

MEDISCHE BEELDVORMING (VWO)

NNV14

In deze module worden de natuurkundige principes en technieken uitgelegd die toegepast worden bij het maken van foto's en beelden in de medische praktijk.

Delen van deze module bevatten verplichte stof voor het schriftelijk eind-examen, de docent kan deze gedeeltes aan de hand van de syllabus aangeven.



In de kantlijn van de tekst staat af en toe dit pictogram. Dat geeft aan dat je op www.schoolsupport.nl/ninaweblinks een link naar een webpagina of andere informatie kunt vinden. De links op deze NiNaweblinks-pagina worden zoveel mogelijk up to date gehouden.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde
Auteurs	Bart Lindner
M.m.v.	Hans van Bommel, Kees Hooyman, Henk van Lubeck
Vormgeving	Loran de Vries
Redactie	Harrie Eijkelhof, Koos Kortland, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	april 2012

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2012

Alle rechten op het lesmateriaal dat voor de pilot Nieuwe Natuurkunde ontwikkeld is, zijn voorbehouden aan de Stichting natuurkunde.nl. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins, voor al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten;
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt en/of verder ontwikkeld, voor al of niet commercieel hergebruik, mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:

1. schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, met als contactadres de Nederlandse Natuurkundige Vereniging: verenigingsmanager@nnv.nl

2. bij hergebruik of verspreiding wordt door de gebruiker de bron correct vermeld, en de licentievoorwaarden van dit werk kenbaar gemaakt.

Delen van dit lespakket, m.n. eindopdracht 1, zijn gebaseerd op materiaal dat is ontwikkeld voor een module in het vak Natuur, Leven en Technologie, en zijn opgenomen met toestemming van de SLO te Enschede. Hiervoor geldt een Creative Commons licentie zoals omschreven in

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl>.

Voor zover de Stichting natuurkunde.nl gebruik maakt van extern materiaal heeft zij getracht toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan wordt u verzocht contact op te nemen met: verenigingsmanager@nnv.nl.

Het lesmateriaal is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. de auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de modules, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze modules.

INHOUDSOPGAVE

Inleiding	5
1 Röntgenfotografie	8
1.1 De röntgenfoto	8
1.2 Röntgenstraling	9
1.3 Absorptie van röntgenstraling	12
1.4 De röntgenfoto in de praktijk	13
2 Nucleaire diagnostiek	19
2.1 Bouw van atoomkern; isotopen	21
2.2 Radioactiviteit	23
2.3 Halveringstijd	26
2.4 Nucleaire diagnostiek in de praktijk	30
3 Ioniserende straling	39
3.1 Effecten van straling	39
3.2 Stralingsbescherming	42
3.3 Natuurlijke radioactiviteit	43
4 Echografie	50
4.1 Echografie van 'niet' bewegende lichaamsdelen	51
4.2 Echografie van bewegende lichaamsdelen	54
5 Overige technieken	60
5.1 De CT-scan	60
5.2 De MRI-scan	63
5.3 Overzicht van de beeldvormingstechnieken	66
6 Over het beeld	69
6.1 Het digitale beeld	69
6.2 Beeldbewerking	70
7 Afsluiting	78

GLOBALE OPBOUW VAN HET LESMATERIAAL

In het lesmateriaal is een aantal stijlen gebruikt. De *belangrijkste leerstof* is weergegeven in *blauwe* tekstvakken. De betekenis van de andere kleuren en stijlen is hieronder aangegeven.

De tekst van ieder hoofdstuk begint met een **oriëntatieopdracht**. Deze opdrachten staan in de **paarse** tekstvakken.

In het **groene** tekstvak ‘Extra’ staat informatie die niet tot de leerstof behoort.

2 Nucleaire diagnostiek

Hoofdstukvraag	Hoe gebruiken radioactiviteit in de geneeskunde?
----------------	--

Oriëntatieopgave

Het linkerpaarje geeft een beeld van röntgenstraling een materiaal van bepaalde dikte doorklat. Een verduubding van de dikte halveert de **intensiteit** van straling. Ruiterkerf deed een experiment met de straling uit titanium. Hij deed een titanium plaatje door twee laagjes aluminium. Resultaat: het rechterpaarje. Wat volgt hieruit over de straling uit die van titanium?

Extra

Röntgenstraling wordt ook gebruikt om structuren te onderzoeken. Het is een vorm van elektromagnetische straling met een golflengte van ongeveer 10^{-8} tot 10^{-11} m. Het wordt gebruikt om de structuur van materialen te onderzoeken. Het wordt ook gebruikt om de structuur van materialen te onderzoeken.

Desinequivalent

$E = D \cdot Q$

Symbolen D is het dosisequivalent (in Gy), Q is de weegfactor van de stralingsoort en E is het dosisequivalent (in Sv).

Getuigenheid Als je, het is een dosimeter.

Hij een negatief getal heeft een donkere plaat lichtere getinte plaat als bruin. Hij een positief getal heeft een licht getinte plaat donkere bruin.

Voorbeeld - Bèta-afval van koolstof-14

Koolstof-14 heeft te veel neutronen om stabiel te zijn. Het is een radioactieve isotoop. Het komt het meest voor in de natuur. Het is een radioactieve isotoop. Het komt het meest voor in de natuur. Het is een radioactieve isotoop. Het komt het meest voor in de natuur.

$^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^-$

Belangrijke nieuwe **vergelijkingen** uit de natuurkunde zijn aangegeven in **blauwe** tekstvakken. Deze heb je nodig om rekenwerk mee te kunnen verrichten.

In de **blauwe** tekstvakken met **voorbeelden** staan uitgewerkte berekeningen van behandelde formules.

In de **grijze** tekstvakken staan de **practicumopdrachten**.

De tekst van ieder hoofdstuk wordt afgesloten met een **reflectieopdracht**. Deze opdrachten staan in de **paarse** tekstvakken.

In het **blauwe** tekstvak ‘**Begrippen**’ staan belangrijkste termen uit de tekst.

Practicum – Doppler effect

De afstand van de bron tot de waarnemer, is een geluidsdruk berekend (bijvoorbeeld om de afstand van de bron tot de waarnemer te berekenen). Het is een berekening van de afstand van de bron tot de waarnemer. Het is een berekening van de afstand van de bron tot de waarnemer. Het is een berekening van de afstand van de bron tot de waarnemer.

Tekst vragen

- Wat heeft een hogere frequentie: licht of röntgenstraling?
- Wat zijn fotonen?

Begrippen

Röntgenstraling
Zwaartekracht
Elektromagnetische golf
Golflengte
Frequentie

Samenvatting

- Röntgenstraling behoort tot de elektromagnetische golven. De frequentie van deze straling is hoog.
- Fotonen zijn deeltjes van licht. Ze hebben een bepaalde energie en een massa.
- De massa van een deeltje is niet gelijk aan de massa van een deeltje. Het is een deeltje van licht. Het is een deeltje van licht. Het is een deeltje van licht. Het is een deeltje van licht.

Opgaven

5.1.1 Gebruik Röntgenstraling (Röntgen).

57. Elektromagnetisch spectrum (1)
Zet in volgorde van laag naar hoog golflengte:
Radiogolven – gammastraling – ultraviolette straling – infrarode straling – blauw licht – röntgenstraling – rood licht

58. Elektromagnetisch spectrum (2)
d. Zijn lichtgolven langzaam of snel? Leg uit.

In het **blauwe** tekstvak ‘**Samenvatting**’ staat de minimale kennis die je paraat moet hebben.

Opgaven staan bij elkaar aan het einde van een hoofdstuk. De opgaven zijn gegroepeerd per paragraaf.

MEDISCHE BEELDVORMING

Als je in een ziekenhuis werkt, stage loopt of als patiënt een onderzoek ondergaat, krijg je te maken met medische diagnostiek waarbij met behulp van diverse vormen van elektromagnetische straling de inwendige organen zichtbaar worden gemaakt. In deze module maak je kennis met mogelijkheden en gevaren van diverse technieken en instrumenten die worden gebruikt voor deze medische beeldvorming.

Voorkennis

Je kent de volgende begrippen:

Golven: frequentie, golflengte, voortplantingssnelheid

Atoombouw: kern en elektronen

Magnetisme: magnetisch veld opgewekt door stroomspoel; noord- en zuidpool; ijzer, kobalt en nikkel worden door magneten aangetrokken.

INLEIDING

Sinds de ontdekking van de röntgenstraling in 1895 zijn technieken ontwikkeld om in het menselijk lichaam te kijken.

Een eeuw geleden kon een arts met een patiënt met pijn in de borst niet veel meer doen dan de patiënt bekloppen of met een stethoscoop te luisteren. Verder was het een beetje raden naar de oorzaak van de klacht. Een operatie, om te kijken wat er aan de hand was, lag niet voor de hand: de gevolgen daarvan waren waarschijnlijk erger dan de kwaal.

Vandaag de dag heeft de arts in het ziekenhuis allerlei mogelijkheden om in het lichaam te kijken.

Medische beeldvorming begon met de ontdekking van röntgenstraling en is in de loop van de 20e eeuw aangevuld met beeldvormingstechnieken waarbij de computer een onmisbare rol speelt.

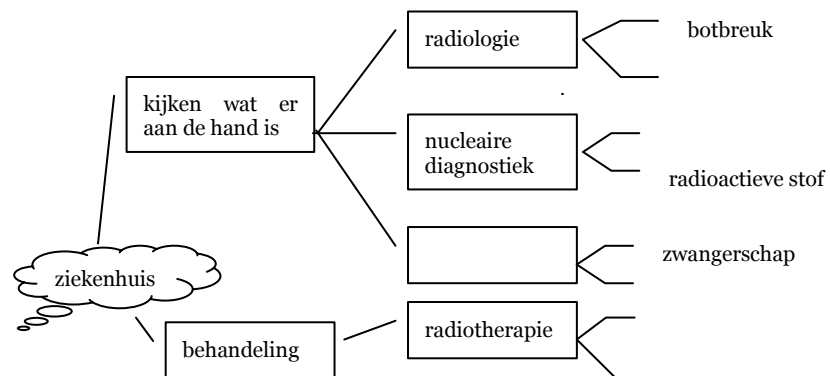
Medische beeldvorming is in de huidige geneeskunde niet meer weg te denken. In een gemiddeld ziekenhuis worden per jaar meer dan 1 miljoen beeldopnamen gemaakt. Een derde deel van de investeringen van een ziekenhuis zit in apparatuur voor medische beeldvorming.

Oriëntatieopgave - Wat zit er al in je hoofd?

Je gaat in deze opdracht onderzoeken wat je over het onderwerp medische beeldvorming al weet.

Neem het volgende schema over en vul de open plekken in. Breid het schema uit met begrippen bij nieuwe lijntjes en in nieuwe vakjes.

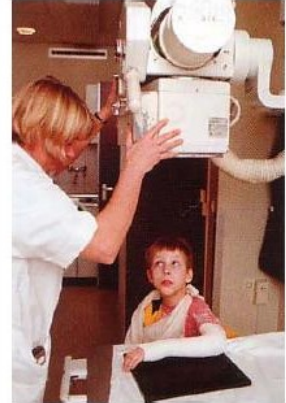
- Kijk in de inhoudsopgave van deze module en markeer in je schema de onderwerpen die aan de orde komen.



In deze module worden de volgende technieken behandeld.

Röntgenfoto

De oudste techniek, gebruikt bij botbreuken en het onderzoek van het gebit. Een minder bekende toepassing is het zichtbaar maken van bloedvaten.



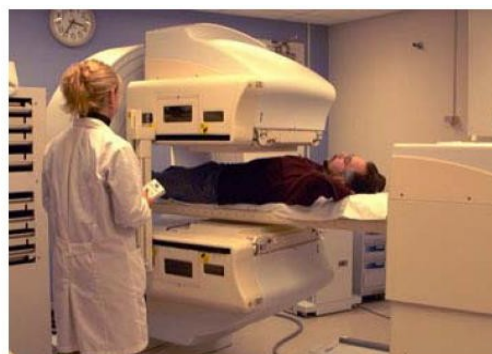
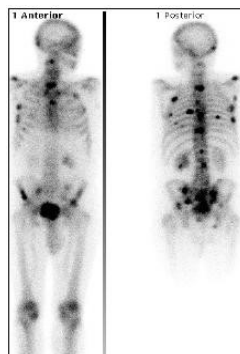
CT-scan

Een moderne toepassing is de CT-scan (CT = 'computed tomography'). Met röntgenstraling maakt de computer een beeld van de dwarsdoorsnede van het lichaam.



Nucleaire diagnostiek

Deze geeft een beeld van de lichamelijke functies: waar is de stofwisseling het actiefst, hoe is de doorbloeding van weefsels, waar ontwikkelt zich een tumor. De patiënt krijgt een kleine hoeveelheid radioactieve stof toegediend, een gammacamera of andere detector legt vast waar die stof in het lichaam terecht komt.



MRI-scan

MRI ('Magnetic Resonance Imaging') berust op het feit dat protonen (waterstofkernen) zich gedragen als kleine magneetjes. In een sterk magnetisch veld zenden waterstofkernen radiogolven uit. Met ontvangers en computer wordt een beeld gevormd. Zo onderscheidt men weefsels met verschillende hoeveelheden waterstof. De MRI-scan is nuttig om beelden van zachte weefsels te maken.



Echografie

Ultrageluid (= geluid met hoge frequenties) kaatst gedeeltelijk terug op het grensvlak van weefsels. Van de teruggekaatste golven maakt de computer een beeld van het inwendige. Algemeen bekend is de zwangerschapscontrole, maar je meet met echografie ook de stroomsnelheid van bloed. Voordeel is dat er geen ioniserende straling of radioactiviteit aan te pas komt.



1 Röntgenfotografie

Hoofdstukvraag	Hoe werkt röntgenfotografie?
----------------	------------------------------

1.1

De röntgenfoto



Figuur 1.1 Röntgenopname om te controleren of een gebroken arm goed geneest

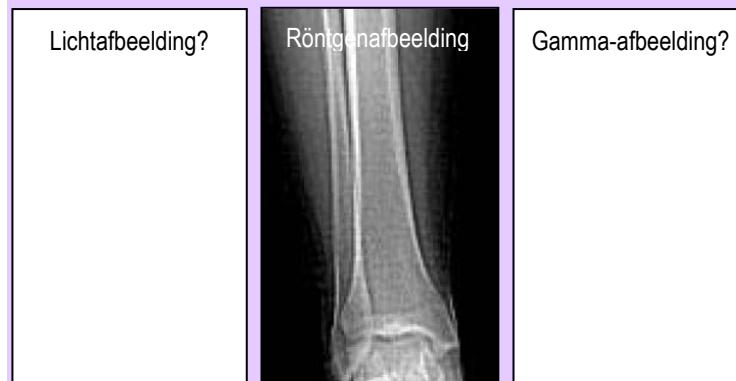
In 1895 ontdekte Wilhelm Conrad Röntgen bij toeval een soort straling die fotofilms kon belichten en bepaalde mineralen deed oplichten.

Hij noemde die stralen X-stralen (in het Engels wordt die term nog steeds gebruikt: X ray). We noemen dit nu ook wel **röntgenstraling**.

Oriëntatieopgave - Absorptie van straling

Röntgenstraling lijkt op licht, alleen de energie van de deeltjes is veel groter dan bij licht. Bij gammastraling is de deeltjesenergie nog groter dan bij röntgenstraling.

De absorptie van straling hangt af van de dichtheid van het weefsel en de energie van de deeltjes. Omdat bij normaal licht de deeltjesenergie veel kleiner is dan bij röntgenstraling wordt normaal licht in veel grotere mate geabsorbeerd.



Figuur 1.2 In het midden een röntgenopname. Welk beeld zou ontstaan als er normaal licht of gammastraling gebruikt was?

- Leg uit dat bij een röntgenopname het bot wit is, de achtergrond zwart en het weefsel grijs.
- Stel dat bij de opname geen röntgenstraling maar normaal licht gebruikt was. Schets het beeld dat dan op de fotografische plaat zichtbaar zou zijn.
- Stel dat bij de opname geen röntgenstraling maar gammastraling gebruikt was. Schets het beeld dat dan op de fotografische plaat zichtbaar zou zijn.

Röntgen ontdekte dat die straling gemakkelijk door veel stoffen kon door-dringen. Daarmee werd het maken van röntgenfoto's mogelijk.

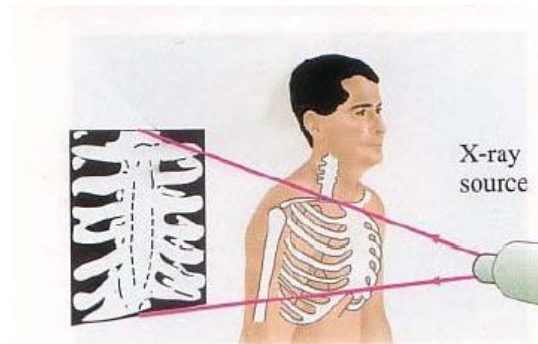


Figuur 1.3 De eerste röntgenfoto uit de geschiedenis; Röntgen maakte die van de hand van zijn vrouw in 1895

Röntgenstraling gaat door weefsel met lage dichtheid heen, maar wordt door zwaarder weefsel, zoals botten, **geabsorbeerd**.

Op de fotografische plaat achter het lichaam komt een soort schaduwbeeld: de lichte weefsels laten de straling door en geven **zwarting**, botten laten weinig straling door en steken daarbij wit af. Na ontwikkeling is dit andersom (zie foto links).

De röntgenfoto werd een belangrijk middel om diagnoses te stellen. Sinds die tijd zijn er steeds technieken ontwikkeld om betere foto's te maken met kleinere hoeveelheden röntgenstraling.

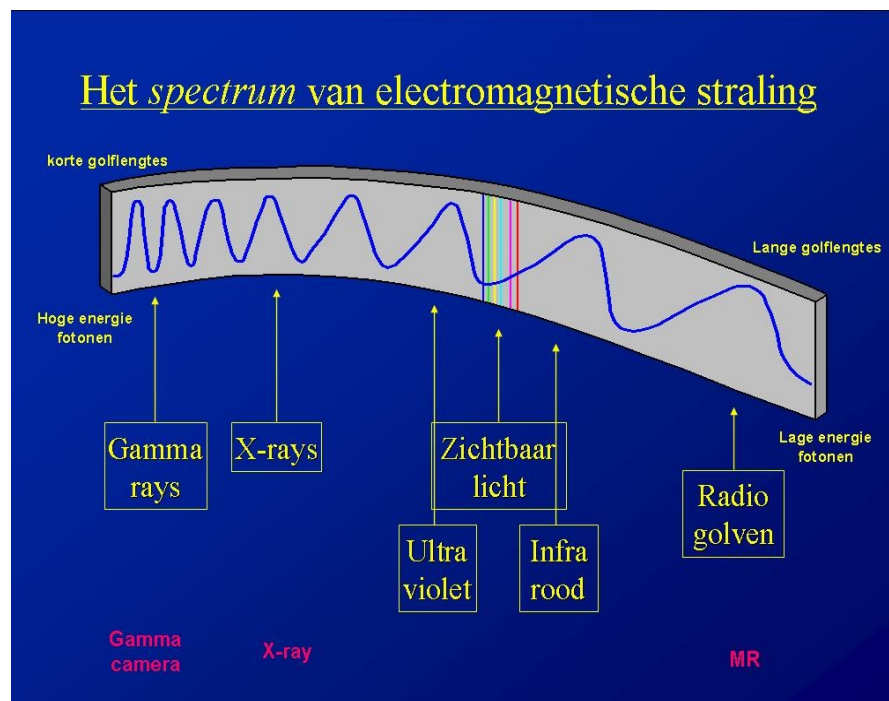


Figuur 1.4

1.2

Röntgenstraling

Röntgenstraling behoort tot de **elektromagnetische golven**. Andere voorbeelden van deze straling zijn radiogolven, radargolven, licht, infrarood straling, ultraviolet straling en gammastraling. Al deze golven planten zich voort met de **lichtsnelheid** (in het luchtledige bijna 300 000 km/s).



Figuur 1.5 De verschillende vormen van elektromagnetische straling onderscheiden zich door hun golflengte

Figuur 1.5 geeft een overzicht van de elektromagnetische golven.

De golflengte van röntgenstraling is tussen 0,1 en 10 nanometer, veel korter dan die van zichtbaar licht (één nanometer is 10^{-9} meter = een miljoenste millimeter).

Verband tussen golflengte en frequentie

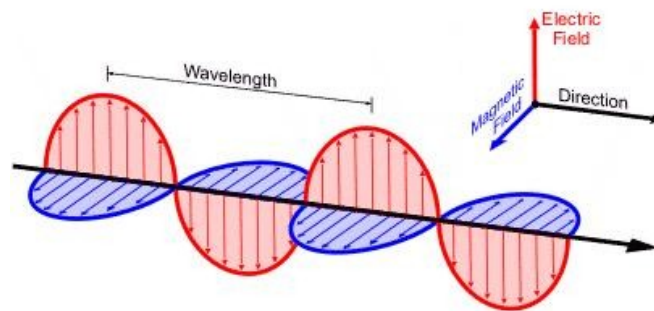
Het verband tussen de golflengte en de frequentie van een golfverschijnsel wordt gegeven door

$$c = \lambda \cdot f$$

Symbolen: c is de voortplantingssnelheid (in m/s), λ is de golflengte (in m) en f is de frequentie (in Hz).

Geldigheid: De vergelijking geldt voor alle elektromagnetische golven. De lichtsnelheid is $c = 299.792.458$ m/s (we gebruiken $3,0 \cdot 10^8$ m/s). In glas en water verschilt de lichtsnelheid van die in lucht.

Men stelt zich elektromagnetische golven voor als twee loodrecht op elkaar staande golven, de elektrische en de magnetische component. Hun snijlijn geeft de voortplantingsrichting van de golf (zie figuur 1.6).



Figuur 1.6

Door elektromagnetische straling wordt energie vanuit een bron naar de omgeving overgedragen; hoe hoger de frequentie, des te groter de energie die wordt overgebracht. In het begin van de 20e eeuw bleek dat als je elektromagnetische golven heel precies onderzoekt, dat deze golven bestaan uit hele kleine golfdeeltjes, de zogenaamde **fotonen**. Een foton vertegenwoordigt het kleinste mogelijke brokje (licht)energie van een elektromagnetische golf. De energie van een dergelijk brokje, de **fotonenergie**, hangt af van de frequentie: hoe groter de frequentie, des te groter de energie.

Fotonenergie

De energie van een foton volgt uit de formule:

$$E = h \cdot f$$

Symbolen: E is de energie van het foton in Joule (J), f is de frequentie in hertz (Hz) en h is de **constante van Planck**:
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

Geldigheid: de vergelijking is geldig voor alle elektromagnetische straling.

Tekstvragen

- Wat heeft een hogere frequentie: zichtbaar licht of röntgenstraling?
- Wat zijn fotonen?
- Wat heeft een grotere energie: fotonen van radiogolven of van zichtbaar licht?

Fotonen kunnen reageren met geladen deeltjes, zoals de elektronen in een atoom. Zo kunnen fotonen van het zichtbare licht chemische reacties veroorzaken (denk aan de fotosynthese bij groene planten, aan zintuigcellen in het oog en de werking van fotofilm).

De frequentie van röntgenstraling is zeer hoog. De energie van röntgenfotonen is dus ook veel groter dan die van lichtfotonen. Fotonen van ultraviolet, röntgen- en gammastraling kunnen daardoor moleculen in ons lichaam beschadigen, wat uiteraard gevaarlijk is voor de gezondheid. Dit bespreken we verder in de volgende paragraaf.

Practicum - Lichtstralen versus röntgenstralen

- Leg zo snel mogelijk, handpalm naar beneden, je hand met gespreide vingers op een stuk fotopapier.
 - Houd je hand zo stil mogelijk totdat het niet bedekte stuk papier duidelijk donker kleurt. Dit kan enige minuten duren.
 - Houd je hand van het papier en kijk wat er langzaam met de afdruk gebeurt.
- a. Geef twee overeenkomsten tussen deze foto en een röntgenfoto.
 - b. Geef twee verschillen tussen deze foto en een röntgenfoto.
 - c. Waardoor verdwijnt je handafdruk?
 - d. Wat moet je doen om je handafdruk niet te laten verdwijnen?

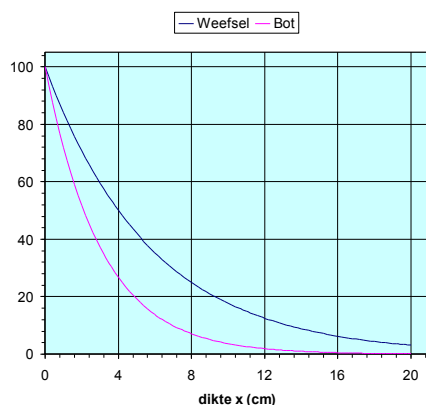
1.3

Absorptie van röntgenstraling

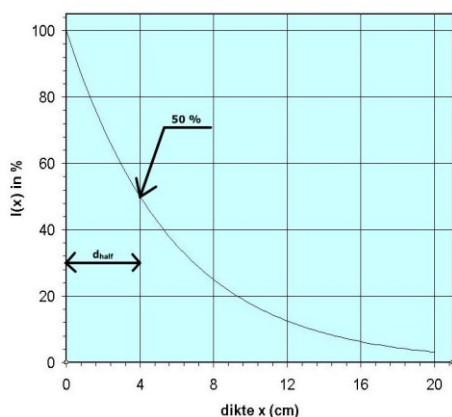


Figuur 1.7

Stralingsintensiteit en dikte



Figuur 1.8 Doorlaatkromme



Figuur 1.9 De **doorlaatkromme** in een weefsel

Oriëntatieopgave - Rekenen aan absorptie

Bekijk de röntgenopname in figuur 1.7. Neem ter vereenvoudiging aan dat het been op de röntgenfoto overal 8,0 cm dik is. Voor weefsel (zoals spieren en huid) geldt bij deze straling dat de halveringsdikte 4,0 cm is. Dat betekent dat na elke 4,0 cm de hoeveelheid straling gehalveerd wordt. Zie ook de doorlaatkromme van figuur 1.8.

- Leg uit dat na 8,0 cm weefsel nog 25% van de straling over is.
- De halveringsdikte van bot is ongeveer 2,0 cm. Bereken hoeveel procent van de straling na 8,0 cm bot nog over is.

In de formule voor het intensiteitsverval $I = I_0 \cdot 0,5^n$ is n het aantal halveringsdiktes.

- Leg uit hoe je n kunt berekenen uit de dikte x van het voorwerp en de halveringsdikte $d_{1/2}$. Schrijf het antwoord als een formule.

Stel dat je een röntgenfoto wilt maken van de poot van een olifant met een dikte van 20 cm.

- Bereken hoeveel procent van de straling doorgelaten wordt door 20 cm weefsel en 20 cm bot.
- Welk beeld zul je dan zien op de röntgenfoto? Leg uit dat er dan vrijwel niets te zien is van de structuur van het bot.
- Bij een röntgenapparaat kun je de energie van de deeltjes verhogen of verlagen. Hoe zou je de energie van de deeltjes veranderen om toch een goede röntgenfoto te kunnen maken van de poot van een olifant?

Fotonen van röntgenstraling hebben in de regel een te grote energie om een reactie met elektronen in een atoom te geven, vandaar dat deze fotonen meestal zonder te reageren dwars door atoomlagen heen gaan. Dat verklaart het grote **doordringend vermogen** van röntgenstraling. Hoe groter de energie (dus de frequentie) van de fotonen is, hoe groter het doordringend vermogen.

Toch bestaat er een kleine kans dat een elektron een foton absorbeert. Het foton verdwijnt dan en het elektron neemt de energie van het foton op. Dat elektron krijgt dan een grote kinetische energie en raakt los van het atoom. Dat atoom wordt dan een positief ion. Een ion is een atoom dat te veel of te weinig elektronen heeft en dus geladen is. Als atomen elektronen verliezen worden ze positieve ionen.

De kans op een dergelijke reactie is het grootst in stoffen met een grote dichtheid. Die bestaan uit atomen met veel elektronen om de kern (en dus ook veel elektronen per cm^3). Deze stoffen absorberen relatief veel röntgenstraling. Door absorptie neemt de intensiteit van de doorgelaten straling af. In de natuurkunde is de intensiteit van straling gedefinieerd als het vermogen dat door een vierkante meter oppervlak gaat. In figuur 1.9 zie je het verband tussen de intensiteit van de doorgelaten straling $I(x)$ en de dikte x van een laag weefsel.

De intensiteit van de op het weefsel vallende straling (dus bij een dikte van 0 cm) is I_0 . Je stelt die I_0 op 100%.

