

Fra elastik til batteri

Princippet bag en almindelig elastik kan måske hjælpe med at løse en af den grønne omstillings største udfordringer: Lagring af energi.

Af Agnete Jenfort, Frederikke Bahrt Madsen og Anne Ladegaard Skov, Dansk Polymer Center (DPC), Kemiteknik, Danmarks Tekniske Universitet

Når en elastik strækkes, lagrer den energi, som senere kan frigives igen. Det samme princip udnyttes i gummibatterier, der kan bidrage til at lagre energi fra vedvarende energikilder. Her beskrives teknologien bag gummibatterier og udviklingen af nye silikonebaserede materialer med høj energilagringskapacitet.

Fra elastik til batteri

En elastik kan fungere som et batteri. Når vi bruger elastikker i hverdagen, for eksempel til at sætte håret op eller holde låget på en madbeholder, strækker vi dem og giver dem energi. Denne energi lagres i elastikken, indtil den frigøres igen. I den periode fungerer elastikken derfor som et lille batteri. Når elastikken slippes, frigives den lagrede energi, som kan omsættes til andre energiformer, herunder elektrisk energi.

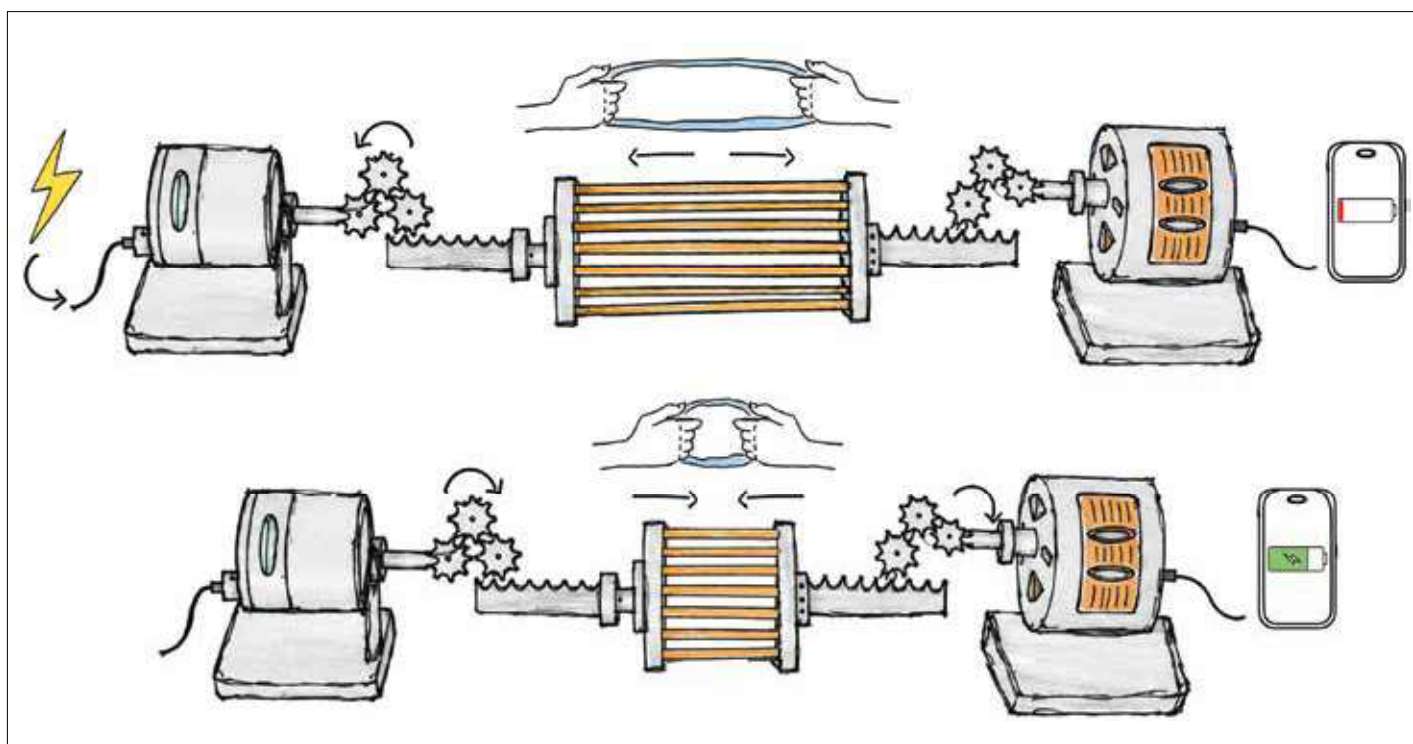
Selvom energimængden i en almindelig elastik er begrænset, illustrerer eksemplet et vigtigt princip: energi kan lagres og frigives efter behov. Netop lagring af energi er en af de store udfordringer i den grønne omstilling. Behovet for energi stiger, samtidig med at grønne energiformer vinder frem, hvilket er positivt for klimaregnskabet. Et problem opstår dog, fordi

