

Intelligente materialer kunstige muskler

En opsigtsvækkende type af "intelligent materiale" kan stå overfor et kommercielt gennembrud i milliardklassen. Dielektriske elektroaktive polymerer (DEAP) kan fx bruges som kunstige muskler, som energi-høstere eller i ultratynde højttalere. For til fulde at realisere potentialet skal en række processer i produktionen dog forbedres.

Forfattere



Frederikke
Bahrt Madsen,
ph.d.
-studerende.

Dansk Polymer Center,
DTU Kemiteknik, DTU
frbah@kt.dtu.dk



Anders
Egede
Daugaard,
adjunkt,

Dansk Polymer Center,
DTU Kemiteknik, DTU
adt@kt.dtu.dk



Søren
Hvilsted,
professor,
Dansk

Polymer Center, DTU
Kemiteknik, DTU
sh@kt.dtu.dk



Anne Lade-
gaard Skov,
lektor,
Dansk

Polymer Center, DTU
Kemiteknik, DTU.
al@kt.dtu.dk

Det har i mange år været en udfordring for forskere og ingeniører at udvikle et materiale, der grundlæggende fungerer på samme måde som en muskel. Dielektriske elektroaktive polymerer (DEAP) er en type intelligent materiale, der har vist sig at have de rette egenskaber. Verdens førende producent af DEAP-materialer er den danske virksomhed Danfoss A/S, som siden 1995 har været involveret i teknologien. Siden har det vist sig, at DEAP-teknologien har potentiale til at blive anvendt inden for mange andre områder – fx indenfor robotteknologi, proteser, pumper, ventiler, bølgeenergi-generatorer og ultratynde højttalere.

Motor og energi-høster

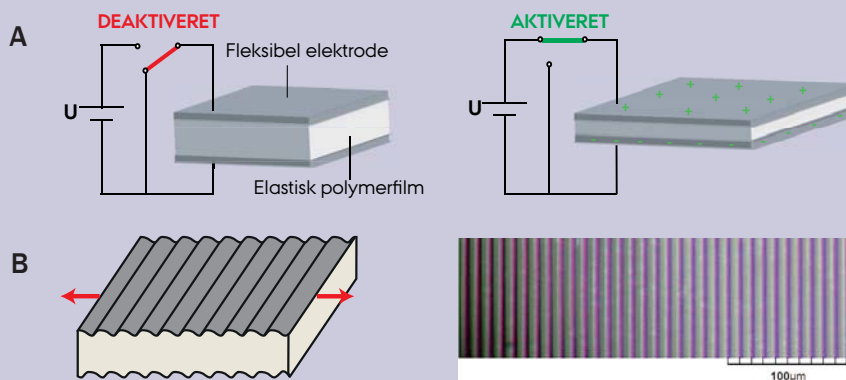
Den meget store spændevide i de mulige anvendelser skyldes det simple og fleksible funktionsprincip i DEAP-teknologien. En DEAP består sædvanligvis af en tynd elastisk polymerfilm (en såkaldt elastomer), der er anbragt imellem to ultratynde og fleksible elektroder. Elektroderne består af ledende materialer – ofte ædelmetaller som guld eller sølv. Når der sættes en elektrisk spænding over elektroderne, vil der dannes elektriske ladninger, der er positive på den ene elektrode og negative på den anden elektrode. Ladningerne med de modsatte fortegn vil tiltrække hinanden og dermed presse elektroderne sammen. Polymerfilmen bevarer sit volumen (man siger, at den

er inkompressibel) og den vil derfor udvides i den tværgående retning af det elektriske felt, og arealet af DEAP'en bliver forøget. Den elektriske energi er dermed blevet omdannet til mekanisk energi.

En DEAP kan også anvendes til at generere energi. Det kan gøres ved at strække materialet og derefter oplade den strakte polymerfilm. Når den elastiske polymerfilm efterfølgende vender tilbage til sin oprindelige form, arbejder de mekaniske kræfter imod det elektriske felt, og den elektriske energi vil nu blive forøget. Den opladede energi kan derefter udvindes.