Definitie:

Halveringsdikte is de dikte van het materiaal waarbij de helft van de stralingsintensiteit wordt geabsorbeerd.

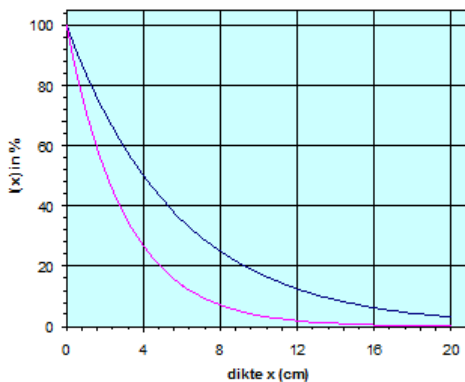
Na één halveringsdikte (4 cm) is dus de helft (50%) van de oorspronkelijke intensiteit over. Na twee halveringsdiktes (8 cm) de helft van de helft, dus $\frac{1}{4}$ (= 25%). Na drie halveringsdiktes (12 cm) $\frac{1}{8}$ (= 12,5%), enzovoort.

Tekstvragen

- Waardoor heeft röntgenstraling een groot door-dringend vermogen?
- Wat is halveringsdikte?
- Röntgenstraling dringt bijna niet door lood heen. Heeft lood een grote of een kleine halveringsdikte?

Stralingsintensiteit en dikte

— Weefsel — Bot



Figuur 1.10

1.4

Intensiteitafname

Voor de afname van de intensiteit geldt de formule:

$$I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{d_{\frac{1}{2}}}}$$

Symbolen: I is de intensiteit (in W/m²) van de doorgelaten straling bij een dikte x (met x en $d_{\frac{1}{2}}$ in gelijke eenheden)

Geldigheid: de vergelijking is geldig voor het verval van Röntgenstraling en andere hoogenergetische straling in een stof

Als röntgenstraling door een dikkere laag weefsel gaat, wordt er meer straling geabsorbeerd. Gevolg: botten absorberen meer straling dan zachte weefsels, die vooral uit water bestaan.

Figuur 1.10 geeft voor weefsel en bot het verband aan tussen de intensiteit van de doorgelaten straling en de dikte. Je ziet dat röntgenstraling in weefsels verder doordringt dan in botten. Daardoor is de röntgenfoto mogelijk. Op het fotonegatief zijn zachte weefsels donkerder dan botten, zodat de botten zichtbaar zijn.

De röntgenfoto in de praktijk

Fotobeeld

Vroeger werd voor het vastleggen van het beeld een fotografische plaat gebruikt. Maar door het grote doordringend vermogen van röntgenstraling gaan veel fotonen door een fotografische plaat heen zonder zwarting van de fotofilm te veroorzaken. Voor een behoorlijke foto was dan een lange bestraalingstijd nodig waardoor de patiënt bloot stond aan vrij veel straling.



Figuur 1.11 Röntgenfoto's van het gebit (links), van botten (midden) en van bloedvaten in de hand (rechts). Bij de laatste moet het bloed van een contrastvloeistof worden voorzien.



Figuur 1.12 Het fosforscher. De Röntgenstraling zorgt ervoor dat in het fosforscher atomen licht geven. Dat licht geeft belichting van de filmemulsie.

Om een kortere bestralingstijd mogelijk te maken wordt een fosforscher gebruikt. Deze naam heeft niets met de stof fosfor te maken. Een stof 'fosforesceert' als die stof licht uitzendt nadat het getroffen is door snelle elektronen of bestraald is met röntgenstraling. Fosforescentie is het verschijnsel dat een stof na te zijn belicht in het donker nog een poos blijft nalichten.

Achter de dunne fotofilm zit een dikker fosforscher. In dat scher wordt de röntgenstraling voor het grootste deel geabsorbeerd en omgezet in zichtbaar licht. Een röntgenfoton die het fosforscher treft, geeft een uiterst klein lichtflitsje dat de fotofilm belicht waardoor uiteindelijk de foto ontstaat.

Digitaal beeld

Modern is het zogenaamde digitale scher, te vergelijken met een digitale foto. Uiteindelijk wordt het beeld opgeslagen in een computer.

Een digitaal scher heeft veel voordelen: betere **beeldkwaliteit**, minder röntgenstraling nodig, geen ontwikkelprocessen, je kunt het steeds opnieuw gebruiken, gemakkelijk te bewaren en te verzenden.

Extra

Het digitale scher bevat europium. Als het scher door röntgenfotonen wordt getroffen, blijven europiumatomen wekenlang in een hogere energietoestand. Hierdoor blijft de informatie wekenlang in het digitale scher.

Het scannen (uitlezen) van het scher gebeurt razendsnel met een infraroodlaser. De europiumatomen 'vallen' door de infrarode straling terug naar hun oorspronkelijke energietoestand en zenden daarbij licht uit. Een gevoelige lichtsensor vangt dit licht op, zet het om in elektrische signalen die naar de computer gaan.

De computer berekent van elk beeldelementje de 'grijswaarde' (§6.1).

Als de lichtsensor veel licht opvangt wordt de grijswaarde hoog en het pixel licht. Het zo ontstane beeld wordt op een beeldscherm vertoond en op de harde schijf opgeslagen.

Toepassingen

De bekendste medische toepassingen zijn het onderzoek van botbreuken, gebit en het onderzoek naar borstkanker bij vrouwen.

Maar er zijn meer medische toepassingen.

Bij fluoroscopie wordt langdurig in het lichaam gekeken. Dit is nuttig om operaties te volgen zoals het verwijderen van cholesterol uit de wand van een

Tekstvragen

- Hoe werkt een fosforscherm?
- Wat is fluoroscopie?
- Hoe werkt DSA?

Extra

Röntgenstraling wordt ook gebruikt om materiaal in technische constructies (schepen, hijskranen, stoomketels etc.) te controleren op haarscheurtjes of om de kwaliteit van lasverbindingen te onderzoeken.
Bij veiligheidscontroles op luchthavens bekijkt men zo de inhoud van tassen en koffers.

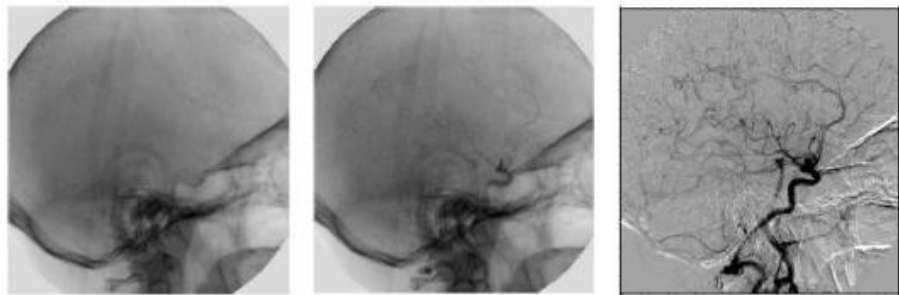
bloedvat (dotteren) en het aanbrengen van een stent (een versterking van de wand van een bloedvat). De röntgenstraling heeft een zeer lage intensiteit en de detector is voorzien van een beeldversterker, zodat het beeld op een monitor toch goed zichtbaar is.

Bij angiografie maakt men op een röntgenfoto bloedvaten duidelijk zichtbaar met een sterk absorberende contrastvloeistof. Bloed en weefsel bestaan voor een groot deel uit water en zullen de röntgenstraling even sterk absorberen. Door aan het bloed een andere stof toe te voegen, wordt het verschil in absorptie van röntgenstraling groter en zijn de bloedvaten op de foto goed zichtbaar.

Een speciale techniek is de zogenaamde DSA (Digital Subtraction Angiography). Hierbij maakt men eerst een digitale röntgenfoto zonder contrastvloeistof. Dit is het maskerbeeld. Daarna maakt een tweede foto maar nu met contrastvloeistof in het bloed, het contrastbeeld.

Vervolgens worden de grijswaarden van het maskerbeeld van die van het contrastbeeld afgetrokken. Plaatsen waar contrastbeeld en maskerbeeld dezelfde grijswaarde hebben worden zwart. Plaatsen waar contrastbeeld en maskerbeeld duidelijk verschillen worden krijgen een hoge grijswaarde en worden bijna wit. Dit geeft een duidelijk (negatief) beeld, doordat onduidelijke structuren worden weg gefilterd. De computer maakt hiervan weer een positief beeld.

Voor een goede DSA-opname mag de patiënt bij het maken van beide beelden absoluut niet van plaats veranderen, niet altijd even gemakkelijk.



Figuur 1.13 Een DSA-opname van het hoofd. Links het maskerbeeld, midden het contrastbeeld, rechts het verschil tussen contrast- en maskerbeeld. De bloedvaten zijn nu zeer duidelijk te zien.

Voor- en nadelen

Voordelen: Röntgenapparaten zijn niet duur (zo'n 15 000 euro), maar gaan bij intensief gebruik niet lang mee (ca 8 maanden). Netto zijn de kosten per foto vrij laag, zeker vergeleken met CT-scan en MRI-scan.

De foto is snel gemaakt en het resultaat is snel zichtbaar.

Nadelen: De patiënt kan door de röntgenstraling schade oplopen, maar het risico is kleiner dan bij een CT-scan.

Op een röntgenfoto zijn diverse structuren door elkaar te zien. Bij een foto van de borstkas zijn zowel de ribben en wat vager het hart of de longen en tenslotte de ruggenwervels te zien. Dit leidt soms tot verwarring.

Zachte weefsels zijn moeilijk te onderscheiden, doordat ze bijna even sterk röntgenstraling absorberen.

Reflectieopdracht - Gaten in je kennis?

Geef aan wat bij elke letter zou moeten staan. Kies uit: absorbeert, angiografie, elektromagnetische, fosforschermer, foton, gamma, grote, kleine, licht, radio, spectrum, ultraviolette

Röntgenstraling is een vorm van **.a.** straling. Deze stralingsoorten vormen een heel **.b.** Als je deze soorten straling rangschikt naar opklimmende golflengte, krijg je **.c.** straling, röntgenstraling, **.d.** straling, zichtbaar **.e.**, infrarode straling en tenslotte **.f.** golven, die dus de grootste golflengte hebben.

Deze straling bestaat uit afgepaste brokjes energie, zo'n brokje noem je een **.g.** Uit de formule $E=h \cdot f$ volgt dat een **.h.** met een grote frequentie een **.i.** energie heeft. Een grote frequentie betekent een **.j.** golflengte. Een **.k.** gammastraling heeft dus een **.l.** energie en een **.m.** radiostraling heeft een heel **.n.** energie. Daardoor is **.o.** straling schadelijk voor de gezondheid en **.p.** straling niet. Ook **.q.** magnetronstraling heeft een **.r.** energie.

Het ene materiaal **.s.** röntgenstraling beter dan het andere. Een materiaal dat goed **.t.**, heeft een **.u.** halveringsdikte. Deze verschillen maken röntgenfoto's mogelijk. Voor een afbeelding van de bloedvaten spuit men een contrastvloeistof in. Deze **.v.** veel straling. Deze techniek noem je **.w.**

Bij gebruik van een **.x.** wordt minder straling gebruikt dan bij een fotografische plaat. Zo'n **.ij.** zendt **.z.** uit als er röntgenstraling op valt.

Begrippen

Röntgenstraling
Absorptie
Zwarting
Elektromagnetische golf
Golflengte
Frequentie
Voortplantingssnelheid
Foton
Fotonenergie
Doordringend vermogen
Doorlaatkromme
Halveringsdikte
Beeldkwaliteit
Ioniserende straling

Samenvatting

- **Röntgenstraling** behoort tot de **elektromagnetische golven**. De **frequentie** van deze straling is hoog.
- **Fotonen** zijn 'brokjes' stralingsenergie. De **frequentie** bepaalt de **energie** van een foton: $E = h \cdot f$
- De meeste röntgenfotonen worden niet geabsorbeerd door elektronen in het weefsel, daardoor heeft röntgenstraling een groot **doordringend vermogen**.
- Als elektronen in het weefsel röntgenstraling absorberen, treedt ionisatie op. Daarom noem je röntgenstraling **ioniserende straling**. Hoeveel straling er geabsorbeerd wordt, hangt af van het aantal elektronen per cm^3 .
- **Halveringsdikte** is de dikte van het gebruikte materiaal waarbij de helft van de straling wordt **geabsorbeerd**.

Opgaven

§1.1 Gebruik Binas tabel 18 of 19.

1 Elektromagnetisch spectrum (1)

Zet in volgorde van lage naar hoge golflengte:

Radiogolven – gammastraling – ultraviolette straling – infrarode straling – blauw licht – röntgenstraling – rood licht

2 Elektromagnetisch spectrum (2)

- Zijn lichtgolven longitudinaal of transversaal? Leg uit.
- Leg uit wat de hoogste frequentie heeft: infrarode of ultraviolette straling.
- Leg uit welk foton de grootste energie heeft: dat van ultraviolette straling of dat van röntgenstraling.

3 Rekenen met golflengte en frequentie

- Bereken de frequentie van magnetrongolven met een golflengte van 12,2 cm.
- Bereken de golflengte van röntgenstraling met een frequentie van $2,0 \cdot 10^{18}$ Hz.

4 Rekenen met energie van een foton

- Bereken met behulp van Binas de energie van een röntgenfoton dat een golflengte van 5,00 nm heeft.

Omdat de energie van een foton in joule zeer kleine getallen oplevert, is het handiger om met de eenheid elektronvolt (eV) te werken.

Een foton heeft een energie van $3,0 \cdot 10^{-19}$ J.

- Bereken de energie in elektronvolt ($1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).
- Haal uit Binas van welke kleur zichtbaar licht hier sprake is.

§ 1.2

5

- Waardoor hebben röntgen- en gammastraling een groot doordringend vermogen?
- Wat gebeurt er met de energie van het foton nadat het is geabsorbeerd?

6 Halveringsdikte

- Geef de definitie van halveringsdikte
- Hoeveel procent van de oorspronkelijke intensiteit is overgebleven nadat de straling in een stof twee halveringsdiktes heeft afgelegd?
- Leg uit wat röntgenstraling sterker absorbeert: een stof met grote halveringsdikte of een stof met kleine halveringsdikte.
- Leg uit wat een grotere halveringsdikte heeft: weefsel of bot.

7 Rekenen met halveringsdikte

Voor bepaald weefsel is de halveringsdikte voor röntgenstraling 3,7 cm.

- Bereken de dikte van het weefsel als na het passeren van röntgenstraling 12,5% van de oorspronkelijke intensiteit over is.
- Bereken hoeveel procent van de ingevallen intensiteit geabsorbeerd wordt door een laag van 7,4 cm van dit weefsel.
- Bereken hoeveel procent van de ingevallen intensiteit over is na 20 cm.

8

In figuur 1.10 is af te lezen dat na 8,0 cm bot nog 7,0% van de straling over is. Volgens de tekst is de halveringsdikte van bot *ongeveer* 2,0 cm. Benader met behulp van figuur 1.10 de halveringsdikte op één decimaal nauwkeurig.

9

Leg in enkele zinnen het principe van de röntgenfoto uit

§ 1.3

10 Vastleggen van het beeld

- Waardoor is een gewone fotografische plaat voor het vastleggen van een röntgenbeeld niet zo geschikt?
- Waardoor is een 'fosforscher' in dit opzicht beter?
- Geef drie voordelen van een digitaal scherm boven een foto.

11 Angiografie

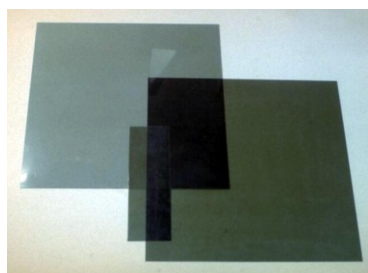
- Waardoor is voor het zichtbaar maken van bloedvaten op een röntgenfoto een contrastvloeistof nodig?
 - Leg uit hoe DSA (digital subtraction angiography) werkt.
 - Waarom moet de patiënt bij het maken van het maskerbeeld en het contrastbeeld op dezelfde plaats blijven?
-

2 Nucleaire diagnostiek

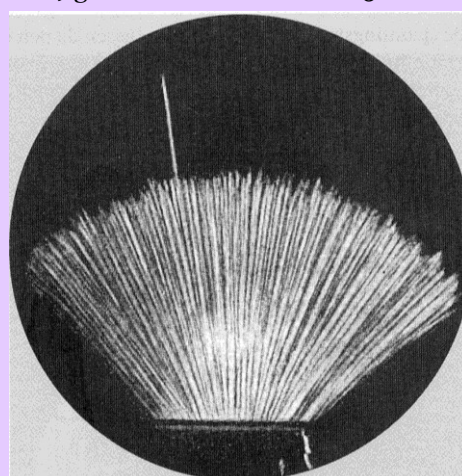
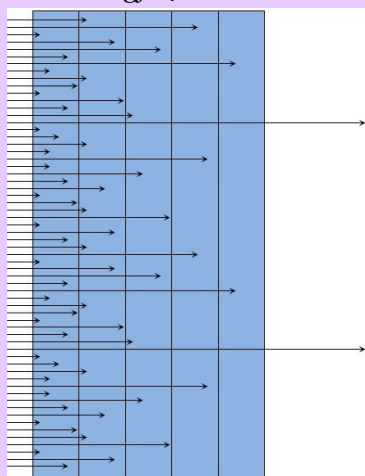
Hoofdstukvraag	Hoe gebruikt men radioactiviteit in de geneeskunde?
----------------	---

Oriëntatieopgave - Dracht en halveringsdikte

De absorptie van röntgen- en gammastraling is goed te vergelijken met absorptie van licht in melk of in laagjes zonnebrilfolie. De stralingsdeeltjes worden niet afgeremd maar stuk voor stuk geabsorbeerd door atomen in het materiaal. Daarbij speelt toeval een rol. Voor elk deeltje is de kans om binnen één laagje (met d = halveringsdikte) geabsorbeerd te worden 50%.



Figuur 2.1 Absorptie van zonlicht in laagjes folie.



Figuur 2.2 Links: Absorptie van licht. In elk laagje wordt de helft van de lichtdeeltjes geabsorbeerd. Foto rechts: Condenssporen van alfadeeltjes in onderkoelde lucht (bron: Newton – ThiemeMeulenhoff)

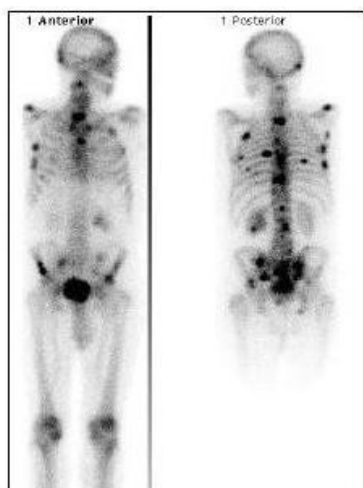
Bij alfa- en bètastraling treedt geen absorptie op. Het stralingsdeeltje botst tegen atomen en geeft daarbij steeds een beetje energie af. De snelheid van het deeltje wordt afgeremd.

In figuur 2.2 zijn rechts condenssporen van alfadeeltjes zichtbaar. De sporen bestaan uit kleine condensdruppeltjes die gevormd zijn rond een molecuul dat door de botsing geïoniseerd is.

- Hoe groot is de snelheid van het alfadeeltje aan het eind van het condensspoor?
- De condenssporen zijn (op één na) allemaal even lang. Wat betekent dat voor de snelheid waarmee de alfadeeltjes uit de bron (aan de onderzijde van de foto) zijn gekomen?
- Leg uit waardoor alfa- en bètadeeltjes wel kunnen worden afgeremd bij botsingen en gamma- en röntgendeeltjes niet.
- Leg uit dat een loodschort nooit alle röntgenstraling tegen kan houden, maar wel alle alfa- en bètastraling.

De dracht van alfa- en bètastraling hangt af van de snelheid van de deeltjes en de dichtheid van de materie waar ze doorheen bewegen.

	dracht in lucht	dracht in water
α	1-7 cm	20-80 μm
β	0,2-1 m	0,1-10 mm



Figuur 2.3 Scan van het lichaam. De donkere vlekken duiden op tumoren

In figuur 2.3 zie je een scan die gemaakt is door radioactief materiaal in het lichaam te spuiten. Het materiaal hecht zich aan groeiplekken en dus ook aan tumoren. Om een afbeelding te kunnen maken moet het radioactief materiaal gammastraling uitzenden.

e. Leg uit waarom radioactief materiaal dat alfa- of bètastraling uitzendt ongeschikt is om een dergelijke opname te maken.

f. Waarom kan de straling die bij deze opname uit het lichaam komt geen röntgenstraling zijn?

Bij deze scan is wel gebruik gemaakt van röntgenstraling. Het is een combinatie van een röntgenfoto en een gammascan.

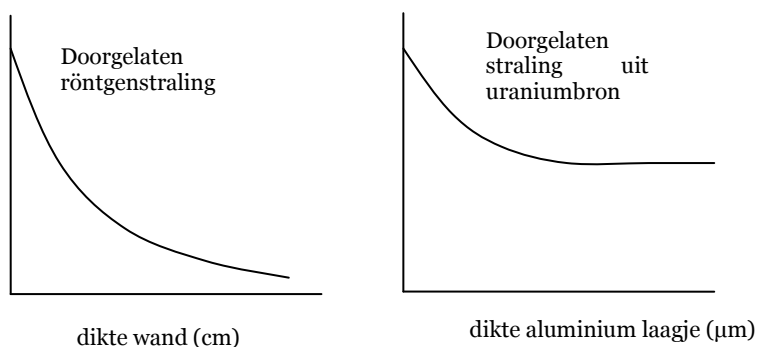
g. Wat zou je zien als er alleen een gammascan zou zijn gemaakt?

Extra - Ontdekking van alfastraling

Het linker plaatje van figuur 2.4 geeft aan hoeveel röntgenstraling een materiaal van bepaalde dikte doorlaat. Een verdubbeling van de dikte van het materiaal halveert de hoeveelheid doorgelaten straling.

Rutherford deed een experiment met de straling uit uranium. Hij deed om uranium steeds dikkere laagjes aluminium. Resultaat: het rechterplaatje.

Wat volgt hieruit over de straling uit die uraniumbron? (Let op de eenheden langs de horizontale as!)



Figuur 2.4

Radioactiviteit of **radioactief verval** is het proces waarbij instabiele atoomkernen energie verliezen in de vorm van deeltjes of elektromagnetische straling. Deze straling noemen we **ioniserende straling**.

In de nucleaire diagnostiek gebruikt men radioactiviteit, onder andere, om tumoren (kankergezwellen) op te sporen. Met röntgenstraling is dit moeilijk te zien omdat de absorptie in de tumor gelijk is aan het omringende bot.

In de nucleaire diagnostiek krijgt een patiënt een kleine hoeveelheid radioactieve stof toegediend. Die stof zendt gammastraling (zeer energierijke straling) uit die gedetecteerd wordt, zodat duidelijk wordt waar die stof terecht gekomen is.

Tumoren zijn zeer actieve en snel groeiende weefsels en nemen daardoor sneller nieuw toegediende stoffen op dan gewoon weefsel. De meeste toegediende radioactieve stof komt dus in tumoren terecht en de straling komt dus vooral uit die tumoren. Met een zogenaamde gammacamera brengt men die tumoren in beeld.

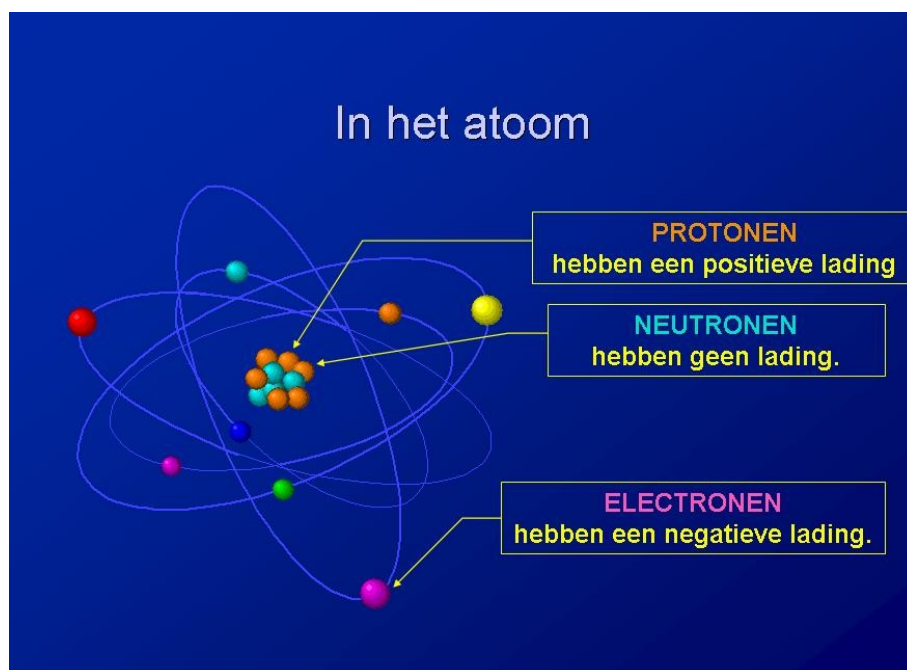
Radioactiviteit wordt ook gebruikt om tumoren te bestrijden (radiotherapie). Men injecteert in de tumor een hoeveelheid radioactieve stof zodat de straling de tumor kan vernietigen. Hier wordt verder niet op ingegaan.

Om de nucleaire diagnostiek te begrijpen is kennis over de bouw van het atoom en over radioactiviteit onmisbaar.

2.1

Bouw van atoomkern; isotopen

In figuur 2.5 zie je een afbeelding van een atoom. Het atoom bestaat uit een **kern** en daaromheen **elektronen**.



Figuur 2.5

De atoomkern bevat twee soorten kerndeeltjes: **protonen** en **neutronen**. Beide deeltjes zijn ongeveer even groot en hebben bijna dezelfde massa.

De massa van een proton of neutron is ruim 1800 keer zo groot als die van een elektron. Praktisch alle massa van het atoom zit dus in de kern; de massa van de elektronen is meestal te verwaarlozen.

Een proton heeft positieve elektrische lading (evenveel als die van een elektron, maar die is negatief) en een neutron is elektrisch neutraal. Een atoom bevat evenveel elektronen buiten de kern als er protonen in de kern zijn en is dus elektrisch neutraal.

Het aantal protonen in de atoomkern bepaalt de atoomsoort. In het periodiek systeem staan de atoomsoorten geordend naar het aantal protonen. Zo heeft waterstofkern één proton, een heliumkern twee, een koolstofkern zes en de grootste stabiele atoomkern, die van uranium, 92 protonen.

Men geeft bij een atoomkern met twee getallen aan hoe de kern is samengesteld. Het ene getal, het **atoomnummer Z**, geeft aan hoeveel protonen de kern bevat.

Het andere getal, *A*, is het **massagetal**. Dat geeft het totaal aantal kerndeeltjes (protonen en neutronen) in de kern aan.

Voorbeeld

Als voorbeeld de kern van kobalt: $^{59}_{27}\text{Co}$

Het getal bovenaan is het massagetal. De kobaltkern bevat dus 59 kerndeeltjes. Onderaan staat het atoomnummer: kobalt heeft 27 protonen. Deze kobaltkern bevat dus $59 - 27 = 32$ neutronen.

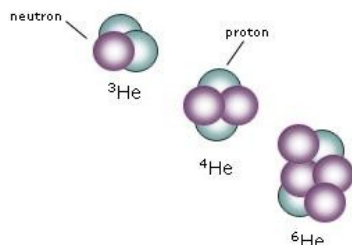
De stikstofkern $^{14}_7\text{N}$ bevat dus 7 protonen en 7 neutronen.

De zuurstofkern $^{16}_8\text{O}$ heeft 8 protonen en 8 neutronen

Het aantal neutronen wordt aangegeven met de letter N . Er geldt dus:

$$A = N + Z$$

Opmerking: De letters A en N worden ook gebruikt voor de activiteit van een bron en het aantal instabiele kernen in de bron. Verwarrend!



Figuur 2.6

Bij kleine atoomkernen is het aantal neutronen in de kern ongeveer even groot als het aantal protonen. Bij grotere kernen komen er steeds meer neutronen ten opzichte van het aantal protonen. Zo heeft het loodatoom $^{208}_{82}\text{Pb}$ 82 protonen en 126 neutronen.

Er bestaan drie soorten heliumkernen. Dat moet aan het aantal neutronen liggen, want een heliumkern (atoomnummer 2) heeft altijd twee protonen. In figuur 2.6 staan die soorten heliumkernen afgebeeld. Alle drie hebben dus twee protonen in de kern. Een kern ^3_2He heeft één neutron, ^4_2He (de meest voorkomende heliumkern) heeft er twee en ^6_2He heeft vier neutronen.