energiefterspørgslen er relativt konstant, men produktionen fra vedvarende energikilder varierer. På dage uden vind og sol kan produktionen være lav, mens den på blæsende og solrige dage kan overstige forbruget.

En mulig løsning er derfor at lagre den overskydende energi fra perioder med høj produktion og bruge den senere, når produktionen ikke kan følge med efterspørgslen. Dette kræver store energilagere eller store batterier. Eksisterende litium-ionbatterier er forbundet med udfordringer, blandt andet brandrisiko og afhængighed af kritiske råmaterialer [1]. På DTU's Dansk Polymer Center (DPC) arbejder vi derfor med en ny type batterier, der lagrer energi mekanisk – modsat litium-ionbatterier, som lagrer energi kemisk. Disse nye batterier kaldes gummibatterier.

Gummibatterier udnytter den potentielle energi, der opstår, når en elastik strækkes. Princippet er meget simpelt. En elastik strækkes og fungerer som et batteri, indtil strækket slippes og energien bliver omdannet til elektrisk energi via en motor og en generator. På den måde kan overskydende grøn energi bruges til at strække elastikken og dermed gemme energien, indtil den skal bruges senere. En illustration af gummibatteriet ses i figur 1.

Udfordringen ved en sådan løsning ligger dog i valget af materiale til elastikken. Det skal have en høj strækbarhed og samtidig være stabilt og stærkt nok til at kunne holde et stræk over længere tid. Strækbarheden påvirker mængden af energi,



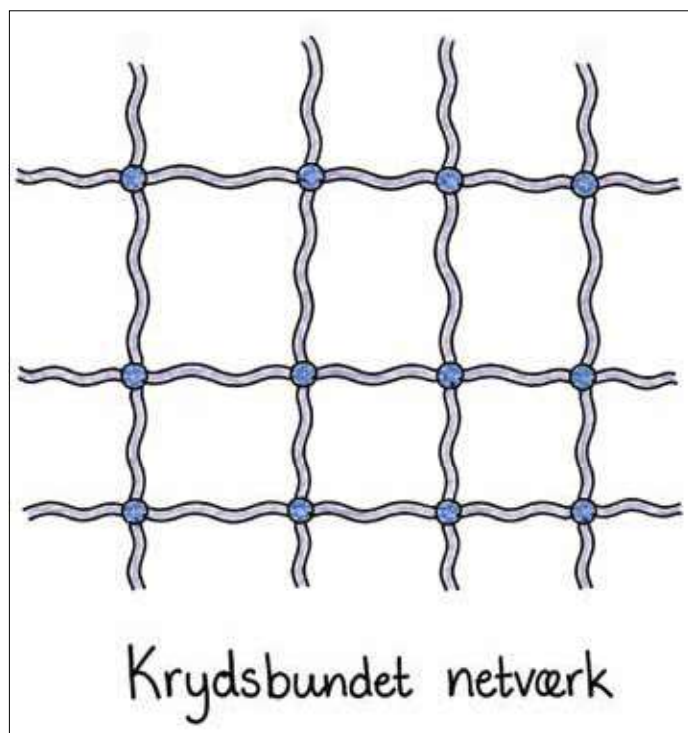
Figur 1. Princippet bag gummibatterier. Overskydende energi bruges til at strække de orange elastikker. Strækket holdes, og den mekaniske energi bevares, indtil elastikken slippes, og energien kan omdannes til elektrisk energi.

der kan lagres i materialet. Jo længere materialet kan strækkes, desto mere energi kan der lagres. Et materiale, der kan opfylde disse kriterier, er silikonegummi. På DPC arbejder vi derfor med at udvikle en ny type silikonegummi. Valget af silikone skyldes materialets særlige kombination af mekanisk og kemisk stabilitet, hvilket gør det velegnet til anvendelse i gummibatterier.

