

MOLEKYLÆRE MASKINER

- en verden af muligheder

Forfatterne



Sissel Stenbæk Andersen er ph.d., postdoc ved Syddansk Universitet, hvor hun bl.a. har arbejdet på at lave ensrettet bevægelse i rotaxaner og catenaner. sissel.s.andersen@gmail.com



Rikke Kristensen er cand. scient. fra Syddansk Universitet. Har i sit speciale bl.a. syntetiseret en catenan, med henblik på at skabe ensrettet bevægelse. rikke.kristensen86@gmail.com



Jan Oskar Jeppesen er professor, ph.d. Havde Sir J. Fraser Stoddart som medvejleder på sit ph.d. projekt og har af flere omgange været på længerevarende forskningsophold hos Sir J. Fraser Stoddart. joj@sdu.dk

Alle tre ved Institut for Fysik, Kemi og Farmaci, Det Naturvidenskabelige Fakultet, Syddansk Universitet

Nobelprisen i kemi uddeles i år til tre forskere, der har været med til at designe og syntetisere nogle af de første molekyler, der virker som små maskiner. Det indvarsler en fremtid, hvor man kan producere meget små maskiner, som fx kan anvendes i kroppen.

Maskiner er en uundværlig del af vores dagligdag. Normalt tænker vi på en maskine som et stort, mekanisk hjælpemiddel, der omdanner energi eller udfører et arbejde. Tænk blot på en bilmotor, som omdanner den potentielle energi i brændstoffet til kinetisk energi i form af bevægelse af bilen. Mere generelt kan man sige, at en maskine er sammensat af en række dele, hvor mindst en er bevægelig. Det betyder, at også molekyler kan anses for at være maskiner, hvis de er opbygget på samme måde med mindst en bevægelig del. Og det giver bestræbelserne på at gøre maskiner mindre og mere effektive, så de kan bruges i nye sammenhænge, en helt ny dimension. Man kan således i princippet designe maskiner i molekyl størrelse, som kan bruges fx i kroppen. Molekylære maskiner er kun få nanometer store, det vil sige omkring en million gange mindre end de mindste makroskopiske maskiner, vi allerede benytter i vores dagligdag. Dette års Nobelpris i kemi er netop givet til tre kemikere, Jean-Pierre Sauvage, Sir J. Fraser Stoddart og Bernard L. Feringa, for

deres pionerarbejde med design og syntese af molekylære maskiner.

Strukturen af de molekylære maskiner

Inden for den syntetiske kemi har specielt to typer af molekyler vundet indpas til opbygning af molekylære maskiner: catenaner og rotaxaner.

En catenan består af to sammenlåste ringe. En rotaxan består af en ring, der omkranser en stang påsat to store endegrupper. Stangen og de store endegrupper kaldes for en "håndvægt". De store endegrupper i håndvægten forhindrer ringen i at falde af stangen.

Selvom de to ringe i en catenan ikke er bundet fysisk sammen, kan de alligevel ikke adskilles, uden at den ene ring brydes. Det faktum gør det meget vanskeligt at syntetisere catenaner. I 1983 lykkedes det Jean-Pierre Sauvages forskningsgruppe at syntetisere den første catenan i et godt udbytte på 42 %. De syntetiserede først den ene ring. Dernæst klistrede de den anden ring fast til den første ring ved hjælp af en kobberion, som fungerer som

lim. Herefter lukkes den anden ring, hvorefter kobberionen fjernes. På tilsvarende måde fremstillede Sir J. Fraser Stoddarts forskningsgruppe i 1991 den første rotaxan.

Sådan fungerer de molekylære maskiner

I en rotaxan kan ringen bevæge sig langs håndvægten. Ved at indsætte stationer i håndvægtsenheden af rotaxanen er det muligt at styre bevægelsen af ringen. En station er et sted på håndvægten, hvor ringen foretrækker at være placeret på grund af øget tiltrækning mellem ring og håndvægt. En to-stations rotaxan kan således laves ved at indsætte to stationer på håndvægtsenheden, og dermed kan molekylet anvendes som en molekylær kontakt. Når ringen omkranser station 1, vil det svare til, at kontakten er slukket, og når ringen omkranser station 2, svarer det til, at kontakten er tændt.

For at sikre, at kontakten virker så effektivt som muligt, er det vigtigt, at man kan kontrollere, på hvilken station ringen er placeret på et givent tidspunkt, altså om kontakten er tændt eller slukket. For at kunne

Strukturer: catenaner og rotaxaner

Illustration af en rotaxan og en catenan. En catenan består af to sammenlåste ringe, mens en rotaxan består af en ring der omkranser en stang, påsat to store endegrupper. Stangen påsat de to store endegrupper har form som en "håndvægt", og kaldes derfor på engelsk for *dumbbell*.

