

# Neutrondoteret silicium – co-innovation hos en dansk halvlederproducent

AF HENRIK KNUDSEN

Halvlederindustri – i Danmark? Måske vil det komme bag på mange, at Danmark siden slutningen af 1950'erne har haft en halvlederindustri. Det handler om Frederikssund-virksomheden Topsil, der i 1974 som den første halvlederproducent i verden bragte neutrondoteret silicium på verdensmarkedet. Innovationen foregik i samspil med et par af de store aktører i branchen og frem for alt i et tæt samarbejde med Forskningscenter Risø. Der var tale om et nyt højteknologisk produkt, som blev lanceret på baggrund af et offentlig-privat udviklingssamarbejde; et eksempel på co-innovation i dansk industri. I de efterfølgende år var Topsil og Risø, hver på deres måde, med til at sætte dagsordenen for den videre udvikling af dette specielle materiales produktion og anvendelse, hvilket i mange år gjorde de to aktører til centrale spillere i en nichepræget global industri. Historien om neutrondoteret silicium kaster samtidig lys over en række spørgsmål, der knytter sig til flere af de dominerende forestillinger om og modeller for innovation.

## Indledning

For år tilbage indsamlede jeg genstande fra Forskningscenter Risø med henblik på at dokumentere aktiviteten ved centrets nukleare faciliteter, hvoraf de sidste var blevet nedlukket omkring 2000 og nu stod foran dekommissionering – et andet ord for skrotning og reetablering. Et konsortium af danske museer ønskede at bevare noget af den materielle kulturarv, der knyttede sig til Danmarks hedengangne og forkætrede atomforskningsprogram. Jeg var på jagt efter sager, som ikke bare fortalte en historie om livet på Risø, men helst også om det omgivende samfund. Det lignede umiddelbart en vanskelig opgave, da jeg denne dag befandt mig i en afgrænset og lukket verden bevogtet af vagter, og på vej ind i en reaktorbygning, hvortil adgangen var endnu mere begrænset. På vej ind gennem hovedindgangen til den store reaktor DR 3, Risøs flagskib, faldt mine øje på en montre, der stod ensomt i foyeren. Den indeholdt blandt andet en lille dyngesand, en projektilformet krystal og nogle tynde skiver af samme mærkværdige, sølvglinsende materiale.

Da jeg spurgte til indholdet i montren, fortalte ingeniøren, at materialet var silicium. Flere hundrede tons af dette materiale var blevet bestrålet i DR 3 i en periode fra midten af 1970'erne og frem til reaktorens nedlukning i 2000. Det bestrålede silicium blev primært brugt til fremstilling af tyristorer: en slags elektroniske halvlederkomponenter, der anvendes til at konvertere højspændt vekselstrøm til jævnstrøm. I montren lå også et enkelt eksemplar af disse eksotiske komponenter. Det danske elektricitetsnet er forbundet med Norge og Sverige gennem undersøiske kabler, der transporterer store mængder elektricitet frem og tilbage i form af højspændt jævnstrøm. Omdannelsen af vekselstrøm til jævnstrøm sker ved hjælp af tyristorer, der var fremstillet af silicium, der i sin tid var bestrålet i den reaktor, jeg nu var på vej ind i. Jeg havde fundet mine første

museumsgenstande. Genstande, der knyttede den hemmelighedsfulde atomreaktor direkte sammen med en så hverdagsagtig og trivielt ting som det at tænde og slukke for lyset, og som derved fortalte en ny og overraskende historie om disse arkane maskiner og deres rolle i samfundet.

Samtidig var jeg stødt på en for mig ukendt højteknologisk innovationshistorie, der i midten af 1970'erne var foregået i Danmark.<sup>1</sup> Den historie skal fortælles her, fordi den i sig selv er fascinerende, men også fordi den kaster lys over innovationens komplicerede karakter. Med afsæt i en teknologihistorisk fremstilling af neutrondoteringsprocessens historie, vil jeg i sammenfatningen fremdrage nogle pointer af innovationsteoretisk karakter. Der er dermed ikke tale om en egentlig virksomhedshistorie, men en historie om et innovationssamarbejde mellem en dansk halvlederproducent – Topsil – og en offentlig forskningsinstitution. Kort sagt: en historie om co-innovation. Pointen med dette begreb er, at innovation sjældent er et virksomhedsinternt anliggende, men ofte foregår i tæt samspil med forskellige aktører uden for virksomheden.<sup>2</sup>

## Neutrondoteret silicium

Lad os begynde med en faktabox. Det handler om et halvledermateriale, som kaldes neutrondoteret silicium eller NTD-silicium – en forkortelse af den engelske betegnelse *neutron transmutation doped silicon*. Neutrondoteret silicium er et udpræget nicheprodukt, et kostbart materiale, der hovedsageligt anvendes i højspændingselektronik, hvor der kræves særlig stor ensartethed, præcision og pålidelighed, som fx tyristorer til højspændingsensrettere, der benyttes i højhastighedstog, kraftværker og elektricitetstransmission. En tyristor er en højspændingsensretter baseret på silicium, hvor strømstyrken kan kontrolleres af et meget lille signal. Transistorer, integrerede kredse, dioder, tyristorer og andre elektroniske komponenter består af halvledermaterialer. Det kan fx være germanium eller silicium, som er gjort halvledende ved tilsætning (dotering) af små mængder fremmede stoffer som fx fosfor eller bor. Urenheder er normalt noget, man gerne vil fjerne fra materialer, men i dette tilfælde er urenhederne helt essentielle for materialets elektriske ledningsevne. Silicium har nemlig i ren form en meget lav ledningsevne. Ledningsevnen kan forøges ved at indføre små mængder af urenheder. Lige siden man i 1950'erne begyndte at fremstille transistorer og andre halvlederkomponenter af silicium, har man benyttet en fysisk-kemisk doteringsteknik til at indføre de ønskede urenheder i siliciumkrystallerne.

Før man tilsætter urenhederne, skal man dog have silicium af ultrahøj renhed. Teknikken dertil hedder zonesmeltning (*float zone*) og de rene siliciumkrystaller, der kommer ud af processen, kaldes FZ-silicium. Første del af processen består i at fremstille stænger af polysilicium (dvs. polykrystalinsk silicium). Disse stænger renses ved at bevæge dem langsomt gennem et ringformet varmelegeme. Herved produceres en zone af smeltet materiale tværs gennem siliciumstangen, på hvis forside silicium og urenheder smelter. Når smelten afkøler og genkrystalliserer fås et renere produkt, fordi urenhederne ophobes i smeltezone. Processen kan gentages med successivt stigende renhedsgrad til følge. Når processen til sidst gentages, lader man den flydende silicium krystallisere på et krystalkim, der langsomt trækkes væk fra smeltezone. Herved afsættes den størknende silicium som en lang enkrystal. I 1960'erne kunne teknologien kun frembringe krystaller med en diameter på op til en tomme, men siden da er størrelsen gradvist forøget op til de otte tommer (200 mm) krystaller, der nu er i produktion. Større diameter er ensbetydende med lavere enhedsomkostninger. På grund af siliciums høje smeltepunkt (1414 °C) er processen ekstremt energikrævende. FZ-silicium er et kostbart materiale, der kun benyttes, hvor det er strengt nødvendigt. Omkring 95 % af alt silicium på verdensmarkedet er produceret ved den langt billigere Czochralski-proces, hvor krystalliseringen sker i en kvartsdigel. Czochralski-silicium har et højt indhold af ilt, der optages fra kvartsdiglen. Dette har dog ikke har nogen nævneværdig betydning i

produktionen af computerchips og solceller. Czochralski-silicium er derfor basismaterialet i integrerede kredse, der bruges i telefoner, computere og anden forbrugerelektronik.<sup>3</sup>

FZ-processen benyttes både til at rense silicium for urenheder og til at producere rene *enkrystaller*. En enkrystal er et materiale med et ubrudt krystalgitter. Doteringsen – den kontrollerede tilsætning af urenheder – er et kapitel for sig. Med den kemiske doteringsteknik foregår det på følgende måde: Når enkrystallen til sidst trækkes ud, tilsættes smelten en kontrolleret mængde fosfor eller bor ved at lade processen ske i en atmosfære af gassen fosfin ( $\text{PH}_3$ ) eller diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ). Processen er dog yderst vanskelig og resulterer ikke i den helt jævne fordeling af fosfor-atomer, som komponentindustrien efterspørger til kraftkomponenter med snævre tolerancer og høj pålidelighed. Halvlederproducenterne var derfor nødt til at udvælge de bedste partier, hvilket medførte materialespild og var tidskrævende.<sup>4</sup>



*Siliciumkrystal ved begyndelsen af dyrkningsprocessen.*

*Kilde: Wikimedia Commons  
(Uploadet af Maratoni62)*

I midten af 1970'erne fremkom en ny alternativ doteringsproces baseret på reaktorneutroner, der med hensyn til kvalitet var langt mere fordelagtig. Den danske virksomhed Topsil og Forskningscenter Risø spillede en afgørende rolle i kommercialiseringen af denne proces. Humlen er denne: Naturligt silicium (Si) indeholder tre stabile isotoper, hvoraf omkring 3 % er isotopen  $^{30}\text{Si}$ . Under bestråling i en reaktor omdannes  $^{30}\text{Si}$  ved indfangning af en langsom neutron til den ustabile  $^{31}\text{Si}$ , som ved udsending af en betapartikel henfalder til den stabile fosforisotop  $^{31}\text{P}$ . Halveringstiden er 2,6 timer, hvilket betyder, at radioaktiviteten fra denne henfaldsproces efter blot to døgn er aftaget til omkring 1 milliontedel af den oprindelige intensitet. De to øvrige siliciumisotoper indfanger faktisk også langsomme neutroner, men det hører til naturens lykkelige tilfældigheder, at de derved dannede siliciumisotoper er stabile. For at NTD-processen kan gennemføres, er man nødt til at have et ultrarent produkt, da urenheder selv i meget små mængder vil skabe radioaktive stoffer, når materialet bombarderes med neutroner, hvilket gør slutproduktet uanvendeligt.

Ved at bestråle siliciumkrystaller i en reaktor kan man på denne måde erstatte en præcist kontrolleret mængde silicium med fosfor. Det er små mængder vi taler om: kun omkring en til ti ud af hver milliard siliciumatomer erstattes med fosforatomer. I forhold til silicium har fosfor en ekstra valenselektron, hvilket betyder at materialets ledningsevne stiger med antallet af fosforatomer. Fordelen ved neutrontotering er, at fordelingen af fosforatomer bliver meget jævn samt at doteringsprocessen kan kontrolleres mere præcist.

Neutrontoteringsprocessen er i virkeligheden mere kompleks end her angivet, bl.a. fordi  $^{31}\text{P}$  ved indfangning af en neutron omdannes til  $^{32}\text{P}$ , som henfalder til svovlisotopen  $^{32}\text{S}$  under udsendelse af en betapartikel. Minimering af denne sidereaktion er vigtig, da den ændrer materialets ledningsegenskaber. Hurtige (dvs. energirige) neutroner i reaktoren skaber desuden deformationer i krystalgitteret. Det er derfor fordelagtigt at anvende en reaktor med en høj flux af langsomme neutroner og en lav flux af hurtige neutroner. Deformationerne kan dog i vid udstrækning repareres gennem en såkaldt annealing, der består i en opvarmning af krystallen til 650-900 °C, hvorved krystalgitteret genoprettes.<sup>5</sup> Annealingprocessen er i sig selv afgørende for krystallens halvlederegenskaber og producenter, der råder over en effektiv annealingproces, har en betydelig konkurrencefordel. Detaljerne omkring denne proces er derfor en af NTD-industriens bedst bevogtede hemmeligheder.<sup>6</sup> Annealing er mindre afgørende ved kemisk dotering af silicium.

## Højspændt jævnstrøm og silicium

Størstedelen af det moderne elektricitetsnet er baseret på vekselstrøm, og sådan har det været siden første halvdel af 1900-tallet. I Danmark, hvor der længe var en decentral struktur, blev omstillingen til vekselstrømmen fuldblyrdet i årene efter Anden Verdenskrig.<sup>7</sup> Men når store mængder elektricitet skal transporteres over lange distancer, er det ofte en fordel at benytte højspændt jævnstrøm (High Voltage Direct Current, HVDC), da både anlægsomkostninger og strømtab er mindre end ved transmission af en tilsvarende mængde vekselstrøm. Det har man vidst siden 1920'erne, men anvendelsen af HVDC-teknologien blev i mange år bremset på grund af manglen på effektive og pålidelige ensrettere. Omdannelsen af vekselstrøm til højspændingsjævnstrøm sker i store højspændingsensrettere, der indeholder tusindvis af tyristorer. HVDC-forbindelser er i dag en af hjørne-stenene i det transeuropæiske elektricitetsnetværk.

