

Arven fra Niels Bohr

Thomas Grønlund Nielsen

I coronaåret 2020 lykkedes det de to københavnske atomkraftstartups, Copenhagen Atomics og Seaborg Technologies, at tiltrække sammenlagt et trecifret millionbeløb i private investeringer. Herved bliver de nu i stand til at etablere laboratorier til videre udvikling af en speciel type smeltet salt-reaktor, hvis sikkerhed mod radioaktivt udslip nærmest bliver givet ved naturlovene. Kan Niels Bohrs drøm om ufarlig atomenergi for folket endelig blive til virkelighed? Denne artikel ser nærmere på den nye virkelighed for udvikling af atomkraft i Danmark.

Jeg husker en studiekammerat på Ørsted Laboratoriet, på Københavns Universitet, som havde landets bedste studentereksamen målt på karaktergennemsnittet. På grund af interesse valgte han at studere fysik, selvom der her var adgang for alle. En del år efter at vi var færdiguddannede, ringede jeg til ham og spurgte, hvad han brugte sit talent til. Han fortalte mig, at han arbejdede for en investeringsbank med at sammensætte strukturerede investeringsprodukter – med andre ord “private banking” for velhavere. Jeg spurgte ham ikke om, hvor meget han tjente – ikke fordi jeg var bange for at blive misundelig, det virkede bare ikke rigtig relevant. Begejstret virkede han i hvert fald ikke, og samtalen efterlod mig temmelig desillusioneret på mit fags vegne.

For elitestudenten er bare toppen af isbjerget – flere andre af mine meget dygtige studiefæller arbejder i dag i finansbranchen. Men hvorfor sætter vi ikke vore bedste hjerner til at skabe løsninger, der kommer de mange og ikke blot de få til gode? Hvorfor ikke sætte dem til at udvikle næste generation af atomkraft sikret mod Fukushima-lignende ulykker? Hvad ville være mere naturligt, hvis vi for alvor bekymrer os om den globale opvarmning? Sådan spurgte jeg for et par år siden i en kronik [1], og siden er mine spørgsmål blevet imødekommet og for ganske nylig også efterlysningerne.

Med Bestsellerejeren Anders Holch Povlsens investering i Seaborg Technologies [2], er Danmarks rigeste mand gået ind i atomkraft, og hermed er Niels Bohrs drøm genoplivet efter lang tids dvale i Danmark. Det er desværre gået lidt i glemmebogen, at Niels Bohr efter 2. verdenskrig og atombomben var en utrættelig forkæmper og fortaler for atomkraft, dvs. den fredelige brug af atomkerneenergien. Han modtog som den første “Atoms for Peace”-prisen i 1957, som med tilskud fra Ford Motor Company var blevet oprettet af daværende præsident Eisenhower. Når byggeriet samme år begyndte på Risø-atomforsøgsstation, skyldtes det også Niels Bohr og “Atoms for Peace”-ånden. Det blev med tydelig dansk islæt. For hvad enten Niels Bohr opbygger sit “Institut for Teoretisk Fysik” og danner rammen for “Der Kopenhagener Geist”, eller han på samme institut arbejder med anvendt fysik og sammen med George de Hevesy grundlægger begrebet nuklearmedicin, så personificerer han de danske dyder: Uhøjtidelighed, pragmatisme og jordbundethed. Da Risøstationen indvies med sine skinnende reaktortårne,

skal det ikke blot fremme forskning inden for anvendt atomfysik på energi- og medicinområdet. Også dansk landbrugsteknologi i form af fx strålebehandling af mad skal fremmes – Bohr er ikke for ophøjet til at erkende sit lands ophav som bondesamfund. Men navnlig er det hans ønske, at Risø kan blive hjemsted for nye kreative fysikere og ingeniører, der både kan bruge hoved og hænder, og ikke er tynget af at skulle være noget specielt andet end til menneskeheds fremme.