Definitie

Isotopen: atomen met hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen.

Helium heeft dus drie isotopen. Er zijn ook drie waterstofisotopen: ^1_1H (gewoon waterstof), ^2_1H (zwaar waterstof of deuterium) en het radioactieve ^3_1H (tritium). De laatste kern bestaat uit één proton en twee neutronen.

Van de uraniumisotopen $^{238}_{92}\text{U}$ en $^{235}_{92}\text{U}$ is de eerste splijtbaar en daardoor bruikbaar in een kernreactor. De tweede is de meest in de natuur voorkomende uraniumisotoop en is niet splijtbaar.

Isotopen hebben hetzelfde atoomnummer. Daarom hanteert men vaak een kortere schrijfwijze waarin alleen het massagetal aangegeven wordt. De hiervoor besproken eerste uraniumisotoop schrijf je dan als U-238.

Isotopen hebben een even groot aantal elektronen en daardoor dezelfde chemische eigenschappen. Helium is een edelgas, ongeacht de isotopenamenstelling. Edelgassen gaan geen reactie aan met andere elementen, dus in welke isotopencompositie je helium ook aantreft, zal het geen verbinding aangaan met andere elementen. Isotopen hebben wel verschillende atoommassa en dus verschillende eigenschappen, als deze eigenschappen van de massa afhangen.

Extra

De naam isotopen geeft aan dat zij op dezelfde plaats in het periodiek systeem staan (isos = gelijk, topos = plaats).

Tekstvragen

- Welke deeltjes zijn er in een atoom?
- Wat wordt bepaald door het atoomnummer?
- Wat wordt bepaald door het massagetal?
- Wat zijn isotopen?

Het optreden van isotopie is eerder regel dan uitzondering: verreweg het grootste deel van de elementen komt voor in de vorm van verschillende isotopen.

2.2 Radioactiviteit

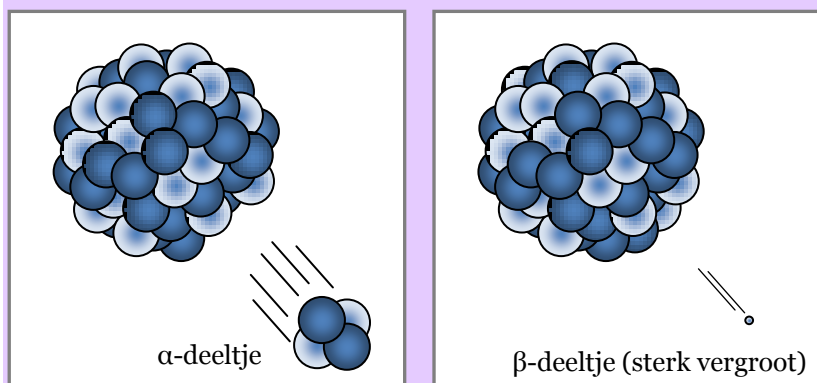
Veel atoomkernen zijn niet stabiel: de kern zit niet stevig genoeg in elkaar om alle deeltjes bij elkaar te houden. In dat geval is de kern **radioactief**, want deze zendt straling uit: **kernstraling**. De bekendste soorten straling zijn **alfa-** (α), **bèta-** (β) en **gamma** (γ) **straling**.

Als de drie soorten kernstraling tussen twee tegengesteld geladen platen gaan, buigt alfastraling naar de negatieve plaat af, bètastraling naar de positieve plaat en gammastraling gaat rechtdoor (zie figuur 2.8).

Daaruit volgt dat alfastraling uit positief geladen deeltjes bestaat, bètastraling uit negatieve deeltjes en gammastraling ongeladen is.

Oriëntatieopgave - Vervalreacties

Een instabiele atoomkern kan op verschillende manieren vervallen. De meest voorkomende vervalreacties zijn **alfaverval** en **bètaverval**. Andere vervalreacties zijn K-vangst en bèta-plus-verval (vallen buiten de leerstof).



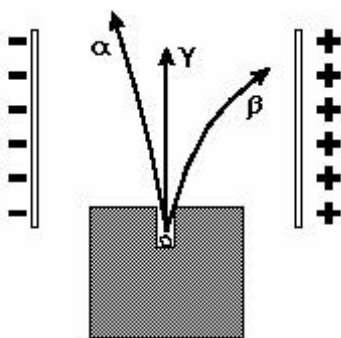
Figuur 2.7 Bij alfaverval en bètaverval komt een stralingsdeeltje uit de kern.

Bekijk BINAS tabel 25. Van een groot aantal isotopen is aangegeven op welke manier zij vervallen.

- Uit welke deeltjes is een alfadeeltje opgebouwd?
- Alfaverval komt voornamelijk bij zeer grote atoomkernen voor. Kun je uitleggen waardoor het bij grote atoomkernen kennelijk gemakkelijker is om een alfadeeltje af te stoten?
- Hoe veranderen het atoomnummer en het massagetal bij alfaverval?

Bij bètaverval komt er een elektron uit de kern. Dat is vreemd, want er zitten immers geen elektronen in de kern. Om een elektron uit te kunnen zenden moet er eerst een andere reactie plaatsvinden in de kern.

- Welke reactie vindt eerst in de kern plaats bij bètaverval?
- Hoe veranderen het atoomnummer en het massagetal bij bètaverval?



Figuur 2.8

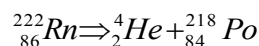
Alfastraling

In het begin van de 20e eeuw werd ontdekt dat alfadeeltjes **heliumkernen** zijn. Een alfadeeltje bevat twee protonen en twee neutronen:

$$\alpha = {}^4_2\text{He} \text{ kern}$$

Als een alfadeeltje met grote snelheid uit de atoomkern gestoten wordt, vervalt de niet-stabiele atoomkern tot een andere, kleinere kern. Zo is bijvoorbeeld in de lucht een geringe hoeveelheid radioactief radon-222 aanwezig dat bij verval een alfadeeltje uitzendt. Een radonkern bevat 86 protonen en 222 kerndeeltjes. Na uitzending van het alfadeeltje heeft de gevormde kern 84 protonen en 218. Die kern moet (Binas tabel 25) polonium-218 (Po-218) zijn.

Je noteert deze vervalreactie van ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ als volgt:



Je ziet dat je bij **kernreacties** een andere atoomsoort krijgt: radium wordt omgezet in polonium.

Bij kernreacties is de som van de massagetallen links en rechts van de pijl gelijk (er verdwijnen geen kerndeeltjes en ze komen ook niet uit het niets tevoorschijn). We geven dit weer in de vorm van een **kernreactievergelijking**, zoals hierboven. In een dergelijke vergelijking staat welke atoomkernen verdwijnen, welke ontstaan en welk(e) stralingsdeeltje(s) daarbij uitgezonden of geabsorbeerd worden.

Ook moet de som van de atoomnummers links en rechts gelijk blijven (ook elektrische lading verdwijnt niet en komt ook niet uit het niets tevoorschijn).

Alfastraling heeft door de sterke positieve lading een groot **ioniserend vermogen**. Dat wil zeggen dat de heliumkernen gemakkelijk van atomen een elektron wegstoten, zodat die atomen positieve ionen vormen. Door die ioniserende werking is de straling op te sporen en te meten. In het menselijk lichaam kan deze straling allerlei moleculen beschadigen en dat kan tot stralingsziektes leiden.

Daarentegen is het doordringend vermogen van alfadeeltjes erg klein. Een blaadje papier is al genoeg om praktisch alle alfastraling tegen te houden.

Voor nucleaire diagnostiek is alfastraling ongeschikt: de straling is buiten het lichaam niet waar te nemen en is door de grote ioniserende werking schadelijk voor de patiënt.

Bètastraling

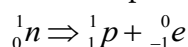
Bètastraling bestaat uit zeer snelle elektronen:

$$\beta^- = {}^0_{-1}e = \text{elektron}$$

Het elektron krijgt die -1 vanwege de negatieve elektrische lading. Het massagetal van het elektron is 0.

Het lijkt logisch dat dit elektron uit de elektronenwolk komt, maar dat is niet zo. Het elektron is een product van een kernreactie. In een atoomkern met naar verhouding veel neutronen gaat een neutron namelijk over in een elektron en een proton. De kern wordt daardoor stabiel.

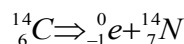
In die kern vindt dus de volgende reactie plaats:



Het neutron heeft lading 0 en massagetal 1, het proton is met 1_1p aangeduid, maar dat mag ook 1_1H zijn.

Voorbeeld - Bètaverval van koolstof-14

Koolstof-14 heeft te veel neutronen om stabiel te kunnen zijn. (koolstof-12 komt het meest voor en is stabiel). Het instabiele koolstof-14 gaat over in een stabiele stikstofkern dat een proton meer en een neutron minder heeft dan de kern van koolstof-14:



Het doordringend vermogen van bètastraling is groter, bètastraling dringt enige centimeters in ons lichaam door.

De elektronen waaruit bètastraling bestaat hebben een kleinere lading dan alfadeeltjes. Ook zijn ze veel lichter en bewegen ze met grotere snelheid. Als ze een molecuul passeren hebben ze minder kans dat molecuul te ioniseren, omdat ze er snel voorbij zijn. Door de kleinere lading en de grotere snelheid heeft bètastraling een kleiner ioniserend vermogen dan alfastraling en is dus minder gevaarlijk.

Voor nucleaire geneeskunde is ook bètastraling ongeschikt. De schadelijke werking is te groot en het doordringend vermogen te klein.

Gammastraling

Gammastraling is ongeladen en bestaat uit fotonen ('energiepakketjes'). Massagetal en lading van het foton zijn beide 0. Men schrijft gewoon γ , zonder nullen.

$$\gamma = {}^0_0\gamma = \text{foton}$$

De energie van deze fotonen is zeer groot, meestal groter dan die van röntgenstraling. Gammafotonen ontstaan als een atoomkern van een hogere energietoestand terugvalt naar de grondtoestand.

Vaak verkeert de atoomkern na een vervalreactie in een hogere energietoestand. Bij terugvallen naar een lagere, dus stabielere toestand (de grondtoestand), wordt een gammafoton uitgezonden.

Vergelijk dit proces met het uitrekken van een elastiekje. Het uitgerekte elastiekje heeft een hogere energie en als je het loslaat, neemt het elastiekje weer zijn oorspronkelijke vorm (= lagere energietoestand) in. Er komt ook energie vrij: een minimale hoeveelheid warmte.

Extra

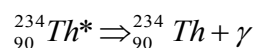
Merk op dat gammastraling uit de atoomkern komt, röntgenstraling is afkomstig uit de elektronenwolk. De energie van gammafotonen is hoger dan die van röntgenstraling.

Voorbeeld - Verval van uranium-238

In Binas tabel 25 staat dat uranium-238 alfa- en gammastraling uitzendt. Eerste stap: de uraniumisotoop zendt het alfadeeltje uit, er ontstaat een thoriumkern in aangeslagen toestand (aangegeven door *):



Tweede stap: Die thoriumkern valt na korte tijd naar de grondtoestand onder uitzending van een gammafoton:



Gammastraling heeft een groot doordringend vermogen, maar het ioniserend vermogen en dus de schadelijke werking op het lichaam is klein. Dit maakt gammastraling geschikt voor nucleaire diagnostiek.

Tekstvragen

- Wat is het verschil tussen alfa-, bèta- en gammastraling?
- Geef de vervalreactie van Kobalt-60
- Geef de vervalreactie van ^{137}Cs .

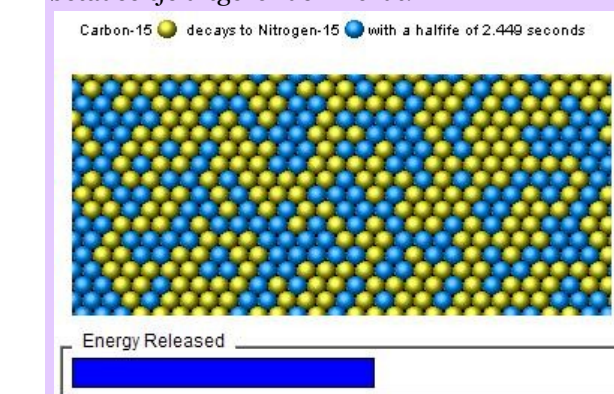
	alfa	bèta	gamma
Deeltje	Heliumkern (^4_2He), sterk positief geladen	Elektron met hoge energie	Foton (elektromagnetische straling) met hoge energie. Gammastraling lijkt veel op röntgenstraling.
Eigenschappen	Heeft sterk ioniserende werking en kan veel schade in het lichaam aanrichten. Doordringend vermogen is zeer klein (in het lichaam minder dan één mm)	Heeft minder lading en dus ook minder ioniserende werking. Gering doordringend vermogen (in het lichaam enige centimeters)	Zeer geringe ioniserende werking, maar een groot doordringend vermogen. Het menselijk lichaam is voor gammastraling vrijwel doorzichtig.
Ontstaan	Grote atoomkernen zenden vaak deze straling uit Bijvoorbeeld: $^{226}\text{Ra} \Rightarrow ^{222}\text{Rn} + ^4\text{He}$	Als er te veel neutronen in de kern zijn, gaat een neutron over in een proton onder uitzending van een elektron	De ontstane atoomkern na de reactie is in een hogere energietoestand gekomen. Als de kern terugvalt naar zijn grondtoestand, wordt een gammafoton uitgezonden
Bruikbaarheid in nucleaire geneeskunde	Schadelijk voor het lichaam en ook door gering doordringend vermogen niet bruikbaar	Door gering doordringend vermogen niet bruikbaar (ook enigszins schadelijk)	Zeer bruikbaar door groot doordringend vermogen, richt in het lichaam weinig schade aan

2.3

Halveringstijd

Oriëntatieopgave – Applet ‘Halflife’

In een radioactieve stof vervalt een instabiele naar een ander soort kern waarbij een stralingsdeeltje uitgezonden wordt. De afbeelding komt van een applet uit het project [Physics 2000](#) van de Colorado University (zoek op ‘Halflife’ en ‘Colorado’). Koolstof-15 vervalt naar stikstof-15 waarbij een bètadeeltje uitgezonden wordt.



Figuur 2.9 Applet die het verval van koolstof-15 tot stikstof-15 weergeeft.

- Hoe kun je aan de applet zien dat het vervallen van een atoomkern een toevalsproces is?

In de applet wordt ook aangegeven hoeveel energie er per seconde wordt uitgezonden. Daarmee wordt de energie van de bètastraling bedoeld.

- b. Leg uit dat de energie die per seconde wordt uitgezonden evenredig is met de activiteit A van de bron.
- c. Leg uit dat de activiteit A van de bron gelijk is aan het aantal atomen koolstof-15 dat per seconde ‘verdwijnt’.

In de loop van de tijd neemt zowel het aantal instabiele kernen koolstof-15 als de uitgezonden energie af.

- d. Leg uit dat de activiteit A dezelfde halveringstijd moet hebben als het aantal overgebleven instabiele kernen N .

In de formules $A=A_0 \cdot 0,5^n$ en $N=N_0 \cdot 0,5^n$ is n het aantal halveringstijden.

- e. Leg uit hoe je n kunt berekenen uit de verstreken tijd t en de halveringstijd $t_{1/2}$. Schrijf het antwoord als een formule.
- f. In de applet zijn ongeveer 500 atomen zichtbaar. Hoe lang duurt het tot er nog maar 5 atomen koolstof-15 over zijn? Controleer je antwoord (indien mogelijk) met de applet.
- g. Bij het verval van een stof met een grotere halveringstijd (zoals Beryllium-11 met een halveringstijd van 13,81 s) is de per seconde uitgezonden energie veel lager. Hoe zou dat komen?

Extra

Henri Becquerel (1852-1908) is de ontdekker van de radioactiviteit. Hij ontdekte bij toeval dat uraniumzouten in een donkere kast fotografisch materiaal konden belichten.

Hoe lang een radioactieve stof na toediening in je lichaam blijft, wordt door twee factoren bepaald: de snelheid waarmee de stof op natuurlijke wijze het lichaam verlaat en de snelheid waarmee de stof verval.

Bij relatief stabiele kernen is de kans op een vervalreactie klein. De stof verval langzaam en vertoont weinig radioactiviteit.

Een stof met zeer onstabiele kernen verval daarentegen in hoog tempo en vertoont grote radioactiviteit, vooral in het begin.

Een maat voor de snelheid waarmee een radioactieve stof verval is de halveringstijd (vroeger: halfwaardetijd).

Definitie:

Halveringstijd is de tijd waarin de helft van het oorspronkelijk aantal atoomkernen verval.

Het aantal vervalreacties per seconde wordt de activiteit genoemd.

Definitie:

De **activiteit** van een hoeveelheid radioactieve stof is het aantal vervalreacties per seconde.

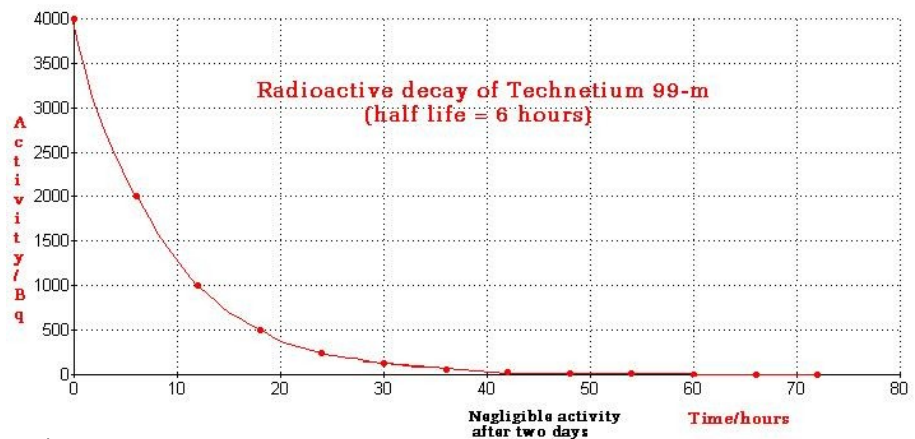
De eenheid van activiteit is dus: ‘per seconde’ = $1/s = s^{-1}$. Die eenheid van activiteit noem je de **becquerel** (Bq).

Als de halveringstijd groot is, gaat het verval van de atoomkernen langzaam; de activiteit van de stof is dan klein. Zo is de halveringstijd van U-238 ongeveer 4,5 miljard jaar. Sinds het ontstaan van de aarde is er ongeveer één halveringstijd verstreken, is dus de helft van het oorspronkelijk aanwezige uranium over.

Neptunium (Np-237) heeft een halveringstijd van ‘slechts’ 2,1 miljoen jaar. Die stof komt in de natuur niet aantoonbaar voor. Als het er ooit geweest is, is het sinds het ontstaan van de aarde volledig vervallen.

In de nucleaire diagnostiek wordt vaak technetium (Tc-99m) gebruikt. Het zendt vrijwel uitsluitend gammastraling uit en heeft een halveringstijd van 6,0 uur. Andere term voor deze methode: SPECT (Single Photon Emission Tomography).

In figuur 2.10 is de activiteit van Tc-99m uitgezet tegen de tijd.



Figuur 2.10

Na elke 6 uur is de activiteit gehalveerd: op $t = 0$ was de activiteit 4000 Bq, op $t = 6$ h is die 2000 Bq en op $t = 12$ h is die 1000 Bq enz.

Na 2 etmalen = 8 halveringstijden is de activiteit $(1/2)^8 = 1/256^e$ deel van wat het in het begin was. Dus is na twee dagen het technetium zo goed als geheel uitgewerkt.

Activiteit in de tijd

Je kunt het verloop van de activiteit ook uitrekenen met de volgende formule. Op tijdstip t geldt:

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

(t en $t_{1/2}$ in gelijke eenheden).

Symbolen: A is de activiteit op een tijdstip t ,
 A_0 is de beginactiviteit op tijdstip $t=0$.

Geldigheid: deze vergelijking is geldig als de stof slechts één radioactief isotoop bevat.

Een dergelijke formule geldt ook voor het aantal radioactieve atoomkernen N . Vervang A in de bovenstaande vergelijking dus door N . Op tijdstip t geldt:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

t en $t_{1/2}$ in gelijke eenheden.

Symbolen: N is het aantal atoomkernen op een tijdstip t en N_0 is het aantal atoomkernen in het begin op tijdstip $t = 0$.

Geldigheid: Alleen als de stof slechts één radioactief isotoop bevat.

De activiteit A is gedefinieerd als het aantal atoomkernen dat per seconde vervalst. Op elk tijdstip geldt dan ook:

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Het minteken ontstaat doordat N afneemt. De helling van de grafiek en de afgeleide zijn dan negatief, maar A moet positief zijn.

Tekstvragen

- Wat is activiteit?
- Wat is de eenheid van activiteit?
- Wat is halveringstijd?
- Welke isotoop is stabiel, die met een grote of die met een kleine halveringstijd?

Rekenvoorbeeld

Opgave

De radioactieve isotoop Ac-225 heeft een halveringstijd van 10 dagen.

In het begin is de activiteit $1,20 \cdot 10^4$ Bq

- Bereken de activiteit na 63 dagen.
- Bereken na hoeveel dagen de activiteit is gedaald tot 315 Bq.

Uitwerking

- 63 dagen komt overeen met 6,3 halveringstijden.
Invullen in de formule geeft:

$$A = 1,20 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{6,3} = 152 \text{ Bq}$$

- A is 315 Bq, A_0 is weer $1,20 \cdot 10^4$ Bq, n is onbekend. Je krijgt dan

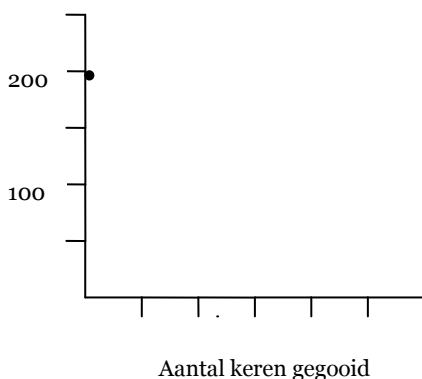
$$A = 1,20 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \text{invullen} \quad 1,20 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n = 315$$

Hieruit n berekenen gaat het snelst met de Grafische Rekenmachine, bijvoorbeeld via Calc → Intersect of met Math → Solver

Intersect: $Y1 = 12000 \times 0.5^X$ en $Y2 = 315$

Solver: $12000 \times 0.5^X - 315 = 0$

Je vindt dan $n = 5,3$, dus 5,3 halveringstijden → $5,3 \times 10$ dagen = 53 dagen



Figuur 2.11

Practicum – Toeval bestaat

- Verzamel in een bak 200 muntjes. Gooi de inhoud over in een lege bak. Haal alle muntjes weg die 'munt' gaven. Zet het aantal overgebleven muntjes in het assenstelsel. Horizontale as: aantal worpen, verticale as: aantal overgebleven munten.
- Herhaal dit op dezelfde manier met de muntjes die 'kop' gaven.
- Ga door tot alle muntjes zijn afgevallen.
- Vul de bak met 200 punaises. Gooi punaises over in een lege bak. Haal alle punaises weg die met de punt omhoog liggen. De punaises die schuin liggen blijven dus over. Zet dit aantal punaises met een sterretje in het diagram.
- Herhaal dit op dezelfde manier met de overgebleven punaises, dus de punaises die de eerste keer schuin met de punt naar beneden zijn gevallen.
- Ga door tot alle punaises op zijn.
- Teken de grafiek die je verwacht als je met 200 dobbelstenen begint, een dobbelsteen valt af als je zes hebt gegoooid.
- Welke overeenkomst zie je tussen deze grafieken en de grafieken voor de intensiteit van de straling die een bron afgeeft?
- Wat heeft de kleinste 'halveringstijd': muntjes, punaises of dobbelstenen?
- Leg uit of je het eens bent met de uitspraak: "Het toeval bepaalt of een kern in een bepaalde periode vervalst".

2.4

Nucleaire diagnostiek in de praktijk

De nucleaire diagnostiek werkt niet met beeld van de diverse organen, maar laat zien hoe deze organen functioneren: hoe actief is de stofwisseling, hoe goed is de doorbloeding, ontstaat er een tumor?

Oriëntatieopgave - De ideale radioactieve bron

Nucleaire diagnostiek is niet zonder risico's. Er wordt immers een radioactieve stof in het lichaam gespoten en dat kan zowel voor de patiënt als voor de arts een extra stralingsbelasting opleveren.

Ziekenhuizen kunnen kiezen uit verschillende radioactieve stoffen. In verreweg de meeste gevallen wordt gekozen voor Technetium-99m. Dat lijkt de ideale bron te zijn voor de nucleaire diagnostiek. Wat maakt Technetium nu zo geschikt?

a. Lees eerst het artikel 'Molybdeen en Technetium'.

Bij de keuze voor de meest geschikte bron wordt gekeken naar:

1. Het type straling dat de bron uitzendt
2. De energie van de stralingsdeeltjes
3. De halveringstijd van de bron
4. De hechting van de stof aan delen van het lichaam
5. Eenvoudige beschikbaarheid in het ziekenhuis
6. Mogelijk radioactieve vervalproducten

b. Leg voor elk van bovenstaande criteria uit waarom Technetium-99m een ideale stof is voor nucleair onderzoek.

Molybdeen komt niet in de natuur voor. Het kernreactorcentrum NRG in Petten is Europa's grootste producent van Technetium-99m.

c. Beschrijf hoe Technetium-99m gemaakt wordt.

Artikel



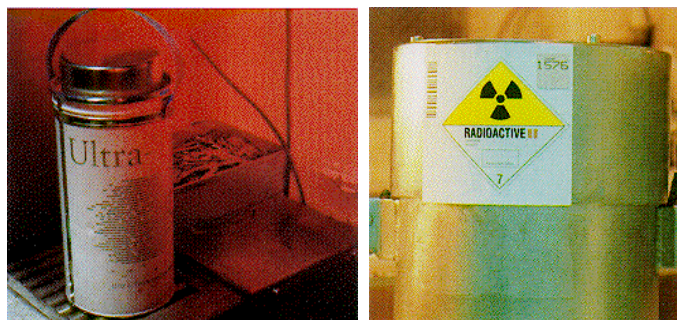
Molybdeen en Technetium (bron: [NRG Petten](#))

Technetium-99m is een radioactieve stof die veel gebruikt wordt voor medisch-nucleair onderzoek (in Europa miljoenen diagnoses per jaar).

Technetium is zo populair omdat die stof precies de goede fysische en chemische eigenschappen bezit. De uitgezonden gammastraling heeft de juiste energie om een goede afbeelding te verkrijgen. De stralingsbelasting van de patiënt is zeer laag. Technetium laat zich gemakkelijk binden aan vele verschillende chemische stoffen zodat het voor uiteenlopende diagnoses bruikbaar is. De halveringstijd is 6 uur, lang genoeg om het medisch onderzoek goed uit te voeren en kort genoeg om de patiënt na het onderzoek niet in het ziekenhuis te hoeven houden.



Figuur 2.12 – Kernreactor in Petten. (bron: NRG)

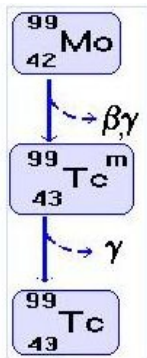


Figuur 2.13 In de afgeschermd fles (foto links) bevindt zich molybdeen-99. Het molybdeen (halveringstijd 66 uur) vervalst naar technetium-99m (halveringstijd 6 uur). Het 'verse' molybdeen-99 in dit buisje (foto rechts) is goed voor de behandeling van zo'n tienduizend patiënten.

Er lijkt maar één nadeel aan technetium te kleven. Hoe krijgt men een stof die na 6 uur al voor de helft verdwenen is iedere dag in elk ziekenhuis? Technetium-99m is het vervalproduct van molybdeen-99 dat zelf een halveringstijd heeft van 66 uur. En die halveringstijd laat transport wel toe, zelfs over grote afstanden.

Molybdeen-99 wordt gevormd bij de splijting van uranium en komt dus voor in 'gebruikte' splijtstof van een kernreactor. Het isoleren van molybdeen uit gebruikte splijtstof is chemisch gezien niet al te lastig, het probleem schuilt in de straling: de splijtingsproducten zijn hoograadioactief.

bron: NRG Petten



Figuur 2.14 - Molybdeen-99 vervalt tot Technetium-99m dat de gewenste gammastraling uitzendt. Het Technetium-99 dat daaruit ontstaat is vrij stabiel, zodat het verval ervan weinig schade veroorzaakt.

