

Røntgenstråling og CT-skanning for gymnasieelever

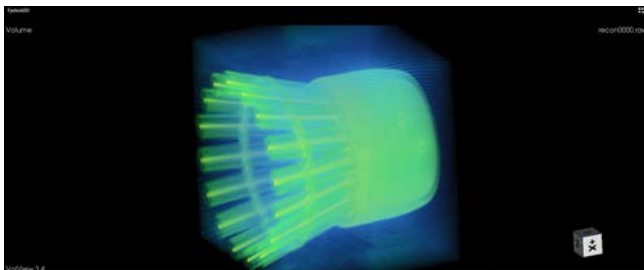
Af Ole L. Trinhammer, Nanoteket, DTU Fysik

Tredimensionale billeder fra todimensionale skygger? Kan man prøve det selv? Ja, gymnasieklasser kan – med Nanotekets nye røntgenapparater. De fleste kender røntgenbilleder og forstår dem nemt som skygebilleder. Ved en CT-skanning drejes skanneren omkring personen, og skygebillederne sammenstilles ved hjælp af absorptionsloven til et tredimensionalt billede af den indre struktur.



Figur 1. Et af Nanotekets røntgenapparater sat op til CT-skanning af fjerbold. Røntgenrøret sidder til venstre, og man aner katoden gløde orange. Bolden roteres, og man optager fx 200 projektioner fra forskellige vinkler. Disse behandles i computeren, og en 3D-rekonstruktion dannes.

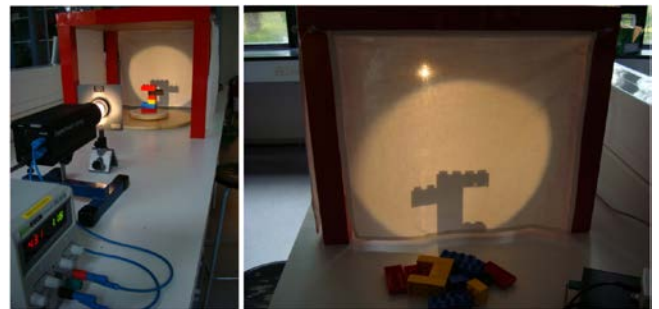
Nanoteket er et undervisningslaboratorium under DTU Fysik for studerende ved DTU og for besøgende gymnasieelever fra hele landet. Det fik sit navn i 2004, hvor vi investerede i skanningprobemikroskoper til nanoteknologi. Siden er der kommet et væld af gymnasieøvelser til: Brændselsceller og solceller som knytter an til instituttets forskning i katalyse, plasmafysikøvelse med e/m -rør, skanningelektronmikroskoper, hvor elever kan se strukturen i sommerfugleskæl, kvanteoptikudstyr, hvor de kan bryde Bells ulighed, og røntgenudstyr, som jeg her vil koncentrere mig om.



Figur 2. Klip fra videoanimation af 3D-rekonstruktion af fjerbold.

Røntgenudstyret gør det muligt at “se det usynlige”. Røntgen- og neutronsprengningsgrupperne ved instituttet bruger metoderne især til materialeteknologiske formål. Det kan være at undersøge funktionen og strukturen inden i et batteri, mens det er virksomt. Neutronsprengningsgruppen er tilknyttet den kommende

spallationskilde ESS i Lund i Sverige, ligesom røntgengruppen er i gang med at udvikle en beamlinje, Danmax, ved synkrotronkilden, Max IV, sammesteds. Neutronsprengning er i høj grad komplementær til røntgensprengning. Neutronerne “ser” spin og dermed magnetisme, og de “ser” bedst de lette grundstoffer, da neutronerne vekselvirker mest med de lette atomkerner. Røntgen “ser” bedst de tunge grundstoffer, da røntgenfotonerne vekselvirker med elektronerne, som der er flere af i de tunge grundstoffer.