Silikone som fundament for gummibatterier

Silikone er et meget anvendt materiale i en lang række industrier. Modsat de fleste polymerer, som bliver sprøde i kulden og bløde i varmen, kan silikone opretholde sine mekaniske egenskaber, altså forblive fleksibel ved store udsving i temperatur, helt ned til -100°C og op til $+200^{\circ}\text{C}$.

Et klassisk gummi består af krydsbindingspunkter, hvor lange polymerkæder er kovalent bundet sammen. Således dannes et netværk, der fungerer som et stort molekyle, som vist i figur 2 [2]. Netværket kan strækkes op til 600 procent af sin oprindelige længde og har et energipotential på 53 mJ/g [3]. Energipotentialet beskriver, hvor meget energi materialet kan lagre ved stræk, og bestemmes som arealet under materialets strækkurve.

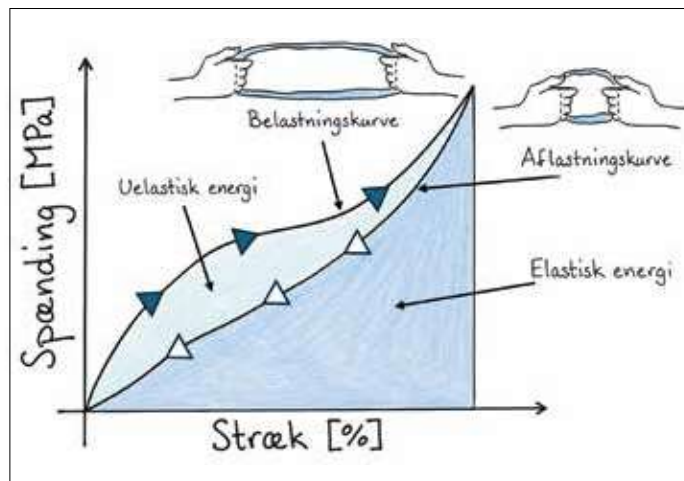


Figur 2. Silikonegummi med krydsbundet netværksstruktur. De lille kæder er silikonepolymerkæderne og de blå prikker er krydsbindingspunkterne.

Hvor meget energi kan lagres?

For at sammenligne nye typer silikonegummi er det nødvendigt at måle, hvor meget energi materialet kan lagre. Dette kan gøres med en stræktest, hvor materialet strækkes, mens den nødvendige kraft måles. Resultatet vises som en strækkurve, der ses i figur 3, hvor den lagrede energi svarer til arealet under kurven.

Når materialet aflastes, følger det ikke den samme kurve tilbage. En del af energien går tabt til irreversible processer, og den energi der kan lagres og senere udnyttes i et gummibatteri, svarer derfor til arealet under aflastningskurven [4].

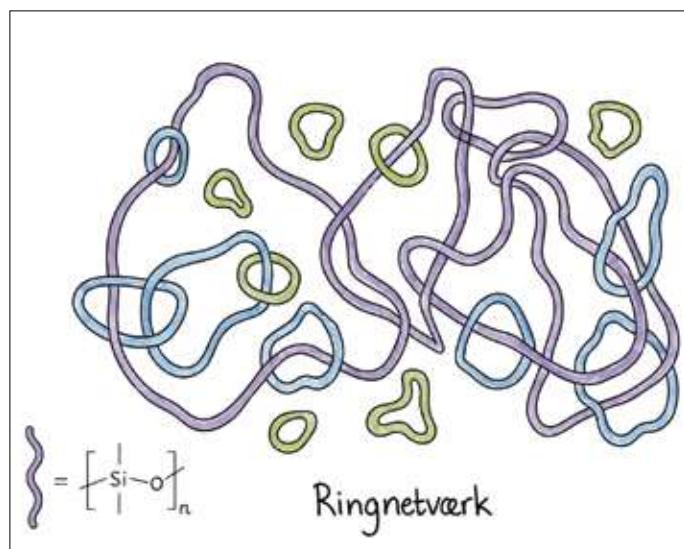


Figur 3. Illustration af resultatet af en stræktest. De farvede pile illustrerer belastningskurven, og de hvide pile illustrerer aflastningskurven, mens arealet under aflastningskurven svarer til mængden af energi, der lagres i materialet.

Ved optimering af materialet er målet at maksimere dette areal. Det kan opnås ved at gøre materialet mere strækbart, så kurven forlænges, eller stivere, så kurven bliver stejlere. For at opnå en høj energilagring er det ideelle materiale derfor både stift og meget strækbart. Det er to egenskaber, der kan være svære at kombinere.