Nogmaals: Technetium-99m

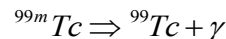
De halveringstijd van de radioactieve stof moet aan bepaalde eisen voldoen. De radioactieve stof moet namelijk eerst worden gemaakt, dan vervoerd naar het ziekenhuis en aan de patiënt toegediend. Na toediening moet de stof zich nog in het lichaam van de patiënt verspreiden.

Bij een te korte halveringstijd is het preparaat al uitgewerkt voordat men aan de beeldvorming kan beginnen.

Bij een te lange halveringstijd is de activiteit laag en moet men de radioactieve stof dus in grotere hoeveelheid toedienen. Dan duurt het langer voordat het is uitgewerkt, de patiënt is langer aan straling blootgesteld en loopt meer schade op.

Tc-99m ontstaat uit het bètaverval van 99-molybdeen. Die 'm' betekent 'metastabiel.' Daarmee wordt bedoeld dat deze isotoop na vorming vrij lang in een hogere ('aangeslagen') energietoestand blijft.

Bij terugval naar de grondtoestand zendt de kern de voor medisch onderzoek bruikbare gammastraling uit:



Het ontstane technetium-99 is zelf ook radioactief, het zendt bètastraling uit. Maar het heeft een zeer lange halveringstijd (ruim 200 000 jaar), zodat de schadelijke activiteit erg klein is.

Extra

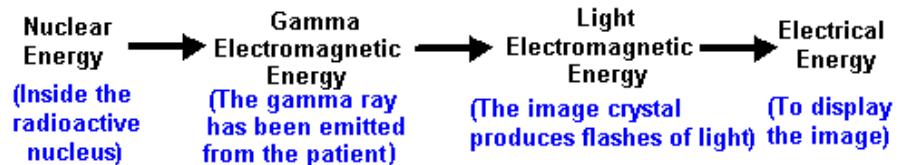
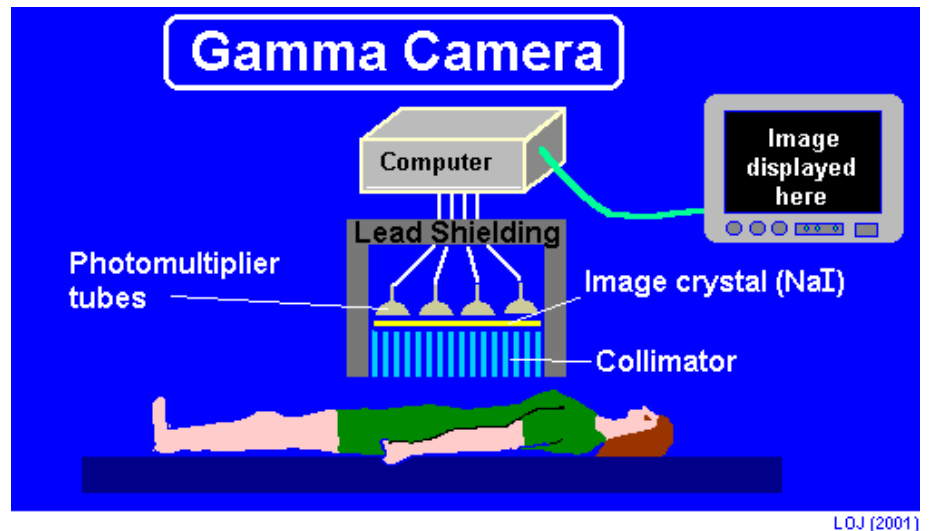
Molybdeen-99 komt niet in de natuur voor. Het is een isotoop die ontstaat bij splijting van uranium-235. De kernreactor in Petten is een van grootste leveranciers van Mo-99.

De voordelen van 99m technetium zijn:

- De productie uit 99-molybdeen is vrij eenvoudig;
- de halveringstijd van 6 uur is ideaal: niet te lang, maar ook niet te kort;
- deze isotoop zendt uitsluitend gammastraling uit; er is dus geen schadelijke bijwerking van bèta- of alfastraling;
- het kan op verschillende manieren toegediend worden en is daardoor bruikbaar voor onderzoek van hersenen, botten, milt, nieren en lever.

De gammacamera

In figuur 2.15 zie je hoe de beeldvorming met de gammacamera werkt. De straling uit de patiënt gaat omhoog. De collimator, een dikke plaat lood waarin verticale gaten geboord zijn, laat alleen fotonen door die verticaal omhooggaan. Daardoor is nauwkeurig te bepalen waar de gammastraling vandaan komt.



Figuur 2.15

Boven de collimator bevindt zich een zeer kostbaar en breekbaar natriumjodidekristal. Dit zet de energie van gammafotonen om in zichtbare lichtflitsen. Dat zichtbare licht wordt versterkt in zogenaamde fotomultiplicatorbuisen en omgezet in elektrische signalen die naar een computer gaan. Deze maakt er op een beeldscherm een beeld van.

Nucleaire farmacie

Voor het onderzoek naar het functioneren van uiteenlopende organen zijn verschillende radio-isotopen nodig. Zo is voor het onderzoek naar de schildklier natriumjodide (NaI) bruikbaar dat de joodisotoop I-123 bevat.

Voor onderzoek naar botten gebruikt men strontium-89 of technetium-99m en voor onderzoek naar rode bloedlichaampjes natriumchromaat met chroom-51 atomen.

Het maken van de radioactieve preparaten is een specialisme: nucleaire farmacie. Nucleaire farmacie verschilt van gewone 'apothekerskunde' doordat men met radioactief materiaal werkt en dus extra moet letten op stralingsbescherming, het voorkómen van radioactieve besmetting en een veilige opslag van radioactief afval.

De halveringstijd van de te gebruiken isotopen is meestal vrij kort, zodat ook nog in een behoorlijk tempo gewerkt moet worden.

Voor- en nadelen

In de nucleaire diagnostiek spoort men allerlei defecten op: tumoren, zwakke plekken in de wanden van bloedvaten, onregelmatige of onvoldoende doorbloeding van weefsels, slecht functioneren van schildklier en longen.

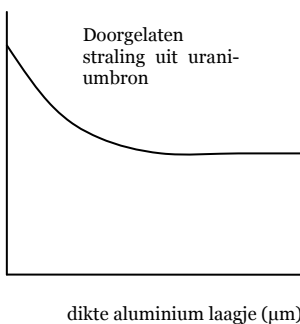
De gammacamera is een kostbaar instrument, vergeleken met andere technieken vallen de kosten van het onderzoek zelf wel mee.

Door de grote activiteit van de radioactieve stof hoeft er maar weinig van worden toegediend en is de stof ook snel uitgewerkt. Na een paar dagen is er geen straling meer aan te tonen.

De stralingsrisico's zijn kleiner dan bij de CT-scan (§5.1). Toch past men deze techniek bij zwangere vrouwen alleen toe als het echt hard nodig is.

Tekstvragen

- Wat is het nadeel van een te korte halveringstijd?
- Wat is het nadeel van een te lange halveringstijd?
- Waardoor is Tc-99m zeer geschikt voor nucleaire diagnostiek?
- Waarvoor dient de collimator bij een gammacamera?



Figuur 2.16

Reflectieopdracht – Wat volgt uit wat?

Hieronder staan uitspraken over radioactiviteit, atoombouw en gebeurtenissen bij proeven. Geef bij elke eigenschap de bijbehorende gebeurtenis(sen). Dat kan dus meer dan één gebeurtenis zijn.

Eigenschappen

- a. Eén bron kan meerdere soorten straling uitzenden.
- b. Er bestaat straling die negatief geladen is, straling die positief is en neutrale straling.
- c. Straling uit radioactieve bronnen ioniseert moleculen in lucht.
- d. Alfastraling heeft een sterkere ioniserende werking dan bètastraling.
- e. De ioniserende werking van gammastraling is zwakker dan die van bètastraling.
- f. De energie van elektromagnetische straling wordt in afgestemde hoeveelheden afgegeven.
- g. De kernen van isotopen zijn niet even zwaar.
- h. De aantallen protonen en elektronen van isotopen zijn gelijk.
- i. Bij alfa en bèta-afval verandert de atoomkern.
- j. In het ziekenhuis gebruikt de afdeling Nucleaire Geneeskunde vooral gammastraling.

Gebeurtenissen/verschijnselen

1. Als je een radioactieve bron bij een geladen voorwerp houdt, verdwijnt de lading van dat voorwerp.
2. Eén stralingssoort buigt naar een positief geladen plaat toe, een andere buigt er van af en een derde soort straling wordt niet afgebogen.
3. Als je een alfa- of bètaradioactief preparaat een tijd laat staan, vind je minder van het element waarmee je begon en je vindt elementen die er eerst niet waren.
4. Isotopen geven dezelfde scheikundige reacties.
5. Als je isotopen in supersnelle centrifuges laat ronddraaien, komen ze op verschillende plaatsen terecht.
6. In lucht komt alfastraling zo'n tien centimeter ver, bètastraling enkele meters en gammastraling honderden meters.
7. Rutherford deed steeds dikkere laagjes aluminium om een uraniumbron en kreeg figuur 2.16 als resultaat.
8. Alfastraling gaat niet door de huid heen, bètastraling kan enige centimeter in het lichaam doordringen.
9. 'Zwaar water' is een stof die chemisch hetzelfde reageert als gewoon water, maar waarvan de dichtheid groter is.
10. Als straling met een bepaalde golflengte een molecuul niet kan ioniseren, dan kan méér van deze straling dat ook niet, maar straling met een kortere golflengte mogelijk wel.

Begrippen

Radioactiviteit
Radioactief verval
Ioniserende straling
Kern
Elektron
Proton
Neutron
Atoomnummer
Massagetal
Isotoop
Kernstraling
Alfastraling
Bètastraling
Gammastraling
Dracht
Heliumkern
Kernreactie
Kernreactievergelijking
Ioniserend vermogen
Halveringstijd
Activiteit
Becquerel (Bq)

Samenvatting

- Een atoom bestaat uit een positief geladen **kern** en negatief geladen **elektronen**.
- De **kern** bestaat uit **protonen** en **neutronen**. De kern bevat bijna alle massa van het atoom.
- Een atoom is niet geladen en heeft daardoor evenveel protonen in de kern als elektronen buiten de kern.
- Het **atoomnummer** Z geeft het aantal protonen in de kern aan en is bepalend voor de atoomsoort.
- Het **massagetal** A geeft het totale aantal kerndeeltjes aan. Het aantal **neutronen** N is $A - Z$. Er geldt ook: $A = N + Z$
- **Isotopen** zijn atomen met hetzelfde aantal protonen, maar een verschillend aantal neutronen.
- **Alfastraling** bestaat uit ${}^4_2\text{He}$ kernen. Deze straling heeft een groot **ioniserend vermogen** en dus schadelijke werking. Het doordringend vermogen is zeer klein.
- **Bètastraling** bestaat uit snelle elektronen. Bètastraling heeft een groter doordringend vermogen en een tamelijk grote ioniserende werking.
- **Gammastraling** bestaat uit fotonen met hoge energie. De ioniserende werking is zeer klein en het doordringend vermogen is zeer groot.
- Alleen bij deeltjesstraling spreken we van **dracht**. Dit is de maximale afstand die de straling in een materiaal aflegt.
- In een **kernreactievergelijking** staat welke atoomkernen verdwijnt, welke ontstaan en welk(e) stralingsdeeltje(s) daarbij uitgezonden of geabsorbeerd worden. Bij een kernreactie zijn links en rechts van de pijl de som van de atoomnummers en de som van de massagetallen gelijk, evenals de som van de ladingen.
- De **activiteit** is het aantal vervalreacties per seconde. De eenheid van activiteit is de **becquerel** (Bq).
- De **halveringstijd** is de tijd waarin de helft van de atoomkernen verval.
- Voor de activiteit A na een tijdverloop t geldt:

$$A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \text{met} \quad n = \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}$$

- Voor het aantal instabiele kernen N na een tijdsverloop t geldt:

$$N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad \text{met} \quad n = \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}$$

- Verband tussen A en N :

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

Opgaven

§ 2.1 Gebruik Binas tabel 25.

12 Het atoom aluminium-27

- Hoeveel protonen zijn er in de kern van een atoom aluminium-27?
- Hoeveel neutronen?
- Hoeveel elektronen zijn er buiten de kern?

13 Symboolnotatie

- Schrijf in symbolen een atoomkern met 28 protonen en 30 neutronen.
- Voor een elektron is de symboolnotatie: ${}_{-1}^0e$. Leg uit waarom men voor het atoomnummer -1 schrijft.
- Geef de symboolnotatie van een neutron, een proton en een alfadeeltje.
- Een positron (een bèta-plus-deeltje) is identiek aan een elektron, alleen de lading is positief. Geef de symboolnotatie van een positron.

14 IJzer (${}^{56}\text{Fe}$)

Een proton en een neutron hebben bijna even grote massa, $1,67 \cdot 10^{-27}$ kg. Een elektron heeft een massa van $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg.

- Bereken met deze gegevens de massa van een atoomkern van ${}^{56}\text{Fe}$.
- Bereken de massa van de elektronen in een atoom ${}^{56}\text{Fe}$.
- Hoeveel keer zo zwaar is de kern als de elektronenwolk?

Een blokje ijzer van 80,0 gram bestaat uitsluitend uit atomen ${}^{56}\text{Fe}$.

- Bereken uit je antwoorden op a en b het aantal atomen in dit blokje.

§ 2.2 Gebruik Binas tabel 25.

15 Radium (${}^{226}\text{Ra}$)

- Welke soort straling zendt het radioactieve radium-226 uit?
- Schrijf de reactievergelijking op.
- Is de ontstane isotoop radioactief?
- Zo ja, geef ook de vergelijking van het verval daarvan.

16 Vervalsreacties

Geef de vergelijking van het verval van de volgende kernen:

- ${}^{99}\text{Mo}$
- ${}^3\text{H}$
- ${}^{210}\text{Po}$

§ 2.3

17 Calcium-47

- Geef de reactievergelijking van het verval van een kern ^{47}Ca .
- Hoe groot is de halveringstijd van ^{47}Ca ?

Een preparaat ^{47}Ca heeft op tijdstip $t = 0$ een activiteit van 1,000 MBq.

- Bereken de activiteit op $t = 24,0$ h.
- Bereken na hoeveel dagen de activiteit is gedaald tot 5,00 kBq.

18 Technetium-99m

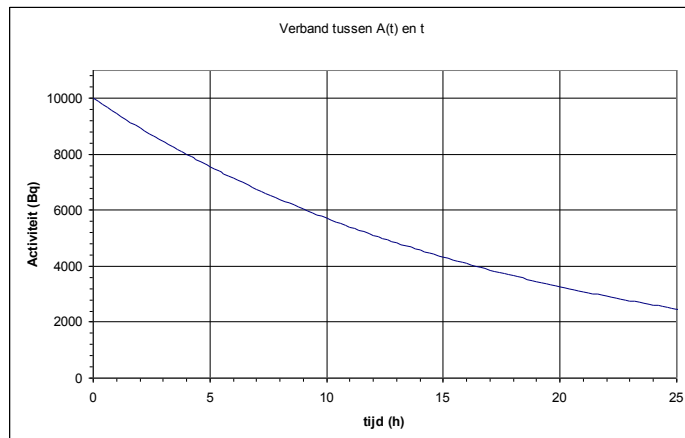
Een hoeveelheid technetium-99m, halveringstijd 6,0 h, heeft 12,0 h na toediening aan een patiënt een activiteit van 2,0 kBq.

- Bereken de activiteit op het moment van de toediening
- Bereken na hoeveel uur na toediening de activiteit gedaald is tot 100 Bq.

19 Halveringstijd

In figuur 2.17 is van een radioactief isotoop het verband tussen de activiteit en de tijd weergegeven.

- Bepaal uit het diagram de halveringstijd.
- Bereken na hoeveel uur de activiteit gedaald is tot 625 Bq.



Figuur 2.17

- Leg uit dat de grafiek van het aantal instabiele kernen als functie van de tijd dezelfde vorm heeft, maar met een ander beginpunt.

Om het aantal instabiele kernen N op $t = 0$ te bepalen kan een schatting gemaakt worden met de volgende gegevens:

- Na één halveringstijd (45.000 s) is de helft van het aantal instabiele kernen vervallen.
 - In deze periode is de gemiddelde activiteit ongeveer 7,0 kBq.
- Bepaal uit deze gegevens het aantal instabiele kernen N op $t = 0$.

Neem aan dat $N_0 = 650$ miljoen, zodat geldt: $N = 6,5 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{45.000}}$.

- e. Gebruik $A = -\frac{dN}{dt}$ om te controleren dat de activiteit op $t = 0$ hierbij 10,0 kBq is.

20 Halveringstijd en activiteit

Men heeft op $t = 0$ evenveel kernen van ^{33}P als van ^{35}S .

- Leg uit welke van de twee de grootste activiteit op tijdstip $t = 0$ heeft.
- Leg uit welke de grootste activiteit zal hebben op tijdstip $t = 300$ dagen.

21 Stralende patiënt

Een patiënt die technetium toegediend heeft gekregen, is zelf een bron van gammastraling en dus een mogelijk gevaar voor zijn omgeving.

Geef een beredeneerde schatting na hoeveel uur de activiteit gedaald is tot 0,10 % van de beginactiviteit.

§ 2.4

22 Gammastraling in de geneeskunde

- Geef twee voordelen van het gebruik van gammastraling in de nucleaire geneeskunde.
- Waarom moet de patiënt tussen toediening van de radioactieve stof en het onderzoek met de gammacamera stil liggen?

23 Reactievergelijkingen

- Geef de vergelijking voor het ontstaan van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ uit ^{99}Mo .
- Geef de vergelijking voor het verval van dit technetiumisotoop.

24 Activiteit en halveringstijd

Hoe de activiteit A_0 op tijdstip $t = 0$ afhangt van het aantal kernen volgt uit:

$$A_0 = \frac{0,693}{t_{\frac{1}{2}}} \cdot N_0$$

Hierin is N_0 het aantal atomen op tijdstip $t = 0$.

t_{half} is de halveringstijd in seconden.

Aan een patiënt wordt $^{99\text{m}}\text{Tc}$ toegediend. Op tijdstip $t = 0$ is het aantal atomen van deze isotoop $5,0 \cdot 10^{11}$.

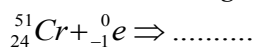
- Bereken de activiteit van $^{99\text{m}}\text{Tc}$ op $t = 0$.

Voor $^{99\text{m}}\text{Tc}$ is de halveringstijd 6,0 uur. Na het verval blijft er ^{99}Tc in het lichaam achter. Een hoeveelheid ^{99}Tc bevat op tijdstip $t = 0$ ook $5,0 \cdot 10^{11}$ atomen.

- Bereken de activiteit van het ^{99}Tc op tijdstip $t = 0$.
- Leg uit of die hoeveelheid ^{99}Tc erg schadelijk voor een patiënt is.

25 Chroom-51

Voor bloedonderzoek wordt chroom-51 gebruikt. Dit radioactieve isotoop vervalst door zogenaamde *K-vangst*. Dat betekent dat het dichtst bij de kern zijnde elektron in de kern verdwijnt, waarbij een proton overgaat in een neutron. De reactievergelijking hiervan:



- a. Welk isotoop komt op de stippellijn te staan?

Doordat bij deze reactie röntgenstraling en gammastraling ontstaat, is chroom-51 geschikt voor nucleaire geneeskunde. Men dient een patiënt een hoeveelheid ${}^{51}\text{Cr}$ toe. Op tijdstip $t = 0$ is de activiteit 50 kBq.

- b. Bereken het aantal atomen ${}^{51}\text{Cr}$ op tijdstip $t=0$. Gebruik de formule uit de vorige opgave.
c. Bereken de massa van deze hoeveelheid ${}^{51}\text{Cr}$ op $t=0$.
d. Bereken het aantal kernen ${}^{51}\text{Cr}$ na 330 dagen.

26 Fluor-18

Voor sommige scans in de nucleaire diagnostiek wordt fluor-18 gebruikt, een positronstraler. Een positron is het zogenaamde antideeltje van een elektron: even grote massa, maar tegengestelde lading.

- a. Hoeveel protonen en hoeveel neutronen bevat een kern ${}^{18}\text{F}$?
b. Geef de reactievergelijking van het verval van ${}^{18}\text{F}$.

De halveringstijd van ${}^{18}\text{F}$ is 110 minuten, dat is vrij lang.

- c. Wat is het voordeel van een vrij lange halveringstijd?
d. Wat is het nadeel?

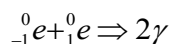
Tussen de 'fabricage' van ${}^{18}\text{F}$ in een kernreactor en het toedienen aan de patiënt verloopt 5,5 uur.

- e. Bereken hoeveel procent van het oorspronkelijke aantal fluorkernen dan nog over is.

27 Energie van de gammafotonen

Een positron is het zogenaamde antideeltje van een elektron: even grote massa, maar tegengestelde lading.

Als een positron en een elektron flink botsen, verdwijnen beide. Dit wordt beschreven met de reactievergelijking:



Volgens Einstein zijn massa en energie gelijkwaardig, weergegeven met de formule $E = mc^2$. Hierin is E de energie in joule, m de verdwijnende massa in kilogram en c de lichtsnelheid in meter per seconde.

- a. Bereken de massa die in de weergegeven reactie verdwijnt.
De energie die volgens Einstein bij deze reactie vrijkomt wordt over beide gammafotonen gelijk verdeeld.
b. Bereken de energie in joule die één gevormd gammafoton op deze manier ontvangt.

3 Ioniserende straling

Hoofdstukvraag	Hoe beschermt men zich tegen ioniserende straling?
----------------	--

Oriëntatieopgave – Wat straalt daar?

Ioniserende straling ontstaat niet alleen in een röntgenapparaat. Schrijf zoveel mogelijk bronnen van ioniserende straling op.

Bij de röntgenfoto en de CT-scan (§5.1) gebruikt men röntgenstraling, in de nucleaire diagnostiek vooral gammastraling.

Het gevaar van röntgenstraling en gammastraling is de ioniserende werking: de straling kan uit atomen elektronen losmaken, waarbij positieve ionen ontstaan. Dit verstoort biochemische processen in het lichaam en geeft beschadigd DNA, afbraak van eiwitten en afbraak van membranen.

Bij radioactieve stoffen worden twee begrippen duidelijk onderscheiden:

- **Blootgesteld worden aan straling:** je lichaam krijgt straling, maar je hebt de radioactieve stof niet aangeraakt. Dat is niet altijd gevaarlijk: een blokje uranium geeft wel alfastraling, maar deze dringt niet door je huid heen. Bèta- en gammastraling kan wel je lichaam binnendringen. Voor een goed begrip kun je deze straling vergelijken met zonnestraling. Als je uit de zon gaat, ben je de zonnestraling kwijt. Maar niet de gevolgen van eerder opgelopen straling!
- **Radioactieve besmetting:** je hebt contact met de radioactieve stof zelf. Dit is veel geniepiger, want je kan er ongemerkt jezelf en je omgeving mee vergiftigen. In je lichaam richt ook een alfastraler grote schade aan. Overigens loop je ook bij het roken een (kleine) radioactieve besmetting op; een kleine hoeveelheid polonium-210 of lood-214 komt uit de tabak in je longen terecht. De alfastraling uit deze stoffen kan in de longen gevaarlijke schade aanrichten en longkanker veroorzaken.
Met een Geiger Müller telbuis is eenvoudige controle op radioactieve besmetting mogelijk. Dit apparaat geeft hoorbare tikken als er straling opgevangen wordt. Meer tikken, meer straling.

In dit hoofdstuk leer je stralingsdoses te berekenen en hoe men patiënt en ziekenhuispersoneel tegen te veel straling beschermt.

3.1 Effecten van straling

De schade die straling in het menselijk lichaam schade aanricht hangt af van:

- De hoeveelheid stralingsenergie die het lichaam absorbeert.
- De bestraalde massa: als de energie in een klein deel van het lichaam geconcentreerd is, is de schade ernstiger. Gelijke hoeveelheid straling heeft bij kinderen dus ernstiger gevolgen dan bij volwassenen.

Extra

Louis Harold Gray (1905-1965) Deze Brits natuurkundige onderzocht de effecten van straling op organismen. Een pionier op het gebied van de stralingsbiologie!

- De soort straling: alfastraling heeft een grotere ioniserende werking dan gammastraling en richt daardoor meer schade aan.
- De kwetsbaarheid van het lichaamsdeel. Huid en handen zijn minder gevoelig voor straling dan bijvoorbeeld geslachtsorganen of de longen.

De geabsorbeerde stralingsenergie en de massa bepalen samen het begrip stralingsdosis of kortweg dosis.

Definitie:

Stralingsdosis is de hoeveelheid geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram (eenheid dus joule per kg = J/kg).

Deze eenheid van dosis wordt de **gray** (Gy) genoemd.

Stralingsdosis

$$D = \frac{E}{m} = \frac{\text{geabsorbeerde energie}}{\text{bestraalde massa}}$$

Symbolen: E is de geabsorbeerde energie (in J), m is de bestraalde massa (in kg) en D is de dosis (in Gy).

Geldigheid: Altijd, het is een definitie

Ook de soort straling speelt een rol. Daartoe vermenigvuldig je de geabsorbeerde dosis met de **stralingsweegfactor** van de betreffende straling, die proefondervindelijk bepaald is. Dan krijg je de equivalente dosis.

Voor alfastraling is de weegfactor 20, voor bèta-, gamma- en röntgenstraling straling is de weegfactor 1. Je zag het eerder: alfastraling is het schadelijkst.

Definitie:

Equivalente dosis = geabsorbeerde dosis $\times$ weegfactor van de stralingssoort

De eenheid van equivalente dosis is nog steeds de J/kg, maar wordt nu de **sievert** (Sv) genoemd.

Equivalente dosis

$$H = w_R \cdot D$$

Symbolen: D is de stralingsdosis (in Gy), w_R is de weegfactor van de stralingssoort en H is de equivalente dosis (in Sv). Voor alfastraling is de weegfactor 20, voor bèta-, gamma- en röntgenstraling straling is de weegfactor 1.

Geldigheid: Altijd, het is een definitie

Extra - Effectieve dosis

Bij medische beeldvorming is vaak precies bekend hoeveel straling wordt gebruikt en op welke plek in het lichaam die straling terecht komt. In die situatie kan ook rekening gehouden worden met de gevoeligheid van de verschillende organen. Niet alle organen zijn namelijk even gevoelig voor straling. Als je ook rekening wilt houden met de gevoeligheid van een bepaald orgaan, vermenigvuldig je de equivalente dosis met een tweede weegfactor. Je krijgt dan de effectieve dosis.

Belangrijke weefselweegfactoren staan in het onderstaande lijstje. Als een orgaan gevoeliger is voor straling, is de weegfactor groter. De som van de weefselweegfactoren van alle onderdelen van het lichaam is precies 1.

Het maken van berekeningen met weefselweegfactoren valt buiten de examenstof.

Weefselweegfactor	Organen en weefsels
0,20	Testikels, eierstokken
0,12	Rode beenmerg, dikke darm, longen, maag
0,05	Blaas, borst, lever, slokdarm, schildklier en de volgende weefsels/organen: nieren, bijnieren, hersenen, bovenste deel dikke darm, dunne darm, alvleesklier, milt, thymus, spieren, baarmoeder
0,01	Huid, botoppervlak

Effecten van stralingsdosis op het menselijk lichaam

De tabel hieronder geeft de gevolgen van een bepaalde dosis als deze in korte tijd ontvangen wordt.

Effecten van acute blootstelling over het gehele lichaam	
Dosis	Effect
<0,05 Gy	Geen direct waarneembaar effect
0,15-0,25Gy	Bij enkele mensen veranderingen in de bloedwaarden
0,5 Gy	Vrijwel zeker veranderingen in de bloedwaarden
1,0 Gy	Vaak acuut stralingssyndroom merkbaar (begint met misselijkheid, overgeven, vermoeidheid, geen eetlust)
1,5 Gy	Overgevoelige mensen gaan eraan dood
2 Gy	Ooglenzen begint troebel te worden
3,2-3,6 Gy	De helft gaat dood binnen 30 dagen bij minimale medische verzorging
4 Gy	Permanente steriliteit bij bestraling van de geslachtsorganen
5,0 Gy	Haaruitval
4,8-5,4 Gy	De helft gaat dood binnen 30 dagen bij normale medische verzorging
11 Gy	De helft gaat dood binnen 30 dagen, ook bij intensieve medische verzorging waaronder beenmergtransplantatie
>20 Gy	Vrijwel zeker dood
>50 Gy	Centraal zenuwstelsel (hersenen, spieren) bestuurt lichaamsfuncties als ademen en bloedcirculatie niet meer. Zekere dood binnen enkele uren.