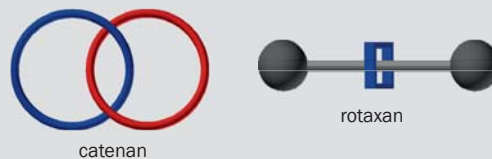
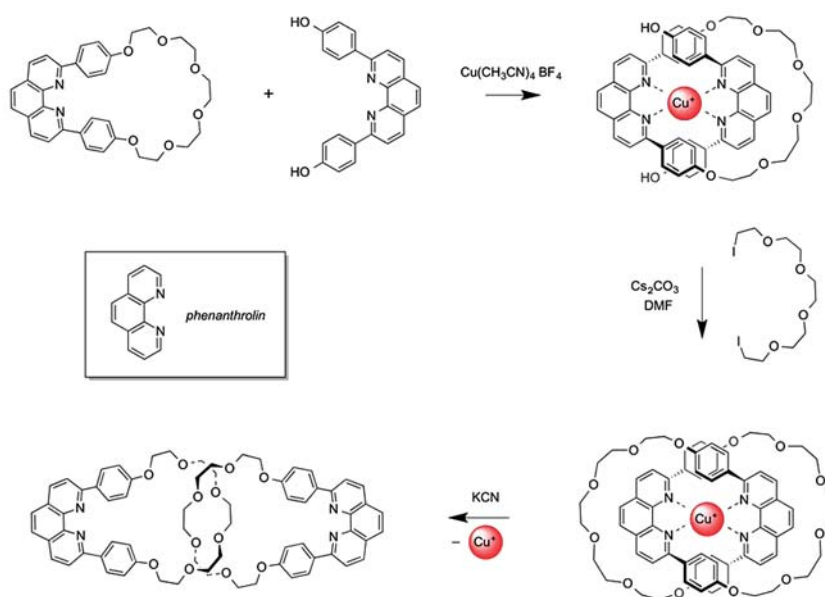
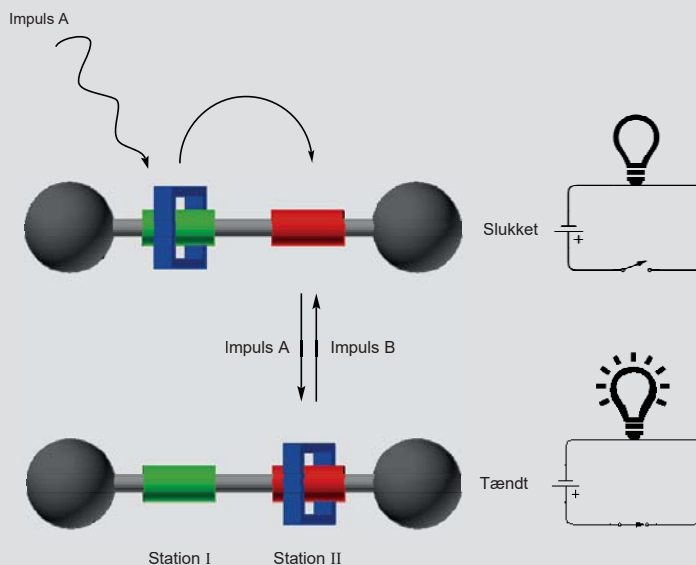


Illustration af en rotaxan, som er forsynet med to stationer. Ved at give en impuls til rotaxanen kan ringen bevæge sig fra den ene station til den anden. Hvis den ene station defineres som tænd og den anden som sluk, fungerer molekylet som en kontakt.



Sauvages synteserute til den første fremstillede catenan. Syntesen sker ved hjælp af en kobberion (Cu^+ , rød), der fungerer som lim til at holde de to ringe sammen. Til sidst fjernes kobberionen.

kontrollere dette, er det nødvendigt at påvirke den kemiske ligevægt, som styrer hvor ringen er placeret. Det kan ske ved at tilføje en impuls, som fx kan ændre på en af stationernes evne til at tiltrække ringen, hvilket får ringen til at bevæge sig. Det havde Stoddart succes med for første gang i 1994. I samme år lykkedes det Sauvage at skabe en

lignende kontrolleret bevægelse i en catenan.

Bittesmå computere og molekylære elevatorer

Stoddart har sammen med andre forskere udviklet en computerchip baseret på netop rotaxan-strukturen. Denne chip besidder 20 kB hukommelse. Chippen er lavet ved at

omdanne tænd og sluk i to-stations rotaxanen til 0 og 1, hvilket svarer til det binære talsystem, som computere er bygget op omkring. Denne type molekylære computerchips er meget små, når de sammenlignes med nutidens chips. Det kan potentielt føre til meget små computere i fremtiden, hvis teknologien udvikles.