Teknologien blev udviklet af ASEA i Sverige fra slutningen af 1920'erne og frem til 1950'erne med henblik på transport af elektricitet fra vandkraftværkerne i nord og ned til industricentrene i det sydlige Sverige.<sup>8</sup> En anden pioner på området var det tyske firma Siemens, der dog måtte lide den tort, at se deres prototypeanlæg ødelagt, konfiskeret og endda bragt til Sovjetunionen efter Anden Verdenskrig. Frem til begyndelsen af 1970'erne var HVDC-teknologien

baseret på en særlig højspændings kviksølvensretter ("thyatron"), som blev opfundet hos General Electric i 1921 og videreudviklet ikke mindst af ingeniøren Uno Lamm hos ASEA. Verdens første kommercielle HVDC-forbindelse forbandt Gotland til det svenske fastland og blev taget i brug i 1954. Uno Lamm havde på dette tidspunkt arbejdet på at forbedre sine kviksølvensrettere i 25 år. Der blev fra 1954 til 1972 installeret i alt 11 HVDC-forbindelser rundt om i verden baseret på kviksølvensrettere.<sup>9</sup> ASEA førte an i udviklingen og stod for konstruktionen af de seks. Med en markedsandel på op mod 60 % af den installerede kapacitet var ASEA den helt dominerende aktør. Blandt de øvrige spillere på markedet for store HVDC-projekter finder vi virksomhederne Siemens (Tyskland), General Electric (USA), Alstom (Frankrig), og endelig Brown, Boveri & Cie (BBC, Schweiz), der i 1988 fusionerede med ASEA under navnet ABB.

Disse store og meget kostbare transmissionsanlæg bruges typisk til undersøiske forbindelser eller på steder, hvor der er lang afstand mellem elproduktion og -konsumtion, som fx den såkaldte Pacific DC Intertie, der forbinder vandkraftværker i det nordvestlige USA med de store byer i det sydlige Californien. Dette projekt baseret på kviksølvensrettere blev projekteret og konstrueret af ASEA og General Electric i forening og igangsat i 1970. HVDC-teknologien har desuden den fordel, at elektricitets-flowet kan kontrolleres hurtigt og præcist, hvilket gjorde HVDC-forbindelserne til stabiliserende elementer i de stedse mere komplicerede elforsyningsnetværk, der med jævne mellemrum blev ramt af store og langvarige nedbrud.



*I montren ses en enkrystal af FZ-silicium. Til højre herfor ses tynde polerede skiver af NTD-silicium – såkaldte "wafere" – der er udgangspunktet for produktion af halvlederkomponenter. Forfatterens foto.*





*Hal med tyristorer i en transformatorstation for omdannelse af højspændt vekselstrøm til jævnstrøm. Kilde: Wikimedia Commons.*

I midten af 1957 opfandt ingeniører hos General Electric en ensretter baseret på silicium – den såkaldte SCR (Silicon Controlled Rectifier). Ingeniørerne valgte det umiddelbart lidt besynderlige navn ”thyristor” til den nye faststofbaserede ensretter, fordi General Electrics kviksølvensretter blev markedsført under handelsnavnet ”thyatron”. Tyristoren muliggjorde effektiv og økonomisk omdannelse af vekselstrøm til jævnstrøm i mindre skala, og brugen af tyristorer voksede derfor hurtigt i de efterfølgende år.<sup>10</sup> Men der skulle imidlertid gå nogle år før tyristorteknologien blev taget i kommerciel brug i HVDC-øjemed. Det første gennembrud for teknologien kom i 1970, hvor ASEA igen på forbindelsen til Gotland igangsatte verdens første HVDC-forbindelse baseret på tyristorer. Der blev dog i de efterfølgende år fortsat igangsat projekter baseret på kviksølvensrettere og årene frem til 1975 må betegnes som en teknologisk overgangsfase med to konkurrerende ensretterteknologier. Når udviklingen gik så langsomt, må det tilskrives en række forskellige faktorer. Der var i 1960’erne kun 4-5 virksomheder, der havde økonomisk og teknisk muskelkraft til at udvikle kompetencer på dette specialiserede og kapitalkrævende område. HVDC er præget af få store kapitalintensive projekter, hvilket favoriserer en konservativ ingeniørstil. Tyristoren kræver desuden brug af ekstremt rent silicium, der efter doteringen samtidig har en nøje specificeret og helt jævn fordeling af fosfor. Det helt ideelle materiale fandtes ikke, og et brugbart materiale kunne kun leveres af ganske få siliciumproducenter.<sup>11</sup>

Den konventionelle kemiske dotering foregår som sagt ved at tilsætte en kontrolleret mængde fosfor til den smeltede silicium, når man til slut trækker selve enkrystallen. Denne fremgangsmåde

er dog ikke er i stand til at give en jævn fordeling af fosforatomer gennem krystallen, idet tætheden varierer fra centrum og ud mod kanten af krystallen samtidig med, at der også optræder mikroskopiske tæthedsvariationer. Dette medfører, at modstanden vil variere hen over den færdige siliciumskive. Til fremstilling af effekttyristorer krævedes imidlertid en meget jævn fordeling af fosfor, da områder med lav modstand potentielt kan udvikle sig til ”hot-spots”, fordi strømstyrken vil være størst i disse områder – en velkendt og frygtet defekt, der indimellem medførte ødelæggelse ikke bare af enkelte tyristorer men af et helt højspændingsaggregat med store økonomiske tab til følge.<sup>12</sup>

Problemet med at opnå en jævn fordeling af fosforatomer i kemisk doteret silicium var dermed et kritisk flaskehalsproblem for leverandører af højspændingsrettere og HVDC forbindelser, og dermed i princippet for hele elektricitetssystemet. Vi har med andre ord her et klassisk eksempel på det, den amerikanske teknologihistoriker Thomas Hughes betegner som en ”reverse salient”. Herved forstår han en systemkomponent, som underperformer og derved bremser udviklingen af et større teknisk system. Metaforen er hentet fra militærverdenen og betegner et afgrænset segment af en front, der er kommet bagud i forhold til hovedfronten, fx fordi modstanderen står stærkt på dette sted. Reverse salients er dermed produktet af en ujævn udvikling af systemets forskellige komponenter. Identifikationen og elimineringen af reverse salients er for Hughes helt afgørende for et teknisk systems markedsmæssige succes. Dermed også sagt, at det primære formål med at eliminere problemet i reglen er ønsket om at forbedre systemets økonomiske performance.<sup>13</sup> Reverse salients er derfor locus for intensivt forsknings- og innovationsarbejde, der går ud på at afhjælpe eller fjerne problemet. Det var præcist hvad, der skete i dette tilfælde.

Hos Siemens, der både var producent af FZ-silicium og HVDC komponenter, forsøgte en forskningsgruppe omkring kemikeren Manfred Schnöller at eliminere tæthedsvariationerne i firmaets konventionelt doterede siliciumkrystaller ved hjælp af annealing gennem lang tid og ved temperaturer tæt på siliciums smeltepunkt. Helt uden målbart resultat. Schnöller begyndte derfor at se sig om efter en snedig måde, hvorved fosforatomerne kunne indsættes i krystallen efter, at den var færdigdannet. Af denne grund begyndte han i 1973 i samarbejde med ingeniøren Ernst Haas ved Kraftwerk Unions forskningslaboratorium at undersøge neutrondoteringsteknikken og fremstillingen af højspændingskomponenter af NTD-silicium. På basis af dette arbejde udtog Siemens fra efteråret 1974 og frem patent på neutrondoteringsprocessen i Tyskland og senere i en række andre lande, heriblandt også USA.<sup>14</sup> Schnöller var dog langt fra den første, der havde forfulgt dette spor.

Den teoretiske mulighed for at dotere silicium med reaktor neutroner blev oprindeligt påpeget i 1950-51 af faststoffysikeren Karl Lark-Horowitz fra Purdue University. Han bestrålede siliciumkrystaller, men fandt ikke den forventede forøgede ledningsevne, da den kraftige bestråling samtidig havde ødelagt krystalgitret. I slutningen af årtiet blev siliciumdotering med reaktor neutroner igen udforsket nærmere af Morris Tanenbaum fra Bell Labs. Det var ved Bell Labs, at den første transistor havde set dagens lys i 1947 og stedet var i årene efter Anden Verdenskrig halvlederindustriens absolutte mekka. Tanenbaum var en af tidens førende halvlederforskere. I 1954 skabte han den første siliciumtransistor – den komponent, der udgør det materielle fundament for den digitale computerteknologi, men da Bell Labs ikke gik videre med teknologien, blev det i stedet Texas Instruments, der høstede æren og frugten af denne vigtige opfindelse. Tanenbaum søgte i 1959 og fik udstedt et amerikansk patent, der dækkede både neutrondoteringsprocessen af silicium og de komponenter, der kunne fremstilles af materialet.<sup>15</sup> Sammen med A.D. Mills frembragte han neutrondoterede siliciumkrystaller, hvoraf de to forskere fremstillede og testede dioder med lav modstand. Denne komponenttype kunne dog lige så godt fremstilles af kemisk doteret silicium, men der fandtes endnu ikke noget oplagt marked for komponenter med højere modstand. Samtidig var forsøgsmaterialet forholdsvis radioaktivt, da

Tanenbaum ikke havde gjort noget for at minimere produktionen af den radioaktive fosforisotop  $^{32}\text{P}$  og heller ikke gav sig tid til at afvente, at radioaktivitet aftog. Neutrondoteret silicium blev derfor anset for uinteressant, indtil Manfred Schnöller fattede interesse for materialet og teknologien.<sup>16</sup>

## Topsil kommer på banen

Konkurrenterne havde imidlertid fået nys om Manfred Schnöllers arbejde med NTD-silicium. ASEA og BBC havde på dette tidspunkt en fælles arbejdsgruppe, der ligeledes arbejdede med at forbedre FZ-teknologien til produktion af silicium til højspændingskomponenter. I arbejdsgruppen deltog også ledende udviklingsfolk fra Topsil, en dansk halvledervirksomhed med speciale i ultrarent FZ-silicium.

Topsil var et spin-off af den danske katalysevirksomhed Haldor Topsøe. Her var man i slutningen af 1950'erne begyndt at interessere sig for halvledere, herunder ikke mindst silicium, på grund af visse berøringspunkter mellem halvlederteori og de katalyseproblemer, som virksomhedens ingeniører arbejdede med. Katalyséforskerne ønskede at skabe en ren siliciumoverflade, hvorfor man eksperimenterede med zonerensning og produktion af rene enkrystaller. I 1958 indkøbte Haldor Topsøe maskineri til zonerensning af silicium, der blev opstillet i den villa i Gentofte, der fungerede som virksomhedens hovedkvarter. Da virksomheden i 1960 opførte en katalysatorfabrik ved Frederikssund, besluttede Haldor Topsøe, at firmaet skulle påbegynde en industriel produktion af superrent FZ-silicium til den elektroniske industri. FZ-teknologien var på dette tidspunkt mindre end fem år gammel.

Udgangsmaterialet for produktionen var siliciumtetraklorid ( $\text{SiCl}_4$ ), som blev oprenset til stor renhed ved intensiv destillation og omdannet til polysilicium i en reaktion med hydrogen.<sup>17</sup> Ved zonerensning og krystallisering ved hjælp af FZ-teknologien omdannedes dette materiale til enkrystaller af ekstrem høj renhed. Virksomheden lancerede hurtigt sit første højkvalitetsprodukt "hyper pure silicon" (HPS). Siden fulgte et andet højkvalitetsprodukt, dislokationsfri silicium, der blev markedsført under handelsnavnet "Topsil". De færdige produkter blev solgt udskåret og poleret som tynde skiver med en typisk tykkelse på omkring 1/3 millimeter – såkaldte "wafere". Fabrikken i Frederikssund var frem til nogle begivenhedsrige år i 1970'erne en komplet siliciumfabrik, der ud over FZ-silicium blandt andet producerede Czochralski-silicium og FZ-apparatur. Virksomheden havde nemlig udviklet sine egne maskiner til zonesmelting. I slutningen af 1960'erne angives den totale medarbejderstab til 200-300.

Topsils FZ-silicium blev overvejende brugt i kraftkomponenter som ensretterdioder, tyristorer og transistorer. Kernekunderne omfattede producenter af højspændingskomponenter som BBC, Alstrom, Philips, International Rectifier Corporation (IRC) og Semikron. Man vidste på dette tidspunkt i Frederikssund i virkeligheden kun lidt om, hvad produkterne blev brugt til hos kunderne, da disse ifølge lederen af fabrikken holdt kortene tæt ind til kroppen. Siliciumforretningen var aldrig en kerneaktivitet for Haldor Topsøe, og slet ikke en *cash cow*. Det var vanskeligt at tjene penge på en produktion, der både var investeringstung og stærkt diversificeret. Hvor meget eller hvor lidt, der blev tjent, er der ingen, der helt præcist ved, for der blev ifølge fabrikkens daglige leder ikke ført noget officielt regnskab!<sup>18</sup>





*Haldor Topsøes katalysator- og siliciumfabrik i Frederikssund, i dag kendt som Topsil Semiconductor Materials A/S, som fabrikkomplekset tog sig ud ved midten af 1960'erne. Fremstillingen af siliciumkrystaller foregik i den lange bygning i forgrunden, mens råmaterialet (polykrystalinsk silicium), blev fremstillet i skråtagsbygningen i midten af komplekset. Fotoet er venligst stillet til rådighed af Arne V. Jensen.*

I begyndelsen af 1970'erne fik Haldor Topsøe økonomiske problemer. Siliciumproduktionen blev frasolgt til den hæderkronede danske elektrotekniske virksomhed Thrige-Titan med den flamboyante og til tider brutale industrimatador Steen Danø i spidsen.<sup>19</sup> Steen Danø, der i denne sag blev sekunderet af professor Niels I. Meyer fra Danmarks Tekniske Højskoles halvlederlaboratorium, indsatte en helt ny og i FZ-sammenhæng uerfaren ledelse for virksomheden, der herefter antog navnet Topsil efter virksomhedens mest fremtrædende varemærke. Aktivitetsniveauet i den nye virksomhed var væsentligt lavere, idet medarbejderstaben blev mere end halveret. Haldor Topsøe beholdt en del af virksomheden, der under navnet HT-Equipment fortsatte som producent af maskiner til fremstilling af FZ-silicium.