Mikrostrukturer forbedrer ydeevnen

I dag har Danfoss Polypower A/S, som blev stiftet som et datterselskab af Danfoss i 2008 for at udvikle og producere DEAP-materialer, udvidet deres oprindelige koncept og producerer nu DEAP-materialer til brug i både kunstige muskler og de mange andre anvendelsesområder. Virksomheden har specielt haft succes med at bruge materialerne som bevægelsessensorer og til aktuatorer, som er en type motorer, der kan bruges til at aktivere, bevæge eller styre et system. Virksomheden har udviklet en revolutionerende måde at producere DEAP-filmene på, hvor polymerfilmen bliver imprægneret med mikroskopiske overfladestrukturer, der forbedrer fil-



DEAP-teknologien

A. Skematisk illustration af princippet bag DEAP-teknologien. Når en spænding sættes over elektroderne, vil de dannede ladninger tiltrækkes og dermed udvide materialet ved at presse den elastiske polymerfilm sammen. Når spændingen kobles fra, vender den strakte polymerfilm tilbage til sin oprindelige form.

B. Illustration af en DEAP-polymerfilm med mikroskopiske bølgestrukturer med forlængelsesretningen vist. Th.: Mikroskopbillede af Danfoss Polypower DEAP-polymerfilm med mikrostrukturer. Perioden mellem hver top er 10 µm og dybden er 5 µm, men kan varieres alt efter de ønskede specifikationer.

som og energi-høstere

mens ydeevne som aktuator og generator drastisk. Det skyldes, at mikrostrukturerne styrer forlængelsen af materialet til kun at være i én retning, da stivheden på tværs bliver meget højere end på langs på samme måde som bølgekarton. Mikrostrukturerne giver også materialet en større overflade, hvilket betyder, at elektroderne kan forlænges mere end på en tilsvarende ustruktureret overflade.

Danfoss Polypower sælger allerede nu deres DEAP-materialer til brug som bevægelsessensorer, men før DEAP-teknologien kan endeligt kommercialiseres som kunstige muskler, aktuatorer og energi-generatorer er der dog stadig flere udfordringer, der skal løses. Det drejer sig blandt andet om at optimere produktionen af DEAP-materialerne og forbedre det elastiske polymermateriale.

Anvendelser af DEAP-teknologien



Wavestar bølgekraft-testanlæg ved Hanstholm. Anlægget udvinder energi fra bølgerne ved hjælp af store flydere, der følger bølgenes bevægelser. Flyderne er fastgjort til en platform, der er fastnaglet på havbunden. Flydernes bevægelser overføres i dag til en generator ved brug af hydrauliske systemer. Hydraulikken giver dog anledning til store energitab, og derfor ønsker man at udskifte hydraulikken med DEAP-teknologien, hvormed man vil kunne opnå næsten 100 % effektivitet.

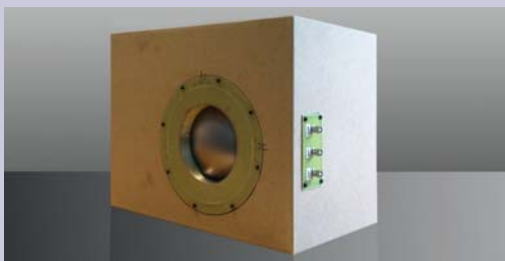


DEAP-teknologien kan anvendes til at stimulere ansigtsbevægelser hos patienter med lammelser. Her ses en illustration af en øjenlågsslynge tilknyttet en DEAP, der i dette tilfælde virker som en kunstig muskel. Strømforsyningen og den kunstige muskel er fastgjort i tindingen. Når det fungerende øjenlåg blinker, sendes et signal via den elektriske sensor (grøn) til batteriet om at aktivere den kunstige muskel i den lammede side. Denne teknologi forventes at være tilgængelig inden for de næste 5 år.



DEAP-teknologien er meget lovende til displays til blindskrift. Traditionelle omskiftelige blindskrifts-displays bruger keramiske materialer til at flytte stifter op og ned for at skabe bogstaver. Keramiske materialer er dog tunge, vanskelige at arbejde med og meget dyre. DEAP-materialerne er derimod lette, fleksible, nemme at arbejde med og billige at fremstille. Dermed vil prisbillige blindskrifts-displays snart være en realitet.