De nye danske atomiværksættere ved Seaborg Technologies og Copenhagen Atomics [3,4] har nu fået en chance for at bygge videre på Niels Bohrs pionerarbejde. Det var sådan en chance, som Risø Atomforsøgsstation fik i 1960'erne, og selvom man gjorde store videnskabelige landvindinger, nåede man ikke i mål med at realisere Bohrs drøm om at skaffe danskerne billig og stabil energi gennem atomkraft. Det var der flere grunde til, at de ikke gjorde, og den endegyldige var den politiske og folkelige modstand, der op gennem 1970'erne blev en overmægtig modstander. Men man må nok også indrømme, at forsøgsstationen i de gode 1960'ere (hvor det følte som om, at der var masser af tid) ikke fik eksekveret hurtigt nok. Måske manglede den offentlige institution den beslutsomhed og “sense of urgency” mod industrialisering af atomkraft, som man så på den anden side af Øresund. Svenskerne havde ikke nogen, der kom i nærheden af Niels Bohr inden for atomfysik. Men de havde til gengæld en energihungrig sværindustri og fremfor alt nogle folk, der kunne eksekvere på at få store ting til at ske i industrien. Således blev det trods alle gode forudsætninger ikke Niels Bohrs fædreland, der fik bygget atomkraftværker, men Sverige. Risøs svenske pendant, Studsvik, er i dag en børsnoteret virksomhed, som er førende i verden inden for behandling af radioaktivt affald.

Med tanke på at få mere til at ske med hensyn til atomkraft i Danmark, er det derfor også en god nyhed, at Seaborg har fået Bestsellerejeren ombord. Han ved noget om storstilet produktion og faldgruberne her. Med ham rykker dansk reaktordesign tættere på containeren. Nu skal pengene sættes i at få et stort laboratorium op at køre. Der skal laves kemiske test i stor skala og under høje temperaturer. Der skal laves stålkonstruktioner, som skal testes for korrosion og elektromekaniske egenskaber. Over 50 specialister inden for området skal hyres og indarbejdes. Men der er naturligvis langt til målet endnu. For at vurdere, hvad der sker på feltet i Danmark lige nu, og hvad der

skal komme til at ske for at komme i mål, vil vi først gå mere i dybden med, hvordan en atomkernereaktor fungerer og de udviklingstrin (generationer), den har været igennem.

Safety-by-physics

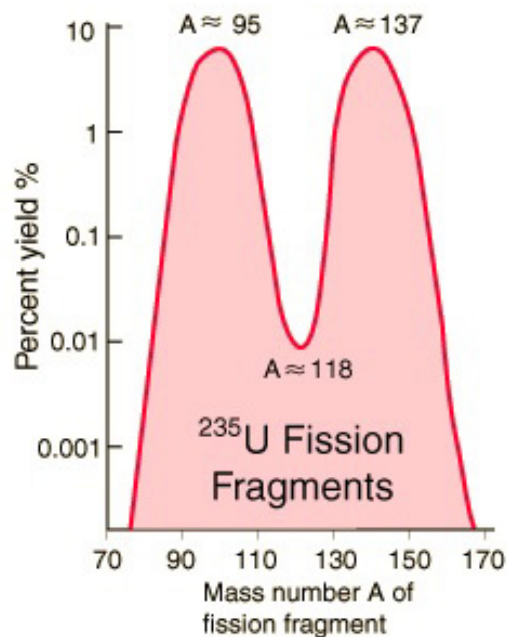
Safety-by-physics er et afgørende nyt princip, der går ud på, at man opnår en sikkerhed mod radioaktive udslip, som ikke afhænger af menneskelig indgriben. Det vil sige, at der ikke kræves elektriske pumper, afkøling osv., og dermed kræves der ikke elektricitet for at opretholde sikkerheden. Sikkerheden ligger i de fysiske og kemiske love, der aldrig svigter – tyngdekrafter, smeltepunkter, kemiske reaktioner etc. behøver ikke menneskelig indgriben for at virke. Det kaldes passive sikkerhedssystemer eller “safety-by-physics” modsat aktive sikkerhedssystemer eller “safety-by-engineering”. Da første generation- og anden generation-(2G)-reaktorerne blev designet i 1950’erne og 1960’erne, var sikkerhed i reaktorer ikke det altoverskyggende tema, som det har været siden Tremileulykken i 1979. Efter denne kom aktive sikkerhedssystemer på som en slags overbygning på det gamle design, hvilket var og blev en lappeløsning. Med tredje generation-reaktorer (der bygges i dag) forsøger man så vidt muligt at få “safety-by-physics” ind ved at gøre brug af konvektion og tyngdekraft, så der ikke behøves pumper til at undgå nedsmeltning. Men først med fjerde generation-(4G)-reaktorer (der udvikles i dag, bl.a. i Danmark) er den passive sikkerhed tænkt ind helt fra start. Først i det seneste årti, hvor atomkraft igen er ved at erobre scenen, har man visket tavlen helt ren og erkendt, at man må starte med helt nyt reaktordesign for at sætte den udbredte atomkraftskræk på plads en gang for alle.