Den lille Frederikssund-virksomhed havde længe leveret kemisk doterede silicium-wafers til nogle af de førende producenter af højspændingsanlæg, men ikke til den markedsledende virksomhed, ASEA, der sværgede til silicium fra den italienske konkurrent Montecatini.<sup>20</sup> Efter at Thrige-Titan kom ind i billedet ændrede dette sig. Forbindelsen til ASEA kom i stand via Steen Danø og Thrige-Titan. ASEA havde i 1967 overtaget 40 % af aktierne i Thrige-Titan, hvorefter der blev etableret et verdensomspændende samarbejde om produktion og markedsføring.<sup>21</sup> På et møde i den førnævnte arbejdsgruppe med ASEA, BBC og Topsil fik den danske virksomheds daværende

udviklingschef Hans Janus i foråret 1974 fra BBC et tip om, at Siemens arbejdede med en ny doteringsteknik baseret på reaktorbestråling.<sup>22</sup> Hans Janus kontaktede derfor Kaj Heydorn, der var leder af Risøs Isotoplaboratorium, for at høre, om de ville medvirke til at lave en forsøgsbestråling af silicium. Isotoplaboratoriet var den del af Risø, der havde ansvaret for produktion og distribution af radioaktive isotoper og radioaktivt mærkede forbindelser.<sup>23</sup>



*Float-zone apparatur hos Haldor Topsøe omkring 1970. Fotoet er venligst stillet til rådighed af Arne V. Jensen.*

På Risø blev henvendelsen indledningsvist mødt med skepsis, da de hidtidige erfaringer fortalte, at det bestrålede silicium ville være alt for radioaktivt til at kunne benyttes. Man var dog villige til at lave et forsøg.<sup>24</sup> Den 22. april 1974 indsattes en lille siliciumkrystal på 50 gram i den termiske kolonne på Risø-reaktoren DR 2. Krystallen blev udtaget efter 12 timer, efter midtvejs at havde været drejet en halv omgang. Stor var overraskelsen og glæden hos alle implicerede, da det viste sig at krystallen ikke var særlig radioaktiv. Fem dage senere kunne den returneres til Topsil. Markedsreaktionen på de første prøveleverancer udsendt i november 1974 var ifølge Topsil ”overvældende”, og leverancerne nåede hurtigt DR 2’s kapacitetsgrænse på 2-5 kg per måned. Der gik nu efterhånden rygter om, at et par tyske firmaer (heriblandt formentlig Siemens) var begyndt at benytte NTD-processen i deres interne produktion, men Topsil var den første siliciumproducent, der bragte neutrondoteret silicium ud på det frie marked.<sup>25</sup> Det er derfor berettiget, at tilskrive Topsil en væsentlig del af æren for innovationen af NDT-silicium.

Topsil var på dette tidspunkt gennem et tysk firma ved at byde ind på leverancen af neutrondoteret silicium til højspændingsretterne til et amerikansk kraftværk, der var under opførelse. Som allerede nævnt, var leverandørerne af højspændingsrettere i første halvdel af 1970’erne ved at gå fra kviksølvrettere til den nye teknologi baseret på tyristorer. Der var altså potentielt ved at blive skabt et stort lukrativt marked for neutrondoteret silicium til tyristorer med høj kapacitet og pålidelighed, hvilket var baggrunden for, at forskning i neutrondoteret silicium interesserede ASEA, BBC og Topsil. Dette er en vigtig pointe, da man ellers let kan komme til at tro, at historien om NTD-silicium alene handler om forskning og videnskab, og vi derfor her har en historie, der bekræfter den videnskabscentrerede samlebåndsmodel for innovation. I dette tilfælde var det ret beset omvendt: forskningen i NTD-silicium blev først for alvor interessant som teknologi i det øjeblik, hvor Topsil og producenterne af kraftkomponenter kunne se et marked for et produkt. Det manglende marked var som tidligere anført samtidig en af grundene til, at den kommercielle interesse for NTD-silicium var forblevet lav i 1960’erne til trods for, at der for længst var udtaget patenter på området. Nu var situationen en anden. Det marked, der hidtil havde manglet for high-performance produkter, var ved at åbne sig med det store gennembrud for tyristor-teknologien og HVDC. I konklusionen vil jeg vende tilbage til denne diskussion.

### ”så forfærdeligt besværligt”

Fra et socio-teknisk og organisatorisk synspunkt var neutrondoteringsteknologien langt mere kompleks end den kemiske doteringsteknologi. Ved den kemiske doteringsteknologi var alle led i produktionen samlet hos halvlederproducenten. For producenterne var neutrondotering ensbetydende med, at man for første gang måtte involvere andre parter i produktions- og innovationsprocessen.<sup>26</sup> Det drejer sig primært om operatørerne og lederne af de forskningsreaktorer, hvori doteringen finder sted, og om de offentlige forskningsinstitutioner, der driver reaktorerne. Halvlederproducenterne bragtes derved ind i et tæt samspil med offentlige institutioner. I det følgende vil jeg med udgangspunkt i samspillet mellem Topsil og Risø konkretisere nogle af de problemer, der opstod i spændingsfeltet mellem den private og den offentlige sektor.

DR 2-reaktoren blev i de følgende måneder benyttet til at lave en mindre produktion, som skulle indgå i en leverance af prøvekomponenter, der skulle testes i USA. DR 2 var en forholdsvis simpel letvandsmodereret forsøgsreaktor af amerikansk konstruktion. Bestrålingen af silicium i denne facilitet var omstændelig, da siliciumkrystallerne midtvejs i processen skulle drejes manuelt, hvilket kun kunne ske, når reaktoren var lukket ned.<sup>27</sup> Prøveleverancen blev dog fuldført. Men så opstod der pludselig et uventet problem: Risøs ledelse besluttede nemlig i løbet af 1974 at nedlukke

DR 2 for bestandigt. Man havde dog ikke fået meddelt denne beslutning til Isotoplaboratoriet, der havde givet Topsil tilsagn om, at man var i stand til at bestråle firmaets silicium, hvis de rent faktisk gik hen og fik ordren til USA. Hvis Topsil fik sin ordre, ville Isotoplaboratoriet være i den pinlige situation, at man ikke var i stand til at bestråle, hvorved begge parter ville miste både troværdighed og en potentiel fremtidig indtægtskilde.

Isotoplaboratoriets leder Kaj Heydorn gik derfor til Risøs direktion og forlangte midler til at opbygge nye bestrålingsfaciliteter ved DR 3. Direktionen var da også indstillet på, at der hurtigst muligt blev opbygget nye bestrålingsfaciliteter i DR 3. Dog ikke til bestråling af silicium, som man i direktionen ikke rigtig havde nogen interesse i.<sup>28</sup> Der var nok heller ikke nogen, der i efteråret 1974 kunne forudsige den betydning, som neutrondoteret silicium ville få i fremtiden. Den egentlige årsag til direktionens reservede holdning, fremgår af underdirektør Cecil F. Jacobsens bemærkninger til sagen: ”[D]et sørgelige i forbindelse med sager af denne art [er], at jo bedre det går, jo dyrere bliver det for Risø, fordi vi ikke kan bruge indtægten. [...] Jeg synes, at det hele er så forfærdeligt besværligt, når vi gør noget for penge, som vi ikke må bruge.”<sup>29</sup> Den lunkne holdning var altså først og fremmest dikteret af økonomi. Humlen var, at indtægterne gik direkte i statskassen, mens Risøs ekstraudgifter først et til to år senere blev udlignet gennem tillægsbevillinger via finansloven, hvor der tilmed var en risiko for, at pengene forsvandt under de politiske forhandlinger om en finanslov. Der var således en betydelig økonomisk risiko og bureaukrati forbundet med indtægtsdækket virksomhed i større stil, og absolut ingen gulerod. Det var et strukturelt problem, som gennem mange år var en hæmsko for direkte samarbejde mellem erhvervsvirksomheder og de videnskabelige institutioner, og som i mange tilfælde blev løst ved skabelsen af selvejende selskaber eller institutter i relation til de offentlige laboratorier.<sup>30</sup>

Topsil havde ikke penge til at finansiere udviklingen af en bestrålingsfacilitet. I den situation valgte man at spille højt spil. Uden direktionens viden bestilte Heydorn ved Risøs konstruktionsafdeling sammen med de øvrige faciliteter også en siliciumbestrålingsfacilitet. Samtidig søgte Topsil den statslige fond *Fondet til Fremme af Teknisk og Industriel Udvikling* (”udviklingsfondet”) om et beløb, der kunne dække regningen for fremstillingsarbejdet i Risøs konstruktionsafdeling.<sup>31</sup> Parallelt hermed arbejdede konstruktionsafdelingen under stort pres på at fremstille verdens første bestrålingsfacilitet til silicium. Der var tale om et fuldstændigt nyt område, hvor der ikke fandtes noget fortilfælde at modellere faciliteten over. Trods den usikre finansieringssituation, ingen forudgående erfaring og en stram deadline, lykkedes det konstruktionsafdelingen at få installeret en funktionsdygtig bestrålingsfacilitet i DR 3 per 1. november 1975, da DR 2 lukkede ned for sidste gang. Til alt held klappede det hele i sidste ende, da Topsil både fik sin fondsbevilling og den første ordre på NTD-silicium til det amerikanske projekt i hus.<sup>32</sup> Trods den turbulente begyndelse blev Topsil med hjælp fra Risø det første firma i verden, der bragte NTD-silicium på verdensmarkedet.

Hvor det tekniske samarbejde forløb uden de store problemer, var der større uoverensstemmelser på det juridiske plan. Det tog således næsten 15 måneder at få kontrakten om bestråling i DR 3 på plads. Et af problemerne var, at Topsil søgte at få eksklusivt monopol eller i det mindste forkøbsret på hele den fremtidige siliciumbestrålingskapacitet i DR 3 for derved at afskære konkurrenter fra at benytte reaktoren, hvilket selvfølgelig var helt uacceptabelt for Risø.<sup>33</sup>

Midt i euforien var der dog også sorte skyer. Det patent, der var udtaget af Siemens, beskrev ret præcist den fremgangsmetode, som man også fulgte på Risø, hvilket vakte bekymring hos lederen af Isotoplaboratoriet. Patentet blev udtaget i en række lande, men dog ikke i Danmark. Ved at holde lav profil lykkedes det at undgå at skabe opmærksomhed om sagen.<sup>34</sup> Et er at have et patent. Noget helt andet er at håndhæve patentet. De mange offentlige atomforskningsinstitutioner, der i de følgende gik ind i NTD-området, antyder, at Siemens valgte ikke at håndhæve deres patent. Siemens gik da heller ikke selv ind i produktionen af NTD-silicium, hvorved patentproblemet i



sidste ende var til at overse. Topsils patentstrategi var i mange tilfælde at lede efter huller i de store virksomheders patenter og omgå patenterne med spidsfindige modifikationer af processen.<sup>35</sup>

Topsils første prøveleverancer blev som sagt leveret i efteråret 1974 og i det efterfølgende år aftog kraftkomponentproducenterne i alt 160 kg NTD-silicium. Kort efter var produktet universelt accepteret blandt komponentproducenterne og i 1977 nåede den globale produktion op på knap 10 tons.<sup>36</sup> Endnu inden faciliteten i DR 3 var taget i brug, begyndte Topsil derfor at presse på for at øge bestrålingskapaciteten væsentligt.

