



Memristive egenskaper i slimsoppen *Badhamia utricularis*

Forfattere: Max Folstad Andersen og Ronja Lem Hetland, Ullern videregående skole

*Memristorer kan effektivisere og forbedre digitale prosesseringsenheter. En memristor er en elektrisk komponent der motstanden gjennom komponenten avhenger av den tidligere strømmengden som har gått igjennom den. Hypotesen var at slimsoppen har memristive egenskaper. Vi fikk slimsoppen *Badhamia utricularis* til å danne en bro mellom to elektroder, og det ble sendt strøm gjennom preparatet for å teste memristive egenskaper. Det ble gjort flere metodefunn knyttet til elektrodene og kapasitans. Av studien var det ikke mulig å bekrefte eller avkrefte memristive egenskaper. Videre forskning er nødvendig.*

Introduksjon

I dagens høyteknologiske samfunn er elektriske komponenter svært viktige. Datamaskiner, mikrokontrollere og chiper har mange bruksområder, og det jobbes aktivt for å forbedre de elektriske kretsene som inngår i disse komponentene. I dag brukes det i hovedsak transistorer i digitale prosessorer. Memristor er en elektrisk komponent som ble teorisert i 1971 (Chua, 1971), og som senere har blitt vist at kan effektivisere og forbedre elektronikk til ulike oppgaver (Chua, Tetzlaff & Slavova, 2020). Blant annet kan memristorer minke beregningstid for oppgaver der nøyaktighet ikke er så viktig. Memristorer kan fungere som både prosesseringsenhet og minne, noe som vil være både energibesparende og effektiviserende (Choi, Hwang, Jeong, Kim, & Kim, 2016). Dette har mulighet til å gjøre datamaskiner mer lik en menneskehjerne, altså alle komponentene i ett, heller enn å ha dem adskilt som i dagens datamaskiner. Dette kan ha mange fordeler. Blant annet øker det effektiviteten, minker energiforbruket og minker antall komponenter som kreves. Memristorer kan og gjør at datamaskinen lagrer tilstanden selv om strømmen forsvinner, som minker tid ved oppstart og gjør i tillegg at den ikke trenger å bruke strøm når den ikke er i bruk (Choi, Hwang, Jeong, Kim, & Kim, 2016). Sistnevnte kan være spesielt nyttig i svært energikrevende prosesseringsenheter der det er viktig å holde på tilstanden til maskinen.

Memristorer blir omtalt som den fjerde fundamentale elektriske komponent. De andre fire er motstand, kondensator og induktor. Memristorer har den egenskapen at motstanden gjennom komponenten avhenger av den tidligere strømmengden som har gått igjennom dem. Dette gjør det mulig å lagre et binært signal.

Den første memristoren ble syntetisert i 2008 (Snider, Stewart, Strukov, & Williams, 2008). Selv om nye metoder for å produsere memristorer har kommet, er de ennå dyre og vanskelig å produsere. Derfor har man sett til naturen og lett etter memristive egenskaper i organisk materiale. Egenskapen har allerede blitt påvist i menneskehud (Grimnes, Johnsen, Lütken, & Martinsen, 2010) og i slimsopp *Physarum*

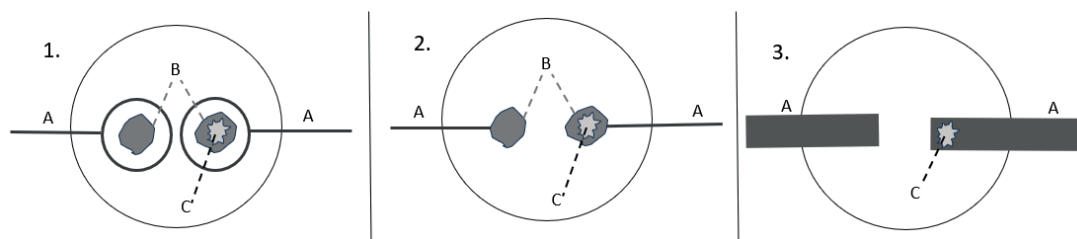
polycephalum (Gale, Adamatzky, & Costello, 2014). Slimsopp er enkelt å dyrke og masseprodusere og kan derfor være en billig memristor. Artikkelen publisert på memristive egenskaper i *P. polycephalum* har noen mangler i metoddelen. Denne studien har som mål å replikere forsøket gjort på *P. polycephalum*, men i en annen art av samme familie; *Badhamia utricularis* og presentere en mer komplett metode som kan brukes i testing av memristive egenskaper i arter av Physaraceae.