Je ziet in de tabel dat er bij röntgen- en gammastraling onder 0,05 Gy (= 0,05 Sv = 50 mSv) geen direct waarneembaar effect is. Dit betekent niet dat een lage dosis straling ongevaarlijk is. Er bestaat altijd een zeer kleine kans op genetische veranderingen en kanker door straling.

Er gelden strenge regels voor de hoeveelheid toelaatbare straling op de werkvloer en in de leefomgeving. Voor mensen die niet beroepsmatig werken met ioniserende straling is de dosislimiet 1 mSv per jaar. Voor 'beroeps' is dat ongeveer 10 keer zo veel.

In Binas tabel 27G staat meer informatie over de dosislimieten.

Hoe risicovol is medische diagnostiek?

Bij medisch onderzoek is er geen limiet voor de patiënt. Dat lijkt op het eerste gezicht misschien vreemd, maar dat is het niet. Het is aan de behandelende medicus om, in samenspraak met de patiënt, tot een bepaalde behandeling te besluiten. Uiteraard een enorme verantwoordelijkheid! Je spreekt hier over het ALARA-principe (As Low As Reasonably Achievable).

De volgende gegevens geven een idee van de stralingsbelasting:

- Röntgenfoto van het gebit: 0,01 mSv
- Röntgenfoto van de longen: 0,1 mSv
- Nucleaire geneeskunde: gemiddeld 5 mSv
- CT-scan: 10 - 15 mSv

Het is zinnig deze waarden te vergelijken met andere risico's. De volgende tabel (gebaseerd op Amerikaans onderzoek) geeft het gemiddelde verlies van levensduurverwachting bij de vermelde situatie.

Risicofactor	Gemiddeld verlies van levensduurverwachting
20 sigaretten per dag	6 j
15% overgewicht	2 j
Gemiddeld alcoholgebruik (US)	1 j
Ongelukken (voertuigen, thuis, verdrinking)	1 j
Beroepsblootstelling straling: 10 mSv/j tijdens 18-65 jaar	51 d
Natuurrampen	7 d
Medische bestralingen	6 d

3.2 Stralingsbescherming

Volledige bescherming tegen straling is niet mogelijk. Er is altijd straling, afkomstig uit het heelal (kosmische straling) en van allerlei radioactieve stoffen. Deze bevinden zich in geringe hoeveelheid in de grond, in de atmosfeer, in bouwmaterialen en... in je lichaam. Deze onvermijdelijke straling noem je **achtergrondstraling**.

In Nederland is de jaarlijkse achtergrondstraling zo'n 2,5 mSv. Die waarde varieert per plaats enorm: in New York is zij 1,4 mSv per jaar, in Poco de Caldas (Brazilië) maar liefst 70 mSv per jaar.

Je lichaam is ook een beetje radioactief, vooral door kalium-40 en koolstof-14.

Beveiliging tegen straling kan op drie manieren:

- Beperk de tijd dat je aan straling blootgesteld wordt. Zorg bij het werken met ioniserende straling voor efficiënte voorbereiding en planning van het werk. Stel je niet onnodig bloot aan straling
- Houd de stralingsbron zo ver mogelijk op afstand. Belangrijk, want twee keer zo grote afstand betekent vier keer zo lage intensiteit.
- Scherm je af van de stralingsbron, bijvoorbeeld door een laagje lood of een betonnen muurtje.

Op de radiologische afdelingen worden patiënten en personeel zo goed mogelijk tegen straling beschermd. Radiologisch personeel beschermt zich tegen straling door achter een muur te staan, een loden schort te dragen of de apparatuur vanuit een andere kamer te besturen.

Als je de halveringsdikte (§ 1.2) van een beschermende laag stof en de dikte van de laag weet, kan je uitrekenen hoeveel de intensiteit van de straling afneemt. De volgende formule geldt alleen voor gammastraling en röntgenstraling.

In Binas tabel 28 E staan halveringsdiktes voor diverse materialen.

Je rekent met deze formule net zo als met de halveringstijd (§ 1.3).

De halveringsdikte van röntgenstraling en dus het doordringend vermogen neemt toe met de frequentie. Röntgenstraling met lage frequentie ('zachte' röntgenstraling) wordt door het lichaam sterk geabsorbeerd.

Voor de röntgenfoto en CT-scan is zachte röntgenstraling niet goed: hij leidt tot een hoge stralingsdosis en geeft slechte beeldvorming. Bij veel röntgenapparaten filtert een filter de zachte straling eruit.

Tekstvragen

- Wat is achtergrondstraling?
- Op welke manieren kun je je beschermen tegen straling?
- Wat is halveringsdikte?
- Waarvoor dient een badge?

Bij radiologische werkers meet een **badge** de dosis die in een bepaalde tijd is opgelopen. Hiervan zijn verschillende uitvoeringen.

In de klassieke badge zit een speciale fotofilm, gevoelig voor röntgen- of gammastraling. Bij meer straling op de film wordt deze zwarter. Na enige tijd meet men de zwarting van de fotofilm en berekent daaruit de dosis. Een persoon bij wie de maximaal toelaatbare dosis is bereikt, mag een tijd niet met ioniserende straling werken.

Een andere uitvoering is de TLD-badge (= Thermo-Luminescentie-dosimeter). Deze badges worden om de vier weken naar een speciaal laboratorium gestuurd, waar ze worden uitgelezen. Dit gebeurt door de TLD's te verwarmen (thermo), waarna licht vrijkomt (luminescentie). Die hoeveelheid licht is een maat voor de opgevangen stralingsdosis.

Tegenwoordig maakt men ook veel gebruik van een elektronische dosismeter.

3.3

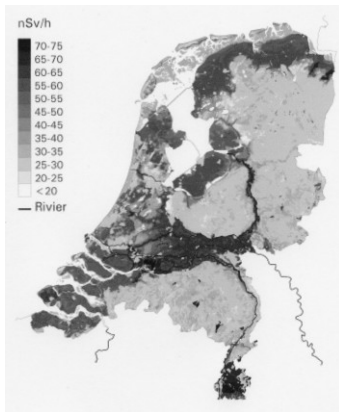
Natuurlijke radioactiviteit

De risico's die toepassing van straling bij de medische diagnostiek opleveren moeten worden afgezet tegen de stralingsbelasting door natuurlijke bronnen.

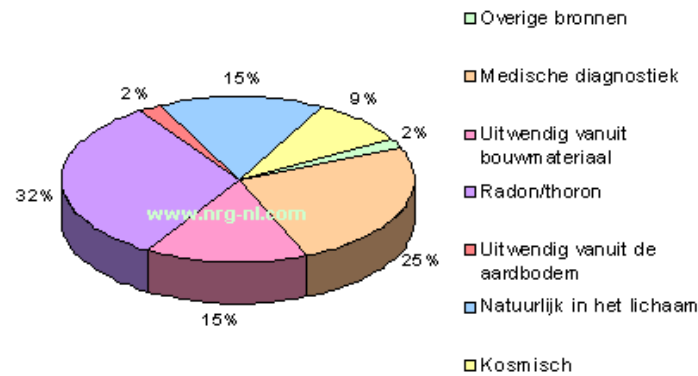
Op het Aardoppervlak staan we bloot aan straling uit diverse bronnen:

- Straling uit de ruimte, de kosmische straling
- Straling uit de bodem, uit radioactieve bestanddelen in de grond
- Straling van radioactieve gassen uit de grond zoals radongas, een natuurlijk radioactief gas (inwendige belasting door inademing)
- Straling uit bouwstoffen, die weer gemaakt zijn van grondstoffen uit de bodem
- Straling van menselijke activiteiten, waarbij medische handelingen een aanzienlijke bijdrage leveren

In de onderstaande grafiek is te zien welke bijdrage elke bron levert aan de gemiddelde jaarlijkse blootstelling van 2,5 mSv.



Figuur 3.1 Natuurlijke radioactiviteit in de bodem (bron: RIVM)



Figuur 3.2: Verdeling van de dosisbelasting vanuit diverse bronnen. In Nederland is de gemiddelde blootstelling circa 2,5 milliSievert per jaar.

Oriëntatieopgave – Waar komt de straling vandaan?

De blootstelling aan natuurlijke straling varieert over het Aardoppervlak. In Nederland is zowel de straling uit de bodem als de straling uit de lucht (vooral Radongas) lager dan in andere landen.

- a. In figuur 3.1 is te zien dat de natuurlijke radioactiviteit in de bodem in Nederland niet overal even hoog is. Wat is de oorzaak van de verhoogde radioactiviteit in sommige delen van Nederland?

De concentratie Radongas in de lucht is in Nederland relatief laag. Alle instabiele isotopen van Radon hebben een korte halveringstijd.

- b. Zoek uit hoe Radon in de lucht ontstaat (lees de tekst over radongas) en verklaar daarmee waardoor de concentratie in Nederland vrij laag is.
- c. Radon is een edelgas dat met geen enkele andere stof reageert. Toch levert het inademen van hoge concentraties Radon een behoorlijk risico op. Leg uit waardoor dit veroorzaakt wordt.

In de lucht is in geringe concentraties koolstof-14 aanwezig, met een halveringstijd van 5730 jaar. Lees de tekst over C14-datering.

- d. Zoek uit hoe koolstof-14 in de lucht ontstaat.

Koolstof-14 wordt gebruikt om de ouderdom van organisch materiaal zoals botten en plantenresten te bepalen.

- e. Beschrijf hoe koolstof-14 in dit materiaal terecht is gekomen.
- f. Beschrijf hoe de koolstofdateringsmethode werkt.

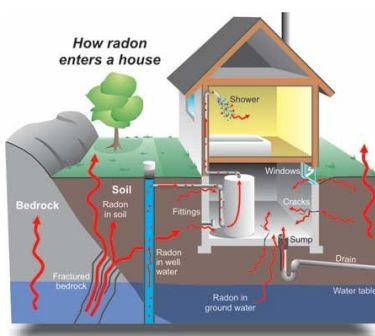


Radongas (bron: [NRG Petten](#))

Radon is het zwaarste edelgas. Radon wordt in de aardkorst voortdurend geproduceerd door het verval van de langlevende isotopen van thorium en uranium die daar van nature voorkomen. Het zit in Nederland bijvoorbeeld in klei- en zandgrond, gesteenten etc. en dus ook in bouw materiaal dat hieruit gemaakt wordt.

In eerste instantie hoopt het gas zich op in grondwater om uiteindelijk in de atmosfeer terecht te komen. Daardoor komt radon in lage concentraties in de lucht voor. Radon komt voor in drinkwater, grondwater kan een hoge concentratie radon bevatten. Als grondwater aan de oppervlakte komt, wordt het radon snel in de lucht losgelaten.

Het inademen van Radon brengt geen risico's met zich mee. Het gas wordt direct weer uitgeademd. Radon is echter radioactief; het valt uiteen in andere (radioactieve) stoffen. Die stoffen hechten zich aan rondzwevende stofdeeltjes, die weer worden ingeademd. Als deze stofdeeltjes zich op longweefsel vastzetten, kan dit weefsel door de afgegeven straling worden beschadigd. Op deze manier kan op den duur longkanker ontstaan.



Figuur 3.3 Radongas komt uit gesteente en grondwater in de woning. Bron: Natural Resources Canada

Volgens de Gezondheidsraad leidt blootstelling aan radon binnenshuis in Nederland tot naar schatting 800 extra gevallen van longkanker. In woningen (en vooral kruipruimtes) kan radon zich in de lucht ophopen, waardoor de concentratie hier hoger is dan buiten. Door goede ventilatie daalt de radonconcentratie.

Nederland heeft in Europa de laagste radonconcentratie in woningen: 23 Bq/m³. Bouwmaterialen vormen de belangrijkste bron van straling in de woning (70 procent), de overige 15 procent komt uit de buitenlucht. De radonconcentratie in huis hangt af van zeer veel factoren zoals bodemsoort, bouwmaterialen, bewonersgedrag, aard van de woning en wijze van ventileren.

C14-datering (bron: [Wikipedia](#))



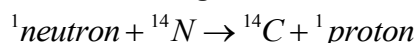
Figuur 3.4 De ijsmummie Ötzi werd in 1991 in de Tirolse Alpen gevonden. De ouderdom werd bepaald met C14-datering. Bron: www.pbs.org

C14-datering is een methode om de ouderdom van organisch materiaal te bepalen. Koolstof-14 is een isotoop van koolstof die in onze atmosfeer uit stikstofkernen gevormd wordt. De methode is bruikbaar voor materialen tot circa 60.000 jaar oud.

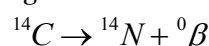
Planten nemen deze licht radioactieve vorm van koolstof op. Hierdoor krijgen dieren die van die planten leven de isotoop binnen, en vervolgens weer dieren die van dieren leven, enzovoort. Alle levende wezens hebben in hun lichaam dus nagenoeg dezelfde verhouding tussen koolstof-14 en koolstof-12.

Koolstof-14 heeft een halveringstijd van 5730 jaar, ongeacht wat er chemisch met het materiaal gebeurt. Het zou al lang van de aarde verdwenen zijn als er niet een continue aanvoer van nieuwe C14-atomen is als gevolg van de kosmische straling die stikstof uit de atmosfeer omzet in de koolstofisotoop.

De kosmische straling zorgt voor het ontstaan van neutronen in de atmosfeer. Deze neutronen spelen een rol in de reactie waarbij een van de stikstofatomen uit het stikstofmolecuul (N₂) gestoten wordt:



Zodra een organisme sterft houdt de uitwisseling van koolstofbevattende verbindingen op, en neemt het gehalte aan C-14 dus af.



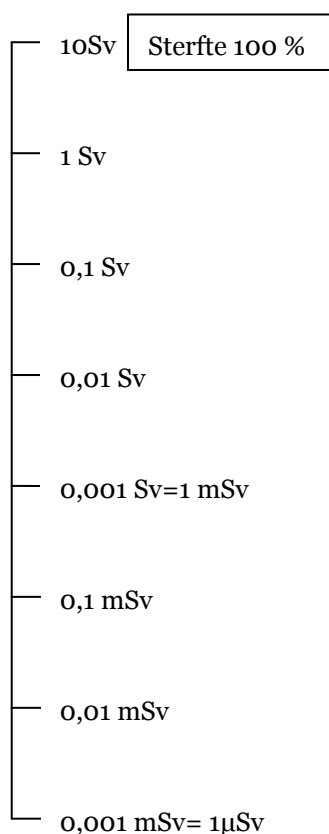
Materiaal dat erg oud is (bijvoorbeeld steenkool), zal vrijwel geen C-14 meer bevatten. Met behulp van massaspectrometrie kunnen de relatieve gehalten aan verschillende isotopen nauwkeurig worden bepaald.

Het radioactieve C-14 vormt dus een 'klok' die tikt met constante snelheid.

Practicum - Ioniserende straling om je heen

Met een Geiger-Müller teller ('GM-meter') wordt de ioniserende straling op diverse plaatsen gemeten. De meter registreert ionisaties als korte onregelmatige tikken. Houd plaatjes lood gereed. Meet indien mogelijk:

- op het schoolplein
 - in een gewoon lokaal
 - in de kelder of een kruipruimte
 - in het scheikundelokaal
 - in het scheikundepracticum
 - in de chemicaliënopslagruimte
 - vlak voor een potje natriumchloride
 - vlak voor een potje kaliumchloride.
- Probeer bij een flinke activiteit met de loden plaatjes te ontdekken waar de straling vandaan komt.
 - Zoek op internet en/of in Binas op van welke soort straling en van welke stof sprake is.



Reflectieopdracht - Wat mag, wat niet?

Hiernaast zie je een schaal waarop stralingsdoses worden weergegeven. De schaal is logaritmisch. Dat wil zeggen dat de afstand tussen 1 en 0,1 op de schaal even groot is als de afstand tussen 0,1 en 0,01.

Zoek op (mogelijke zoektermen op internet 'sievert' en/of 'dosis') hoeveel straling iemand oploopt in de volgende situaties. Neem de schaalverdeling over en schijf de letter van elke situatie op de juiste hoogte erbij.

- a Een röntgenfoto van je gebit laten maken.
- b Een CT-scan van je hele lichaam laten maken.
- c Een röntgenfoto van je longen laten maken.
- d Een jaar niets bijzonders doen in Nederland.
- e Een jaar niets bijzonders doen in een hooggelegen gebied in Brazilië.
- f Een jaar lang vlieguren maken als stewardess.
- g Een jaar rondlopen in de buurt van Tsjernobyl, waar in 1986 een kernreactor smolt en ontplofte.
- h De thee opdrinken waarmee Aleksander Litvinenko is vermoord (ga er van uit dat de stoffen een maand in het lichaam blijven).

Leg ten slotte in zo'n 10 regels uit wat de verhouding tussen de gevaren van straling volgens jou is. Voorbeelden: hoe bang moet je voor een röntgenfoto, mag een röntgenlaborant zonder bescherming bij alle foto's staan en moeten zwangere stewardessen voorzichtig zijn met de aantallen vluchten?

Figuur 3.5

Begrippen

Blootstelling aan straling
Radioactieve besmetting
Stralingsdosis
Gray
Weegfactor
Equivalent dose
Sievert
Effectieve totale lichaamsdosis
Achtergrondstraling
Dosimeter

Samenvatting

- **Blootstelling aan straling/bestraaling** is niet hetzelfde als **radioactieve besmetting**: als je straling ontvangt, ben je nog niet besmet (= in aanraking met de radioactieve stof).
- **Stralingsdosis** is de geabsorbeerde stralingsenergie per kilogram bestraalde massa. Eenheid is de gray (Gy) = J/kg
- **Equivalent dose** = **dosis** × **weegfactor** van de soort straling.
- Bij de **effectieve totale lichaamsdosis** houd je ook rekening met de **weegfactor** van het bestraalde lichaamsdeel. Deze laatste twee doses hebben ook de eenheid J/kg, die noem je nu sievert (Sv).
- Bij medische beeldvorming varieert de dosis van 0,01 mSv tot zo'n 15 mSv.
- De gemiddelde gezondheidsrisico's bij medische beeldvorming zijn laag vergeleken met andere risico's.
- Er is altijd ioniserende straling, **achtergrondstraling**: uit het heelal, uit de grond en uit de atmosfeer. Een belangrijke bron is radongas.
- Een **dosimeter** (bijvoorbeeld een badge) meet de dosis straling die iemand oploopt
- Bij **C14-datering** wordt gebruik gemaakt van een deel van de koolstofatomen in de atmosfeer radioactief is. De halveringstijd is 5730 jaar, bruikbaar voor materialen tot circa 60.000 jaar oud.
- Beveiliging tegen straling: zo kort mogelijk aan de straling blootstaan, zo ver mogelijk van de stralingsbron blijven en afscherming van de stralingsbron.

Opgaven

§ 3.1

28 Geabsorbeerde stralingsenergie

Voor iemand die met ioniserende straling werkt geldt een dosislimiet van 20 mSv per jaar. Een persoon van 75 kg wordt aan gammastraling blootgesteld, waardoor het gehele lichaam (vrijwel homogeen) wordt bestraald.

Bereken hoeveel energie die persoon in een jaar absorbeert als hij de equivalente dosis van 20 mSv oploopt.

29 Straling uit Kalium-40 (zie Binas tabel 25)

Elk menselijk lichaam bevat een zekere hoeveelheid radioactief Kalium-40. Stel de activiteit ervan $4,8 \cdot 10^3$ Bq.

- Geef de vergelijking voor het bètaverval van Kalium-40.
- Bereken hoeveel energie (in joule) vrijkomt bij het verval van een kalium-40 kern ($1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$).
- Waarom mag je aannemen dat de activiteit van ^{40}K in een jaar praktisch constant blijft?

Dit kaliumisotoop is vooral aanwezig in spierweefsel. Neem voor de massa van het spierweefsel 30 kg. Neem aan dat alle energie uit het verval door het spierweefsel zelf wordt geabsorbeerd.

- d. Bereken de stralingsdosis die in een jaar door dit verval in het spierweefsel terecht komt.

30 Alfastraling

In een kerncentrale wordt een werknemer blootgesteld aan α -straling. Het lichaam absorbeert hierbij 0,15 J stralingsenergie. De werknemer heeft een massa van 70 kg. Hoe groot is het ontvangen equivalente dosis?

31 Radongas in buitenlucht

De radioactieve radonisotoop Rn-222 wordt in de aardkorst gevormd door het verval van andere radioactieve isotopen. Daardoor bevat de buitenlucht, en dus ook de longen van de mens, een kleine hoeveelheid radioactief radongas. Dit radongas geeft bij het radioactief verval in de longen een stralingsvermogen van $5,3 \cdot 10^{-14}$ W af.

- Geef de vergelijking van het verval van Rn-222.
- Bereken hoeveel energie (in joule) vrijkomt bij het verval van een radon-222 kern ($1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$).
- Bereken de activiteit van het radongas in de longen.

De bestraalde massa van de longen is 0,15 kg.

- Bereken het equivalente dosis dat iemand per jaar in zijn of haar longen ontvangt door het radioactief verval van de radonisotoop Rn-222.
- Volgens figuur 3.2 zorgt radongas voor 32% van de gemiddelde jaarlijkse blootstelling van 2,5 mSv. Dat is veel meer dan het in vraag d. berekende equivalente dosis. Geef een verklaring voor het verschil.

32 Longfoto

Bij onderzoek naar de longen wordt een röntgenfoto gemaakt. De longen lopen hierbij een dosis op van 0,10 mGy. De energie van de röntgenfotonen is 0,10 MeV. De bestraalde massa is 4,0 kg.

- Bereken de geabsorbeerde stralingsenergie.
- Bereken de energie in joule van één röntgenfoton ($1 \text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J}$).
- Bereken hoeveel fotonen bij deze foto worden geabsorbeerd.

§ 3.2

33 Achtergrondstraling

In Nederland krijg je gemiddeld 2,5 mSv per jaar door achtergrondstraling. De vuistregel is dat bij één röntgenfoto een equivalente dosis hoort die gelijk is aan 10 dagen achtergrondstraling.

Bereken het equivalente dosis van de röntgenfoto.

34 Halveringsdikte

Een laag beton van 33 cm is voldoende om 87,5% van de gammastraling van kobalt-60 tegen te houden.

- Bereken de halveringsdikte van het beton voor deze straling.
- Zoek in Binas de energie van dit gammafoton op.

35 Stralingsbescherming

Bij het maken van röntgenfoto's beschermen de medewerkers zich met een kledingstuk waarin lood is verwerkt, het zogenaamde loodschort. De dikte van de laag lood is 0,55 mm. De röntgenstraling waarmee wordt gewerkt heeft een energie van 0,10 MeV.

- a. Bereken hoeveel procent van de straling door het loodschort wordt tegengehouden.

Een medewerker wordt tijdens zijn werk per ongeluk gedurende 25 seconden blootgesteld aan deze straling. Het vermogen van de röntgenstraling is 0,15 microwatt. Van deze straling wordt 73% geabsorbeerd door een spiermassa van 12 kg.

- b. Bereken de stralingsdosis die de spiermassa ontvangt.
(ongewijzigd naar havo examen 2002 II)

§ 3.3

36 Koolstofdatering

Op 19 september 1991 werd in de Tiroolse Alpen een ijsmummie gevonden door Duitse toeristen. Het ging om een neolithische man (ca 45 jaar) die de naam Ötzi kreeg (zie figuur 3.4). Uit een koolstof-14 datering bleek dat de mummie stamt uit 3150 v.C.

- a. Bereken hoeveel halveringstijden van C-14 zijn verstreken sinds het overlijden van Ötzi.
- b. Bereken hoeveel procent van het oorspronkelijke C-14 in zijn lichaam vervallen is.

37 Natuurlijke radioactiviteit

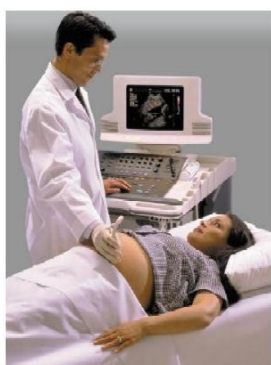
Via voedsel en ademhaling komen met name de volgende radioactieve isotopen in het lichaam terecht: C-14, K-40, Ra-226 en Rn-222.

- a. Ga na of deze isotopen α -, β - of γ -stralers zijn en noteer de halveringstijd.
- b. Welke van deze isotopen zijn in het lichaam het gevaarlijkst? Leg uit waarom.

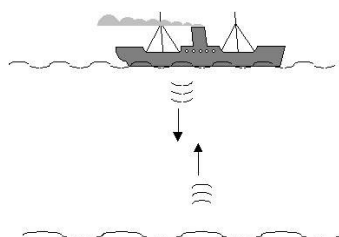
4 Echografie

Hoofdstukvraag

Hoe werkt echografie?



Figuur 4.1



Figuur 4.2

Tekstvragen

- Leg uit wat er in figuur 4.2 uitgebeeld wordt.



Figuur 4.3 Een apparaat voor echoscopie. Ervoor zie je verschillende typen transducers

Oriëntatieopgave - Auto's en baby's

Een parkeersensor in een auto waarschuwt als de achterkant van de auto te dicht bij een voorwerp komt. De sensor zendt geluidsgolven uit met een frequentie van 40 000 Hz. De weerkaatste golven worden opgevangen. Uit het tijdsverschil tussen de uitgezonden en de weerkaatste golf wordt de afstand berekend. De golflengte is bij deze frequentie ongeveer 1 centimeter. De sensor neemt objecten kleiner dan 1 centimeter niet waar.

Van een website over parkeersensoren:

Iets heel duns zoals afzetting van ijzerdraad of hekwerk geeft geen goede weerkaatsing. Bovendien geeft rond draad geen mooie weerkaatsing in één richting, maar naar alle kanten. Alles buiten zijn in een kegelvorm uitgestraalde geluidsbundel ziet de parkeersensor ook niet.

- Leg uit of, vergeleken met de parkeermeter, men bij het onderzoek met echo van een foetus geluid met grotere of kleinere golflengte gebruikt.
- Leg met een schets uit hoe het komt dat een rond voorwerp naar alle kanten weerkaatst.
- Welke ronde voorwerpen in je lichaam weerkaatsen ook naar alle kanten?

Ook met echografie kijk je in het menselijk lichaam. Met teruggekaatste **ultrasone geluidsgolven** (onhoorbaar geluid met hoge frequentie) brengt men het beeld van een bepaald lichaamsdeel op een beeldscherm.

Op de foto links zie je hoe men echografie bij zwangerschapscontrole uitvoert. Een gecombineerde zender en ontvanger van geluid wordt op de buik van de vrouw geplaatst. Op het beeldscherm ziet de arts een doorsnede van de baarmoeder en kan zo nagaan hoe de foetus zich ontwikkelt.

De transducer is een essentieel onderdeel van het echografieapparaat. De transducer zendt de geluidsgolven uit en vangt ze ook weer op, werkt dus als geluidsbron en als microfoon.

De transducer geeft een zeer korte geluidspuls en werkt direct daarna als ontvanger om de echo op te vangen. Het terugontvangen signaal wordt naar een computer gestuurd die uit het tijdsverschil tussen uitzending en ontvangst van het geluid de 'diepte' van het grensvlak berekent.

Uiteindelijk wordt alle ontvangen informatie een beeld van een dwarsdoorsnede van het lichaam geconstrueerd.

Voor een goed begrip van echografie is een onderscheid in twee situaties nodig: echografie van (vrijwel) niet bewegende lichaamsdelen en echografie van sterk bewegende lichaamsdelen, denk hierbij bijvoorbeeld aan bloed.

4.1

Echografie van 'niet' bewegende lichaamsdelen

Geluidssnelheid in het lichaam

Extra

Geluid met hoge frequentie wordt sterk gedempt en dringt dus minder ver in het lichaam door. Dit is geschikt voor een ondiepe scan. Als men diep in het lichaam wil kijken zijn juist de lagere frequenties geschikt.

Bij echografie gebruikt men dus ultrageluid, geluid met een zeer hoge frequentie (2,5 tot 10 megahertz) dat voor ons niet hoorbaar is.

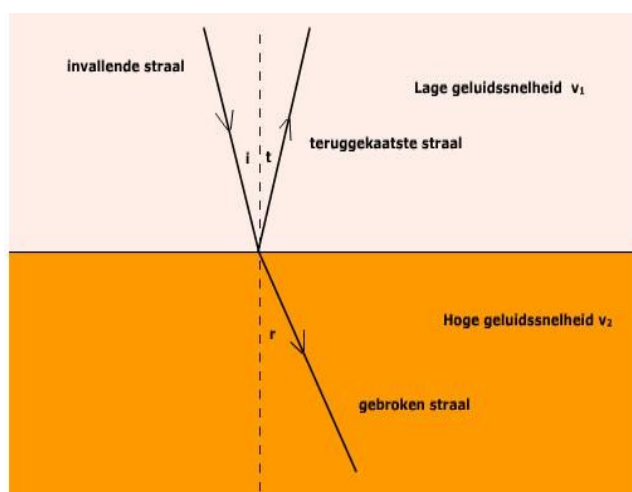
De **geluidssnelheden** verschillen in de diverse organen. Hoe groter de dichtheid en hoe steviger het weefsel, hoe hoger de geluidssnelheid.