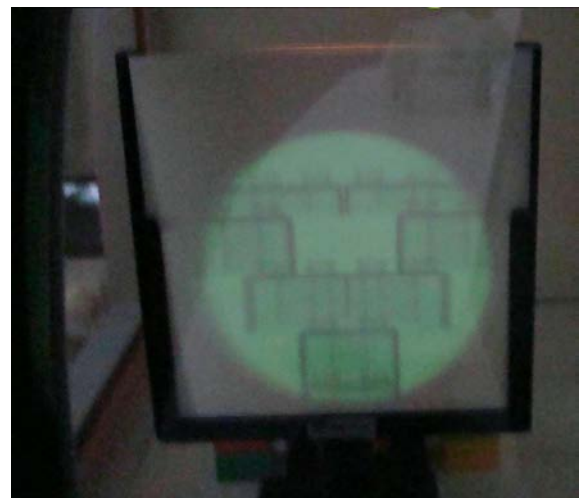


Figur 3. Opstilling til illustration af 3D-rekonstruktion. Her virker hjernen som computer!

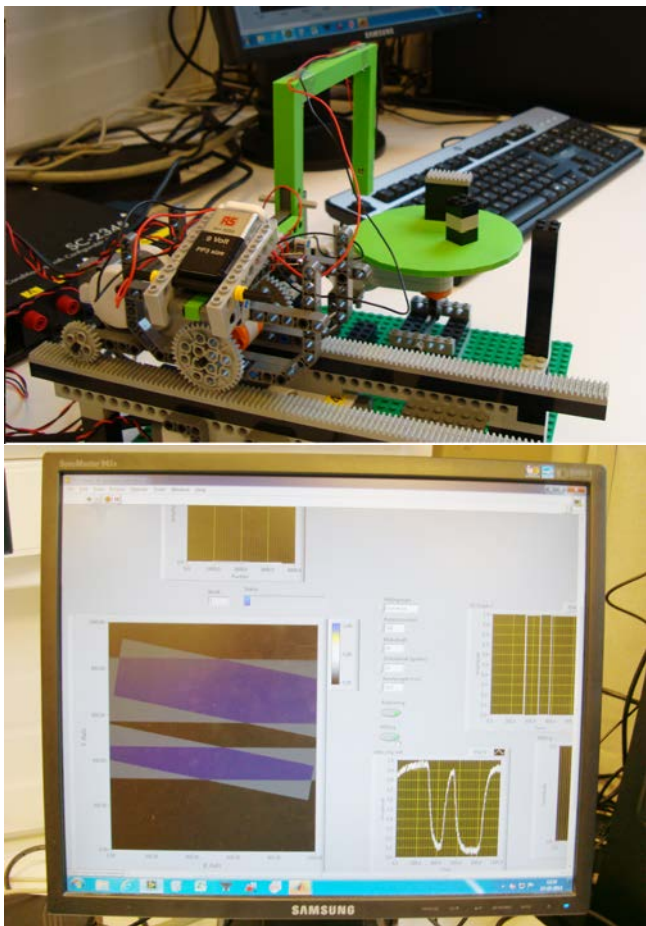
Ved at gennemlyse emnet fra mange forskellige retninger fås en 3D-rekonstruktion ud fra absorptionsloven

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}. \quad (1)$$

Her er I intensiteten efter passage af materiale med tykkelsen x og absorptionskoefficient μ . Derudover anvendes en såkaldt invers radontransformation.



Figur 4. Klassisk røntgenbillede taget med fluorescerende skærm monteret i apparatet i stedet for den elektroniske skærm i figur 1.



Figur 5. a) (Øverst): CT-skanner til 2D-rekonstruktion. Skannehovedet består af den portformede bjælkekonstruktion, som er sat fast på LEGO-bilen. I porten sidder en infrarød diode i venstre side over for en fotoresistor i den højre side. Hver gang skannehovedet har kørt frem og tilbage, drejes bordet et bestemt antal grader, og et nyt skan foretages. Begge motorer styres af robotten, mens signalet fra fotoresistoren sendes til computeren til videre behandling. b) (Nederst): På computerskærmen ses skyggestriber fra to skan drejet i forhold til hinanden.