Demonstrationsmodel lavet af Yanko Design.
<http://www.yankodesign.com/2009/04/17/braille-e-book/>



B&O har demonstreret, at DEAP-teknologien kan bruges til at generere lyden i højtalere. På billedet ses en af deres prototyper. Fordelen ved DEAP-højtalere er deres lave vægt, deres skalerbarhed til små og store områder og deres evne til at kunne bruges på både flade og ikke-flade områder. Højtalere kan derfor bruges som tynde skærme og som buede højtalere til mange forskellige applikationer herunder til aktiv støjdemping.

Udfordringer i produktionen

En konkret udfordring for en storskalaproduktion er, hvordan de meget tynde polymerfilm kan håndteres. Tykkelsen af filmen svarer til et hår (ca. 30 µm), og derfor er det en delikat proces at tage filmen af det underlagsbånd, hvor den hærder, uden at den elastiske film går i stykker.

Mikrostrukturene på overfladen af polymerfilmen gør processen endnu mere vanskelig, da overfladearealet er meget større end på flade film, og det giver en meget kraftig binding imellem film og underlag. Når filmen skal tages af underlaget er det dermed nødvendigt at trække i den med en større kraft, hvilket alt andet lige forøger sandsynligheden for, at filmen går i stykker. Aftagningen kan også påvirke polymerfilmens ydeevne, fordi der kan opstå mindre defekter i filmen.

En anden udfordring i produktionen er, at der til traditionelle polymerfilm skal bruges store mængder opløsningsmidler i processen, hvor det uheldige polymermateriale påføres det mikrostrukturede underlagsbånd, og disse opløsningsmidler skal recirkuleres. Det fordyrer produktionen.

Kagerulle hjælper på vej

Ved DTU Kemiteknik arbejder vi sammen med Danfoss Polypower om at udvikle en ny metode til fremstilling af polymerfilmene med mikrostrukturer. Metoden går ud på at varmepræge polymerfilmen med en mikrostruktureret rulle i en løbende proces. Metoden kan sammenlignes med at anvende en kagerulle med bølgestruktur, som man ruller henover polymerfilmen. Polymerfilmen har nu den flade side ned mod underlagsbåndet og den strukturerede side opad. Det bliver dermed nemmere at tage polymerfilmen af underlagsbåndet, da det kræver mindre kraft at trække en flad film af båndet. To polymerfilm kan nu limes sammen med de flade sider mod hinanden, så filmen er struktureret på begge sider. Denne proces bruger desuden mindre opløsningsmiddel, da man kan bruge en mere tykflydende polymerblanding. Metoden er stadig på udviklingsstadiet, men det er en lovende proces på vejen mod den endelige kommercialisering af DEAP-materialerne.

Forbedring af filmen

Et andet vigtigt skridt mod kommercialisering er som nævnt optimering af selve polymerfilmene. Flere forskellige elastiske materialer kan bruges til den tynde polymerfilm. Det gælder fx silikoner som polydimethylsiloxan (PDMS), polyurethaner og akrylatklæbere kendt fra firmaet 3M. Blandt dem er silikonepolymeren PDMS særlig fordelagtig, da den har mange fremragende egenskaber som fx høj virkningsgrad og hurtig respons. En polymerfilm af silikone vil derfor udvide sig meget hurtigt efter tilføjelsen af den elektriske spænding, og samtidig går

der meget lidt energi tabt til omgivelserne. Fælles for de nævnte polymerer er dog, at de alle har en lav dielektrisk konstant. Den dielektriske konstant er et udtryk for et materiales evne til at oplagre elektrisk energi. Hvis polymeren har en lav dielektrisk konstant, er det nødvendigt med en meget høj elektrisk spænding for at opnå en tilstrækkelig forlængelse af polymerfilmen. Hvis materialet skal bruges til fx proteser er det selvsagt ikke praktisk med en høj elektrisk spænding, og det gør desuden elektronikken dyr og kompliceret.