In de longen, die veel lucht bevatten, is geluidssnelheid laag terwijl die in tanden en botten juist hoog is. De geluidssnelheden in 'natte' organen (hersen, nieren, lever, spieren) liggen vrij dicht bij die van water. Ze verschillen vaak voldoende om de gewenste terugkaatsing te geven. In de volgende tabel staan de geluidssnelheden in verschillende media.

Medium	Geluidssnelheid in km/s
Lucht	0,34
Water (ca 37 °C)	1,50
Longen	0,85
Vetweefsel	1,45
Lever	1,54
Nierweefsel	1,56
Spier	1,59
Botweefsel	4,0

Terugkaatsing en breking

Als geluidsgolven het grensvlak tussen twee weefsels treffen, kaatst een deel terug, de rest gaat verder. Op een volgend grensvlak is er weer terugkaatsing en breking enzovoort.



Figuur 4.4 Geluidsstralen breken en kaatsen terug als ze het grensvlak tussen twee verschillende organen treffen.

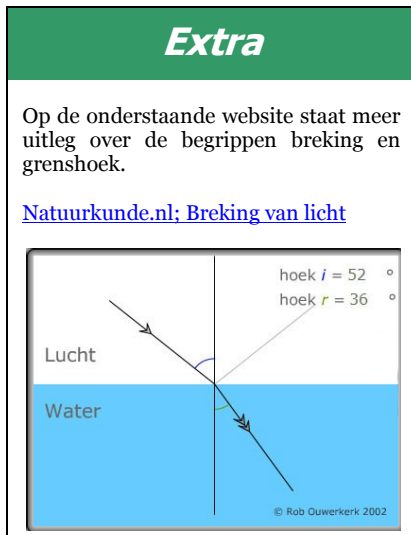
Hierbij gelden dezelfde twee wetten als bij licht (zie module 'Materialen', hoofdstuk 3):

1. Bij **terugkaatsing** geldt: hoek van inval = hoek van terugkaatsing

$$\angle i = \angle t$$

2. Bij **breking** van golven die van een medium met een lagere geluidssnelheid naar een medium met een hogere geluidssnelheid gaan geldt dat de hoek van breking groter is dan de hoek van inval. Er wordt dan van de normaal af gebroken:

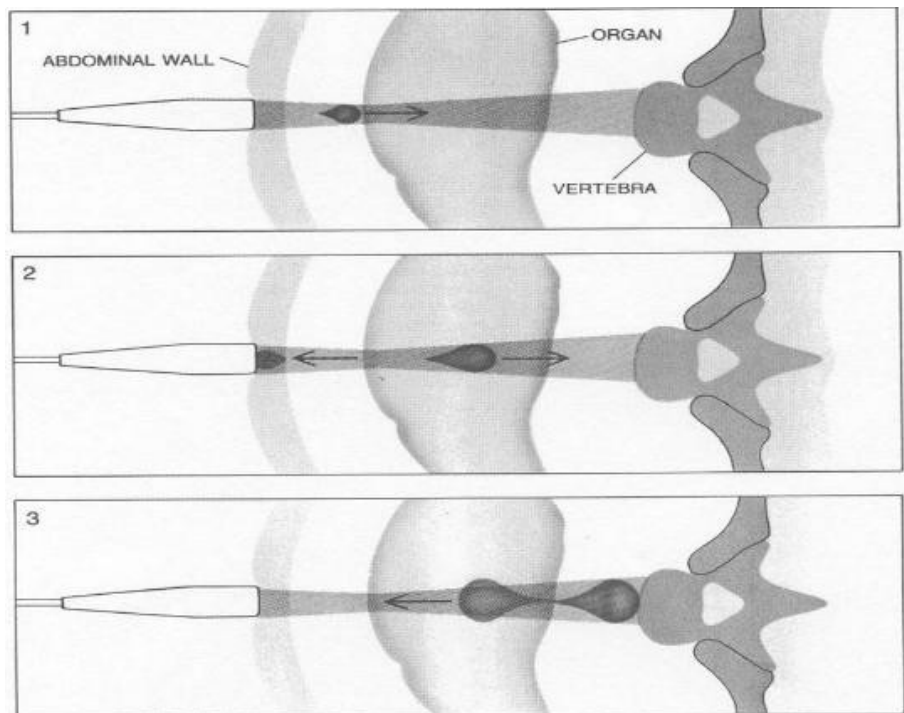
$$\angle r > \angle i$$



Op elk grensvlak treedt terugkaatsing op. Ook bij een hoek van inval van 0 graden, kaatst een deel terug en een deel gaat (recht)door.

Hoe groter de verschillen in geluidssnelheden, hoe sterker de terugkaatsing. Echografie is dan ook niet geschikt voor botten en longen. Bij de overgang van een 'dun' medium (de longen met al die lucht) naar een 'dik' medium (lichaamsweefsel en vooral botten) doet zich namelijk een speciale situatie voor. Bij een bepaalde hoek van inval wordt de hoek van breking 90°. Deze hoek noem je de **grenshoek**. Bij invalshoeken groter dan de grenshoek treedt **totale terugkaatsing** op.

De tekeningen in figuur 4.5 laten het principe van echografie zien.



Figuur 4.5 Principe van echografie. 1. Een geluidspuls nadert de voorkant van een orgaan. 2. Het geluid kaatst voor een deel terug en gaat voor een deel door. 3. aan de achterkant van het orgaan kaatst weer een deel van het geluid terug.

De teruggekaatste golven worden opgevangen en omgezet in elektrische signalen. De computer bewerkt deze tot het beeld op een beeldscherm. Omdat lucht storend werkt op echografie krijgt de patiënt een laagje gel op het lichaamsdeel waar contact met de zender/ontvanger (de transducer) is.

In de foto's van figuur 4,6 zie je hoe de opnames in de loop der tijden steeds beter zijn geworden. Links de situatie in 1956, rechts een foto van de bekendste toepassing: opname van een foetus in de baarmoeder.

Medische toepassingen van echografie: zwangerschapsonderzoek, onderzoek naar hart en bloedvaten, opsporen van tumoren in de lever en in de prostaat en steeds meer gebruik bij spoedeisende hulp om snel diagnoses te stellen.

Voordelen van echografie

Het grote voordeel van toepassing van ultrageluid is dat er geen gebruik wordt gemaakt van ioniserende straling (röntgenstraling en radioactiviteit). Voor zover bekend heeft echografie geen schadelijke bijwerkingen, maar het is altijd beter het niet méér toe te passen dan nodig is.

Echografie is zeer geschikt om weke delen van het lichaam zichtbaar te maken, iets wat met röntgenstralen minder goed gaat.

In tegenstelling tot bijvoorbeeld een MRI-scan (§5.2) is echografie niet duur. Echografie werkt snel, je kunt ermee ca 25 beelden per seconde produceren. Dit maakt echografie ook zeer geschikt op de afdeling spoedeisende hulp. De apparatuur is klein en dus gemakkelijk naar de patiënt toe te brengen.

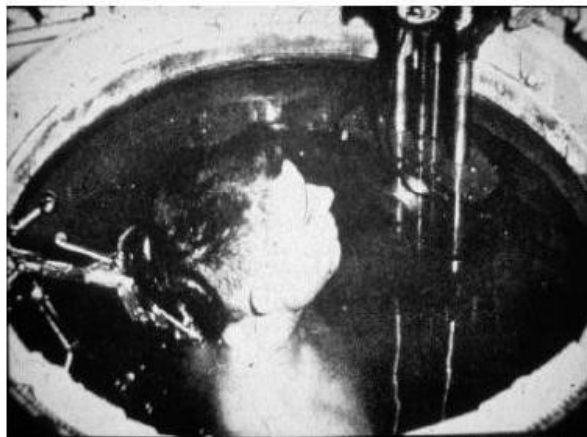
Nadelen van echografie

Longen en botten zijn niet te onderzoeken. Het geluid kaatst op deze lichaamsdelen praktisch geheel terug, door een te lage geluidssnelheid (longen) of een te hoge (botten).

Echografiebeelden niet altijd duidelijk. Voor het lezen van een echogram heb je dan ook goed opgeleide mensen nodig.

Tekstvragen

- Wat doet een transducer?
- Wat zijn de voordelen van echografie?
- Welke nadelen zijn er?



Figuur 4.6 De eerste experimenten met echografie in 1956. De patiënt moest plaatsnemen in een soort badkuip om lucht buiten te sluiten. Er werd een opname van de dwarsdoorsnede van de hals gemaakt. Het resultaat zie je in de foto rechts. Vaak waren de opnamen zo onduidelijk dat alleen speciaal opgeleide artsen er wijs uit konden. In de foto links is een echo afgebeeld, die gemaakt is met de huidige technieken.

Extra

Christian Doppler (1803-1853), Oostenrijks natuurkundige, Beschreef het naar hem genoemde effect. In 1845 onderzocht de Nederlandse meteoroloog Buys Ballot dit effect met een rijdende trein waarop een aantal hoornisten geluid maakten.



Figuur 4.7 Bij races is het dopplereffect goed te horen. Als de skelter op je afkomt, hoor je een hogere toon dan als die van je vandaan rijdt. Maar ook bij veel lagere snelheden kan je, als je goed luistert, het dopplereffect waarnemen.



Figuur 4.8

Een bekend verschijnsel op de kartbaan en bij een ambulance: een voertuig dat op je afkomt, geeft je een hogere toon dan een voertuig dat van je weg rijdt. De richting van het voertuig is dus bepalend. Bij de ambulance zijn de bijbehorende golven getekend. Je noemt dit het **dopplereffect**.

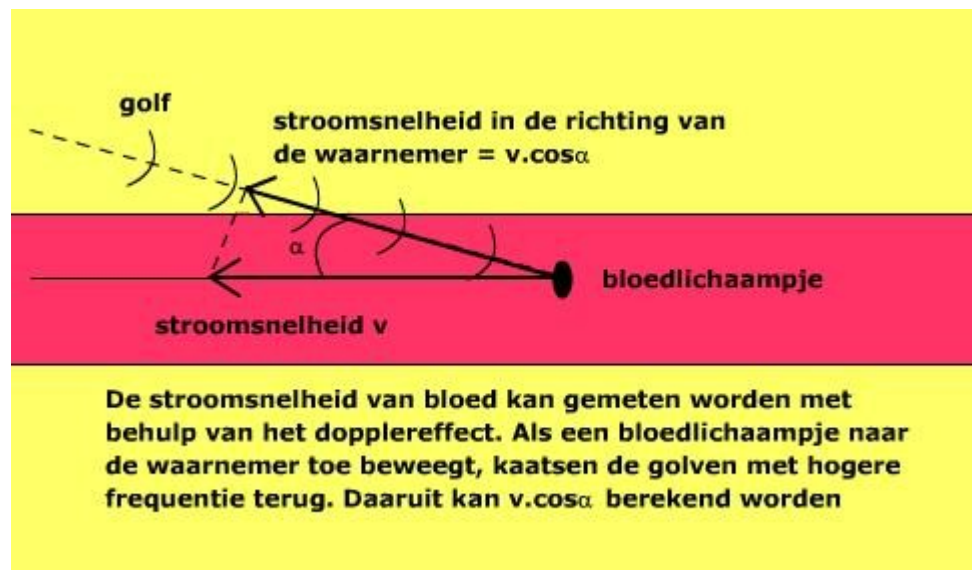


Figuur 4.8 De auto rijdt naar het radarapparaat toe. Daardoor vangt de auto een hogere frequentie op en kaatst die nog eens verhoogd weer terug.

Het dopplereffect wordt, in combinatie met terugkaatsing, ook gebruikt om snelheden te meten zoals bij de radarcontrole. Een zender zendt radargolven uit die terugkaatsen op de rijdende auto. De teruggekaatste golven worden opgevangen door een antenne. Uit het verschil tussen de twee frequenties wordt de snelheid van de auto berekend.

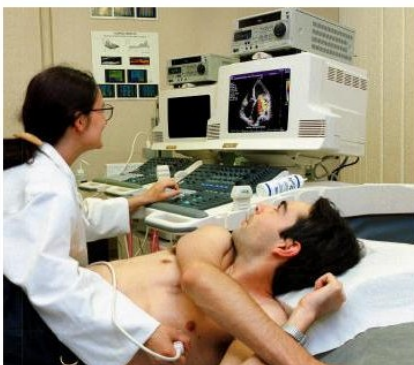
Extra

Bij het in beeld brengen van bloedvaten spuit men soms een contraststof in die bestaat uit microscopisch kleine belletjes lucht, opgesloten in eiwit. Die belletjes zijn ongevaarlijk en stromen met het bloed mee en de terugkaatsing van geluid op die luchtbelletjes is zeer sterk zodat die bloedvaten duidelijk in beeld komen.

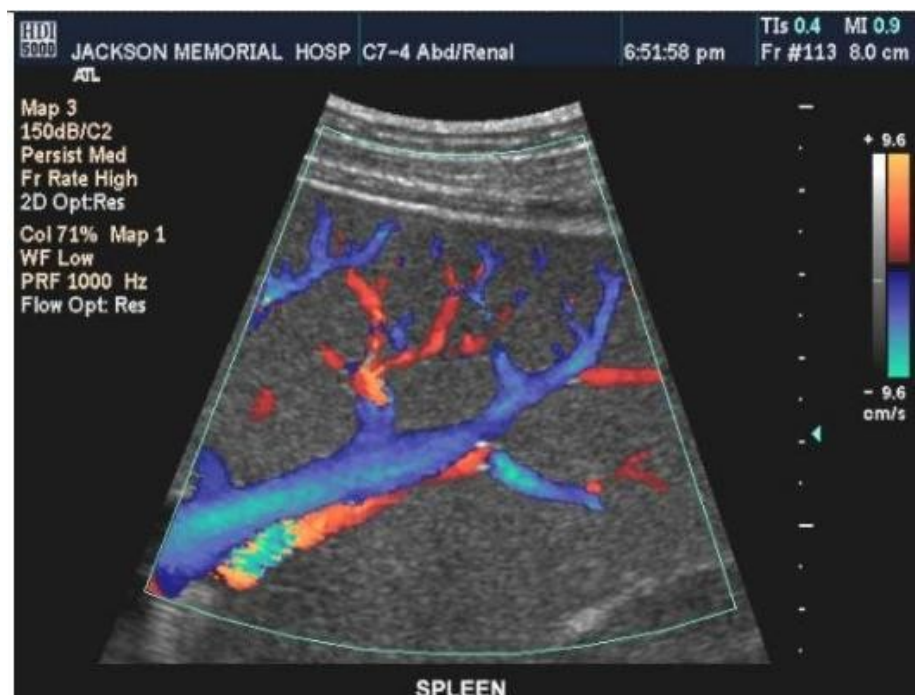


Figuur 4.10

In figuur 4.12 zie je het resultaat. De stroming naar de waarnemer toe is blauw aangegeven, de stroming van de waarnemer af rood.



Figuur 4.11



Figuur 4.12 Doppler-echo van de milt. Op het beeldscherm is de loop van bloedvaten goed te zien. De computer heeft kleuren aangebracht, waaruit de stroomsnelheid van het bloed is af te lezen. Blauw is naar de waarnemer toe en rood is van de waarnemer af.

Practicum – Dopplereffect

Aan een touw, waarvan je de lengte kunt variëren, is een geluidsbron bevestigd (bijvoorbeeld een buzzer die op een batterijtje werkt). Het touw wordt snel rondgedraaid, de waarnemers staan ongeveer 2 meter buiten de draaicirkel.

- Leg uit wat er te horen is.
- Voorspel wat er gebeurt als er sneller gedraaid wordt en wat er gebeurt met een langer touw.
- Controleer of deze voorspellingen kloppen.

Reflectieopdracht – Tatu ... Tatu ...

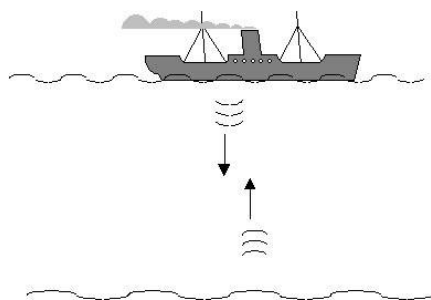
- Op natuurkunde.nl vind je een geluidsopname van een auto met sirene. Bepaal de hoogste en de laagste frequentie en bepaal daaruit de snelheid van de auto. Gebruik een meetprogramma, bijvoorbeeld Coach, of een oscilloscoop.
- Bepaal uit de gegevens van een dopplermeting van de aorta (ook op natuurkunde.nl) de hoogste stroomsnelheid van het bloed.

Begrippen

Ultrasonische geluidsgolven
Geluidssnelheid
Terugkaatsing
Breking
Grenshoek
Totale terugkaatsing

Samenvatting

- Bij echografie wordt ultrageluid met zeer hoge frequentie gebruikt.
- **Ultrageluid** kaatst gedeeltelijk terug op grensvlakken tussen twee weefsels met verschillende dichtheid en dus verschillende **geluidssnelheden**.
- Uit de gemeten tijd tussen uitgezonden en teruggekaatst geluid wordt de diepte van het grensvlak berekend en zo een beeld van organen gevormd.
- Voordelen echografie: er wordt geen gevaarlijke straling gebruikt, is goedkoop, werkt snel en de apparatuur is gemakkelijk te vervoeren.
- Nadelen: niet geschikt om in longen en botten te kijken, het beeld is niet altijd gemakkelijk te interpreteren.



Figuur 4.13

Opgaven

§ 4.1 Gebruik Binas tabel 15.

38 Varen, varen

- a. Wat heeft figuur 4.13 met medische beeldvorming te maken?

Het schip vaart in zeewater heeft een temperatuur van $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. De geluidspuls wordt 33 ms na uitzending weer opgevangen.

- b. Bereken de diepte van het water op die plek.
- c. Verderop is het water 45 m diep. Bereken hoeveel seconden na uitzending de geluidspuls daar terug is.

39 Ultrageluid

- a. Zoek op tussen welke grenzen de frequentie van hoorbaar geluid zit.

De geluidssterkte (intensiteit) van het ultrageluid dat bij echografie wordt gebruikt is heel hoog en kan oplopen tot 3.104 W/m^2 .

- b. Zoek op met hoeveel decibel dit geluid overeenkomt.
- c. Waarom gebruikt men zo'n grote intensiteit?
- d. Welk negatief effect zou hoorbaar geluid hebben?

Van een geluid is de golflengte $1,5\text{ mm}$. De gemiddelde geluidssnelheid in het menselijk lichaam is $1,54\text{ km/s}$.

- e. Bereken de frequentie van dit geluid.
- f. Bereken de trillingstijd.

40 Resolutie

Geluidsgolven kaatsen goed terug op voorwerpen die groter zijn dan de golflengte van het geluid. Daardoor zijn objecten die kleiner zijn dan de golflengte in het echogram niet zichtbaar.

De geluidssnelheid is 1540 m/s

- a. Bereken de afmeting van de kleinste details die op het echogram nog net zichtbaar zijn als de frequentie van het ultrageluid $2,5\text{ MHz}$ is.
- b. Idem als de frequentie 10 MHz is.
- c. Met welk van de twee soorten geluid kun je de kleinste details zien?
- d. Wat is het nadeel van erg hoog frequent geluid?

41 Pulsfrequentie

- a. Wat is het nadeel als bij echografie de geluidspulsen elkaar te snel opvolgen?

Voor een echogram wordt geluid gebruikt met een frequentie van $3,00\text{ MHz}$. Elke puls bevat vier hele geluidstrillingen.

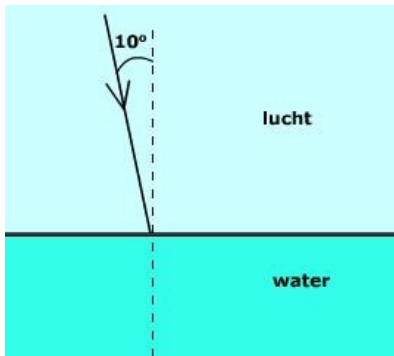
- b. Bereken hoe lang het uitzenden van zo'n puls duurt.

Men wil echo's opvangen van 25 cm diepte in het lichaam. De geluidssnelheid in het lichaam is gemiddeld $1,54\text{ km/s}$.

- c. Bereken hoe lang de geluidspuls in het lichaam onderweg is.

De echografie werkt alleen goed als een nieuwe puls pas wordt uitgezonden als de vorige puls geheel is terugontvangen.

- d. Op tijdstip $t = 0$ zendt de transducer het begin van een puls uit. Bereken op welk tijdstip de puls geheel is terugontvangen wordt.
- e. Bereken de maximale puls-frequentie die in deze situatie mogelijk is.



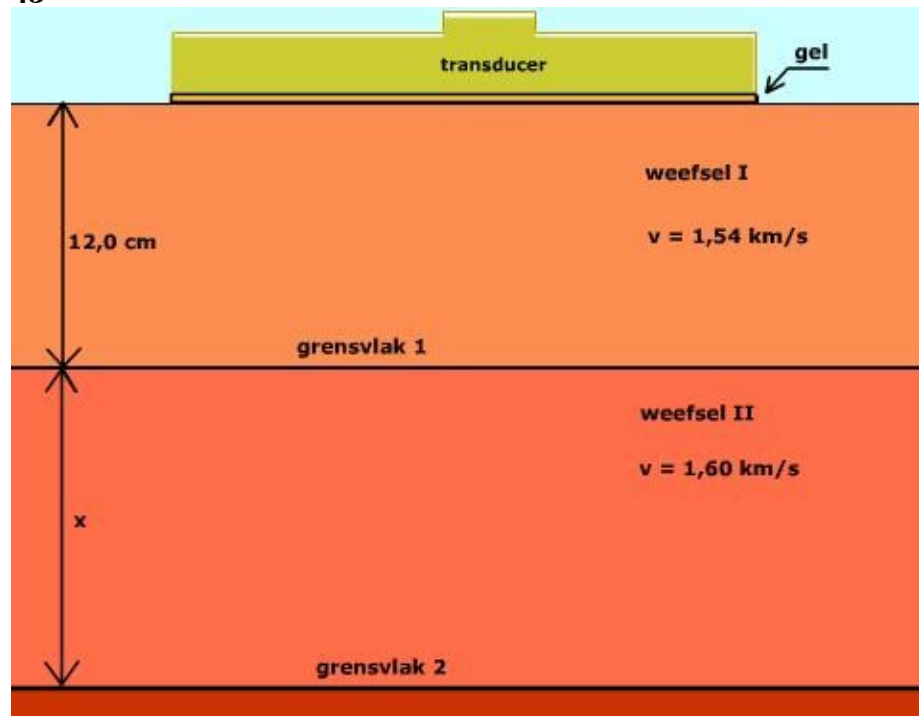
Figuur 4.14

42 Breking van lucht naar water

Zie figuur 4.14. Geluidsgolven gaan van lucht naar water. De invallende geluidsstraal is getekend. De temperatuur is 20 °C.

- Bereken de brekingsindex voor de overgang van lucht naar water.
- Bereken de hoek van breking.
- Neem figuur 4.14 over en teken de gang van de geluidsstraal in het water.
- Bereken bij welke hoeken van inval al het geluid wordt teruggekaatst?
- De golflengte van geluid in lucht is 10 cm. Bereken de golflengte in water.
- Leg uit waardoor een laagje lucht een echogram compleet bederft.

43 Echo



Figuur 4.15

Een echografieapparaat zendt op tijdstip $t = 0$ een puls ultrageluidsgolven loodrecht naar beneden uit met een frequentie van 2,50 MHz.

Op de grensvlakken 1 en 2 kaatst het geluid terug en wordt daarna door het apparaat opgevangen.

Verwaarloos de dikte van het laagje gel en houd uitsluitend rekening met terugkaatsingen op grensvlak 1 en grensvlak 2.

- Bereken de golflengte van het geluid in weefsel I.
- Bereken op welk tijdstip de eerste echo opgevangen wordt.

De tweede echo wordt opgevangen op tijdstip $t = 0,400$ ms. Bereken x , (= de dikte van weefsel II)

- Leg uit of er ook derde en vierde echo's ontstaan.

§ 4.2

44 Meting stroomsnelheid

Met behulp van het dopplereffect meet men de stroomsnelheid van bloed. Belangrijk daarbij is het verschil tussen de teruggekaatste frequentie en de frequentie van de bron: $f_{\text{teruggekaast}} - f_{\text{bron}}$.

- a Leg uit of $f_{\text{teruggekaast}} - f_{\text{bron}}$ positief of negatief is.

De urine van een gezond persoon is helder. Troebele urine wijst in de regel op een medisch probleem. Afgezien van praktische problemen is echografie dus in principe geschikt voor dit soort urineonderzoek.

- b Leg uit wat het verschil is tussen de echo's van deze twee soorten urine.
c Leg uit of voorurine $f_{\text{teruggekaast}} - f_{\text{bron}}$ positief of negatief is.
d Welk praktisch probleem treedt hier op?

§ 4.3

45 Voors en tegen

- a. Leg uit voor welke weefsels echografie geschikt is.
b. Geef twee voordelen van echografie.
c. Geef een nadeel van echografie.
-

5 Overige technieken

Beeldvormingstechnieken vergeleken

Hoofdstukvraag	Welke overige beeldvormingstechnieken zijn er?
----------------	--

Oriëntatieopgave - Overal trillingen: in je hoofd, in de soep en in het heelal

Geef aan wat bij elke letter zou moeten staan. Kies uit: atomen, computers, doorsnede, ioniserende, magnetrons, metalen, natuurkundig.

Nieuw **.a.** inzicht en ontwikkelingen in de rekenkracht van **.b.** zijn essentieel bij de ontwikkeling van nieuwe medische beeldvormingstechnieken.

Het begon met **.c.** onderzoek naar straling uit het binnenste van **.d.**, de röntgenstraling. Een CT-scan stelt uit een groot aantal röntgenopnamen **.e.** beelden samen. Hier was de ontwikkeling op het gebied van **.f.** onmisbaar, omdat snelle berekeningen nodig zijn.

Het **.g.** inzicht dat bepaalde **.h.** straling van een bepaalde frequentie absorberen, is de basis voor de MRI-techniek. Het gaat hier niet om **.i.** straling, maar om onschadelijke radiogolven. Deze absorptie lijkt op wat er in een **.j.** gebeurt, waar energie wordt gebruikt om iets op te warmen. Overeenkomsten: MRI-scanners worden niet gebruikt bij patiënten met **.k.** voorwerpen in hun lichaam, zoals een pacemaker, en in een **.l.** mag je geen vork leggen. In beide gevallen omdat **.m.** de straling weerkaatsen.

In de vorige hoofdstukken zijn drie technieken in de medische beeldvorming besproken: de röntgenfoto, de nucleaire diagnostiek en de echografie.

In dit hoofdstuk komen nog twee speciale technieken ter sprake:

- De CT-scan (berust op röntgenstraling)
- De MRI-scan

Aan het eind van het hoofdstuk worden alle technieken met elkaar vergeleken.

5.1

De CT-scan

Een CT-scanner maakt met röntgenstraling beelden van dwarsdoorsneden van het lichaam. CT staat voor Computed Tomography, het maken van een dwarsdoorsnede door de computer. Een andere term is CAT (Computed Axial Tomography).



Figuur 5.1 Een röntgenfoto van de borstholte. Als er een tumor te zien is, weet je nog niet hoe 'diep' deze zit.



Figuur 5.2 De CT-scan. Deze geeft een beeld van een dwarsdoorsnede van de borstholte.

Bij een gewone röntgenfoto wordt de hele dikte van het lichaam gefotografeerd. Door overlap van diverse structuren zijn deze soms moeilijk te onderscheiden.

In de röntgenfoto van de borstholte (zie figuur 5,1) geven de zwarte vlekken de longen aan. Van een mogelijke tumor zie je niet hoe 'diep' die zit. Een foto van opzij helpt ook niet altijd: de tumor kan achter een rib verscholen zitten.

De CT-scan (zie figuur 5.2) lost dit probleem op door een beeld van de dwarsdoorsnede van de borstholte te geven. Er is dan geen overlapping met andere structuren en de plaats van een tumor is nauwkeurig te bepalen.