Geometrisk tomografi

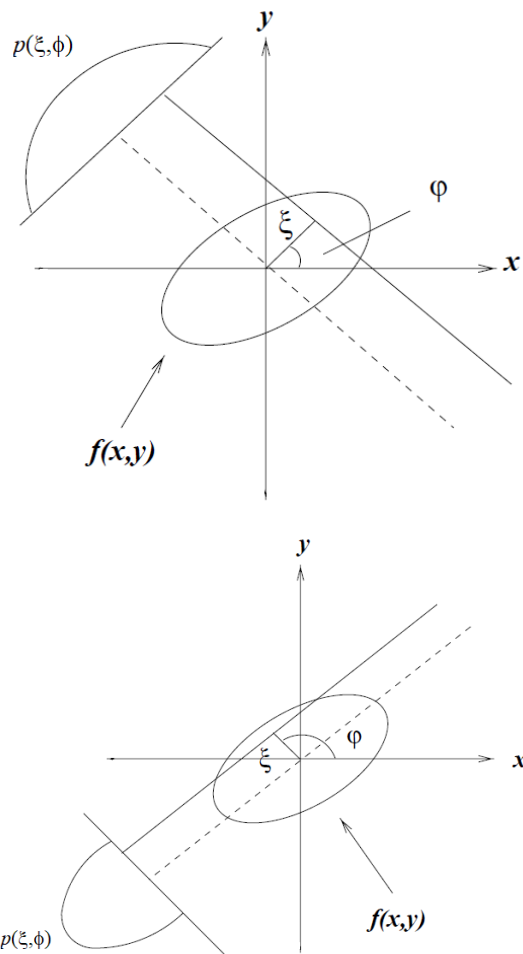
Hvordan ser figuren mon ud i 3D, hvis man kun kan se dens skygge fra forskellige sider? I denne indledende øvelse deles gruppen i to. En person bygger en model, som placeres bag et klæde og belyses bagfra. Modellen roteres bag klædet. Foran klædet er resten af gruppen, som skal prøve at bygge i 3D det, de forestiller sig ud fra skygebillederne, se figur 3.

Computed tomography

På rekonstruktionen af fjerbolden i figur 2 ser man intensitetsforskelle afhængig af materialernes gennemtrængelighed for røntgenstråling. Man nøjes ikke med kun at konstatere skygge eller ikke-skygge som i den geometriske tomografi i figur 3. At kunne se intensitetsforskelle som i figur 4 er karakteristisk for klassiske røntgenbilleder.

Ved at rotere emnet skannes skyggen fra forskellige vinkler og sammenstykkedes ved hjælp af en computer til et tredimensionalt tomogram. Databehandlingen er helt tilsvarende det, der foregår i hospitalernes CT-skannere. Den eneste væsentlige forskel er, at her ligger patienten

stille, mens apparatet roterer rundt om patienten! Den inverse radontransformation er en "tilbageregning" fra skyggen til det computerberegnete tomogram. Vi illustrerer princippet med en model med en LEGO-robot som vist i figur 5.



Figur 6. Radontransformation p for et ellipseformet snit gennem et emne set fra forskellige drejninger ϕ i forhold til et fast (x, y) -koordinatsystem i emnet. Figur redigeret fra [2]. Se evt. også [3].