Metode

Metoden brukt i denne studien er tilsvarende som i artikkelen til Gale, Adamatzky, & Costello.

B. utricularis ble grodd i petriskåler fylt med et 1-2 mL lag med 1-2 masseprosent agar (VWR Chemicals, agar agar pulver, 20767.232). Kulturene ble flyttet over til nye petriskåler hver tredje dag, dette for å unngå kontaminering. Havregryn ble brukt som næringskilde og destillert vann ble pipettert over og rundt slimsoopen.

Flere oppsett ble testet for å sende strøm gjennom slimsoopen. Se figur 1. Først ble oppsett 1 brukt med en elektrode av cm sølvtråd (0,5 mm) tvunnet sammen med en ring i enden med diameter cm. Oppsett 1 var tilsvarende elektrodeoppsett som i beskrevet i artikkelen til Gale, Adamatzky, & Costello. Så ble oppsett 2 brukt med en elektrode av cm sølvtråd (0,5 mm) tvunnet sammen uten en ring i enden med. Til sluttet ble oppsett 3 brukt med elektroder av aluminiumsfolie med lengden cm og bredden cm limt fast i petriskålen. Av de tre oppsettene ga 2 og 3 best resultater og 3 var mest robust ettersom elektrodene hang fast i skålen.

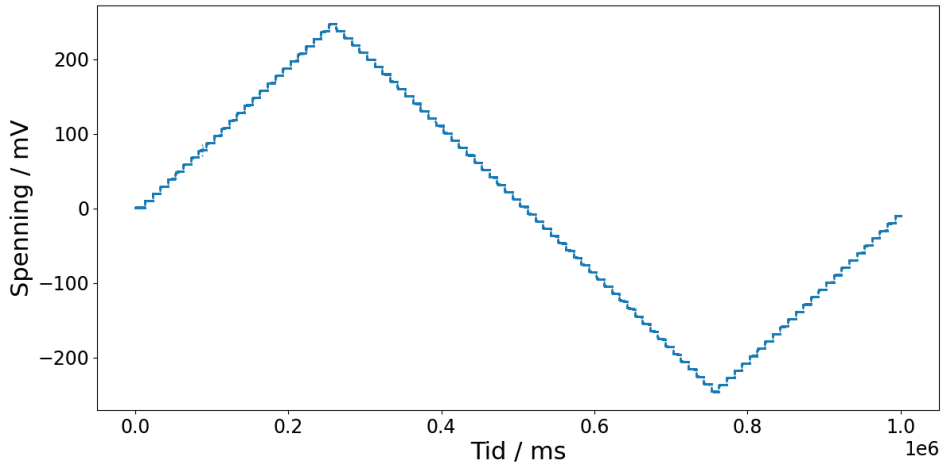


Figur 1. Skisse av de tre oppsettene. A er elektroden (1, 2 sølvtråd, 3 aluminiumsfolie), B er agar og C er en bit slimsoopp skåret ut av en petriskålene med slimsoopp.

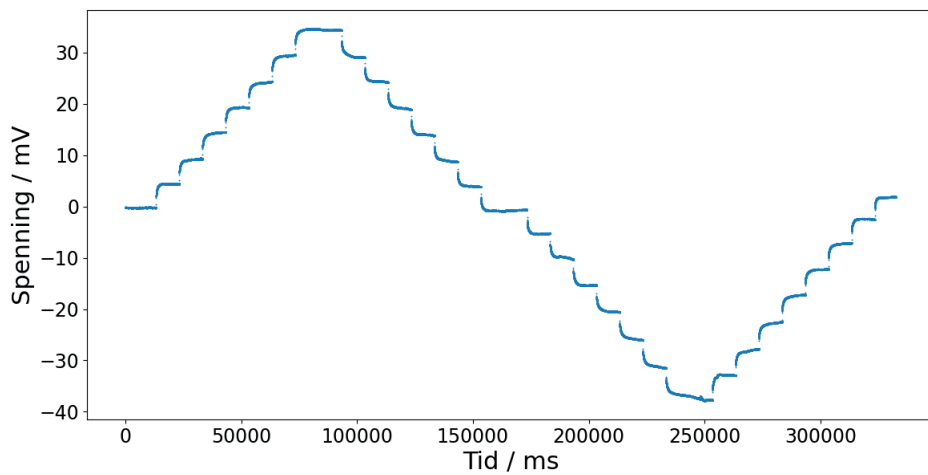
Etter å ha blitt plassert på elektroden, fikk *B. utricularis* vokse over til den andre elektroden og danne en bro mellom elektrodene. Det ble lagt havregryn på begge elektrodene og mellom for å få til vekst i ønsket retning. Dette fordi *B. utricularis* foretrekker å vokse på organisk materiale og derfor unngår å vokse på plast. Broen av havregryn skapte i etterkant problemer med at den ledet strøm.