Risø var imidlertid tilbageholdende og først i efteråret 1976 fandt Isotoplaboratoriet det opportunt at diskutere en udvidelse af bestrålingskapaciteten. Der var i mellemtiden sket en mindre revolution på Risø, som fik stor betydning for den videre udvikling. Kaj Heydorn kunne således på et møde hos Topsil i oktober 1976 meddele samarbejdspartneren, at "Risøs nye bestyrelse og direktion var interesserede i samarbejde med industrien"<sup>37</sup>. Holdningsændringen til industrisamarbejde var indtruffet efter, at regeringen i sommeren 1976 valgte at udskyde beslutningen om bygningen af atomkraftværker i Danmark. Kort forinden var den næsten almægtige Atomenergikommission, der fra begyndelsen stod i spidsen for Risøs arbejde og skulle rådgive regeringen om atomenergispørgsmål, blevet nedlagt samtidig med, at Risø fik en ny bestyrelse og direktion. Atomforsøgsstationens mission blev herved med et slag bredere, og nu defineret som generel energiforskning i modsætning til blot atomenergi. Strammere økonomiske rammer skabte samtidigt på Risø et mere positivt syn på indtægtsdækket virksomhed og industrisamarbejde.<sup>38</sup> Der blev nu for Topsils regning konstrueret og installeret fire nye bestrålingsrigs i DR 3, der gik i drift fra begyndelsen af 1978.



*Udtagning af siliciumkrystal fra lagerområder på toppen af DR 3 følges af helseassistent med strålingsmonitor. Siliciumkrystallen er indkapslet i en dåse af aluminium og har stået til "afkøling" efter bestråling i reaktoren. Foto fra sidst i 1970'erne. Risøs Billedarkiv.*

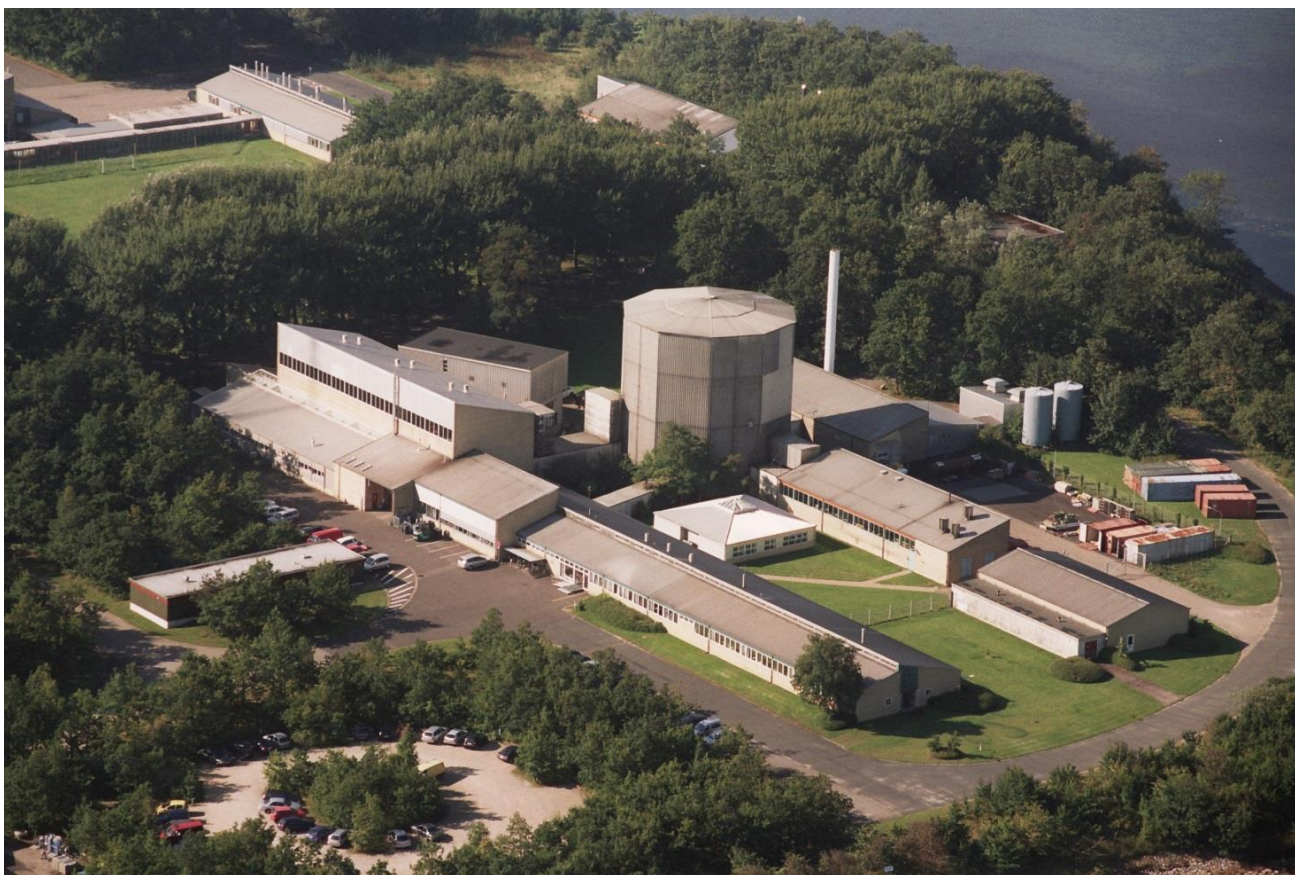


Også hos Topsil var der sket gennemgribende forandringer siden samarbejdet med Risø blev indledt. Thrige-Titan videresolgte allerede i 1974 Topsil til den gigantiske amerikanske elektronik-koncern Motorola, der på dette tidspunkt havde brug for ny siliciumkapacitet og derfor lagde et godt bud. Topsils primære forretningsstrategi sigtede mod at blive en førende leverandør af silicium til højspændingsmarkedet. Et eksempel er firmaets leverancer til Konti-Skan-forbindelsen, der under Kattedag forbinder det danske og svenske elektricitetsnet. De tyristorer, der bruges i Konti-Skan, siges at være produceret af NTD-silicium fra Topsil og Risø.<sup>39</sup> Da Risøs bestrålingskapacitet i de første år var begrænset, fik Topsil også bestrålet silicium i Norge (Kjeller), Sverige (Studsvik), England (Harwell) og Frankrig (CEA/CENG).<sup>40</sup> Svenskerne var stærkt interesseret i NTD-silicium og konstruerede fuldautomatiske bestrålingsfaciliteter til deres forsøgsreaktor R2. Topsils samarbejde med den franske atomenergikommission CEA var særligt tæt og involverede ud over NTD-silicium også overførsel af virksomhedens knowhow vedrørende indium og bismuthdoteret silicium til infrarøde detektorer. Frankrig satsede i disse år stærkt på NTD-silicium ikke mindst på grund af behovet for avanceret HVDC-teknologi i forbindelse med udviklingen af TGV-højhastighedstoget. Samtidig søgte virksomheden også at udnytte sin specialkompetence inden for produktion af hyper pure silicon til specialkomponenter, hvor marginerne var større. Motorolas ejerskab gav også adgang til kontrakter for det amerikanske militær. Topsil leverede således hyper pure silicon til den amerikanske våbenproducent Martin Marietta til brug i varmesøgende missilers infrarøde detektorer. I slutningen af 1970'erne havde virksomheden også en lukrativ udviklingskontrakt med US Air Force om udviklingen af indiumdoteret silicium til samme formål.<sup>41</sup> Alt dette var dog pynt på kagen. Topsils hovedmarked lå i slutningen af 1970'erne og i 1980'erne i Japan, hvis boomende elektronikindustri Topsil blandt andet havde adgang til gennem et tæt samarbejde med Osaka Titanium Corporation (OTC). I 1984 afsatte virksomheden omkring 50 % af sin produktion i Japan, mens USA og Europa hver stod for 25 %.<sup>42</sup>

Topsil var en af de siliciumproducenter, der i slutningen af 1970'erne gik forrest med at udbrede anvendelsen af neutrondoteret silicium. Fundamentet var i orden. Man havde nemlig på dette tidspunkt i Frederikssund et produkt, der var *best in-class*. Heinz Herzer fra konkurrenten Wacker-Chemitronic udtalte således et par år senere om konkurrencesituationen i de tidlige år omkring 1975-78: ”Ingen var i tvivl om, at Topsil's NTD-silicium skiver (wafers) var de bedste i verden”. Men der blev også begået nogle fatale fejlgreb, som Heinz Herzer kunne udpege: Opskæring og polering af wafers blev i 1978 flyttet til Motorolas gigantiske fabrikskompleks i Phoenix (Arizona), hvor det viste sig umuligt at opretholde kvaliteten. Topsil kørte i slutningen af 1970'erne en aggressiv prispolitik, der år efter år resulterede i en blødende bundlinje.<sup>43</sup> Opmuntret af den kommercielle succes for neutrondoteret silicium og den øgede konkurrence fra de øvrige producenter vedtog virksomheden i 1979 en forretningsplan, der helt udfasede brugen af den konventionelle dateringsteknik. Prisen på neutrondoteret silicium er omkring 50 % højere end konventionelt doteret silicium.<sup>44</sup> Ved at gå over til udelukkende at benytte neutrondoteret silicium kunne Topsil forenkles produktionsgangen og høste stordriftsfordele, hvilket kompenserede for de øgede dateringsomkostninger.<sup>45</sup> Den kemiske dateringsteknik var som tidligere nævnt vanskelig at styre, hvilket medførte, at producenterne måtte kassere en hel del silicium. En væsentlig fordel ved NTD-processen var, at den resulterede i lavere materialeforbrug under produktionsprocessen. Og fordi produktet var mere ensartet, kunne komponentproducenterne også reducere den anvendte mængde FZ-silicium pr. komponent. Alt i alt medførte dette ifølge Topsils direktør, at efterspørgslen efter FZ-silicium i slutningen af 1970'erne stagnerede til trods af en underlæggende vækst på 15 % pr. år i markedet for komponenter.<sup>46</sup>

## Industrialiseret siliciumdotering på Risø

Med flytningen til DR 3 havde Isotoplaboratoriet fået adgang til den perfekte reaktor til siliciumbestråling. Den store tungtvandsreaktor havde nemlig et stort volumen, hvor neutronerne har den rette hastighed, idet der til doteringen kræves langsomme (såkaldt termiske) neutroner. Reaktoren havde dermed potentielt en meget høj produktionskapacitet. Mere vigtigt er det dog, at forholdet mellem langsomme og hurtige neutroner netop er mest fordelagtig i en tungtvandsreaktor, hvilket er optimalt for produktets kvalitet, da hurtige neutroner øger antallet af deformationer i krystalgitteret, der kun kan genoprettes ved en effektiv annealing. Derfor var tungtvandsreaktorer som DR 3 i høj kurs hos NTD-producenterne.<sup>47</sup> Nogle læsere vil måske undre sig over, at man ikke bare bruger almindelige kraftreaktorer til doteringen. Svaret er, at forsøgsreaktorerne netop er designet specielt med henblik på bestråling af materialer og til dette formål er gennemskåret af forsøgsrør og forsøgshuller. Et forsøgshul eller -rør er en åbning, der giver adgang til området med høj neutronintensitet nær reaktorkernen eller i reaktortanken. Forsøgsreaktorer er dermed langt bedre til sådanne formål.



*Reaktorkomplekset omkring Forskningscenter Risøs flagskib, forsøgsreaktoren DR 3. Kilde: Risø billedarkiv.*

Efter en langsom opstart i midten af 1970'erne lykkedes det i løbet af de næste 20 år for Isotoplaboratoriet at opbygge en række bestrålningsfaciliteter og skaffe andre kunder end Topsil. Topsil var ikke en stor spiller, og som vi senere skal uddybe, kørte virksomheden i slutningen af 1970'erne

med store underskud og galoperende gældsforpligtelser. Skulle man sikre sig en fortsat position i den internationale doteringsbranche, som man selv havde været med til at skabe, måtte Risø ud i verden for at skaffe sig andre kunder. Men Isotoplaboratoriet havde næsten ingen viden om de øvrige siliciumproducenter og hyrede derfor en tidligere salgschef fra Topsil som konsulent. Herigennem kom man i 1979 i kontakt med Heinz Herzer, der stod i spidsen for den tyske kemikoncern Wacker-Chemitronics afdeling for FZ-silicium.<sup>48</sup>

Wacker var Europas største producent af FZ-silicium og neutrontoteret silicium og fik i forvejen bestrålet silicium både i Tyskland, Frankrig og England. Firmaet var storkunde hos Harwell i England, hvor de igennem flere år havde fået bestrålet silicium i DR 3's søsterreaktorer DIDO og PLUTO. Wackers NTD-forretning var inde i en ekstremt hurtig ekspansion og der var netop indledt helt nye bestrålingsamarbejder med atomforskningsstationer i Sverige (Studsvik) og Italien (Ispra). I forhold til sidstnævnte udtrykte Heinz Herzer dog stor betænkelighed med hensyn til effektiviteten. Heller ikke Harwell havde formået at leve op til Wackers kapacitetsforventninger og behov. Man var derfor stærkt interesseret i ny kapacitet primært til bestråling af krystaller med en diameter på 4 tommer, som Wacker som de første i verden netop havde sat i produktion.<sup>49</sup> Det var lidt af et scoop, da Risø i 1980 indgik kontrakt med Wacker om bestråling af en betragtelig del af deres silicium efter en i forvejen fastlagt pris og leveringsplan for en årrække frem. Aftalen var dristig for begge parter, fordi de nødvendige bestrålingsfaciliteter endnu ikke fandtes. Et centralt element i aftalen var netop, at den sikrede penge til en løbende udbygning af bestrålingsfaciliteter i DR 3.<sup>50</sup> Men der var også en hage: bestrålingerne for Wacker skulle nemlig delvist finde sted i Topsils bestrålingsfaciliteter. Arrangementet blev dog accepteret af Topsil, der samtidig fik option på en del af kapaciteten i den kommende 4-tommerfacilitet.