Prismodtagerne



Jean-Pierre Sauvage (f. 1944 i Paris, Frankrig) Ph.D. i 1971 fra Strasbourg Universitet, Frankrig. I dag professor emeritus på Strasbourg Universitet og leder af emeritus forskning hos det Nationale Center for Videnskabelig forskning (CNRS), Frankrig.



Sir J. Fraser Stoddart (f. 1942 i Edinburgh, Storbritannien) Ph.D i 1966 fra Edinburgh Universitet, Storbritannien. I dag Board of Trustees professor i kemi ved Northwestern Universitet, Evanston, IL, USA.



Bernard L. Feringa (f. 1951 i Barger-Compascuum, Holland) Ph.D. i 1978 fra Groningen Universitet, Holland. I dag professor i Organisk kemi ved Groningen Universitet i Holland.

Molekylære maskiner på SDU

Der er mange forskere rundt om i verden, som er inspireret af de tre nobelprismodtageres arbejde med molekylære maskiner. I Danmark arbejdes der bl.a. på Syddansk Universitet med molekylære maskiner, specielt inspireret af det arbejde Sir J. Fraser Stoddarts gruppe har udført. Arbejdet her på Syddansk Universitet har primært fokus på at forstå, hvordan retningen af bevægelsen i en rotaxan eller catenan kan kontrolleres. Til det formål fremstiller vi mindre og simple molekyler, som benyttes til at undersøge forskellige egenskaber, der påvirker bevægelsen. I fremtiden vil disse mindre molekyler kunne sættes sammen til catenener eller rotaxaner med henblik på at skabe ensrettet bevægelse.

Både Sauvage og Stoddart har udnyttet, at det er muligt at kontrollere bevægelsen mellem to stationer til at syntetisere mere komplicerede systemer. I 2000 lykkedes det således Sauvage at fremstille den første molekylære muskel. En molekylær muskel virker ved, at den kan trække sig sammen og strække sig ud igen, på samme måde som vores muskler kan. I 2004 syntetiserede Stoddarts forskningsgruppe en molekylær elevator, hvor bevægelsen anvendes til at kunne løfte noget op og ned. De beviste, at elevatoren kunne løfte sig selv 0,7 nm over en overflade.

Ensrettet bevægelse i en molekylær motor

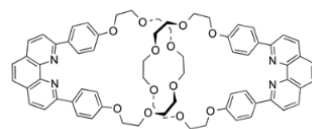
For at kunne udnytte den bevægelse, der skabes i molekylære maskiner, til at drive noget fremad, er det

afgørende, at bevægelsen kun sker i en retning. Det kan sammenlignes med, at når en bilmotor tændes og bilen kører afsted, så skal den kun køre fremad og ikke skiftevis baglæns og forlæns, som bilen selv lyster. Den tredje prismodtager af dette års nobelpris i kemi, Bernard L. Feringa, har opnået at skabe kontinuert, ensrettet bevægelse. Han var den første, der udviklede og syntetiserede en molekylær motor. Det opnåede han med et molekylært rotorblad, der kan rotere i én retning. Motoren består af en stationær del, som via en akse er forbundet til en roterende del. En metylgruppe (dvs. en kemisk gruppe bestående af CH₃) er fastgjort til henholdsvis den roterende og den stationære del. Metylgrupperne fungerer som hager, der sørger for

at rotationen kun kan finde sted i en retning. Akslen består af en dobbeltbinding, og det er netop denne, der får rotationen til at finde sted. Når UV-lys rammer dobbeltbindingen drejer den roterende del 180 grader. De påsatte hager flytter sig nu til den optimale position, og sørger dermed for, at rotationen sker i samme retning, når UV-lys igen får motoren til at dreje yderligere 180 grader. Herved opnås en fuld ensrettet drejning. Hele rotationsprocessen kan gentages.

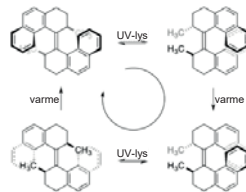
Fra molekylær motor til nanobil

Feringa og samarbejdspartnere har forfinet dette system, siden den første motor blev publiceret i 1999. I 2005 fremstillede de en motor, hvor den stationære del var fastgjort til en guldoverflade. Det er