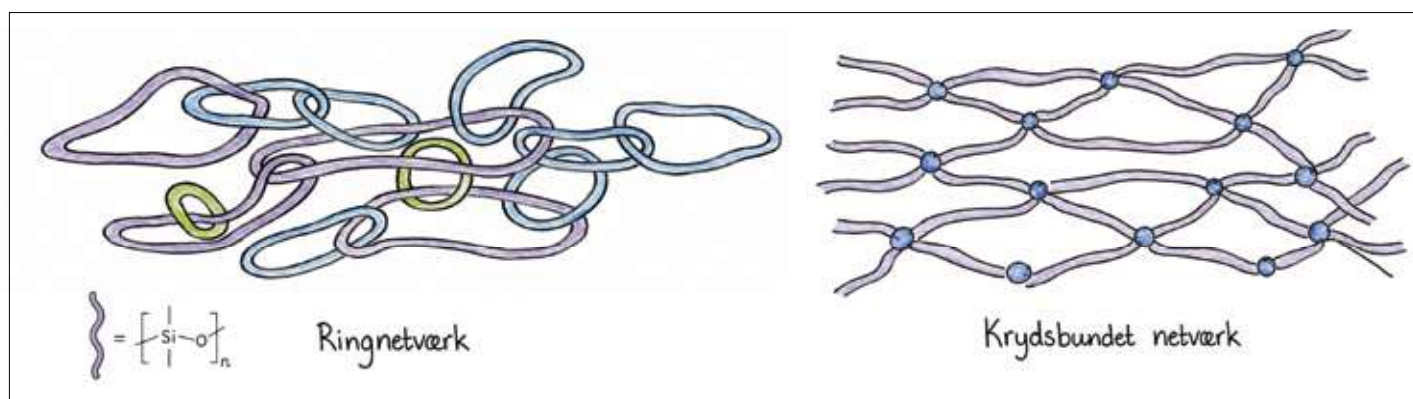
Ringnetværk

En innovativ måde at opnå den høje strækbarhed på er at opbygge silikonen i en ringstruktur og herfra danne et netværk. Forskellen på et krydsbundet netværk og et ringnetværk ligger i, hvordan de lange polymerkæder er bundet sammen, som illustreret i figur 4.

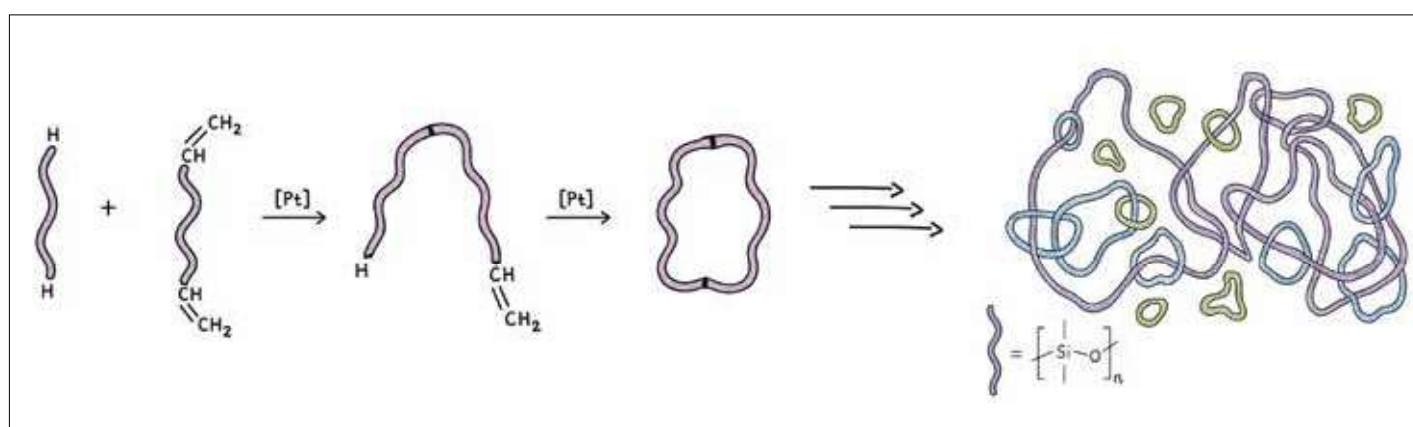


Figur 4. Struktur af silikonegummi, når det dannes som ringnetværk. Farverne på ringene skal tydeliggøre de forskellige ringstørrelser. De farvede kæder er silikonepolymerkæder.