Kontrakten med Wacker kom på det helt rigtige tidspunkt. Markedet for kraftkomponenter er ekstremt cyklisk, med hyppige perioder med boom i efterspørgslen efterfulgt af stagnation. I anden halvdel af 1980 gik det sløjt med salget af Topsils produkter og Motorola besluttede sig for at lukke virksomheden med virkning fra udgangen af marts 1981. Ifølge *Børsen* havde Motorola på dette tidspunkt tabt mindst 47 millioner kr. på ejerskabet af Topsil. Nu var tålmodigheden opbrugt.<sup>51</sup> Afhændelsen skulle efter amerikansk mønster ske ved bortauktion af Topsils maskiner, lager og bygninger stykke for stykke. Man var på Risø pludselig havnet i en yderst delikat situation, idet Topsil jo ejede det udstyr, som for tiden blev brugt til bestråling for Wacker og uden hvilket Risø ikke kunne opfylde sine kontraktlige forpligtelser. Alle bolde var dermed kastet op i luften. I tiden op til nedlukningen var der tilmed gået alvorligt knas i samarbejdet mellem Risø og Topsil. Sidstnævnte var af den opfattelse, at Risø i forbindelse med kontraktforhandlingerne med Wacker havde lovet at åbne endnu en bestrålingsfacilitet for at sikre, at begge firmaers behov kunne dækkes.<sup>52</sup> Der blev truet med sagsanlæg fra begge sider.

Bortauktionen af Topsil skulle efter planen ske i maj 1981. I sidste time blev den dødsdømte virksomhed overtaget af det amerikanske firma Phoenix Materials Corporation i samarbejde med dansk-amerikaneren Leif Petersen.<sup>53</sup> Da Topsil på papiret ejede flere af de bestrålingsfaciliteter, der var installeret i DR 3, var det en kilde til usikkerhed på Risø. Direktøren for Phoenix Materials Corporation, William Santini, var klar over, at han ejede en del af Risøs bestrålingsfaciliteter og kom personligt ned til Risø for at besigtige sin ejendom. Han oplyste, at der i fremtiden ikke skulle fremstilles silicium på Topsil og han ville derfor gerne have bestrålingsfaciliteterne med, så de kunne sælges sammen med det øvrige produktionsudstyr i Frederikssund. Isotoplaboratoriet var omvendt nødt til at råde over faciliteterne for at kunne opfylde forpligtelserne over for Wacker. Kravet blev derfor afvist med henvisning til, at faciliteterne var alt for radioaktive. Bølgerne gik højt, og William Santini truede med at pudse sine jurister på sagen. Den delikate sag fandt først sin løsning, da de nye ejere besluttede sig for at genoplive siliciumproduktionen i Frederikssund under navnet Topsil af 1981 A/S. Til at lede virksomheden headhuntede William Santini den mand, som

Motorola havde sat i spidsen for virksomhedens afvikling. Affæren fik som konsekvens, at Risø gennem løbende rabatter til Topsil over nogle år fik overtaget faciliteterne 100 %.<sup>54</sup>

Afviklingen af Topsil efterlod Risø i en ny strategisk situation, som Kaj Heydorn i december 1980 evaluerede i et internt notat. Det mest oplagte var at finde nye udenlandske samarbejdspartnere til den ledige bestrålingskapacitet, ”men herved mister Danmark den ekspertise inden for NTD silicium, som har været grundlaget for Topsils virksomhed og internationale prestige”. En mere offensiv strategi blev derfor skitseret. Den indebar, at ”Risø [selv] indkøber FZ silicium krystaller og neutrondoterer disse med henblik på direkte salg til kunderne”. Den nødvendige industrielle knowhow og personale var tilgængelig og kunne erhverves qua lukningen af Topsil, ræsonnerede Heydorn optimistisk.<sup>55</sup> Forslaget gik i en nøddeskal ud på at forsøge at overtage Topsils produkt og markedspostion. Denne radikale strategi, der ville forvandle Risø fra serviceleverandør til en kommerciel produktionsvirksomhed, blev dog aldrig forfulgt. Men det, at den overhovedet blev overvejet, viser, i hvor høj grad NTD-doteringen havde udvisket grænserne mellem offentlig og privat.

Verdensmarkedet for NTD-silicium blev i 1980'erne domineret af seks virksomheder: foruden Topsil og Wacker-Chemitronic i Europa, drejede det sig om Monsanto (USA) og de tre japanske firmaer Komatsu Electronic Metals, Shin-Etsu og Japan Silicon.<sup>56</sup> Japanerne havde allerede i begyndelsen af 1980'erne en stærk position på det globale marked. I foråret 1981 skulle HT-Equipment levere nyudviklet FZ-udstyr til Komatsu og herigennem kom Isotoplaboratoriet i kontakt med det japanske firma. Den danske ambassade i Tokyo fik yderligere udvirket, at Isotoplaboratoriet i april samme år kom med i den officielle erhvervsdelegation ved det danske kongehus' officielle besøg i Japan. Det førte til en vigtig kontrakt med Komatsu, der blev indgået netop mens Topsil var ude at svømme. Dette er endnu et eksempel, der viser hvor forretningsmæssigt og langsigtet, der nu blev tænkt og eksekveret på Risø. Da der først var kommet hul igennem til den japanske siliciumindustri gik det stærkt. I de følgende år og indtil DR 3's nedlukning i 2000 bestrålede Risø silicium for fem store japanske firmaer: Komatsu, Shin-Etsu, Japan Silicon, Toshiba og OTC/Sumitomi Sitix Corporation.<sup>57</sup>

I Japan var situationen den, at de hjemlige forsøgsreaktorer ikke var særlig interesseret i siliciumdotering. Det gav sig udslag i så eksorbitant høje priser, at det kunne betale sig for de japanske firmaer at sende deres silicium med luftfragt til dotering i Europa. Ifølge forlydender fra de japanske firmaer var der også i Japan problemer med at overholde leveringstiderne. Den japanske siliciumindustri var på et tidligt tidspunkt begyndt at benytte udenlandske reaktorer. Men også her var der ind i mellem problemer. Et af firmaerne talte åbent om dårlige erfaringer med at få bestrålet silicium ved den amerikanske universitetsreaktor i Missouri.<sup>58</sup> De japanske firmaers voksende interesse for Risø skal formentlig også ses i lyset af, at den eneste tungtvandsreaktor i Japan, JRR-3, stod foran nedlukning. Reaktoren, der hidtil havde været centrum for den japanske doteringsindustri, blev lukket 1. januar 1983 og undergik en ombygning for så at genåbne i 1990.

DR 3 var Risøs flagskib. Den store engelskdesignede tungtvandsreaktor var oprindeligt erhvervet med henblik på test af reaktormaterialer og til forskning. Da Risø mod slutningen af 1960'erne måtte opgive tanken om at udvikle sin egen kraftreaktor, blev reaktoren i stigende grad overtaget af fysikerne, som i løbet af 1960'erne opbyggede en af Europas førende faciliteter til neutron- og materialefysik.<sup>59</sup> Med flytningen til DR 3 var siliciumproduktionen kommet til et sted med næsten ubegrænsede muligheder for vækst. I 1987 var man nået så vidt, at Isotoplaboratoriet lagde beslag på alle disponible lodrette forsøgshuller i DR 3. Man bestrålede dette år i alt 16 tons silicium, hvilket svarede til 95 % af kapaciteten på toppen af reaktoren. Hvis man fortsat skulle imødekomme den stigende efterspørgsel på siliciumdotering, måtte man altså se sig om efter ny bestrålingskapacitet.

Reaktoren var ud over de lodrette forsøgshuller på toppen også forsynet med fire vandrette forsøgsrør. I 1990 besluttede fysikerne at rømme et af disse vandrette forsøgsrør, som dermed gav plads til den ekspanderende doteringsforretning. I 1997-98 overtog siliciumdoteringen endnu et af reaktorens vandrette forsøgsrør. De vandrette forsøgsrør havde potentielt større kapacitet, da de muliggjorde automatisering af doteringsprocessen ved hjælp af computerstyrede bestrålingsfaciliteter, hvilket dog viste sig at være en overordentlig kompliceret affære. Samtidig forøgedes kapaciteten for emner med en diameter på 5 tommer væsentligt. Dette var vigtigt, fordi udviklingen i siliciumindustrien hele tiden gik hen imod større diameter, der for firmaerne var ensbetydende med lavere produktionsomkostninger. I de vandrette forsøgsrør blev der opstillet avancerede anordninger med computerstyring af dosis og automatisk fragt af siliciumkrystallerne ind og ud af reaktoren.<sup>60</sup> Selvom doteringsforretningen nu antog industrielle dimensioner, er det værd at bemærke, at der ikke var tale om serieproduktion. Hver siliciumkrystal krævede nemlig fortsat en individuelt fastsat strålingsdosis indenfor stramme tolerancer. Hertil kommer, at silicium er et skørt materiale, der skal håndteres med varsomhed. Der var dermed en grænse for, hvor automatiseret bestrålingsprocessen kunne blive.

Silicium til tyristorer sælges som tynde ”wafere”. For siliciumproducenterne ville det være fordelagtigt, hvis man i stedet for at dotere krystallerne kunne dotere de udsavede og polerede wafere, da dette ville reducere omkostningerne til dotering med ca. 50 % og reducere behovet for lagerkapacitet. Samtidig ville dette have den fordel, at hovedlageret kunne flyttes helt hen mod slutningen af produktionsprocessen, hvilket giver forøget fleksibilitet i hele produktionskæden. Dette viste sig at være en teknologisk umulighed, dels fordi det forøgede overfladeareal medførte en større grad af urenheder og dermed et mere radioaktivt produkt, og dels fordi det skøre materiale var for vanskeligt at håndtere.<sup>61</sup> På Isotoplaboratoriet blev man af forskellige firmaer adskillige gange bedt om at prøvebestråle wafere, men anmodningerne blev af de anførte grunde afvist.<sup>62</sup>

Fra begyndelsen af 1980’erne og frem postede Risø mange penge ind i at udbygge bestrålingskapaciteten for silicium. Hvor siliciumdoteringen i begyndelsen havde været på tålt ophold, ændrede holdningen til den type virksomhed sig i Risøs ledelse i slutningen af 1970’erne og udviklingen fortsatte i det efterfølgende årti. Begyndelsen af 1980’erne var præget af nedskæringer i de offentlige forskningsbudgetter og institutionerne blev af regeringen opfordret til at søge eksterne bevillinger og øge kontraktforskningen og andre former for indtægtsdækket virksomhed. Det var Schlüter-regeringens politik, at de offentlige forskningsinstitutioner skulle åbne sig for samarbejde med erhvervslivet. For at fremme den udvikling blev de stramme regler for indtægtsdækket virksomhed lempet. De statslige forskningsinstitutioner fik nu som noget nyt lov til selv at disponere over deres indtægter, der tidligere gik direkte i statskassen.<sup>63</sup>

Da produktionen i første halvdel af 1990’erne nåede højdepunktet, bestrålede man i DR 3 årligt 25-30 tons silicium. Man havde da faciliteter til at håndtere silicium i størrelserne fra 2 til 5 tommer. Den gennemsnitlige årlige indtægt fra produktionen af NTD-silicium androg i perioden fra 1991-97 ca. 20 mio. kr., hvilket helt overskyggede Risøs øvrige indtægter fra reaktordriften, der primært kom fra produktion af radioaktive isotoper og mærkede forbindelser.<sup>64</sup> De præcise data fremgår af diagram 1. Indtægter fra dotering dækkede en betydelig del af driftsudgifterne ved DR 3, der i slutningen af 1990’erne lå omkring 40 mio. kr.<sup>65</sup>

Siliciumindustrien er præget af hemmelighedskræmmeri, der gør det vanskeligt at bedømme, hvor stor en del af verdensmarkedet Risø reelt dækkede. Risøs eget skøn var, at DR 3 i de bedste år, fx i begyndelsen af 1990’erne, bestrålede ca. 1/3 af den globale produktion af NTD-silicium.<sup>66</sup> Det tal er dog for optimistisk. Det til dato mest komplette og pålidelige skøn over den historiske markedsudvikling viser, at den globale produktion har udviklet sig fra nogle få kilogram p.a. i 1973/74, passerede 30 tons p.a. omkring 1980 for at nå op over 140 ton i 1991, hvorefter den faldt lidt tilbage, men holdt sig i lejet omkring 110-135 ton p.a. frem til 1996. Dette og et lignende



tilbagefald i anden halvdel af 1980'erne tilskrives forbedringer i den konventionelle doterings-teknologi.<sup>67</sup> En rapport fra Det Internationale Atomenergiagentur (IAEA) fra 2007 angiver, at det globale marked for NTD-silicium omkring år 2000 var 100 tons p.a. Alt dette betyder, at Risø i perioden 1985-1995 har opretholdt en global markedsandel på 20-26 % og før den tid en andel på 7-15 %.