Figuur 5.3 CT-scanner

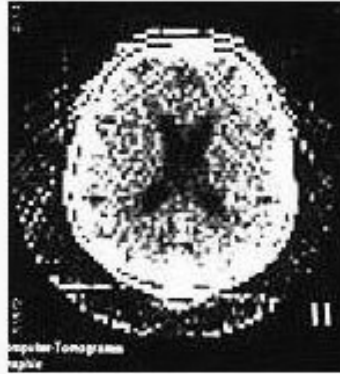


Figuur 5.5 Als de detectoren een schroeflijn om het lichaam trekken, wordt het mogelijk 3D opnamen te maken.

In figuur 5.4 zie je een CT-scan van het hoofd. In deze dwarsdoorsnede zijn ogen, neus en oorschelp duidelijk te herkennen.

Een moderne CT-scanner bestaat uit een röntgenbron die om het lichaam draait met aan de andere kant röntgendetectoren (zie figuur 5.5). Er worden dus onder steeds verschillende hoeken röntgenopnames gemaakt.

De detectoren meten de straling nadat die het lichaam is gepasseerd. De computer berekent de bijbehorende absorpties en zet die om in grijswaardes. Dit geeft uiteindelijk beelden van dwarsdoorsneden van het lichaam.



Figuur 5.4 Vergelijking tussen een scan van een schedel uit 1975 en een hedendaagse. Ook de snelheid waarmee de scan gemaakt wordt, is aanzienlijk verbeterd. De eerste opnamen duurden meer dan 24 uur. Tegenwoordig is dat slechts vijf seconden.

Technische verbeteringen



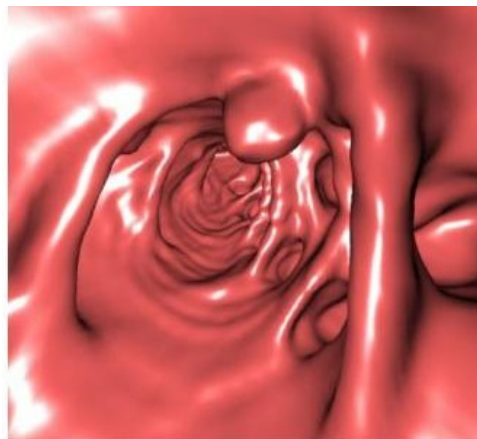
Figuur 5.6 CT-scan in de praktijk. De arts zit in een aparte ruimte om hem tegen röntgenstraling te beschermen.

Sinds de eerste experimenten in 1970 is de CT-scan aanzienlijk verbeterd. Betere detectoren en krachtigere computers maken nu in veel kortere tijd gedetailleerdere beelden.

Bij een scan van de borstholte moet de patiënt de adem inhouden, anders wordt het beeld wazig. Als de opname 5 seconden duurt, is dat geen probleem.

Een andere technische verbetering is dat niet draden, maar sleepringen van de draaiende detector de informatie naar de computer overbrengen (spiraal-CT). Daardoor kan de detector door blijven draaien. Zo breng je achter elkaar veel 'plakken' van het lichaam in beeld en zijn 3D beelden mogelijk.

In figuur 5.7 zie je een 3D beeld van de dikke darm. Door de CT-beelden achter elkaar te leggen maakt men een 'virtuele reis' door de darm.



Figuur 5.7 3D-opname van de dikke darm. Zo kan men bijv. zien of er poliepen zitten. De kleur is door de computer aangebracht en stemt niet overeen met de werkelijkheid.

Extra

Behalve voor medische doeleinden wordt de CT-scan ook gebruikt om levenloze voorwerpen te onderzoeken. Geologen gebruiken de CT-scan om stukken rots te onderzoeken. Zo kun je ook een mummie onderzoeken, zonder de windsels los te maken. Men kan deze voorwerpen uiteraard langer en aan intensievere straling blootstellen dan mensen.

5.2



Figuur 5.8 MRI-scan

Voor- en nadelen

Een belangrijk voordeel van de CT-scan boven de röntgenfoto is het veel betere contrast tussen de weefsels. De CT-scan geeft daardoor een scherpe afbeelding van de organen en wordt veel gebruikt om tumoren op te sporen en de ontwikkeling ervan te volgen. Ook bepaalt men met een CT-scan de afmetingen van de blaas en kijkt of er water in de longen zit.

Een groot nadeel is de flinke dosis straling die de patiënt oploopt. Het equivalente dosis van een scan van het hoofd is 2 mSv, van de borstkas 10 mSv en van het bekken 15 mSv, 10 tot 100 keer zoveel als bij een röntgenfoto.

De MRI-scan

MRI staat voor 'magnetic resonance imaging': het maken van een beeld door middel van magnetische resonantie (= meetrillen).



Figuur 5.9 MRI-scanner

Een supermagneet

In figuur 5.9 zie je een MRI-apparaat. In het apparaat zit een stroomspoel die een uitermate sterk magnetisch veld opwekt. De 'sterkte' (eenheid tesla = T) van het magnetisch veld is meestal 1,5 T, voor gespecialiseerd onderzoek wordt soms 3 tot 7 T gebruikt.

Ter vergelijking: de magneet in elektromotoren of luidsprekers heeft een sterkte van hoogstens 0,2 T. Het magnetisch veld bij een MRI apparaat kan dus ruim dertig keer zo sterk zijn.

Om zo'n sterk veld op te wekken, gaat door de spoelen een stroomsterkte van honderden ampères. In koperdraden ontstaat dan veel te veel warmte en worden bovendien de energiekosten zeer hoog. Daarom gebruikt men supergeleiding. Bij zeer lage temperatuur (zo'n 4 K = -269 °C) zijn sommige metalen (vaak wordt een legering van niobium en titanium gebruikt) supergeleidend. Ze hebben dan geen elektrische weerstand en de grote stroom blijft

zonder energieverlies lopen. Wel moet men de spoel koud houden met vloeibaar helium, maar wel zorgen voor goede warmte-isolatie, anders bevriest de patiënt.

Zo'n sterk magnetisch veld vraagt ook om andere veiligheidsmaatregelen. Alle ijzeren voorwerpen moeten uit de buurt blijven omdat ze met grote kracht in de magneet getrokken worden. Voorwerpen als ijzeren wagentjes, emmers, stofzuigers worden uit de ruimte van het MRI-apparaat geweerd. Ziekenhuispersoneel en patiënten mogen geen ijzer bevattende voorwerpen zoals sleutels en horloge bij zich hebben. Een bankpasje wordt in het MRI apparaat onleesbaar.

Patiënten met een ingebouwd apparaatje (als pacemaker en insulinepompje) krijgen geen MRI-scan.

Er is nog nooit aangetoond dat het sterke magnetische veld gevaarlijk voor de gezondheid zou zijn. Voor alle zekerheid ondergaan vrouwen die korter dan 12 weken zwanger zijn geen MRI-onderzoek.

Het principe

De patiënt wordt dus in het magnetisch veld gebracht. Door extra spoelen (de gradiëntspoelen) krijgt elk lichaamsdeel ('volume-element') een eigen magnetische veldsterkte.

Met radiogolven gaan de protonen (kernen van waterstofatomen) in het lichaam van de patiënt in zo'n magneetveld zelf ook radiogolven uitzenden.

Men meet de sterktes van de uitgezonden radiosignaal. Hoe sterker het signaal, des te meer waterstofatomen (in water of in andere stoffen) er in het weefsel zijn.

De frequentie van de uitgezonden radiogolven hangt af van de sterkte van het magnetisch veld; zo gaat men na waar de radiogolven vandaan kwamen.

De MRI-scan meet dus op elke plaats de concentratie waterstofatomen, die per weefsel verschilt. De computer maakt van deze concentraties op het beeldscherm grijswaarden, die dus voor elk weefsel anders zijn.

Er ontstaat uiteindelijk een duidelijk beeld van de organen. Dat kan een langs-, een dwars- maar ook een schuine doorsnede zijn.

Ook zijn met MRI driedimensionale beelden mogelijk.

Voor- en nadelen

Voordelen

- De MRI-scan geeft een zeer goed beeld van hersenen, hart, longen, (met gebruik van contrastvloeistof) bloedvaten en gewrichten.
- MRI geeft ook andere gegevens zoals de concentratie van fosfor en natrium, de pH, de temperatuur in elk volume-element en de stroomsnelheid van bloed.
- Er wordt geen schadelijke ioniserende straling gebruikt.

Nadelen

- De apparatuur is duur (een eenvoudig MRI-apparaat kost al gauw een miljoen euro) en het onderzoek kan vrij lang duren (een half tot twee uur). Dat maakt ook de scan duur.
- Het apparaat maakt veel lawaai.
- MRI is niet geschikt voor patiënten met ijzer, kobalt of nikkel bevattende voorwerpen in hun lichaam.

Tekstvragen

- Wat betekent MRI?
- Hoe wordt het magnetisch veld opgewekt?
- Wat zijn de voordelen van de MRI-scan?
- Welke nadelen zijn er?

Reflectieopdracht - De loop der tijden

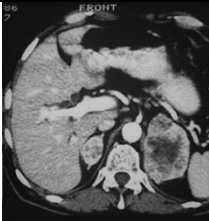
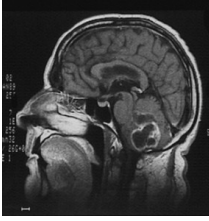
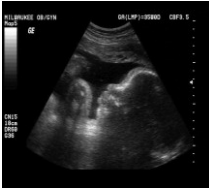
1761 – 1810 – 1895 – 1897 – 1903 – 1919 – 1921 – 1935 – 1938 – 1944 – 1958 – 1979 – 2003

Zoek bij elk jaartal de juiste letter. Welke term uit de module krijg je dan?

- I Allan Cormack en Godfrey Hounsfield krijgen de nobelprijs voor medicijnen voor de ontwikkeling van CAT (= CT).
- G Wilhelm Röntgen, in Utrecht van de middelbare school gestuurd, ontdekt de naar hem genoemde straling.
- U Isidor Rabi krijgt de nobelprijs natuurkunde voor de ontdekking van kernspinresonantie, de basis voor de MRI-techniek.
- E J.J. Thomson ontdekt dat uit atomen kleine negatief geladen deeltjes kunnen worden vrijgemaakt: elektronen.
- O De Franse arts René Laënnec luistert naar het hart van een vrouwelijke patiënt. Hij vond het niet netjes om zijn oor op haar borst te leggen en gebruikt een papieren koker: de stethoscoop was geboren!
- T Ian Donald maakt de eerste echografie van een foetus in de baarmoeder.
- E Paul Lauterbur en Peter Mansfield krijgen de nobelprijs medicijnen voor hun bijdragen aan de ontwikkeling van MRI.
- R Pierre Curie, Marie Curie en Henri Becquerel krijgen de nobelprijs natuurkunde voor hun werk op het gebied van de radioactiviteit.
- O James Chadwick, ontdekker van het neutron, krijgt de nobelprijs natuurkunde. Irène Joliot-Curie (dochter van Pierre en Marie) en haar man Frédéric Joliot krijgen de nobelprijs scheikunde voor het ontdekken van nieuwe radioactieve elementen.
- E Ernest Rutherford ontdekt het proton.
- L Enrico Fermi krijgt de Nobelprijs natuurkunde voor de ontdekking dat door kernen met neutronen te beschieten een kernreactie op gang kan komen.
- H Leopold Auenbrugger von Auenbrugg ziet zijn vader, die herbergier is, op wijnvaten kloppen om te bepalen of ze vol of leeg zijn. Hij bedenkt dat je dan ook, door op de borst en rug van een patiënt te kloppen, kan bepalen of in de longen vocht zit en hoe groot het hart is. De oudste vorm van echografie, nog steeds toegepast!
- S Albert Einstein krijgt de Nobelprijs natuurkunde voor zijn werk aan het foto-elektrisch effect: of licht uit een metaal elektronen vrijmaakt hangt af van de kleur van het licht, niet van de intensiteit.

5.3

Overzicht van de beeldvormingstechnieken

Techniek	Natuurkundig principe	Geschikt voor	Nadelen	Voordelen	Beeld
Röntgenfoto	Absorptie van röntgenstraling	Botten, gebit, bloedvaten, darmkanaal (met contrast-stof)	Zachte weefsels niet goed zichtbaar, structuren door elkaar, (geringe) stralingsdosis	Snel, goedkoop	
CT-scan	Absorptie van röntgenstraling geeft dwarsdoorsneden	Opsporen tumoren, onderzoek naar zachtere weefsels	Tamelijk hoge stralingsdosis	Goed beeld, goed contrast	
MRI-scan	Uitzending van Radiogolven door protonen.	Onderzoek naar hersenen, gewrichten, hart etc.	Duur Maakt lawaai	Goed beeld, veelzijdig toepasbaar Geen ioniserende straling	
Echografie	Terugkaatsing van Ultrageluid	Zwangerschapsonderzoek, sportblessures Meting stroomsnelheid van bloed	Beeld niet erg duidelijk Indringdiepte beperkt Niet geschikt voor botten en longweefsel	Snel Goedkoop Geen ioniserende straling Compacte installatie	
Nucleaire diagnostiek	Radioactiviteit gammastraler.	Opsporen tumoren, onderzoek naar transportprocessen, stofwisseling	stralingsdosis	Geschikt voor onderzoek naar functioneren van organen	

Samenvatting

- Bij een CT-scan (CT = computed tomography) draaien een röntgenbron en detectoren om het lichaam heen. De computer construeert uit de doorgelaten straling een beeld van de dwarsdoorsnede van het lichaam. Voordeel: zeer goed contrast tussen de weefsels, dus duidelijk beeld. Nadeel: hoge stralingsdosis (2 tot 15 mSv).
- Bij MRI (Magnetic Resonance Imaging) laat men waterstofatomen in een zeer sterk magneetveld radiogolven uitzenden. Voordelen: duidelijk beeld door zeer goed contrast tussen de weefsels, methode geeft ook andere informatie, geen gebruik van ioniserende straling. Nadelen: duur, langdurig onderzoek, apparatuur maakt veel lawaai en is niet geschikt voor patiënten met pacemakers of andere metalen voorwerpen.

Opgaven

§ 5.1

46 CT-scans

- a. Leg het principe van een CT-scan uit.
- b. Waarin verschilt de CT-scan van die van een klassieke röntgenfoto?

§ 5.2

47 Een supergeleidende spoel

MRI magneten worden vaak gemaakt van een supergeleidende legering van niobium en titanium.

- a. Leg uit dat het laten lopen van de stroom zelf (vrijwel) niets kost.
- b. Waardoor worden er toch energiekosten gemaakt voor het in bedrijf houden van de magneet?
- c. Op welke twee manieren gebruikt men radiogolven bij MRI?

§ 5.3

48 Technieken voor medische beeldvorming

- a. Noem de technieken voor medische beeldvorming
- b. Bij welke technieken wordt gebruik gemaakt van röntgenstraling?
- c. Bij welke wordt geen ioniserende straling gebruikt?
- d. Bij welke maakt men gebruik van radioactieve stoffen?
- e. Welke techniek is de duurste?
- f. Welke technieken brengen zachte weefsels goed in beeld?
- g. Welke technieken maken geen beeld van organen?

Men overweegt in een ambulance apparatuur voor medische beeldvorming mee te nemen om sneller eerste hulp aan te bieden

- h. Leg uit welke techniek daarvoor het meest in aanmerking zou komen en welke beslist niet.

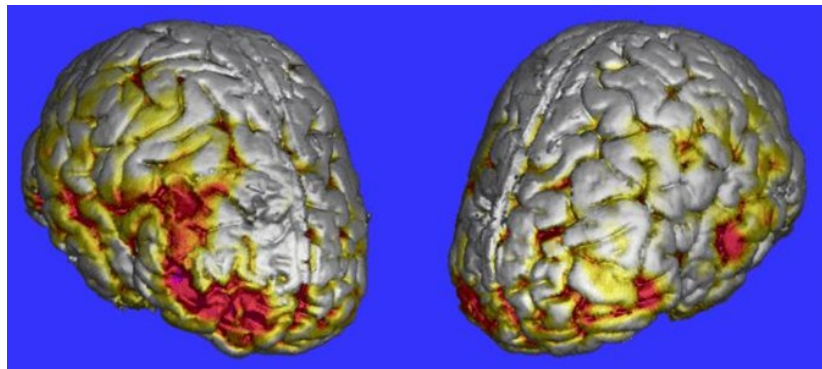
49 Gebruik van technieken

Hieronder volgt een aantal medische gevallen. Welke vorm van medische beeldvorming lijkt je hierbij geschikt? Verklaar je antwoord.

- Na een geslaagde operatie waarbij een kwaadaardig gezwel verwijderd is, wil men weten of er uitzaaiingen in het lichaam zijn
- Men wil bij een zwangere vrouw weten of de foetus goed ligt.
- Men wil onderzoeken of er vocht in de longen van een patiënt zit.
- Men wil onderzoeken of de doorbloeding van het hart goed is.
- Iemand kan na een sportblessure zijn knie niet buigen zonder vreselijke pijn. Een arts wil onderzoeken wat er aan de hand is.
- Bij een patiënt wordt longkanker vermoed. Men wil onderzoeken of er een tumor is en waar die zit.
- Men wil weten waar een uitstulping van de hersenslagader precies zit.

50 Combinatie van technieken

Een computer kan de resultaten van twee technieken combineren voor een beter inzicht in het ziektebeeld. Op de foto hierna zie je zo'n beeld. Onderzocht werd welke delen van de hersenen bij een bepaalde taak actief zijn.



- Leg uit met welke techniek het beeld van de hersenen is gemaakt.
- Met welke techniek is de kleuring gemaakt?

51 Stress

De schade bij Medische Beeldvorming weegt niet op tegen de voordelen. Gemakkelijk gezegd, maar sommige technieken geven wel degelijk stress bij patiënten. Goede voorlichting en begeleiding is dan ook zeer belangrijk.

- Welke omstandigheden kunnen stress veroorzaken bij een MRI-scan?
- Welke bij een CT-scan?
- Welke bij de nucleaire diagnostiek?
- Wat is volgens jou de beste methode om dergelijke stress te voorkomen?

6 Over het beeld

Hoofdstukvraag	Hoe kan men afbeeldingen verbeteren?
----------------	--------------------------------------

Oriëntatieopgave - Downloaden en photoshoppen

Misschien werk je zelf ook wel eens met beelden en beeldbewerking. In dit voorafje kijk je naar zaken die in dit hoofdstuk terugkomen.

- Soms duurt het downloaden van een filmpje van internet lang, soms kort. Waar hangt dit van af?
- Hoeveel foto's passen in een geheugenruimte van 1 gigabyte?
- Waardoor kun je een foto niet steeds verder uitvergrooten?
- Met welke bewerkingen op je digitale camera kun je het beeld van een bestaande foto beter maken?

In de medische beeldvorming meet men de intensiteit van straling of geluid en maakt daarvan uiteindelijk een digitaal beeld. Een digitaal beeld biedt diverse voordelen: gemakkelijk te kopiëren, te verzenden en op te slaan. Een belangrijk voordeel is ook, dat je digitale beelden kunt bewerken om de kwaliteit te verbeteren.

6.1

Het digitale beeld



Figuur 6.1 Op dit stukje röntgenfoto zie je de pixels sterk vergroot

Een digitaal beeld zoals het beeldscherm van je computer is opgebouwd uit kleine rechthoekige (soms vierkante) beeldelementjes: **pixels**. Elke pixel heeft één effen kleur. Hoe meer pixels in een beeld, des te kleinere details kan dit beeld weergeven en des te beter is de kwaliteit bij vergroting.

Pixels in zwartwitbeelden kunnen allerlei tinten grijs hebben, tussen zwart en wit in. Hoe donker of licht een pixel is, ligt vast in een binair getal: de **grijswaarde**. Bestaat dat getal uit 8 bits (zoals in het veelgebruikte JPEG-formaat), dan zijn grijswaarden mogelijk van 0 tot en met 255. Dit zijn de $2^8=256$ mogelijke waarden. Het getal 0 staat voor zwart en 255 voor wit, met alle grijs tinten ertussen. In de medische beeldvorming zijn getallen van 12 bits gebruikelijk.

Het menselijk oog kan slechts circa 128 grijs tinten onderscheiden, maar wel 24 miljoen kleuren. Met 24 bits (3 bytes = 16,8 miljoen kleuren) kom je een heel eind, maar 2 bytes per pixel (65.000 kleuren) levert ook een goed beeld. In het RGB-kleursysteem worden per pixel drie getallen van 8 bits gebruikt. Elke kleur wordt opgebouwd uit rood, groen en blauw. Rood is dan (255,0,0), wit is (255,255,255) en zwart (0,0,0). Hieruit volgt dat een RGB-kleurenbeeld drie keer zoveel geheugenruimte in beslag neemt als een zwart-wit beeld.

Bij digitale beelden zijn belangrijke begrippen: resolutie, helderheid en contrast.

Extra

Veel gebruikte resoluties in de medische beeldvorming (in aantal pixels in de breedte x de hoogte)::

Echogram	256 x 256
Nucleaire diagnostiek	256 x 256
CT-scan	512 x 512
MRI-scan	512 x 512
DSA-beeld (bloedvat)	1024 x 1024
Röntgenfoto:	2048 x 2048

De **resolutie** (het oplossend vermogen) bepaalt de afmeting van de kleinste nog zichtbare details. In een digitale afbeelding met veel pixels is de resolutie groot, ook kleine details zijn zichtbaar. Nadeel van een hoge resolutie is dat die veel geheugenruimte nodig heeft en dat het maken en bewerken van het beeld langer duurt. In de medische beeldvorming kunnen de resoluties van de verschillende toepassingen nogal verschillen.

De **helderheid** geeft aan of beelden lichter of donkerder zijn. Je vergroot de helderheid door van alle pixels de grijswaarde te verhogen. Soms is een minder helder beeld gewenst omdat dan kleine verschillen in grijswaarde beter opvallen.

Onder **contrast** verstaat men het verschil tussen licht en donker. Bij een laag contrast wordt een deel van de grijsstinten gebruikt. Alles is ongeveer even grijs en het beeld is vaag. Bij een hoog contrast worden alle grijsstinten gebruikt, maar in een klein gebied, en daardoor is de overgang van wit naar zwart vrij plotseling. Lichte structuren zijn dan al gauw te licht en donkere te donker. In figuur 6.2 zie je als voorbeeld drie röntgenfoto's van vingers. Eén met te weinig, één met goed en één met te veel contrast. In de streppen naast de foto zie je hoe de grijsstinten zijn verdeeld. Bij veel contrast zijn veel grijswaarden uitsluitend wit of uitsluitend zwart. Op de rechterfoto is door teveel contrast het vingerkootje rechtsboven zwart geworden en niet meer te zien.



Figuur 6.2 Röntgenfoto met te weinig contrast (links), goed contrast (midden) en teveel contrast (rechts)

6.2

Beeldbewerking

Bij het maken van foto's met digitale camera en bij het fotoshoppen op de computer wordt beeldbewerking toegepast. De technieken hierbij zijn ontwikkeld voor wetenschappelijk onderzoek (satellietfoto's), medische beeldvorming en filmindustrie (speciale effecten).

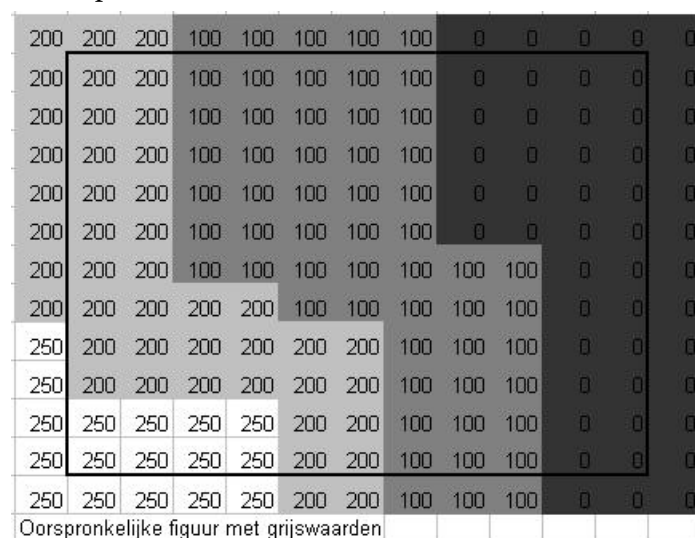
In de techniek van beeldbewerking verandert de computer de grijswaarde (of kleurwaarde) van elke pixel, zodat er een bewerkt beeld ontstaat met de gewenste eigenschappen.

Bekende beeldbewerkingstechnieken zijn: **randversterking** (*edge enhancement*), **ruisonderdrukking** (*noise reduction*) en werken met **valse kleuren** (*false color*).

Randversterking

Het kan in de medische beeldvorming belangrijk zijn een rand aan te brengen tussen organen die niet goed te onderscheiden zijn.

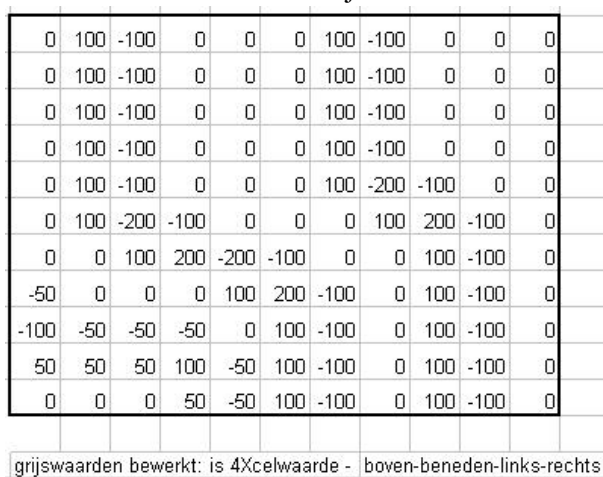
In de volgende figuren zie je hoe dat in zijn werk kan gaan. Figuur 6.3 laat een stukje beeld zien. Voor het gemak zijn er maar vier grijswaarden gebruikt: 0 (bijna zwart), 100 (donkergrijs), 200 (lichtgrijs), en 250 (wit). In het voorbeeld gaan we de 11 x 11 pixels binnen het kader bewerken, de pixels daarbuiten laten we met rust, maar ze hebben wel invloed op de bewerking van de pixels in het kader.



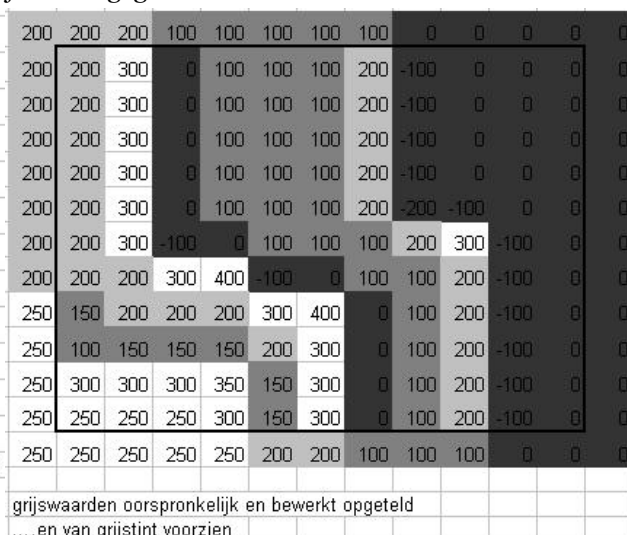
Figuur 6.3 Voorbeeld van een beeldfragment.

De bewerking gaat dan als volgt (zie 'Extra' in de kantlijn): je neemt 4 keer de grijswaarde van een pixel en trekt daarvan af de grijswaarden van de pixel erboven, eronder, links en rechts. Het resultaat van deze berekening zie je in figuur 6.4. De getallen in figuur 6.4 geven voor elke pixel aan hoe de grijswaarde ten opzichte van de oorspronkelijke figuur verandert. Het getal 0 betekent géén verandering. Bij een negatief getal heeft een donkere pixel lichter getinte pixels als burens. Bij een positief getal heeft een licht getinte pixel donkere burens.

Vervolgens tel je voor elke pixel de oorspronkelijke bij de bewerkte grijswaarde op, je telt de waarden uit figuur 6.3 op bij die uit 6.4. Het resultaat zie je in figuur 6.5, de grenzen tussen verschillende tinten worden met duidelijke lichte en donkere lijnen aangegeven.



Figuur 6.4 Veranderingen in het beeldfragment om randversterking te krijgen.



Figuur 6.5 Het beeldfragment met kunstmatig versterkte randen.