Mendelejevs mosaik

Den spaltning af en uranatomkerne, der sker i en atomreaktor, kan optræde i et væld af forskellige varianter. De har dog alle det til fælles, at man får netop to mindre atomkerner ud af spaltningen, som aldrig er lige store. Modsat ved kløvning af et stykke brænde, er kløvningen således altid asymmetrisk – den giver et større og et mindre stykke. Det store stykke er typisk $\frac{1}{2}$ gang større end det lille, dvs. $\frac{3}{5}$ af det oprindelige stykke, hvor det lille er $\frac{2}{5}$. Årsagen til dette ligger i kvantemekanikken, og det rækker for vidt at komme ind på her. Når man ser på de mange forskellige varianter, altså de mange forskellige atomkerner (isotoper), der kan komme ud af en kløvning af en uranatomkerne, er der således to toppe. Det vil sige, at når man ordner dem efter størrelse angivet i det antal partikler (nukleoner), som kernen består af, ligger langt de fleste i to klynger, nemlig med enten 90–100 nukleoner eller 130–145 nukleoner (spalteligt uran består af 235 nukleoner). Større og mindre kerner kan også forekomme, men jo længere væk fra disse intervaller, des sjældnere. Det er altså meget usandsynligt, at kløvningen munder ud i, at det store stykke er to eller tre gange større end det lille.

De mange varianter giver en uhyre mangfoldig mosaik af nye kunstige isotoper i fysikkens verden

– langt mere mangfoldig end Mendelejevs periodiske system i kemiens verden. Særligt mange af disse nye atomkerner er højst gavnlige til brug i navnlig hospitalsvæsenet. Da de er radioaktive, kan de bruges til alskens diagnoser og til kræft- og strålebehandling. Atter andre kan bruges industrielt i detektorer og sensorer og i rumfart og -forskning osv. Man kunne skrive en hel bog om epokegørende anvendelser for radioisotoper. Men det hører unægtelig også med til historien, at enkelte af disse radioisotoper er ret farlige for os, hvis de slipper ud i gadebilledet i større mængder. Heri ligger kilden til den delvist berettigede frygt for ulykker på et atomkraftværk. Men heldigvis er det ingenlunde et uløseligt problem.



Figur 1. Fordelingen af fragmenter efter spaltning af uran-²³⁵U.

Saltet binder det radioaktive affald

Tilfældet har nemlig villet det, at de mest udbredte og problematiske fissionsprodukter fra en atomreaktor (det som populært kaldes “affaldet”), nemlig jod, cæsium og strontium, også ligger i hovedgruppe 1,2 og 7 i Mendelejevs periodiske system. Disse grupper dækker over stoffer, som er kemisk meget reaktive. Tag for eksempel almindeligt salt, som har den kemiske betegnelse natriumklorid, fordi det er sammensat af grundstofferne natrium og klor, der ligger henholdsvis i hovedgruppe 1 og 7. Salt er som bekendt både meget opløseligt i vand og meget aggressivt med hensyn til at få metaller til at ruste osv. – kort sagt, meget kemisk aktivt. Forskellige former for flydende salt er et af de foretrukne materialer i 4G-reaktorer (der er også en del 4G-designs, der baserer sig på flydende metal). Det er helt forskelligt fra konventionelle 2G- og 3G-reaktorer, der bruger vand og metaller i fast form.

Da salte har højt kogepunkt, har de, modsat vand, ikke tendens til at fordampe ved den høje temperatur, der er i en reaktor. Der behøves altså ikke overtryk inde i reaktoren for at undgå fordampning. Det er en stor fordel i tilfælde af en ulykke, hvor reaktoren springer

læk, for da vil et overtryk derinde presse radioaktive gasser ud i omgivelserne. Det kan meget bedre undgåes med en flydende saltreaktor. Men det virkeligt springende punkt med saltet her er, at det nemt binder sig kemisk til andre stoffer i hovedgruppe 1,2 og 7 – altså til de problematiske fissionsprodukter, der således bliver bundet i saltet, og derved holder sig inde i reaktoren, eller under en ulykke løber ned i underjordiske “dump tanks”, hvor det med tiden afkøles og størkner.

Metal / Hovedgruppe 7	Fluorid	Klorid	Jodid
Brint	O	O	O
Litium	so	O	O
Natrium	O	O	O
Cæsium	O	O	O
Strontium	so	O	O
Barium	so	O	O
Sølv	O	I	I

Tabel 1. “O” står for opløselig, “I” for ikke-opløselig og “so” for svært opløselig. Kilde: National Institute of Standards and Technology.