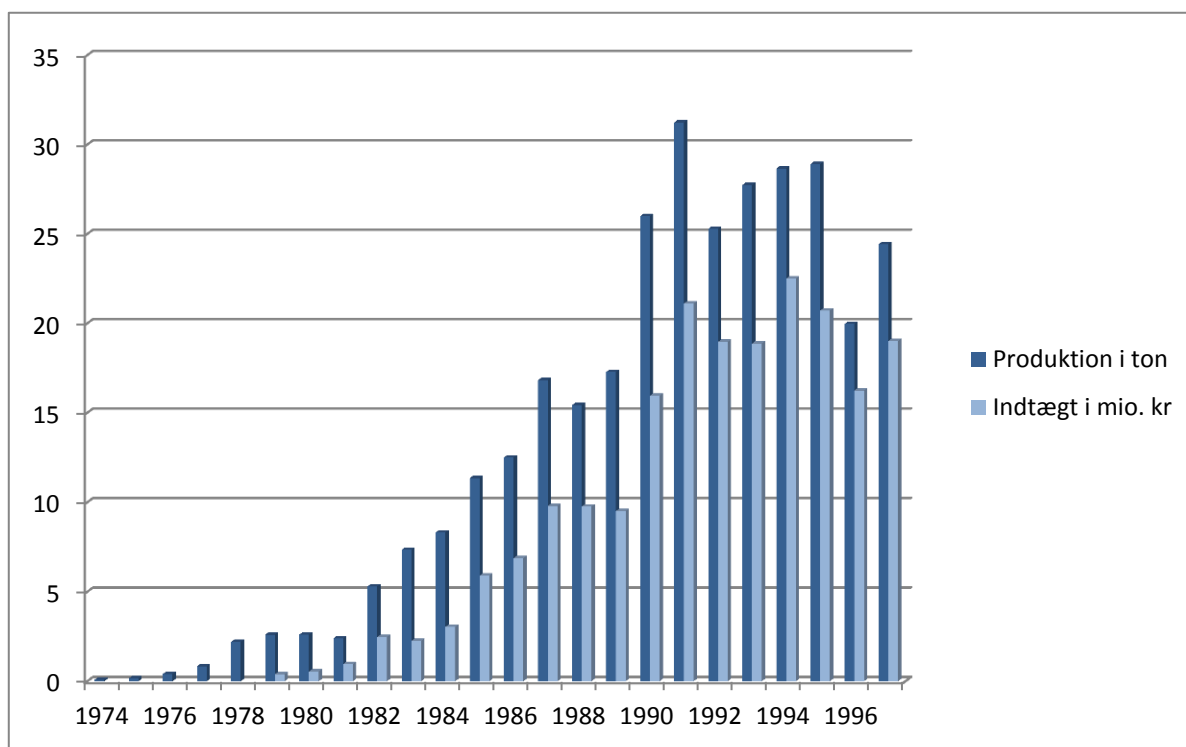


Diagram 1. Risøs siliciumforretning i tal. Doteret mængde og Risøs indtægter heraf 1974-97.<sup>68</sup>

Værdien af den globale produktion af neutrondoteret silicium i året 2000 vurderedes af IAEA til 750 mio. kr. mens forskningsreaktorernes indtægter ved bestråling af silicium blev anslået til 75 mio. kr. per år.<sup>69</sup> Markedet for bestråling af NTD-silicium er således ikke overvældende stort, men til gengæld er det af stor økonomisk betydning for de offentlige forskningsinstitutioner, der satser på bestråling af silicium. Ifølge de angivne tal var den gennemsnitlige pris på siliciumbestråling på det globale marked omkring år 2000 ca. 750 kr./kg. Sammenlignelige tal for Risøs bestrålingsvirksomhed er ikke tilgængelige for dette år, men i treårsperioden fra 1995-97 fakturerede Risø gennemsnitligt 763,50 kr./kg bestrålet silicium. Dette bekræfter Kaj Heydorns udsagn om, at Risø generelt prismæssigt lå lidt over de nærmeste konkurrenter.<sup>70</sup>

Det bryder måske med almindelige forestillinger og fordomme, men i dette tilfælde ser vi offentligt ansatte forskere og ingeniører, der arbejder målrettet på at oparbejde en global kundekreds og trimme en produktionsservice med henblik på at gøre den strømlinet, profitabel og langtidsholdbar. Ret beset var der ikke noget nyt i, at Risø tjente penge på at servicere industrien på det nationale plan. Fx steriliserede man i 1960'erne ved Risøs elektronaccelerator store mængder medicinsk engangsudstyr og Isotoplaboratoriet havde i mange år solgt isotoper og radioaktivt mærkede forbindelser til hospitaler og andre brugere.<sup>71</sup> Men det var første og eneste gang, at man på Risø leverede den slags serviceydelse i så stor en skala og på et globalt plan. Det mest bemærkelsesværdige ved NTD-historien er måske, at Risø på dette område var i skarp konkurrence med andre offentlige forskningsinstitutioner på et globalt plan. Produktionen af NTD-silicium var

dermed med til at redefinere grænsen mellem det offentlige og det private. Den var også med til at redefinere betydningen af det at råde over en forskningsreaktor. Risøs store reaktor DR 3 blev i 1950'erne bygget til at facilitere forskning og teknologisk udvikling, der skulle beam Danmark ind i en industriel atomalder. På baggrund af siliciumforretningen kunne DR 3 i 1980'erne helt i tråd med tidens neoliberalistiske og kommercielle tidsånd i stedet promoveres som en maskine, der muliggjorde en lukrativ "eksport af neutroner".<sup>72</sup>



*Fra DR 3's vandrette bestrålingsfacilitet. Ved computeren styres bestrålingssekvensen. Operatøren i baggrunden er ved at inlde dåser med silicium til bestråling. Foto fra begyndelsen af 1990'erne. Risøs Billedarkiv.*

## Risø som kommerciel aktør

Siliciumeventyret sluttede brat i 2000 med beslutningen om at nedlukke alle Risøs nukleare faciliteter, herunder også DR 3. Men hvordan gik det til, at Risø frem til da formåede at fastholde en international førerposition på siliciumområdet? Her er det først og fremmest vigtigt at gøre opmærksom på, at antallet af velegnede reaktorer selv på verdensplan var begrænset. Tungtvandsreaktorer er som tidligere nævnt særligt velegnede til formålet, hvilket siliciumproducenterne da også lagde stor vægt på og benyttede i deres reklamemateriale.<sup>73</sup> Midt i 1980'erne var der kun omkring 17 tungtvandsreaktorer i drift i den vestlige verden. Som tidligere nævnt var reaktorer af DIDO-typen specielt velegnede på grund af deres attraktive forhold mellem langsomme og hurtige neutroner, samtidig med at de havde en høj bestrålingskapacitet. DR 3 var af denne type, hvoraf der kun var leveret seks eksemplarer i verden. Karakteristik nok var det en DIDO-reaktor – HIFAR i Australien – som efter 2000 overtog den position, som DR 3 hidtil havde indtaget på verdensmarkedet.<sup>74</sup>

Af IAEA's liste over forskningsreaktorer fremgår det, at der fra omkring 1970 og frem verden over blev lukket en række tungtvandsreaktorer. På Harwell, der allerede i slutningen af 1970'erne satsede stærkt på siliciumdotering, lukkede man i 1990 de to tungtvandsreaktorer DIDO og PLUTO, der begge blev benyttet til siliciumbestråling, hvilket alt andet lige må have givet plads til ekspansion andre steder i verden. Som det fremgår af diagram 1, falder denne begivenhed sammen med en markant volumenekspansion på Risø. Risø lader altså til at have haft den rigtige reaktor på det rigtige tidspunkt. For det andet er det naturligt at pege på, at Risø og Topsil var *first movers* på området, hvilket giver mulighed for en betydningsfuld akkumulation af teknisk knowhow og måske også en vis international præstige. Men de tekniske forhold forklarer ikke i sig selv, hvordan Risø var i stand til at fastholde sin førerposition i mere end 25 år i et marked i vækst. De kunne jo forvalte deres tekniske muligheder dårligt.

Et mere nuanceret svar på spørgsmålet, der også inddrager socio-økonomiske, institutionelle og organisatoriske forhold, forudsætter en dybtgående komparativ undersøgelse af de forskellige aktører på markedet. Jeg har ikke i denne omgang haft mulighed for at gå i detalje med disse forhold. I mangel heraf må vi nøjes med de lokale forklaringer, og det der kan udledes af disse. Det fremhæves, at man på Risø arbejdede målbevidst med kvalitetssikring og kvalitetsudvikling. Isotoplaboratoriet blev således i 1994 ISO 9000 certificeret, som den måske første statsinstitution i Danmark.<sup>75</sup> En af Risøs afgørende forcer var også konstruktionsafdelingen, der efterhånden fik stor ekspertise i at fremstille driftssikre bestrålingsfaciliteter. En tredje forklaring er, at DR 3 var en stabil og veldrevet reaktor, der gennem tiden kun har haft ganske få uplanlagte nedlukninger.<sup>76</sup> Det fremgår tydeligt af Risøs møder med kunderne, at effektivitet og driftsstabilitet var afgørende parametre for producenterne af NDT-silicium. Leveringssikkerhed var dermed et af Risøs bedste kort i konkurrencen.

Det kan konstateres, at Risø gennem tiden har kørt en meget liberal politik med hensyn til prisen på serviceydelser. I den officielle beretning om de fælleseuropæiske DRAGON-projekt konstateres det, at Risø kunne lave bestråling og efterundersøgelsesarbejde til en pris, der var 1/3 af prisen på tilsvarende undersøgelser på den engelske atomenergikommissions forsøgsanlæg i Harwell.<sup>77</sup> Det samme var bestemt ikke tilfældet med siliciumdoteringen, hvor Risø som sagt prismæssigt lå lidt over de nærmeste konkurrenter.<sup>78</sup> Når man på Risø kunne erobre og beholde sin markedsandel, skyldtes det dermed ikke en aggressiv prispolitik. Langt de fleste leverandører af bestrålingsservice har som Risø status som nationale laboratorier, dvs. offentlige forskningsinstitutioner, der normalt både skal understøtte det nationale atomenergi-program, den lokale industri og forskning. I disse lande er der lukrative hjemmemarkeder for tests af reaktormaterialer. Den mulighed havde Risø ikke efter 1976, hvor den danske atomenergiforskning

mistede en stor del af sin nationale berettigelse. Men fra dette tidspunkt blev der på Risø skabt et samarbejde og en praktisk forståelse mellem ledelsen, DR 3 og Isotoplaboratoriet baseret på den fælles økonomiske interesse i siliciumdoteringen.<sup>79</sup>

## En historie om co-innovation – og hvad der kan læres deraf

Lad os afslutningsvist diskutere, hvordan historien om NTD-silicium forholder sig til nogle af de dominerende modeller for innovation. Traditionelt har man skelnet mellem forskningsdrevet innovation og markeds- eller brugerdrevet innovation. Samlebåndsmodellen eller den lineære model tilskrives ofte Vannevar Bush, der er kendt for udsagn som dette: ”Grundforskningen er det teknologiske fremskridts pacemaker”<sup>80</sup>. I den forskningscentrerede samlebåndsmode er det forskningen, der fremhæves som den egentlige innovationsmotor. Men det stemmer ikke godt med denne historie. Det var således *ikke* ny forskningsviden, der lå bag Topsils succesfulde innovation. Den forskningscentrerede innovationsmodel kan dermed ikke forklare, hvorfor det var Topsil, der kom først. Det Topsil gjorde, var at kommercialisere og markedsføre en teknologi, som havde mere end 20 år på bagen, og som et par andre producenter parallelt hermed var begyndt at tage i brug i deres interne produktion. Markedstimning, og ikke forskning, lader til at have været den centrale faktor i dette tilfælde. Neutronteeringsteknologien blev nemlig først interessant i det øjeblik, hvor kraftkomponentproducenterne begyndte at efterspørge silicium med en helt uniform distribution af fosfor.

Dette er dog ikke ensbetydende med, at forskningen i dette tilfælde er uden betydning. Dens betydning skal bare ses i et længere perspektiv. Det er således klart, at fremkomsten af neutronteeret silicium skete i forlængelse af tidligere forskningsmæssige gennembrud på halvlederområdet og på det nukleare område i 1940’erne og 1950’erne. Forskningen er dermed en blandt flere forudsætninger for teknologisk udvikling og innovation, men den er ikke den ultimative taktstok og monokausale motor, som Bush ville gøre den til. Hvis det er tilfældet, er det nemlig vanskeligt at forklare, at det var Topsil og Risø, der kom først, og ikke det ressource- og kapitalstærke Bell Labs. Bell Labs var både halvlederforskningens og halvlederteknologiens absolutte centrum, men på trods af dette var man alligevel ikke her i stand til at forvandle NTD-teknologien til en markedsmodnet innovation – tilsyneladende af den simple grund, at der endnu manglede et marked for produktet.