En AxoClamp 2b ble koblet til DPA 2F signalforsterker koblet til en EPMS 07 Housing (npielectronic). DPA 2F var satt til fem ganger forsterkning. DPA 2F ble koblet til en Analogue Expansion (CED) som digitaliserte signalet. Signalet ble logget med programmet Spike 2 (CED). En pappboks dekket med aluminiumsfolie ble brukt som faradaybur og lagt over petriskålen når protokollen kjørte.

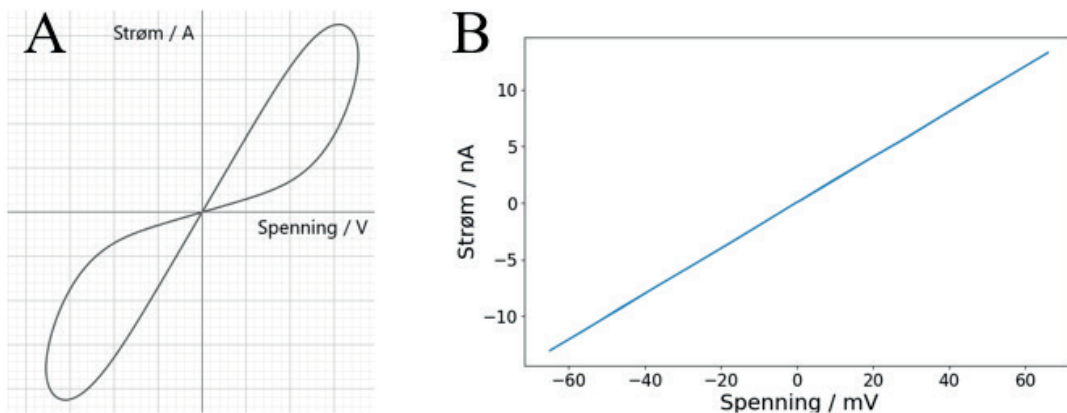
Hele oppsettet ble testet med to motstander koblet i parallell, for å se at motstanden var konstant, se figur 4 B.



Figur 2. Diskretisert spenningsbølge med 80 steg, steglengde på 5 mV og fire sekunder mellom hvert steg.



Figur 3. Diskretisert spenningsbølge med 28 steg, steglengde på 5 mV og fire sekunder mellom hvert steg.



Figur 4. A viser en teoretisk motstandsgraf typisk for en memristor. B viser en motstandsgraf for en ohmsk motstand.