I ringstrukturen findes der ingen krydsbindingspunkter, men i stedet er ringene kædet sammen på kryds og tværs. Dette gør silikonegummiet langt mere strækbart, idet ringene kan glide i forhold til hinanden. Det står i kontrast til klassiske krydsbindingspunkter, som danner en mere fast struktur, som kan begrænse strækbarheden, som vist i figur 5 på side 8 [5]. Med højere strækbarhed kan ringstrukturen opnå større areal under



Figur 5. Ringnetværk af silikonegummi (til venstre) og en klassisk krydsbundet silikonegummi (til højre), der begge strækkes.



Figur 6. Reaktion af polymerkæder til et ringnetværk med en platin (Pt) katalysator. Forskellige farver i ringnetværket viser ringenes forskellige størrelser [5].

strækkurven og dermed en højere energidensitet, der kan udnyttes i gummibatteriet.

Design af fremtidens gummi

Ringstrukturer kan laves på forskellige måder. Én måde involverer to polymerkæder med forskellige reaktive endegrupper. Først reagerer endegrupperne i den ene ende med hinanden, så der dannes en længere polymerkæde. Derefter reagerer de resterende endegrupper, så kæden lukker sig og danner en ring, som vist i figur 6. Reaktionen fortsætter, når flere kæder reagerer på samme måde. Undervejs bliver ringene viklet ind i hinanden og skaber en struktur i stil med en ringbrynje.

En mulighed for at øge elasticiteten ligger i netværksdesignet, for eksempel ved at ændre molekyllægten af de to polymerer, der reagerer. En højere molekyllægt giver længere polymerkæder, hvilket fører til større ringe. De større ringe har større bevægelsesfrihed og kan lettere vikles ind i hinanden. Når materialet strækkes, kan kæderne derfor udfolde sig mere, før de bliver spændt. Dette øger dermed materialets strækbarhed.

Ulempen ved at anvende længere polymerkæder til dannelse af ringe er, at det bliver sværere for kædens to ender at finde hinanden. Jo længere kæden er, desto større er afstanden mellem enderne, og dermed falder sandsynligheden for, at kæden lukker sig og danner en ring. Derudover falder koncentrationen af aktive endegrupper med stigende kædelængde. Det handler derfor om at finde den optimale kædelængde for at opnå den højeste mulige strækbarhed [6].

Vejen mod praktiske gummibatterier

I udviklingen af materialer til gummibatterier undersøges strækbarhed og stivhed. Målet er at udvikle silikonegummi, der på udvalgte områder kan konkurrere med eller på sigt overgå litium-ionbatterier. I DPC arbejder vi med gummibatterier, der sigter mod en energidensitet på 460 kWh/ton, omtrent tre gange højere end litium-ionbatterier [7]. Gummibatterier repræsenterer dermed en lovende tilgang til lagring af energi fra vedvarende energikilder. Lykkes det at forbedre silikonegummiet yderligere, kan teknologien bidrage til energilagring uden brug af litium-ionbatterier og samtidig tilbyde en højere grad af brandsikkerhed.

E-mail:

Agnete Jenfort: agnthe@kt.dtu.dk

Anne Ladegaard Skov: al@kt.dtu.dk

Referencer

1. D. Wu, Fire, 2026, 9, 76, DOI: 10.3390/fire9020076.
2. P. Mazurek, S. Vudayagiri and A.L. Skov, Chem. Soc. Rev., 2019, 48, 1448–1464, DOI: 10.1039/C8CS00963E.
3. J. Vaicekauskaitė, P. Mazurek, S. Vudayagiri and A.L. Skov, J. Mater. Chem. C, 2020, 8, 273–1279, DOI: 10.1039/C9TC05072H.
4. C. Nedelcu, F.B. Madsen and A.L. Skov, Polym. Chem., 2026, 17, 1278–1290, DOI: 10.1039/D5PY01201E.
5. N.S. Frederiksen, L. Yu, D. Kizilkaya, et al., Commun. Mater., 2026, DOI: 10.1038/s43246-026-01256-0.
6. P. Hu, J. Madsen, Q. Huang and A. L. Skov, ACS Macro Lett., 2020, 9, 1458–1463, DOI: 10.1021/acsmacrolett.0c00635.
7. Epec Engineered Technologies, Battery Comparison of Energy Density – Cylindrical and Prismatic Cells, <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html> (tilgået 24. august 2026).