Er denne case så et eksempel på brugerdreven innovation?<sup>81</sup> Måske. Men svaret kommer helt an på, hvad man præcist lægger i ordet *bruger*. Neutronteeret silicium blev introduceret på et marked, hvor den almindelige elektricitetsforbrugers præferencer kun indirekte havde nogen som helst betydning. Men det betyder ikke, at modellen er irrelevant og ikke kan bruges. Blot er brugerne i dette tilfælde af en ganske særlig karakter. Det marked, som Topsil opererede i, var et udpræget business-to-business marked. I dette tilfælde var brugerne forskellige leverandører af kraftkomponenter. Innovationen fandt sted i et helt specifikt og historisk betinget forretningsnetværk, der kun eksisterede ganske kort tid. Hvis ikke Topsil var blevet overtaget af Thrige-Titan med den tætte relation til ASEA, ville det formentlig have været en helt anden halvleder- eller komponentproducent, der havde bragt produktet ud på det åbne marked. Lokalitet, geografi, kontekst og historie har afgørende betydning for teknologiske forandringsretning og hastighed. Økonomerne har fx hæftet sig ved, at store dele af et lands eksport af en bestemt varegruppe kan henføres til meget afgrænsede regioner. Blandt de fænomener, der kan forklare, hvorfor innovation i bestemte regioner specialiseres i bestemte retninger er tilstedeværelsen af særlige naturressourcer og dannelsen af afgrænsede selvforstærkende industriklynger med akkumulation af knowhow (fx den vestjyske tekstilindustri, den schweiziske

urmagerindustri etc.). Med henblik på at forklare, hvorfor visse geografiske regioner er mere innovative og har større konkurrencekraft end andre, har innovationsøkonomerne introduceret begrebet om nationale og/eller regionale innovationssystemer. Hermed forstås i almindelighed det system af specifikke samfundsinstitutioner, virksomheder, lovgivning og kulturelle særegenheder, som tilsammen giver den teknologiske udvikling retning og afgør dens hastighed. Der findes i litteraturen flere kanoniske definitioner: således skal man ifølge økonomen Christopher Freeman ved et nationalt innovationssystem forstå ”the network of institutions in the public and private sectors whose activities and interactions initiate, import, modify and diffuse new technologies”.<sup>82</sup> En anden økonom, Richard Nelson, giver denne kortere definition: ”a set of institutions whose interactions determine the innovative performance [...] of national firms”.<sup>83</sup>

Det er uden videre klart, at Topsil var understøttet af et netværk af offentlige institutioner i det danske innovationssystem, uden hvilke historien ville have set anderledes ud. Først og fremmest af Risø, der geografisk var placeret ganske få kilometer fra Frederikssund. Det var dermed hurtigt og let at iværksætte en forsøgsbestråling, om end der også i det danske innovationssystem var strukturelle forhold omkring indtægtsdækket virksomhed, der i begyndelsen gjorde Risø til en lidt træg medspiller. I de efterfølgende år, hvor siliciumbestrålingen på Risø antog et industriel omfang, drog Topsil fordel af den strukturelle omlægning af Risøs virksomhed, der skete efter 1976, og som ændrede Risøs virkefelt fra rendyrket atomenergiforskning til en bredere energiforskning. Det er derfor relevant, at se NTD-silicium som et eksempel på co-innovation, et resultat af et offentligt-privat samarbejde. Samarbejdet mellem Risø og Topsil blev delvist finansieret af offentlige innovationsmidler fra Fondet til Fremme af Teknisk og Industriel Udvikling, uden hvilket det næppe ville være muligt at flytte siliciumbestrålingen til DR 3 i en tidlig, kritisk fase, hvor produktet kun lige var kommet på markedet. Det danske innovationssystem var dermed en væsentlig brik i historien. På den anden side er det klart, at det lokale innovationsnetværk i sig selv kun kan forklare en del af historien og slet ikke selve begyndelsen.

Dermed er vi tilbage ved betydningen af Topsils forretningsnetværk og selve det teknologiske system, som virksomheden og dens kunder leverede komponenter til. Alle Topsils kunder og forretningsmæssige samarbejdspartnere var udenlandske virksomheder. Danmark savnede nemlig helt virksomheder med kompetencer indenfor højspændingsteknik og halvlederkomponenter, og Topsil var på dette tidspunkt den eneste danske virksomhed, der fremstillede halvledermaterialer. Hvis man således skal lokalisere rødderne til Topsils innovation omkring NTD-silicium er den rette kontekst ikke Danmark, men det netværk af ingeniørvirksomheder, som Topsil henholdsvis samarbejdede og konkurrerede med på et internationalt plan – altså ASEA, BBC og Siemens og det specifikke teknologiske system, som disse virksomheder leverede teknologiske løsninger til. Det var en konkret teknologisk flaskehals i HVDC-teknologien, der udløste interessen for NTD-processen og fik aktørerne til simultant at kaste sig ind i udviklingen af en alternativ doteringsproces. Mere generelt foregik den her beskrevne udvikling i et transnationalt innovationssystem, et grænseoverskridende netværk af multinationale virksomheder, nationale forskningsinstitutioner og statslige organisationer, hvor cirkulationen af teknologisk viden og knowhow ikke kun blev formidlet og formet af udviklingskontrakter, samarbejdsaftaler og patentbeskrivelser men også af mere uformelle tips. Man kan således argumentere for, at vi her har en historie, hvor diffusion, cirkulation og tilgængelighed af global viden er det helt centrale element. Det er problematisk og ensidigt, at analysere denne udvikling alene ved hjælp af begreber som nationale eller regionale innovationssystemer. Teorien om de nationale innovationssystemer blev udviklet i 1980'erne. Men som dette eksempel påviser, var globaliseringen allerede i det foregående årti så fremskreden, at forestillingen om et afgrænset nationalt innovationssystem forekommer problematisk.



Dette casestudie demonstrerer dermed, at innovation inden for store tekniske systemer er et globalt og grænseoverskridende fænomen. Store tekniske systemer som fx elektricitetsproduktion, radiokommunikation, mobiltelefoni kan således i sig selv betragtes som et mere eller mindre velafgrænsede innovationssystemer, der til en vis grad følger deres egen udviklingsdynamik. Overfor økonomernes fokus på geografisk afgrænsede innovationssystemer, hvad enten det nu er i form af klynger eller regionale innovationssystemer, kan man på baggrund af dette casestudie anføre, at de store tekniske systemer og de forretningsnetværk, der skabes i relation til disse systemer, bør tilskrives en selvstændig forklaringskraft, når man analyserer konkrete eksempler på innovation.

## Litteratur

- Bossink, Bart A.G.: "The Development of co-innovation strategies: stages and interaction patterns in interfirm innovation", *R&D Management*, 32:4, 2002, s. 311-320.
- Bush, Vannevar: *Science, the Endless Frontier. A report to the president on a program for postwar scientific research*. Washington DC, 1945.
- Chenyang, Qiao, Sun Zhiyong, Ke Guoto, Lu Cungang, Shen Feng, Chen Huiqiang: "The development and application of silicon Neutron Transmutation Doping (NTD) technology in China", *Engineering Sciences*, 7:4, 2009, s. 95-100.
- Edquist, Charles & Bengt-Åke Lundvall: "Comparing the Danish and Swedish Systems of Innovation", i Nelson (ed.): *National Innovation Systems. A Comparative Analysis*. Oxford, 1993, s. 265-298.
- Freeman, Christopher: *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*. London, 1987.
- Fridlund, Mats: *Den gemensamma utvecklingen: Staten, storföretaget och samarbetet kring den svenska elkrafttekniken*. Stockholm, 1999.
- Haas, Ernst W. & Manfred S. Schnöller: "Silicon Doping by Nuclear Transmutation", *Journal of Electronic Materials*, 5:1, 1975, s. 57-68.
- Haas, Ernst W. & Manfred S. Schnöller: "Phosphorus Doping of Silicon by means of Neutron Irradiation", *IEEE Transactions on Electronic Devices*, ED-23:8, 1976, s. 803-805.
- Heide, Lars: *Historien om Force Technology*. København, 2008.
- Herzer, Heinz: "Neutron-doped silicon – a market review", i Guldberg (ed.): *Neutron-Transmutation-Doped Silicon*. New York, 1981, s. 1-17.
- NN [Kaj Heydorn]: "Eksport af neutroner", *Årsberetning. Forsøgsanlæg Risø*, 1982, s. 12-13.
- von Hippel, Erik: *Democratizing Innovation*. Cambridge (Mass.), 2005.
- Hughes, Thomas P.: *Networks of Power. Electrification in western Society, 1880-1930*. Baltimore, 1983.
- Hughes, Thomas P.: "The Evolution of Large Technological Systems", i Bijker m.f. (eds.): *The Social Construction of Technological Systems*. Boston, (Mass.), 1987.
- IAEA: *Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium*, Technical Reports Series No 455. Vienna, 2007.
- IAEA: *Neutron transmutation doping of silicon at research reactors*, IAEA-Techdoc-1681. Vienna, 2012.
- Janus, Hans: "Application of NTD Silicon for Power Electronics", i Meese (ed.): *Neutron Transmutation Doping in Semiconductors*, New York, 1979, s. 37-45.
- Knudsen, Henrik: *Risøs reaktorer*. Bjerringbro, 2006.

[http://www.dekom.dk/media/52964/ris%C3%B8s%20reaktorer\\_rapport\\_knudsenh\\_2006.pdf](http://www.dekom.dk/media/52964/ris%C3%B8s%20reaktorer_rapport_knudsenh_2006.pdf)  
(4.11.2015).

Knudsen, Henrik: *Maskinerne i haven. Tre erindringsbaserede rundrejser i Danmarks nukleare landskab*. Bjerringbro, 2007.

[http://www.dekom.dk/media/51727/maskinerne%20i%20haven\\_museumsrapport.pdf](http://www.dekom.dk/media/51727/maskinerne%20i%20haven_museumsrapport.pdf) (4.11.2015).

Knudsen, Henrik: "En kerneforretning. Produktion, distribution og anvendelse af radioaktive isotoper i Danmark 1959-2000", *Polhem Teknikhistorisk årsbok 2006-2007*, 2009, s. 75-110.

Knudsen, Henrik: *Visioner, Viden og Værdiskabelse – en historie om Akademiet for de tekniske Videnskaber*. ATV, 2012.

MacKenzie, Donald & Judy Wajcman: "Introductory essay: the social shaping of technology", i MacKenzie & Wajcman (eds.): *The social shaping of technology*. Buckingham, 2<sup>nd</sup> edition, 1999, s. 1-27.

Meyer, Niels I.: *Fra højre mod venstre. Samtidshistoriske erindringer*. København, 2004.

Morris, Peter R.: *A history of the world semiconductor industry*. London, 1990.

Mühlbauer, Alfred: *History of Induction Heating & Melting*. Essen, 2008.

Nelson, Richard R. (ed.): *National Innovation Systems. A Comparative Analysis*. Oxford, 1993.

Nielsen, Henry (ed.), Keld Nielsen, Flemming Petersen & Hans Siggaard Jensen: *Til Samfundets tarv. Forskningscenter Risøs historie*. Roskilde, 1998.

Nielsen, Henry & Henrik Knudsen: "The troublesome life of peaceful atoms in Denmark", *History and Technology*, 26, 2010, s. 91-118.

Nielsen, Kirsten H. & Niels Hegaard: "The new horizontal facility for neutron transmutation doping of silicon at DR 3", i IAEA: *Utilization Related Design Features of Research Reactors: A Compendium*, Technical Reports Series No 455. Vienna, 2007, s. 189-203.

Owen, E.L.: "Fiftieth Anniversary of Modern Power Electronics: The Silicon Controlled Rectifier" *Proc 2007 IEEE Conference on the History of Electric Power*, 2007, s. 20-11.

Peake, Owen: "The History of High Voltage Direct Current Transmission", *Australian Journal of Multi-disciplinary Engineering*, 8:1, 2010, s. 47-55.

Petersen, Flemming: *Atomalder uden kernekraft. Forsøget på at indføre kernekraft i Danmark 1954-1985 set i et internationalt perspektiv*. Aarhus, 1996.

Risø: *Isotoplaboratoriet 1959-1984, Risø-M-2410, Risø*, 1984.

Shaw, E.N.: *Europe's Nuclear Power Experiment. History of the OECD Dragon Project*. London, 1983.

Schnöller, Manfred: "Neutron Transmutation Doping (NTD) of Silicon", i Siffert & Krimmel (eds.) *Silicon: Evolution and Future of a Technology*. Berlin, 2004, s. 231-240.

Stokes, Donald E.: *Pasteurs Quadrant. Basic Science and Technological Innovation*. Washington DC, 1997.

Stone, B.D.: "Large Scale Production of NTD Silicon in the United States", i Guldberg (ed.) *Neutron-Transmutation-Doped Silicon*. New York, 1981, s. 19-33.

Wistoft, Birgitte, Jytte Thorndal & Flemming Petersen: *Elektricitetens Historie. Dansk elforsynings historie. Bind 2. 1940-1991*. Viborg, 1992.

