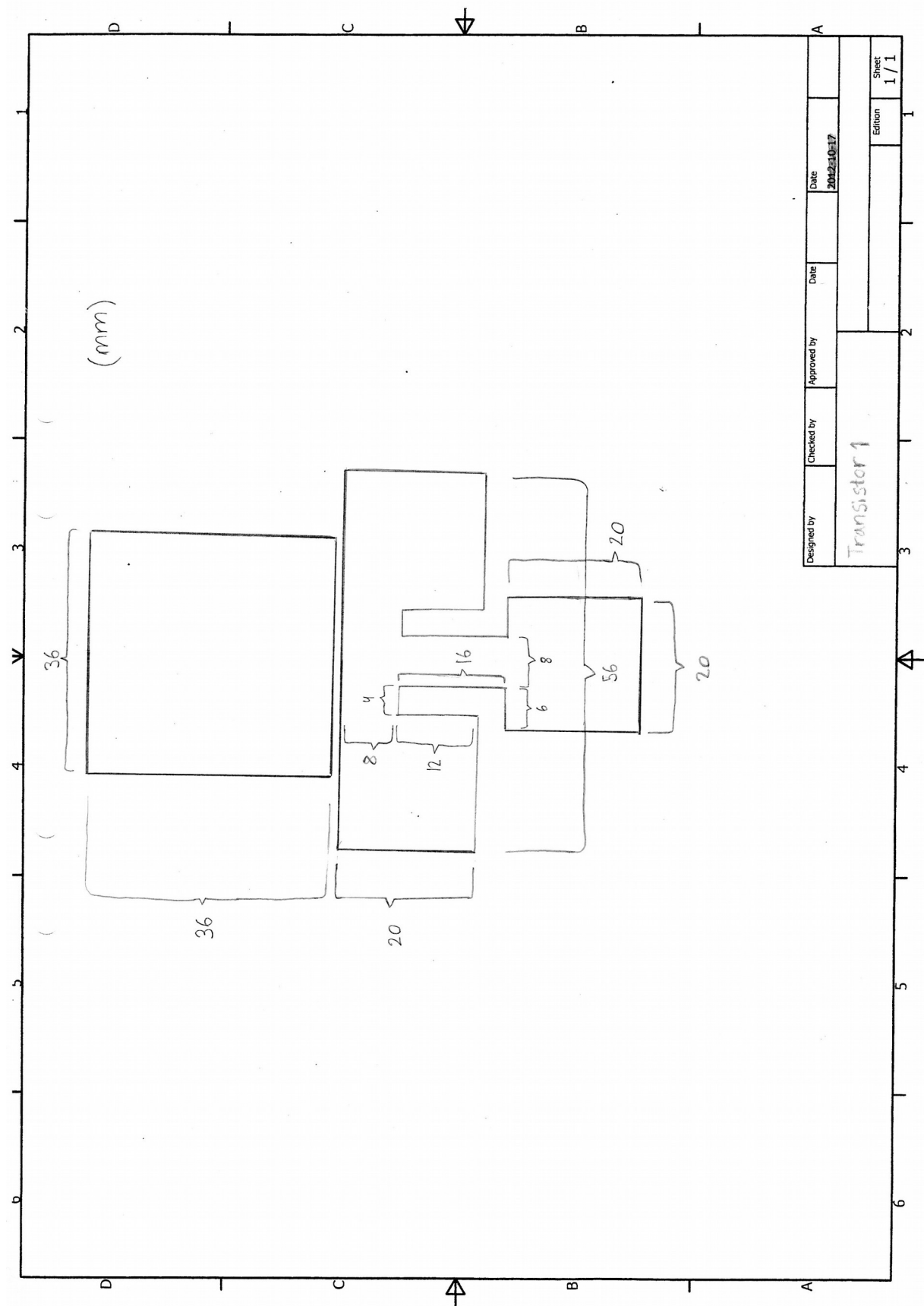
Bilaga 1

Ritning av transistor som den var i originalmått i rapporten. Mått i millimeter.