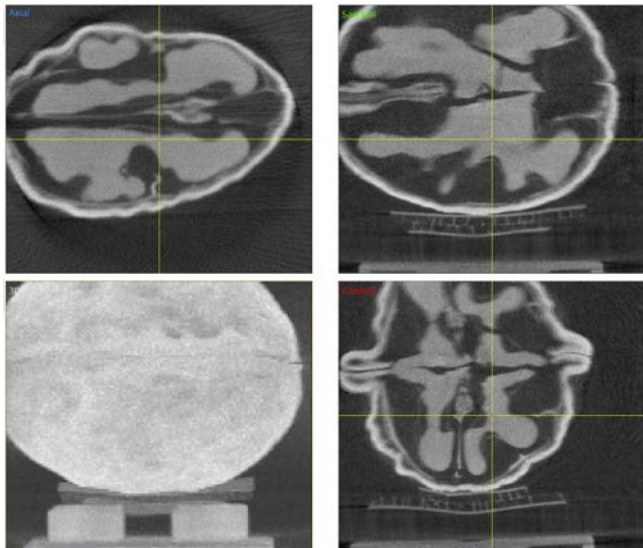
Radontransformationen i 2D

Tætheden af materiale i emnet i et plant snit beskrives ved en funktion f af to koordinater x og y i et koordinatsystem, som ligger fast i forhold til emnet, se figur 6. Tæthedens skygge kan opfattes som en projektion på en linje uden for emnet. Skyggens værdi ("dybde") findes ved at integrere langs sigtelinjen gennem emnet, vinkelret på den linje, der skal projiceres på. Projektionslinjens beliggenhed i forhold til emnets koordinatsystem beskrives ved en vinkel ϕ , og positionen langs linjen beskrives ved en længdekoordinat ξ . Transformationen p bliver da (se figur 6)

$$p(\xi, \phi) = \int f(x, y) \delta(x \cos \phi + y \sin \phi - \xi) dx dy \quad (2)$$

Skyggestriberne på skærmen i figur 5b kan opfattes som to tabeller skrevet på et gennemsigtigt, ternet papir og lagt oven på hinanden med samme drejning, som bordet foretog mellem de to skan. Ved geometrisk

tomografi skriver man 1 i alle de tabelrækker, hvor der er mørke, og 0 i alle de tabelrækker, hvor der er lys. Laver man fx 100 skan, vil skyggerækkerne dreje i forhold til hinanden, og kun de tern, hvor emnet "er", vil vise skygge fra alle sider. Det betyder, at hvis 1-tallerne i disse tern adderes for alle 100 skan, kan stoftætheden sættes til 100 her og markeres på et tomogram. Hvis man vil tage højde for varierende stoftæthed, skal man skrive tal mellem 1 og 0 svarende til et varierende signal fra fotodetektoren ligesom projektionen i figur 6.



Figur 7. Rekonstruktion af en valnød med snit i tre vinkelrette planer.

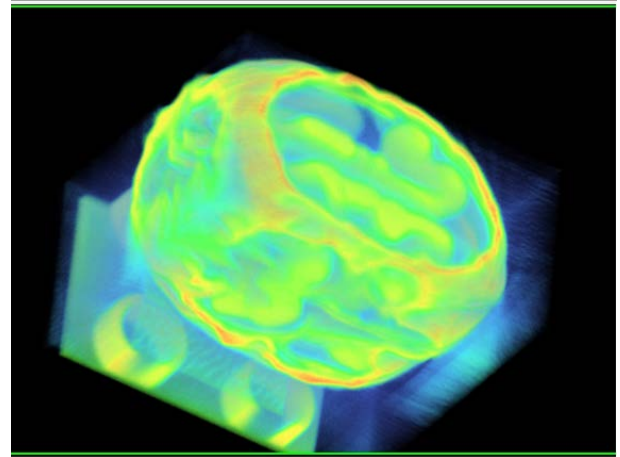
Transformationen (2) bærer sin opdagers efternavn, Radon [1]. Bemærk, at $\mathbf{n} = (\cos \phi, \sin \phi)$ er normalvektor til sigtelinjen, så deltafunktionen plukker funktionsværdier ud, som ligger i afstanden ξ fra sigtelinjen gennem (0,0), idet $\mathbf{n} \cdot (x, y) = \xi$ er ligningen for

sigtelinjen. Sluttelig adderes funktionsværdierne langs denne linje ved hjælp af integralet.

Rekonstruktion består dermed i at bestemme $f(x, y)$ ud fra måling af $p(\xi, \phi)$. Rekonstruktion er altså kort sagt en invers Radontransformation.