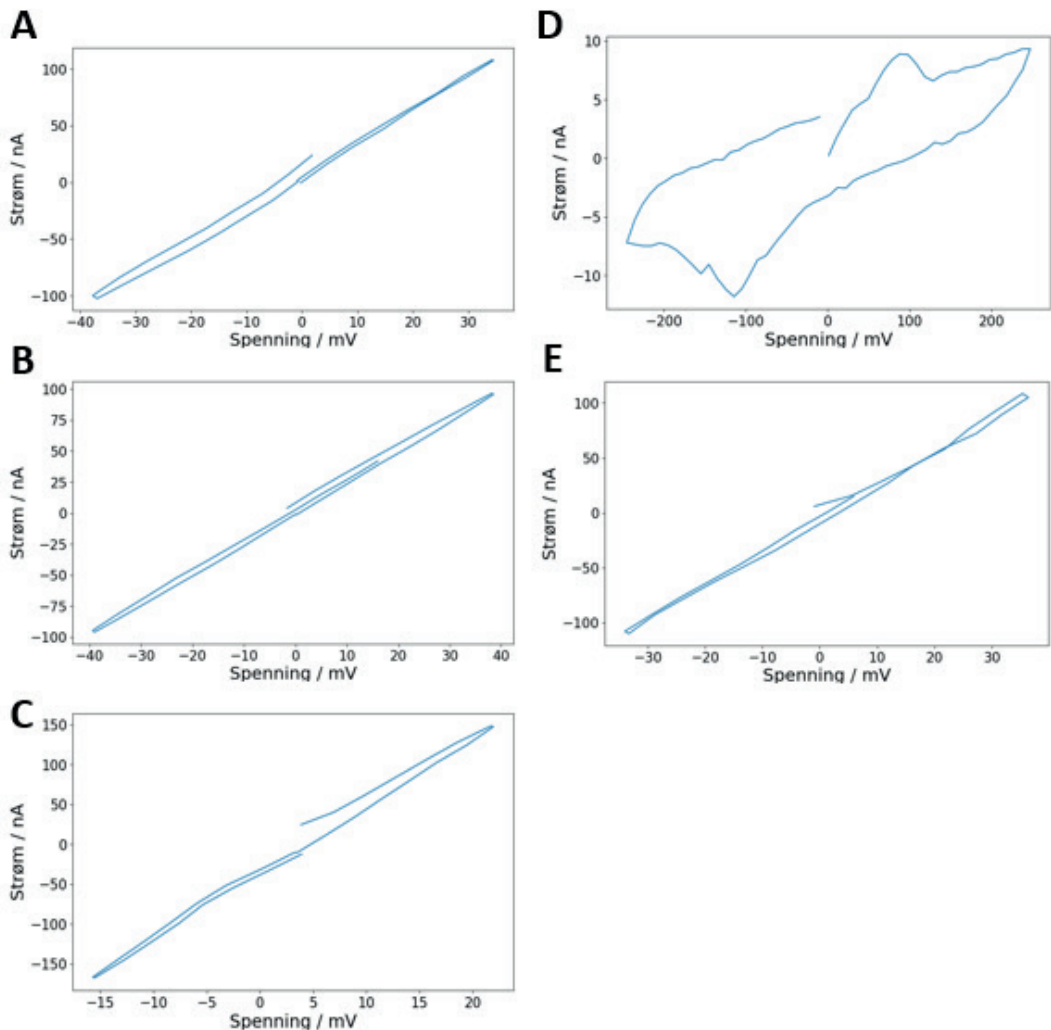
Kapasitans er opphopning av ladninger i et stoff og kan føre til en ikke-lineær motstand i stoffet. Gjennom pilottester ble det funnet at slimsoppen forårsaker en del kapasitans som gjør at deler av forsøket måtte designes for å unngå dette.

I utgangspunktet ble det brukt en protokoll med en diskretisert spenningsbølge (figur 2) med 80 steg og 5 mV steglengde. Ulike tider mellom hvert steg ble testet for å minske innvirkningen av kapasitans. Det ble benyttet en protokoll med fire sekunder mellom hvert steg ettersom mesteparten av kapasitansen da var borte. Antall steg ble tilpasset etter motstanden i preparatet for å holde seg innenfor måleområdet til utstyret (ca. nA). For det første preparatet testet ble 80 steg brukt. For senere preparater ble 28 steg (figur 3) brukt ettersom strømmen nådde over 100 nA på syv steg, som er nært maksimalstrømmen utstyret kan måle.

Dataanalyse ble gjort med Python 3.12.0 (amd64, Windows 10), kode vedlagt (vedlegg 1). Data utenfor protokollen ble fjernet og strøm ble plottet mot spenning. Ikke-lineærhet i motstand ble ikke kvantifisert grunnet lite datagrunnlag.

Resultater

Grunnet et teknisk krevende forsøk ga kun fem preparater meningsfulle data, se figur 5. Samtlige viser en endring i motstand og er altså ikke ohmske motstander. Kvantifisering av endring i motstand er ikke gjort grunnet lite datagrunnlag.



Figur 5. Motstandsgrafene til fire preparater *B. utricularis*. Preparat D hadde en protokoll på 80 steg mens preparat A, B, C og E hadde en protokoll på 28 steg.