Yde, Peter B.: "Danske Chips", *Ny Elektronik*, 9:3, 1984, s. 25-27.

Zulehner, Werner: "Historical Overview of Silicon Crystal Pulling Development", *Materials Science and Engineering*, B73, 2000, s. 7-15.

## Utrykte kilder

### Rigsarkivet

Forskningscenter Risø, Kemiafdelingen, Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne 1957-1994.

## Noter

<sup>1</sup> Ud over den angivne litteratur og arkivmateriale er historien baseret på en serie af interviews og samtaler med tidligere medarbejdere og ledere på Risø og Topsil. De enkelte interviews vil fremgå af noterne. Interviewet med Heinz Floto og et af flere interviews med Kaj Heydorn er udskrevet i Knudsen, *Maskinerne i haven*. Interviewet med Kirsten Andresen er delvist udskrevet i Knudsen *Risøs reaktorer*. Endelig henvises der til dokumentar- og reklamefilmen *NTD-Silicium: Fra forsøg til produktion* (manuskript: Peter Clausen/Kaj Heydorn), Forskningscenter Risø/Isotoplaboratoriet, 1994.

<sup>2</sup> Begrebet co-innovation bruges som en betegnelse for innovationssamarbejde mellem leverandør og bruger og private virksomheder og offentlige institutioner. Se fx Bossink, *Development of co-innovation strategies*.

<sup>3</sup> Zulehner, *Historical Overview*, s. 7-15; Mühlbauer, *History of Induction Heating & Melting*, s. 37-45.

<sup>4</sup> Schnöller, *Neutron Transmutation Doping*, s. 231-233.

<sup>5</sup> For flere detaljer, se Haas & Schnöller, *Phosphorus Doping of Silicon*, 803-805.

<sup>6</sup> "T-silicon. Ansøgning til udv. fond", (udateret), s. 5. RA, Forskningscenter Risø, Kemiafd., Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne 1957-1994, pk. 12 (herefter blot: Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk xx); Stone, *Large Scale Production*, s. 32. Se i øvrigt også Yde, *Danske Chips*, s. 26.

<sup>7</sup> Wistoft et al, *Elektricitetens Aarhundrede*, s. 59ff.

<sup>8</sup> Fridlund, *Den gemensamma utvecklingen*, især kap. 6.

<sup>9</sup> Peake, *High Voltage Direct Current Transmission*, s. 50. Der findes en udmærket historisk oversigt over HVDC-projekter på: [https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_HVDC\\_projects](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects) (5.11.2015).

<sup>10</sup> Owen, *Modern Power Electronics*, 201-11; Morris, *A history of the world semiconductor industry*, 59-61.

<sup>11</sup> Peake, *High Voltage Direct Current Transmission*.

<sup>12</sup> Herzer, *Neutron-doped silicon*, s. 3.

<sup>13</sup> Hughes, *Networks of Power*, 79-106. Hughes, *Evolution of Large Technological Systems*, 51-82; MacKenzie & Wajzman, *Introductory essay*, især s. 9-10.

<sup>14</sup> Schnöller, *Neutron Transmutation Doping*, s. 233; Deutsches Patentamt, Offentlegingsschrift 23 56 376, 15.5.1975.

<sup>15</sup> Patent US3076732 A "Uniform n-type Silicon", 15.12.1959.

<sup>16</sup> Schnöller, *Neutron Transmutation Doping*, s. 234. For den historiske baggrund se også Haas & Schnöller, *Silicon Doping*, s. 57-68; Stone, *Large Scale Production*, s. 20ff.

<sup>17</sup> Baggrunden for etableringen af siliciumproduktionen er beskrevet af Ib Alstrup i "Haldor Topsøe og mig. 1. del: årene 1957-1970. Halvlederfysikkens indtog i firmet Haldor Topsøe", 3.3.2014. MS venligst udlånt af Kurt Jacobsen. Jeg har samtidig lænet mig op af oplysninger modtaget fra Arne V. Jensen og Erik Sprunk-Jansen.

<sup>18</sup> Samtale med Arne V. Jensen, 30.9.2015; Samtale med Erik Sprunk-Jansen, 15.9.2015.

<sup>19</sup> Meyer, *Fra højre mod venstre*, s. 125-6.

<sup>20</sup> Samtale med Arne V. Jensen, 30.9.2015.

<sup>21</sup> Samtale med Hans Janus 16.2.2010; [http://www.thrige-electric.com/english/t-t\\_electric\\_history.htm](http://www.thrige-electric.com/english/t-t_electric_history.htm) (3.11.2015).

<sup>22</sup> Samtale med Hans Janus, 20.1.2010.

<sup>23</sup> For Isotoplaboratoriets historie se: Knudsen, *En kerneforretning*. For Risøs historie se Petersen, *Atomalder uden kernekraft*; Nielsen (ed.) et al, *Til samfundets tarv*; Nielsen & Knudsen, *The troublesome life*.

<sup>24</sup> *NTD-Silicium: Fra forsøg til produktion*.

<sup>25</sup> "T-silicon. Ansøgning til udv. fond", (udateret), s. 4. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.

<sup>26</sup> Stone, *Large Scale Production*, s. 20.

- 
- <sup>27</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1, 62.
- <sup>28</sup> *Ibid.*
- <sup>29</sup> C.F. Jacobsen: Notat ”Topsil”, 3.1.1975. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>30</sup> Heide, *Force Technology*, s. 40-41; Knudsen, *Visioner, Viden og Værdiskabelse*, s. 31.
- <sup>31</sup> ”T-silicon. Ansøgning til udv. fond”, (udateret). Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>32</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1, 62-63.
- <sup>33</sup> Diverse kontraktudkast, juli 1975 og frem. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>34</sup> Brev fra Kaj Heydorn til forfatteren, 4.3.2010.
- <sup>35</sup> Samtale med Hans Janus, 20.1.2010.
- <sup>36</sup> Schnöller, *Neutron Transmutation Doping*, s. 239. Andre kilder antyder en endnu hurtigere markedspenetrations. Janus, *Application of NTD Silicon*, 38.
- <sup>37</sup> Møde hos Topsil, 7.10.1976. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>38</sup> Nielsen (ed.) et al, *Til samfundets tarv*, s. 289-300.
- <sup>39</sup> NN [Kaj Heydorn] (1982) ”Eksport af neutroner”, *Årsberetning. Forsøgsanlæg Risø*, 12-13.
- <sup>40</sup> Samtale med Olof Malmros, 8.2.2010.
- <sup>41</sup> Samtale med Hans Janus, 16.2.2010; ”Topsil Manufacturing Strategies. Discussion Background”, 13.3.1979, Hans Janus’ private arkiv. Jf. også *Frederiksborg Amtsavis*, ”Dansk-amerikaner bag køb af Topsil i Frederikssund”, 30.8.1981.
- <sup>42</sup> Yde, *Danske Chips*, s. 27; *Frederiksborg Amts Avis*: ”En lille virksomhed der tænker stort”, 21.3.1986. ”Rapport fra besøg hos firmaet Wacker-Chemitronic, Burghausen”, 19.3.1981 og ”Møde med Wacker-Chemitronic” 10.12.1987. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 16.
- <sup>43</sup> Udtalelser og citat fra ”Rapport fra besøg hos firmaet Wacker-Chemitronic, Burghausen”, 19.3.1981. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 16.
- <sup>44</sup> IAEA, *Design Features of Research Reactors*, s. 151.
- <sup>45</sup> ”Topsil Manufacturing Strategies. Discussion Background”, 13.3.1979, Hans Janus’ private arkiv; samtale med Hans Janus 16.2.2010. Fordelene ved NTD er diskuteret i Janus, *Application of NTD Silicon*.
- <sup>46</sup> Janus, *Application of NTD Silicon*, 43.
- <sup>47</sup> Interview med lederen af HIFAR-reaktoren:  
[http://www.ansto.gov.au/data/assets/pdf\\_file/0006/41874/ANSTO\\_a\\_big\\_player\\_in\\_silicon\\_irradiation.pdf](http://www.ansto.gov.au/data/assets/pdf_file/0006/41874/ANSTO_a_big_player_in_silicon_irradiation.pdf) (4.11.2015).
- <sup>48</sup> Samtale med Kaj Heydorn 20.1.2010.
- <sup>49</sup> ”Besøg hos Wacker-Chemitronic”, 20.12.1979; Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 16; ”Notat fra frokostmøde med repræsentanter for Topsil A/S”, 15.1.1980. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>50</sup> Brev fra Kaj Heydorn til forfatteren, 4.3.2010.
- <sup>51</sup> *Berlingske Tidende*: ”Amerikansk firma utilfreds med Topsil”, 31.10.1980; *Børsen*: ”Svagere marked for Silikum [sic!] bragte Topsil ud i ny krise”, 9.2.1983.
- <sup>52</sup> Topsil til Risøs direktion, 15.10.1980; Risø til Topsil, 17.11.1980. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>53</sup> *Frederiksborg Amtsavis*: ”Dansk-amerikaner bag køb af Topsil i Frederikssund”, 30.8.1981. Leif Pedersens egentlige rolle i sager er ikke fuldt belyst. Han forsvandt hurtigt ud af historien, hvilket kan antyde, at han blot agerede som stråmand for Phoenix Materials Corporation.
- <sup>54</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1, 65.
- <sup>55</sup> Notat vedrørende eventuel etablering af produktion af NTD silicium færdigvare på Risø, Kaj Heydorn, 15.12.1980. Isotoplaboratoriet, Sager henlagt efter emne, pk. 12.
- <sup>56</sup> Herzer, *Neutron-doped silicon*, 5.
- <sup>57</sup> Interview med Kaj Heydorn, op.cit note 1; Samtale med Kaj Heydorn, 20.1.2010.
- <sup>58</sup> *Ibid.*
- <sup>59</sup> Nielsen (ed.) et al, *Til samfundets tarv*, s. 470ff.
- <sup>60</sup> For flere detaljer, se Nielsen & Hegaard, *New horizontal facility*.
- <sup>61</sup> Samtale med Olof Malmros 8.2.2010.
- <sup>62</sup> Korrespondance med Kaj Heydorn 2.3.2010.

- 
- <sup>63</sup> Interview med Kaj Heydorn, *op.cit* note 1, s. 66-67. For aspekter af denne udvikling se Knudsen, *Visioner, Viden og Værdiskabelse*, s. 84.
- <sup>64</sup> Risø, *Isotoplaboratoriet 1959-1984*, s. 7.
- <sup>65</sup> Interview med fhv. reaktorchef Heinz Floto, 13.3.2007, s. 94. *Op.cit.* note 1.
- <sup>66</sup> NN, *Eksport af neutroner*, s. 12. Telefonsamtale med ingeniør Nils Hegaard, 31.1.2007.
- <sup>67</sup> Schnöller, *Neutron Transmutation Doping*, s. 239.
- <sup>68</sup> Talmateriale og regnskabstal 1998, Kaj Heydorns privatarkiv.
- <sup>69</sup> IAEA, *Design Features of Research Reactors*, s. 151. Se også nyere, men mere summariske estimater i IAEA, *Neutron transmutation doping*, s. 16.
- <sup>70</sup> Talmateriale og regnskabstal 1998, Kaj Heydorns privatarkiv; Interview med Kaj Heydorn 15.1.2007, s. 68. *Op cit.* note 1.
- <sup>71</sup> Nielsen (ed.) et al, *Til samfundets tarv*, s. 130-131.
- <sup>72</sup> NN, *Eksport af neutroner*.
- <sup>73</sup> Interview med Kaj Heydorn 15.1.2007, 66. *Op cit.* note 1.
- <sup>74</sup> Som på så mange andre industrielle områder er det i dag Kina, der med en årlig produktion på angiveligt op imod 65-68 tons, har sat sig på en stor del af verdensmarkedet for NTD-silicium. Chenyang et al. *Development and application*, s. 95-100.
- <sup>75</sup> Interview med Kaj Heydorn 15.1.2007, s. 68. *Op cit.* note 1.
- <sup>76</sup> Interview med fhv. reaktorchef Heinz Floto, 13.3.2007, s. 96. *Op cit.* note 1.
- <sup>77</sup> Shaw, *Europe's Nuclear Power Experiment*.
- <sup>78</sup> Interview med Kaj Heydorn 15.1.2007, s. 68. *Op cit.* note 1.
- <sup>79</sup> Interview med fhv. reaktorchef Heinz Floto, 13.3.2007, s. 96. Interview med Kaj Heydorn 15.1.2007. *Op cit.* note 1.
- <sup>80</sup> Bush, *Science, the Endless Frontier*, s. 3. En systematisk gennemgang og kritik af den lineære model er givet i Stokes, *Pasteurs Quadrant*.
- <sup>81</sup> Se fx von Hippel, *Democratizing Innovation*.
- <sup>82</sup> Freeman, *Technology Policy and Economic Performance*, s. 1.
- <sup>83</sup> Nelson (ed.), *National Innovation Systems*, s. 4-5. Se fx Edquist & Lundvall, *Comparing*, s. 265-298.