Hvis man vil sænke den elektriske spænding, der skal bruges for at aktivere DEAP'en og få den til at bevæge sig, er der principielt tre muligheder: Man kan gøre materialet blødere, reducere tykkelsen af polymerfilmen eller fremstille materialer med en højere dielektrisk konstant.

Den største effekt på spændingen vil det have at gøre polymerfilmen tyndere, men da tykkelsen i Danfoss Polypowers produktion allerede er nede på 30-40 µm vil det være meget svært at opnå mere ad den vej. Et blødere materiale – dvs. som er mere elastisk – er også en meget stor udfordring. Det vil ofte forringe andre af materialets egenskaber som fx materialets stabilitet på længere sigt og dets rivstyrke – og desuden er det rent procesmæssigt vanskeligt at håndtere meget bløde materialer i en storskalaproduktion.

Derfor er det mest praktisk at optimere polymerfilmen ved at fremstille materialer med højere dielektriske konstanter.

Hvordan man undgår, at fyldstoffer laver ballade

Den dielektriske konstant forhøjes typisk ved at tilsætte forskellige fyldstoffer med meget høje dielektriske konstanter til polymerblandingen. Det skaber en polymerkomposit, hvor fyldstofferne fx kan være metaloxider som TiO_2 og BaTiO_3 eller ledende fyldstoffer som ekspanderet grafit, kulstof-nanorør og forskellige ledende polymerer. Kompositsystemerne har imidlertid forskellige ulemper som store varmetab til omgivelserne og reduceret elektrisk nedbrydningsstyrke. Det betyder, at materialet bryder sammen (kortsletter) og DEAP'en stopper med at fungere. Fyldstofferne har desuden en tendens til at klumpe sammen på grund af stor tiltrækningskraft mellem partiklerne. Det kan forringe de lokale mekaniske materialeegenskaber og føre til et elektrisk nedbrud af DEAP'en. Der er blevet udviklet forskellige metoder til at undgå denne sammenklumpning. Fx kan man indkapsle de ledende fyldstoffer som det eksempelvis er gjort for den ledende polymer polyanilin (PANI). PANI-partiklerne er blevet belagt med en ikke-ledende polymerskal. På den måde vil de ledende partikler ikke komme i direkte kontakt, og det er muligt at opnå en god

fordeling af partiklerne i polymerfilmen og forhindre et elektrisk nedbrud af materialet. Ved DTU Kemiteknik har vi udviklet en alternativ metode, hvor molekyler med høje dielektriske konstanter kemisk bindes ind på polymernetværket. Da molekylerne på den måde er fordelt i polymerfilmen, vil man helt kunne undgå, at de klumper sammen. Det giver en polymerfilm, der kan forlænges mere, og hvor en lavere elektrisk spænding er nødvendig for at aktivere DEAP'en.

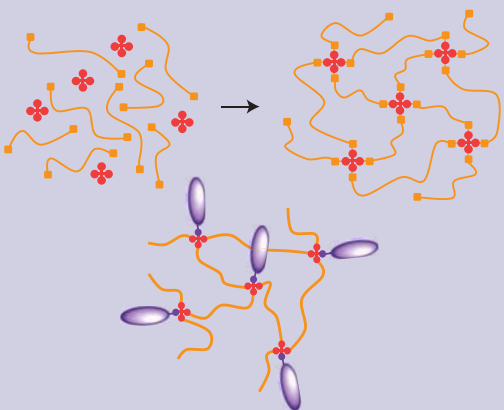
Mange indsatser

De nævnte produktions- og materialeoptimeringer er bare nogle af de initiativer Danfoss Polypower og DTU Kemiteknik arbejder på hen imod den endelige kommerialisering af DEAP-teknolo-

gien. Der arbejdes blandt andet derudover intenst på flere forskellige metoder til yderligere at forhøje polymerfilmens ydeevne ved hjælp af forskellige fyldstoffer og nye silikonesystemer. Der arbejdes også videre på at forbedre polymerfilmens evne til at slippe underlagsbåndet med forskellige overfladeaktive stoffer samt at forbedre DEAP-materialernes elektriske nedbrydningsstyrke og langtidsholdbarhed. Et stort tværfagligt projekt, hvor Danfoss Polypower, udover DTU Kemiteknik, samarbejder med forskellige virksomheder, universiteter (SDU og AAU) og institutter på DTU såsom DTU Elektro og DTU Management, skal desuden medvirke til, at alle aspekter af DEAP-teknologien modnes, så den forhåbentlig snart vil vinde indpas inden for de mange spændende anvendelsesområder. ■