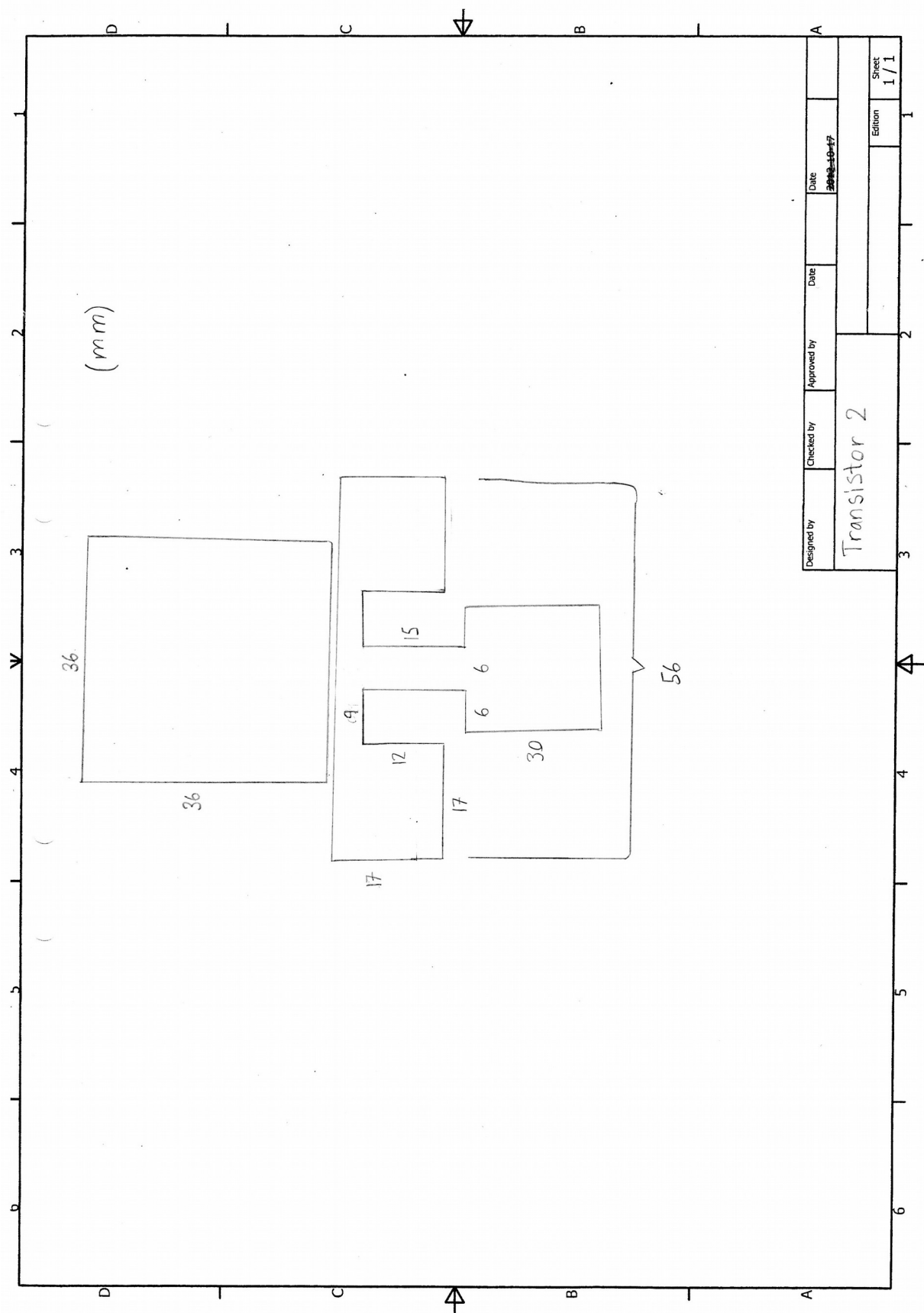
Bilaga 2

Ritning av transistor 1 med mått i millimeter.



Bilaga 3

Ritning av transistor 2 med mått i millimeter.



Bilaga 4

Ritning av transistor 3 med mått i millimeter.