Diskusjon

Av resultatene er det ikke mulig å konkludere om *B. utricularis* har memristive egenskaper. Noen av preparatene viser en ikke-lineær motstandsgraf, som er et interessant fenomen i seg selv, men betyr ikke nødvendigvis at preparatene er memristorer. Motstandsgrafene går hverken gjennom origo eller er lukket, noe som er kjennetegn ved en memristorkurve (figur 4). At motstand ikke er lineær kan skyldes kapasitans, men ettersom kapasitansen var lav, er det mulig *B. utricularis* har en ikke-lineær motstand. Dette er et fenomen som i seg selv er interessant, men grunnet lite datagrunnlag er det ikke mulig å konkludere noe sikkert knyttet til elektriske egenskaper ved *B. utricularis*. Forsøket viser at videre forskning er nødvendig for å få en bredere forståelse av *B. utricularis* og avgjøre om den har memristive egenskaper.

Vi gjorde flere viktige funn angående metode. Elektrodeoppsettet med aluminiumsfolie beskrevet i metoden ble funnet til å være godt egnet til forsøket. Samtidig hadde det svakheter gjennom at det var utfordrende å få *B. utricularis* til å migrere over til den andre elektroden og danne en bro. Dette trolig mye grunnet infeksjoner av ulike sopp og bakterier som i hovedsak skyldes at forsøket ble gjennomført på en skole hvor det ikke var mulig å holde det så sterilt som vi ønsket.

Vi fant også at kapasitans har en stor innvirkning på motstanden og må i eventuell videre studier minskes og helst elimineres. Av denne studien var det ikke mulig å konkludere med en god måte å unngå virkningen fra kapasitans. Det ble funnet at om det er noen sekunder mellom hvert steg i protokollen, vil kapasitansen minke, men det ønskelige er å ha en kortest mulig protokoll med minst mulig påvirkning fra kapasitans. Trolig er ikke innvirkningen av kapasitans stor nok til å ha en innvirkning om det er nok data, derfor burde videre forskning fokusere på å få mer data.

Flere av preparatene viste en ikke-lineæritet i motstand, et fenomen som kan gi opphav til ulike elektriske egenskaper, som for eksempel memristive egenskaper. Videre forskning er nødvendig for å få en bedre forståelse av *B. utricularis* sine elektriske egenskaper og dekke kunnskapshull knyttet til både arten, men også den memristive egenskapen som konsept. Syntetiske memristorer er ennå dyre og det er ennå vanskelig å fremstille memristorer av biologiske materialer. Derfor vil det være nyttig å finne memristive egenskaper i flere arter slik at det kan gi bredere mulighet til å produsere komponenter i stor skala til lav pris. Memristorer kan ha stor innvirkning på digitale komponenter i de kommende årene og en bred forståelse av konseptet er viktig. De kan revolusjonere datamaskiner ved å kombinere prosessering-, kontrollering- og minne-enhetene heller enn å ha dem adskilt som i tradisjonelle datamaskiner. Noe som både senker energibruket og øker effektiviteten til datamaskinen.

Referanser

- Choi, B. J., Hwang, C. S., Jeong, D. S., Kim, K. M. & Kim, S. (2016). Memristors for Energy-Efficient New Computing Paradigms. *Advanced Electronic Materials*, 2(9). <https://doi.org/10.1002/aelm.201600090>
- Chua, L. O. (1971). Memristor-The Missing Circuit Element. *Transactions on circuit theory*. CT-18(5).
- Chua, L. O., Tetzlaff, R. & Slavova, A. (2020). *Memristor Computing Systems*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90582-8>
- Grimnes, S., Johnsen, G. K., Lütken, C. A. & Martinsen, Ø. G. (2010). Memristance in human skin. *Journal on Physics: Conference series* 224. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/224/1/012071>
- Gale, E., Adamatzky, A. & Costello, B. D. L. (2014). Slime Mould Memristors. *BioNanoScience*. <https://doi.org/10.1007/s12668-014-0156-3>
- Snider, G. S., Stewart, D. R., Strukov, D. B. & Williams, R. S., (2008). The Missing Memristor Found. *Nature*, 453(7191). <https://doi.org/10.1038/nature06932>