Elastomerer og polymernetværk

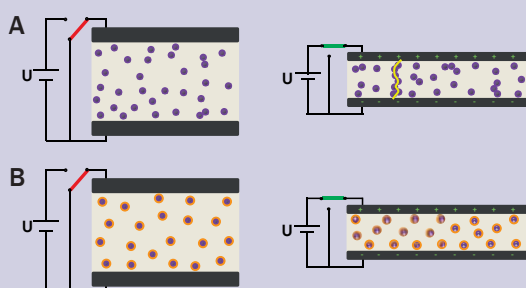
Elastomerer er polymere netværk, der dannes ved krydsbinding af lange kæder af molekyler. Netværket kan dannes ved enten bestråling med UV-lys eller ved brug af krydsbindermolekyler som vist i figuren. Før dannelsen af polymernetværket kan polymerkæderne bevæge sig uafhængigt af



hinanden. Efter krydsbindingsreaktionen (hærdningen) er polymerkæderne fastlåst i et netværk. Når materialet deformeres, vil det nu være elastisk og er i stand til at vende tilbage til sin originale form, når belastningen fjernes. Hvis polymerkæderne ikke var krydsbundet til et netværk, ville materialet blive permanent deformet ved belastning.

Illustration af et polymernetværk. Før krydsbindingsreaktionen (hærdningen) er polymerkæderne frie (tv.). Efter krydsbindingsreaktionen, hvor polymerkæderne reagerer med krydsbindermolekyler, er kæderne fastlåst i et netværk (th.). Materialet har nu helt andre egenskaber end før.

Et netværk dannet med en ny type krydsbindermolekyler, hvor molekyler med høje dielektriske konstanter (lilla ellipser) kan påsættes direkte i krydsbindingspunktet. På denne måde forhøjes materialets dielektriske egenskaber, samtidig med at sammenklumpning af partikler undgås fuldstændigt.



A. En DEAP med sammenklumpede partikler, der danner en elektrisk ledende vej gennem materialet, hvilket vil føre til elektrisk nedbrud.

B. DEAP-materiale med ledende PANI-partikler med en ikke-ledende skal omkring. Den isolerende skal forhindrer elektriske ledende veje gennem materialet. Når en spænding sættes til elektroderne, vil PANI-partikler blive polariseret og materialets dielektriske egenskaber øges på denne måde.

Forlængning

Ligningen for forlængning (aktivering) viser, hvilke parametre man kan skrue på, hvis man ønsker et polymermateriale med bedre egenskaber

til brug i DEAP-teknologi:
$$s = \frac{\epsilon_r \epsilon_0}{Y} \left(\frac{U}{d} \right)^2$$

Her er s = den relative forlængning, U er den elektriske spænding og d er tykkelsen på polymerfilmen. Y kaldes

Young's modul, og det er en størrelse, som angiver hvor blødt polymermaterialet er. ϵ_r er den relative dielektriske konstant for materialet og den fysiske konstant $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m er vakuum permitiviteten som er den dielektriske konstant for det tomme rum.

Det fremgår af ligningen, at en forhøjelse af materialets dielektriske konstant, ϵ_r , har en direkte indflydelse på forlængningen, s , og den elektriske spænding, U .

Læs mere

www.wavestarenergy.com

www.ucdmc.ucdavis.edu/welcome/features/20100217_artificial_muscle/

Heydt, R.; Kornbluh, R.; Eckerle, J.; Pelrine, R. Proceedings of SPIE 2006, 6168, 61681M-1.

Hassounieh, S. S.; Vudayagiri, S.; Yu, L.; Junker, M.; Hansen, U.; Skov, A. L. Dansk Kemi 2012, 93, 22-24.

Madsen, F. B.; Daugaard, A. E.; Hvilsted, S.; Skov, A. L. Dansk Kemi 2012, 93, 48-51.