	50	of kleiner
	tussen 50	en 150
	tussen 150	en 200
	meer dan 200	

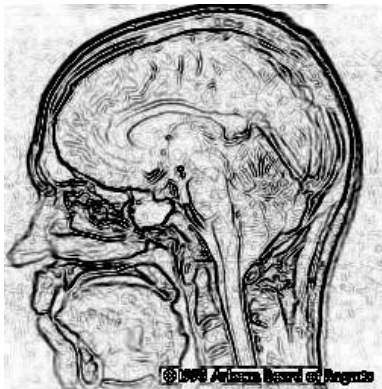
Extra

De rekenprocedure per pixel staat vaak in de vorm van een *matrix*. De hier gebruikte matrix is

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Nullen betekenen dat met die pixels niets gedaan wordt. De waarde voor deze bewerkte pixel wordt:

- 4x de grijswaarde van de oorspronkelijke,
- minus 1x de grijswaarde van de pixel erboven,
- minus 1x die van de pixel eronder,
- minus 1x die van de pixel links,
- minus 1x die van de pixel rechts.

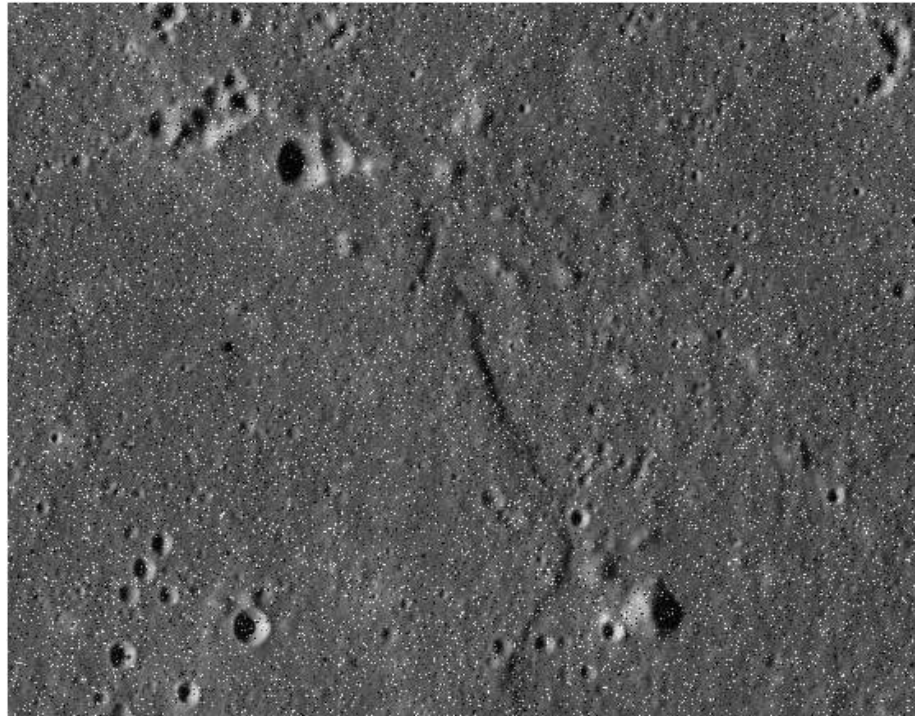


Figuur 6.6

Figuur 6.6 laat een praktijkvoorbeeld zien van een MRI-scan van een hoofd, die na randversterking duidelijker de contouren van zachte weefsels weer-geeft.

Ruisonderdrukking

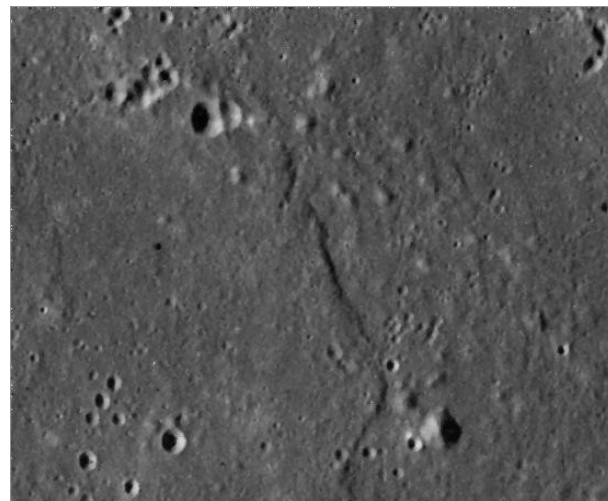
Bij satellietfoto's en bij medische beelden kan door storingen in de overbren-ging van de signalen informatie over pixels verdwijnen. In de foto in figuur 6.7, van het oppervlak van de planeet Mercurius, is het beeld verstoord door de witte puntjes.



Figuur 6.7

In figuur 6.8 zie je het bewerkte beeld.

De ruisonderdrukking gebeurt door elke pixel de waarde te geven van de mediaan van de pixel zelf en de acht omringende pixels. Een nadeel is dat het beeld daardoor wat vager wordt.



Figuur 6.8

Extra

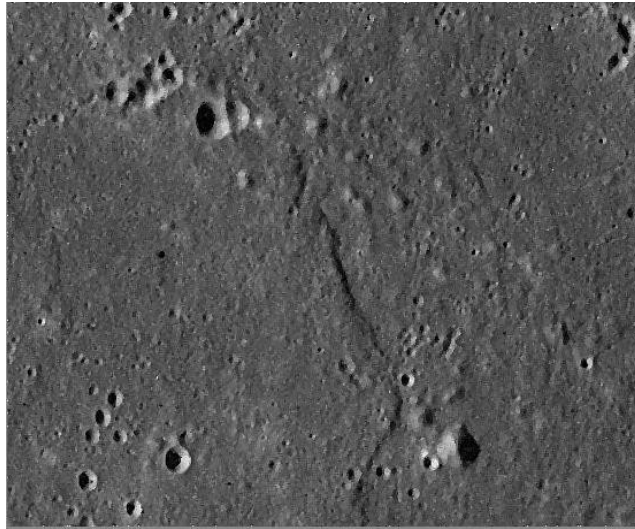
De hiernaast besproken vorm van ruis is de zogenaamde 'peper en zout' - ruis. Door storingen wijkt de grijswaarde van een pixel sterk af van die van zijn bure-
Het beeld vertoont daardoor witte (of zwarte) puntjes.

Daarnaast is er ook een 'additieve ruis': grijswaarden van de pixels wijken door storingen een beetje van elkaar af, maar het gemiddelde van alle (positieve en negatieve) afwijkingen is praktisch nul. Deze vorm van ruis wordt onderdrukt door voor elke pixel het gemiddelde van de grijswaarde van die pixel zelf en van de acht bure-
te nemen.

Extra

De mediaan van een aantal getallen krijg je door ze op volgorde (van klein naar groot) te leggen. Het middelste getal is dan de mediaan.

Een scherper beeld wordt verkregen door ‘sharpening’ toe te passen, zie figuur 6.9. Op die techniek gaan we verder niet in.



Figuur 6.9

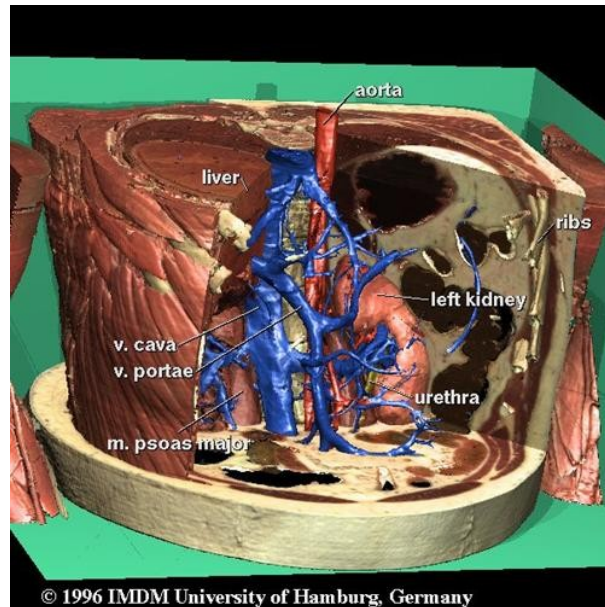
Nepkleuren (false colors)

Je kunt een vage zwart-witfoto duidelijker krijgen door met de computer grijswaarden te vervangen door kleuren uit het spectrum. Violet komt dan bijvoorbeeld in de plaats van wit en rood komt in de plaats van zwart. In figuur 6.10 zie je hoe een slim palet van valse kleuren het oorspronkelijke zwartwitbeeld het aanzien van een kleuren-luchtfoto geeft. En het zijn niet de echte kleuren!



Figuur 6.10 Een slim palet van valse kleuren maakt het oorspronkelijke zwartwitbeeld (luchtfoto Amsterdam) duidelijker en ‘net echt’.

In figuur 6.11 van een MRI-opname, is met valse kleuren een duidelijk beeld van de buikholte verkregen. Geschikt voor een anatomische atlas, afgezien van de kleuren is het beeld realistisch.



Figuur 6.11

Reflectieopdracht - Wat zit er nu in je hoofd?

In de eerste oriëntatieopdracht stond een schema dat je moest invullen en uitbreiden. Doe dat nu weer. Wordt je schema nu uitgebreider?!

Begrippen

Pixel
Grijswaarde
Resolutie
Helderheid
Contrast
Randversterking
Ruisonderdrukking
Valse kleuren

Samenvatting

- Een digitaal beeld is opgebouwd uit kleine egaal getinte rechthoekjes, pixels.
- Elke pixel bij een zwartwitbeeld is voorzien van een getal: de grijswaarde.
- Bij kleurenbeelden zijn er getallen voor rood, voor groen en voor blauw.
- Resolutie geeft aan hoeveel pixels een beeld bevat.
- Helderheid geeft aan hoe licht (of hoe donker) de pixels zijn
- Contrast is het verschil tussen licht en donker. Bij laag contrast is alles even grijs. Bij hoog contrast is de overgang van licht naar donker vrij abrupt.
- Beeldbewerking gebeurt door op de grijswaarde van elke pixel een bepaalde rekenbewerking toe te passen. Voorbeelden van beeldbewerkingen: randversterking, ruisonderdrukking, beeld vervagen of verscherpen en gebruik van valse kleuren.

Opgaven

§ 6.1

52 Hoe groot zijn pixels?

Een digitale kleurenfoto neemt zonder datacompressie een geheugenruimte in van 700 kilobyte. Neem aan dat voor elke pixel drie bytes nodig zijn. Op een computerscherm is de foto te zien. De afmetingen van een foto op een computerscherm zijn 23,5 bij 15,4 cm. NB: een kilobyte = 1024 bytes.

- Waardoor zijn bij kleurenfoto's in RGB drie bytes per pixel nodig?
- Bereken de oppervlakte van één pixel op het scherm.
- Bereken de lengte (of breedte) van één pixel.

Een CT-beeld heeft op het scherm een resolutie van 512×512 pixels. Op een computerscherm heeft het CT-beeld de afmetingen 20 cm bij 20 cm.

- Bereken de afmetingen van één pixel van dit CT-beeld.

53 Hoeveel megabyte?

Bij röntgenfoto's gebruikt men 12 bits per pixel.

- Leg uit hoeveel verschillende grijswaarden hierbij mogelijk zijn.

De foto heeft een resolutie van 2048×2048

- Bereken hoeveel megabytes geheugenruimte voor deze foto minstens nodig zijn.
- Hoeveel van die foto's kunnen maximaal op een dvd van 4.7 GB?

54 Lage resoluties

Voor beelden in de nucleaire diagnostiek en echografie worden lage resoluties gebruikt (256×256).

- Waardoor zijn hogere resoluties in de nucleaire diagnostiek niet nuttig?
- Waardoor zijn die hogere resoluties ook bij echografie niet nuttig?

55 Resolutie en helderheid

De resolutie van een digitale röntgenfoto is meestal groter dan die van een beeldscherm van een computer.

- Leg uit of het nog nut heeft om foto's met zo'n grote resolutie te maken.
- Wat moet men met de grijswaarden doen om de helderheid van een computerbeeld te vergroten?

56 Contrast

- Wat is het nadeel van een te klein contrast?
- Waardoor wordt het beeld van een röntgenfoto van de longen beter als je het contrast vergroot?
- Wat is het nadeel van een te groot contrast?

57 Het negatief van een beeld maken

Men wil van een zwart-wit foto het negatief maken, dat wil zeggen: zwart moet wit worden en omgekeerd.

Welke rekenbewerking moet men dan op elke pixel toepassen?

58 Ruisonderdrukking

In figuur 6.12 zijn 9 pixels getekend. De grijswaarde van elke pixel en de daarmee overeenstemmende grijs tint zijn aangegeven. Je kunt met rekenbewerkingen de grijswaarde van de middelste pixel veranderen.

- a. Waaraan kun je zien dat de grijswaarde van de middelste pixel waarschijnlijk door ruis is veroorzaakt?

Je werkt ruis weg door het gemiddelde te nemen. De grijswaarde van de middelste pixel wordt dan vervangen door het gemiddelde van de pixels.

- b. Leg met het gemiddelde van de 9 pixels uit welke grijs tint de pixel ongeveer krijgt.

Een andere manier is de mediaan te nemen.

- c. Leg met de mediaan van de 9 pixels uit welke grijs tint de pixel nu krijgt.

100	120	140
100	250	120
90	80	70

Figuur 6.12

59 Randdetectie en randvervaging

In figuur 6.13 is van een aantal pixels de grijswaarde gegeven.

240	240	240	120	120	120
240	240	240	120	120	120
240	240	240	120	120	120
240	240	240	120	120	120
240	240	240	120	120	120
240	240	240	120	120	120

Figuur 6.13

- a. Bereken de grijswaarde van de pixels A t/m D als je de rekenbewerking voor randdetectie toepast volgens de in de module aangegeven methode.
- b. Schets hoe figuur er na bewerking komt uit te zien.

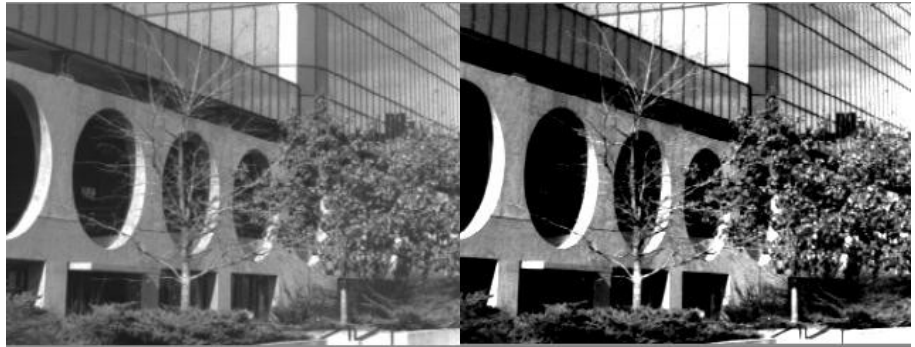
Door bij iedere pixel het gemiddelde te nemen van de pixel en de 8 omringende pixels vervaagt de rand.

- c. Bereken voor de pixels A t/m D de grijswaarde na bewerking.
- d. Schets hoe het beeld er na deze bewerking uitziet.

6o Welke bewerking?

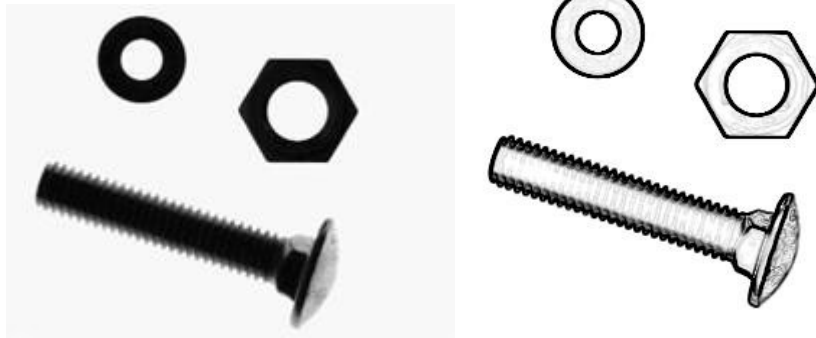
In de figuren 6.14, 6.15 en 6.16, is de linker figuur steeds het origineel, de rechter is bewerkt. Leg van elk paar uit welke bewerking mogelijk is toegepast.

a.



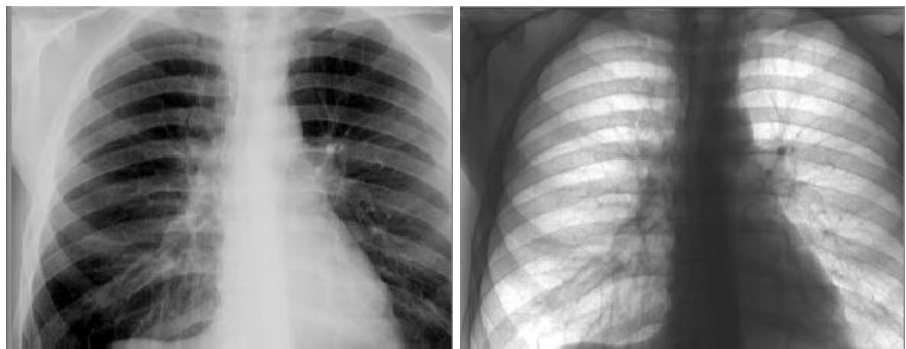
Figuur 6.14

b.



Figuur 6.15

c.



Figuur 6.16

7 Afsluiting

Eindopdrachten

Eindopdracht 1 - Wie hoort bij welke foto?

Voor haar opleiding tot laborant MBRT (Medisch Beeldvormende en Radiotherapeutische Technieken), loopt Margriet stage op de afdeling Medische Beeldvorming van het St. Barbara Ziekenhuis.

Ze moet hiervoor een verslag schrijven, waarin ze de verschillende technieken uitlegt aan de hand van 20 verschillende foto's. Margriet haalt deze stapel foto's op bij de archiefmedewerker. Elke foto zit in een map, waarop kort staat wat er met de betreffende patiënt aan de hand is.

Margriet heeft haast, kijkt niet goed uit en botst bovenaan de trap met een andere medewerker. De foto's glijden uit hun map.

Paniek! Is te achterhalen welke patiënt bij welke foto hoort?



Je vindt foto's en beschrijvingen op de [weblinkpagina](#).

Eindopdracht 2 - Applets

Voor deze module zijn uit de geweldige hoeveelheid informatie die internet biedt vooral applets erg leerzaam. Applets zijn simulaties, vaak interactief.

Medische beeldvorming

Op de volgende drie manieren kom je bij interessante applets over medische beeldvorming:



- [Physics 2000](#) -> 'Einstein's legacy' -> 'X-rays' en 'CAT scans'



- [Medical Imaging Pages](#) -> 'Radiology' (zeer uitvoerige info!) en 'Nuclear Medicine'

(Tip: als het niet lukt, lukt het zeker met de zoektermen 'applet' en 'medical images'.)

Bekijk de applets en beantwoord de volgende vragen

- Leg uit of deze applets hebben bijgedragen tot een betere kennis van het onderwerp.
- Leg uit welke applet je het beste vond.
- Leg uit welke applet je het minste vond.

Radioactiviteit

- Vind twee geschikte applets met de zoektermen 'applet' en 'radioactive'.
- Beantwoord dezelfde bovenstaande vragen, maar nu voor deze applets.

Eindopdracht 3 - ISP op school?

Er zijn bij dit onderwerp weinig proeven geschikt om op school uit te voeren. Je zult voor meer proeven buiten de school moeten kijken. Ongetwijfeld zijn er meer mogelijkheden op hbo-opleidingen (zie ook de opdracht MBRT: iets voor jou?) en in ziekenhuizen. Jij of je docent kunnen altijd deze instituten in de buurt benaderen.

- Geef twee redenen waarom veel van deze proeven niet geschikt zijn voor school.
- Waarom zijn in de regel hbo-opleidingen ‘eerder geneigd om je te helpen dan ziekenhuizen?

Maar zie! De Universiteit van Utrecht heeft een ‘Ioniserend Stralen Practicum’ (ISP) ontwikkeld. Er zijn twee mogelijkheden: studenten komen met een mobiel practicum op jullie school, of je groep gaat proeven op die universiteit uitvoeren.

Een en ander vereist uiteraard een uitgekiende organisatie.



Nadere informatie: [Ioniserende Stralen Practicum](#)

Je docent vertelt je hoe je deze opdracht gaat afronden.

Eindopdracht 4 - Op ziekenhuisbezoek

Sommige ziekenhuizen bieden excursies op de afdeling Medische Beeldvorming aan. Als zich in jouw buurt zo’n ziekenhuis bevindt, is dit uiteraard een uitgelezen kans om hier gebruik van te maken. Een paar punten die hier van belang zijn:

- Probeer er op informele wijze (via familielid of kennis die in dat ziekenhuis werkt) achter te komen of die mogelijkheid aanwezig is.
- Benader de geschikte contactpersoon (afdeling ‘Voorlichting’?) ruim van tevoren met het verzoek. Doe dit zo persoonlijk mogelijk, schriftelijk of telefonisch.
- Bereid met de klas de excursie voor, stel vast wat vragen op.

(PS Als een excursie onmogelijk is, is een interview met de betreffende persoon een alternatief. In dat geval is een lijstje met vragen vooraf uiteraard onmisbaar.) 4

Eindopdracht 5 - MBRT: iets voor jou?

De opleidingen tot laborant in de medische beeldvorming wordt verzorgd door de MBRT afdeling van hbo's.

Je gaat over deze opleidingen informatie verzamelen. Kies voor de manier waarop uit:

- een excursie naar een hbo-instelling in je buurt die deze opleiding aanbiedt
- een onderzoek van drie websites van deze instellingen.

Gebruik in beide gevallen in eerste instantie de zoekterm MBRT.

Maak van je excursie/onderzoek een verslag. Verwerk in je verslag (omvang ongeveer een A-4tje) in elk geval:

- Wat betekent de afkorting MBRT?
- Welke richtingen heb je in deze opleidingen?
- Welke richting je het meest aansprak en waarom dat juist deze richting is.
- Twee redenen voor jou om zo'n opleiding te kiezen. Twee redenen voor jou om zo'n opleiding niet te kiezen.

Bij onderzoek van websites:

- Geef twee overeenkomsten tussen die websites.
- Geef twee verschillen tussen die websites.
- Geef met argumenten aan welke website jou het meeste aansprak.

Eindsamenvatting

Röntgenfotografie

Röntgenstraling behoort tot de **elektromagnetische golven** met hoge frequentie.

Fotonen kun je je voorstellen als 'brokjes' stralingsenergie. De energie van een foton wordt bepaald door de frequentie: hoe groter de frequentie, hoe groter de energie.

Elektronen in het weefsel absorberen weinig röntgenfotonen, zodat röntgenstraling een groot doordringend vermogen heeft. Als elektronen röntgenstraling absorberen, treedt ionisatie op: röntgenstraling is dus **ioniserende straling**.

De hoeveelheid geabsorbeerde straling hangt af van het aantal elektronen per cm^3 .

Halveringsdikte is de dikte waarbij de helft van de straling wordt geabsorbeerd.

Voordelen röntgenfoto: goedkoop en snel.

Nadelen: stralingsdosis is potentieel gevaarlijk, soms structuren door elkaar, zachte weefsels zijn moeilijk te onderscheiden.

Nucleaire diagnostiek

Een atoom bestaat uit een positieve **kern** en negatieve **elektronen**.

De kern bestaat uit positieve **protonen** en **neutrale** neutronen. Bij een neutraal atoom zijn er evenveel protonen in de kern als elektronen buiten de kern.

De kern bevat bijna alle massa van het atoom.

Het **atoomnummer** Z geeft het aantal protonen in de kern aan en is bepalend voor de atoomsoort.

Het **massagetal** A geeft het totale aantal kerndeeltjes aan. Het aantal neutronen (N) volgt uit: $N = A - Z$.

Isotopen zijn atomen met hetzelfde aantal protonen, maar verschillend aantal neutronen.

Alfastraling bestaat uit kernen, heeft een grote ioniserende en dus schadelijke werking. Het doordringend vermogen is zeer klein.

Bètastraling bestaat uit snelle elektronen, die in de kern gevormd worden. Bètastraling heeft een groter doordringend vermogen en een tamelijk grote ioniserende werking.

Gammastraling bestaat uit fotonen met hoge energie. De ioniserende werking is zeer klein en het doordringend vermogen is zeer groot. Dat maakt gammastraling geschikt voor nucleaire diagnostiek: de schadelijke werking is klein en de straling is buiten het lichaam goed te detecteren.

In een **(kern)reactievergelijking** staat welke atoomkernen verdwijnen, welke ontstaan en welk(e) deeltje(s) uitgezonden of geabsorbeerd worden.

Bij een kernreactie blijven de som van de atoomnummers en van de massagetallen gelijk.

De **activiteit** is het aantal vervallen kernen per seconde. Eenheid: becquerel (Bq)

De **halveringstijd** is de tijd waarin de helft van het aantal atoomkernen verval.

De intensiteit van straling is gedefinieerd als het vermogen per oppervlak.

Eindsamenvatting (vervolg)

Hoe stabiel de atoomkern, des te langer is de halveringstijd en des te lager is de activiteit.

Een geschikte radioactieve stof moet (bijna) uitsluitend gammastraling uitzenden en een niet te lange of te korte halveringstijd hebben.

Voordelen: zeer bruikbaar bij opsporing van tumoren en afwijkingen in schildklier, bloedvaten en longen.

Nadelen: een gering risico door de radioactiviteit in het lichaam.

Stralingsbescherming

Blootgesteld worden aan straling: je ontvangt straling, maar komt niet in aanraking met de radioactieve stof.

Radioactieve besmetting: je bent in aanraking gekomen met een radioactieve stof. Er bestaat gevaar voor verspreiding van die stof.

Stralingsdosis is de geabsorbeerde stralingsenergie per kg bestraalde massa. Eenheid is de gray (Gy) = J/kg

Equivalentente dosis = dosis*weegfactor. Eenheid sievert (Sv) = J/kg.

De weegfactor hangt af van soort straling.

Bij medische beeldvorming varieert de dosis van 0,01 mSv tot ca 15 mSv.

Vergeleken met andere gezondheidsrisico's is het risico van de straling bij medische beeldvorming laag, maar men zal steeds de voordelen tegen de risico's moeten afwegen.

Er is altijd een hoeveelheid straling uit het heelal, uit de grond of de atmosfeer: de **achtergrondstraling**.

Beveiliging tegen straling: zo kort mogelijke tijd ondergaan, uit de buurt van de stralingsbron blijven en afscherming van de stralingsbron.

Met een **badge** meet men de opgelopen stralingsdosis om te controleren of deze niet te hoog geworden is.

Echografie

Bij echografie kaatst **ultrageluid** (zeer hoge frequentie) gedeeltelijk terug op grensvlakken tussen weefsels met verschillende dichtheid en geluidssnelheid.

Uit de tijd tussen uitgezonden en teruggekaatste geluidspulsen wordt de diepte van het grensvlak berekend en zo een beeld van organen gevormd.

Voordelen: geen gevaarlijke straling, goedkoop, snel en apparatuur is gemakkelijk te vervoeren.

Nadelen: niet geschikt voor longen en botten, beeld vrij lastig te lezen.

Eindsamenvatting (vervolg)

Het beeld

Een digitaal beeld bestaat uit kleine egaal gekleurde vierkantjes, **pixels**. Bij een zwart-witbeeld is elke pixel voorzien van een getal: de **grijswaarde**. Bij kleurenbeelden zijn er drie getallen: voor rood, groen en blauw. **Resolutie** geeft aan hoeveel pixels een beeld bevat (bijvoorbeeld: 512 x 512). **Helderheid** geeft aan hoe licht of donker getint de pixels zijn. **Contrast** is verschil tussen licht en donker. Bij laag contrast is alles vrijwel even grijs. Bij hoog contrast is de overgang van licht naar donker abrupt. Bij **beeldbewerking** past men op de grijswaarde van elke pixel een bepaalde rekenbewerking toe. Voorbeelden: randversterking, ruisonderdrukking, beeld vervagen of verscherpen en gebruik van valse kleuren.

Lichtsnelheid: $c = \lambda \cdot f$

Energie van foton: $E = h \cdot f$

Stralingsabsorptie: $I = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{x}{d_{\frac{1}{2}}}$

Essentieel: bij hoge frequentie (en dus kleine golflengte) hoort grote energie.

Activiteit: $A = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}$

Aantal atoomkernen: $N = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n$ met $n = \frac{t}{t_{\frac{1}{2}}}$

Verband tussen A en N : $A = -\frac{dN}{dt} =$

Stralingsdosis: $D = \frac{E}{m} = \frac{\text{geabsorbeerde energie}}{\text{bestraalde massa}}$.

Equivalente dosis: $H = w_R \cdot D,$

w_R is de weegfactor van de gebruikte stralingssoort