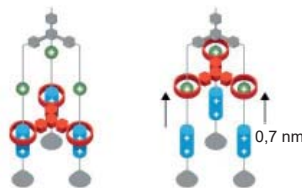


1991 Stoddart laver den første rotaxan

1994 Stoddart kontrollerer bevægelsen i en rotaxan

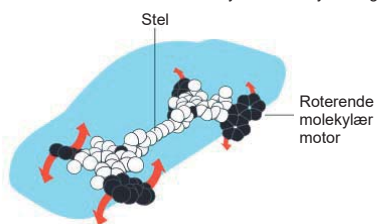


2000 Sauvage laver en molekylær muskel



2005 Molekylær motor på en overflade

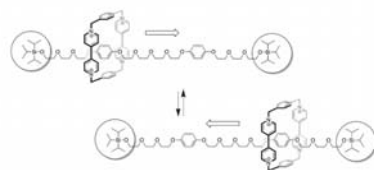
2006 Molekylær motor flytter ting



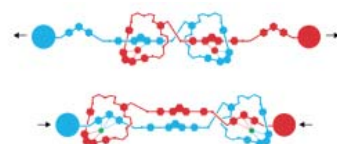
2016 Nobelprisen i kemi til Sauvage, Stoddart og Feringa

Tidslinje

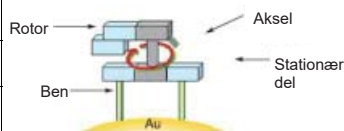
1983 Sauvage laver den første catenan



1999 Feringa laver den første molekylære motor



2004 Stoddart laver en molekylær elevator

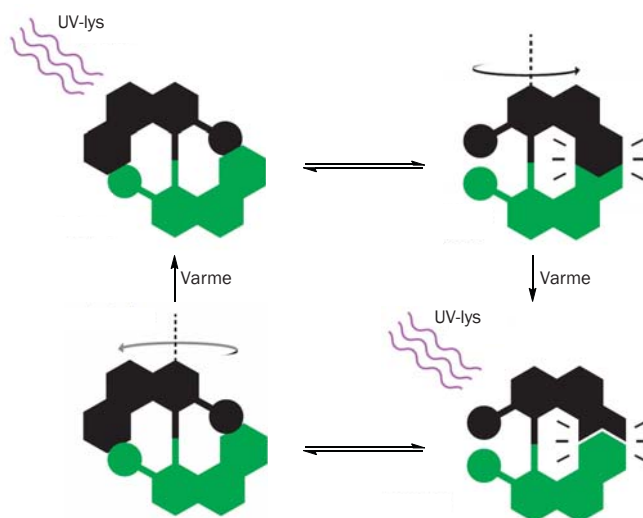
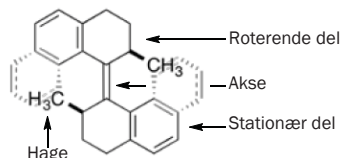


2011 Feringa laver en nanobil

2014 Motoren kan nu rotere med 12 millioner omdrejninger

Illustrationselementer af Johan Järnstedt/Det Kgl. Svenske Videnskabsakademi

Illustration af Feringas ensrettede, lysdrevne molekylære motor. Motoren består af en stationær del forbundet til den roterende del via en akse. Aksen kan skifte mellem to forskellige positioner, når den bestråles med UV-lys. Illustration: Johan Jarnestad/Det Kgl. Svenske Videnskabsakademi



et særdeles vigtigt skridt i at kunne udnytte motorens rotation til at udføre et faktisk stykke arbejde. Så længe molekylerne er i opløsning, er det umuligt at ordne de molekylære motorer på en sådan måde, at de alle er placeret, så de roterer i samme retning. Når det er muligt at fastgøre de molekylære motorer til en overflade er det samtidig muligt at arrangere dem, så de roterer identisk. Dermed kan det samlede arbejde fra de molekylære motorer bedre udnyttes. I 2006 viste Feringa, at en lignende molekylær motor kunne bruges til ensrettet ro-

tation af et ca. 30 mikrometer stort objekt. Det svarer til, at motoren roterer et objekt 10.000 gange større end motoren selv. I 2014 opnåede de at øge hastigheden, således at motoren kan rotere med 12 millioner omdrejninger pr sekund.

Feringas forskningsgruppe syntetiserede i 2011 en nanobil. Nanobilen er opbygget af et molekylært stel påsat fire motorer, som fungerer som bilens fire hjul. Ved at lyse på nanobilen kan den bevæge sig fremad på en overflade, da lyset får hjulene til at rotere.

Molekylære maskiner i fremtiden

De første elektriske motorer blev fremstillet i 1830'erne, og først 50 år senere, i 1880'erne, kom de første biler. Nobelpriskomiteen sammenligner udviklingen af molekylære maskiner med den udvikling, de første elektriske motorer havde frem til 1830'erne. Det er i sig selv imponerende, at det i dag er muligt at skabe noget så småt og samtidig funktionelt. Kun fremtiden vil vise, hvilke anvendelser og betydning disse små maskiner vil få. ■

Videre læsning

Om nobelprisen i kemi:
www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/2016/press.html

Om molekylære computere:
www.kemi-online.dk/files/side20-23dak62001.pdf

Announce