Valg af 4G-reaktormaterialer

Selvom salte som nævnt generelt er meget opløselige i vand, er der gradforskelle. I tabel 1 ses en oversigt over forskellige saltes opløselighed i vand. De tre søjler er hver af ikke-metallerne i hovedgruppe 7, dvs. grundstofferne fluor, klor og jod. Hver række angiver altså for et metal i hovedgruppe 1 eller 2, hvor opløseligt det salt er, som består af metallet i en ionbinding med hhv. fluor, klor og jod. Et salt binder naturligvis bedre, jo mindre opløseligt i vand det er. Som beskrevet af Aslak Stubsgaard [5], er fluoridsalte bedst egnede til en flydende brændselsreaktor, i hvert fald for en som bruger termiske (langsomme) neutroner. Som det fremgår af tabellen, har netop fluoridsalte også de bedste egenskaber mht. til opløselighed, specielt for litium, strontium og barium. Netop strontium og barium er typiske fissionsprodukter og kritiske ved en reaktorylücke, så det er en fordel at få bundet dem i saltet. Også litium er et udbredt stof i saltsmeltereaktorer. Af tabellen ses desuden, at det allermest kritiske radioaktive stof ved en ulykke, nemlig jod, kan bindes uopløseligt til sølv, som også er et hyppigt fissionsprodukt. Jod er specielt kritisk, fordi det i en konventionel reaktor er på gasform og derfor ved en ulykke let kan slippe ud til omgivelserne. Her optages det af mennesker i skjoldbruskkirtlen, hvor den højt radioaktive isotop jod-131 derefter har frit spil til at beskadige væv. Men den proces kan altså bremses i en saltsmeltereaktor, som kan binde joden kemisk, så den har svært ved at undslippe reaktoren.

Ved udvælgelse af hvilke salte, der skal være i reaktoren, er deres smelte- og kogepunkter også vigtige at tage i betragtning. En atomreaktor opererer som regel ved temperaturer mellem 400 og 700 °C, saltsmeltereaktorer i den høje ende. Så det rette salts smeltepunkt skal ligge betydeligt under 6-700 °C, og dets kogepunkt betydeligt over 6-700 °C. Fluoridsalte med tungmetaller som uran, plutonium eller thorium

(som jo er brændslerne i en reaktor) har for høje smeltepunkter, men i en saltblanding med litiumfluorid og berylliumfluorid kan dette sænkes. På samme måde kan man med de rette saltblandinger opnå optimale egenskaber mht. lille vandopløselighed, lille korrosion og høj optagelse af (dvs. høj opløselighed mht.) farlige radioaktive stoffer som jod, cæsium og strontium. Dette er en vigtig del af det, som udviklingsarbejdet hos Seaborg Technologies og Copenhagen Atomic drejer sig om.

Moderatoren

Seaborg har taget patent på sin egen moderator, der også er et salt, nemlig natriumhydroxid. I normale vandreaktorer bruges kølevandet også som moderator. En moderator skal bremse neutronerne inde i en reaktor. Dette er nødvendigt for, at neutronen bliver indfanget af en stor, tung kerne (uran eller plutonium), som den herefter kan spalte. Kædereaktionens princip er jo netop, at de to eller tre neutroner, som der kommer ud af en spaltet urankerne, hver især skal kunne spalte en ny urankerne. På grund af den enorme energi, der frigøres ved spaltning, kommer disse neutroner også ud med en enorm fart – i størrelsesordenen 1/10 af lysets hastighed. Men denne hastighed reduceres, efterhånden som neutronerne støder ind i andre atomkerner. Dette skal helst ske så hurtigt som muligt, for at neutronen kan blive klar til at spalte en ny urankerne. Til dette formål er det væsentligt, at neutronen støder ind i de rigtige atomkerner, så den effektivt kan komme af med sin energi. Pga. lovene om impuls- og energibevarelse sker dette bedst, når den støder ind i et atom med omtrent samme masse som sin egen, nemlig en proton eller brintkerne. Derfor er vandmolekyler (der består af to brintatomer) en god moderator, natriumhydroxid (med et brintatom) ligeså. Kunne man så ikke bare bruge ren brint som moderator? Her er ulemper, at dette er en gas (også ved højt tryk) med for lang afstand mellem atomerne, så neutronerne ville have for lille sandsynlighed for at ramme dem.