Billedbehandling – ind i nødden

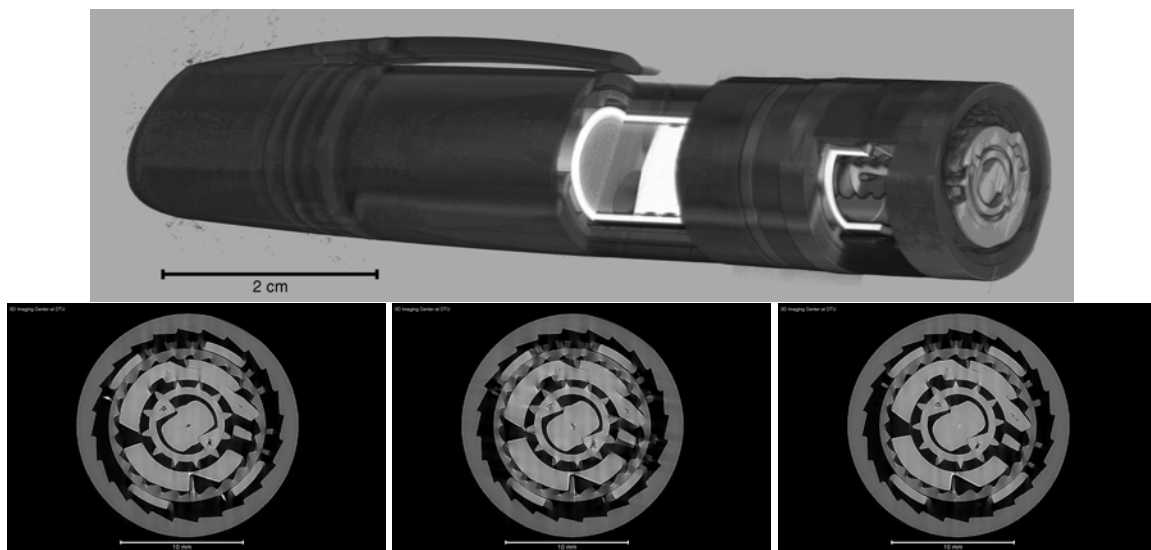
For at kigge ind i emnet, kan rekonstruktionen billedbehandles med snit i tre forskellige planer som vist for en valnød i figur 7. Endvidere kan man lave beskæring i 3D og således kigge ind i nødden som vist i figur 8.



Figur 8. Billedbehandling med beskæring i 3D. Toppen er åben, fordi nødden rager ud af billedfeltet (figur 7 nederst til venstre). Derudover er billedet beskåret i to herpå vinkelrette planer for et kig ind i nødden.

Den fjerde dimension, skanning i 4D

Med kraftige røntgenkilder kan man få den fjerde dimension med, nemlig tiden. Det vil sige, at man fx kan visualisere mekanismen i en insulinpen og se, om den virker som tiltænkt, se figur 9.



Figur 9. Skanning af NOVO-insulinpen med 0,3 sekunders mellemrum. Det lyse felt øverst i midten er stemplet, som trykker insulinen ud. Billederne nederst viser en tandhjulsmekanisme, som drejer sneglen, der presser stemplet. Tak til Novo Nordisk for tilladelse til at vise skanningerne, som blev optaget på European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) i samarbejde med 3D Imaging Centret på DTU som en del af Innovationsfond-projektet LINX.

Litteratur

- [1] Johann Radon (1986) “On the Determination of Functions From Their Integral Values Along Certain Manifolds”, *IEEE Transactions on Medical Imaging*, bind **MI-5**, nr. 4, december 1986. Oversættelse af P. C. Parks fra originalen “Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integralwerte längs gewisser Mannigfaltigkeiten”, offentliggjort i *Berichte der Sächsischen Akademie der Wissenschaft*, bind **69** (1917) side 262–277.
- [2] “Tomographic Image Reconstruction”, <https://aapm.org/meetings/99AM/pdf/2806-57576.pdf> (Forfatter: riviere@imaging.bsd.uchicago.edu). 25. juni 1999.
- [3] Gengsheng L. Zeng, Ya Li og Alex Zamyat-

in (2013) “Iterative total-variation reconstruction versus weighted filtered-backprojection reconstruction with edge-preserving filtering”, *Physics in Medicine and Biology*, bind **58**, side 3413–3431.



Ole L. Trinhammer er cand. scient. Leder af Nanoteket, DTU Fysik. Nanoteket tilbyder ca. 15 forskellige gymnasieøvelser til forskellige klassetrin og niveauer.