I det hele taget er gasser sjældent særlige heldige ingredienser i en reaktor. Så det duer heller ikke at bruge ædelgassen helium (nr. 2 = næst-letteste atomkerne) som moderator. Vand er egentlig heller ikke optimalt, fordi det også skal være under højt tryk i en reaktor for ikke at fordampe. Det er netop her, at saltet med det meget højere kogepunkt kommer ind. Det førømtalte beryllium kan også bruges som moderator, da det er et lille atom (nr. 4 i det periodiske system) med en masse sammenlignelig med en neutron. Beryllium er dog både et sjældent, dyrt og giftigt stof. Som moderator kan man derimod ikke bruge litium og bor (nr. 3 og 5 i det periodiske system), da begge har stærk tendens til at absorbere neutroner, hvilket jo bremser eller stopper kædereaktion. Det næste stof i rækken, kulstof, er derimod meget effektivt som moderator, da det netop har meget lille tendens til at absorbere neutronen. Derfor anvendes normalt grafit som moderator i 4G-reaktorer, hvor vand er bandlyst.

Grafit har dog flere ulemper, nemlig at det er brændbart (hvilke var skæbningsvangert for Tjernobylulykken),

og at det degraderer, når det længe udsættes for stærk stråling. Tabel 2 herunder viser for de vigtigste grundstoffer i en reaktor, sandsynligheden for absorption af en langsom neutron. Som det fremgår, bruges isotoper med højt absorptionstværsnit i kontrolstænger, der jo er bremserne i en reaktor og netop skal absorbere neutroner, så antal fissioner sænkes. Fissionsproduktet xenon-135 har ekstremt høj tendens til at "sluge" neutroner og er derfor gift for en reaktor. (Xenonforgiftning var en medvirkende faktor til Tjernobylyllykken. Da reaktoren blev sat til at yde en lavere effekt, forårsagede en kombination af operatørfejl og xenonforgiftning, at reaktorens termiske effekt næsten blev reduceret til nedlukningsniveauet. Bestræbelserne på at genoprette elproduktionen resulterende i, at reaktoren blev sat i en meget usikker konfiguration.)

	Isotop	Absorptionstværsnit (barn)
Moderator	H-1	0,2
	H-2	0,0003
	C-12	0,002
	Na-23	0,53
	O-16	0,0002
Kontrolstav	B-10	200
	Cd-113	30.000
	Xe-135	2.000.000
Brændsel	Th-232	7
	U-235	99
	U-238	2
	Pu-239	269

Tabel 2. 1 barn = 10^{-28} m² er en enhed for areal i atomernes mikroskopiske verden. Kilde: JEFF-3.1.1 library.

Som det fremgår af tabel 2, har både brint og ilt (og dermed vand) og natrium lavt tværsnit. De københavnske atomiværksættere er derfor landet på natriumhydroxid som moderator, og går altså hele vejen med saltet som både brændsel, kølemiddel og moderator i reaktoren. Herved går man efter kompromisløs sikkerhed mod radioaktive udslip. Sikkerhed gennem kemiske bindinger og undertryk i reaktoren – faktorer som ikke behøver menneskelig indgriben for at virke.

At få den menneskelige faktor med i atomkraft

4G-reaktorer handler altså om brugervenlighed og ikke om ydeevne. De handler om at komme angsten for atomkraft til livs. For det er atomkraftens største problem: at folk er så bange for den. Her har Danmark en vigtig rolle at spille i at kunne skabe små, fleksible atomkraftværker, som folk ikke behøver at være bange for. At få den menneskelige faktor taget med i design af atomkraft – det ville være kronen på værket, og den rette forvaltning af arven fra Niels Bohr.

Litteratur

- [1] T.G. Nielsen (2019) Atomkraft, ja tak, *Dagbladet Information*, kronik, 16. februar.
- [2] M. Kristensen og J. Olesen (2020) Bestseller-ejer satser på atomkraft: Kan komme til »at skrive historie«, *Finans.dk*, 25. november.
- [3] Seaborg Technologies, <https://www.seaborg.co/>
- [4] Copenhagen Atomics, <https://www.copenhagenatomics.com/>
- [5] A. Stubsgaard (2017) "Thorium eller: Hvordan jeg lærte at holde op med at bekymre mig og at elske saltmeltereaktorer, *Kvant*, bind 28, nr. 2, side 7-12.



Thomas Grønlund Nielsen er cand.scient. i fysik fra Niels Bohr Institutet. Forfatter til bøgerne "Niels Bohr må vende sig i sin grav – om fornægtelsen af kernekraften" (2013) og "Den Grønne Atomkraft – Opgør med de farveblinde miljøforkæmpere" (2018).

PFEIFFER VACUUM

Nyhed

Oliefri vacuumpumpe - HiScroll (6-20 m³/t)
Ekstrem lyd- og vibrationssvag
pumpe med kompakt design



Tlf. 3166 8708
Lars.Scholte@pfeiffer-vacuum.dk
www.pfeiffer-vacuum.com