natuurkunde in het kort

De complete bovenbouwstof

VWO

Erik van Munster

Disclaimer:
Bij het maken van *natuurkunde in het kort* is veel zorg besteed aan de juistheid en volledigheid maar helaas zijn vergissingen niet altijd te voorkomen. Raadpleeg daarom je eigen docent of de website van het centraal examen voor de juiste en actuele informatie. Auteur en uitgever kunnen niet verantwoordelijk worden gehouden voor enige onjuist verstrekte informatie in deze samenvatting.

***Je mag dit document gratis weggeven of doormailen aan vrienden en klasgenoten*.**

Commercieel gebruik is niet toegestaan. Het is niet toegestaan delen van dit document te kopiëren of om de inhoud en/of opmaak te wijzigen; Alleen het complete document mag doorgestuurd worden.

© natuurkundeuitgelegd.nl

Inhoud

Inleiding 4
A ALGEMEEN 5
B GOLVEN 9
1 Trillingen en Golven 9
2 Stralingssoorten en Toepassingen 15
C BEWEGING 22
1 Kracht en Beweging 22
2 Energie en Arbeid 27
3 Gravitatie en Cirkelbeweging 29
D ELEKTRICITEIT & VELDEN 32
1 Elektrische Schakelingen 32
2 Elektrische en Magnetische Velden 36
E MATERIE & STRALING 42
1 Eigenschappen van Materie* 42
2 Spectra 46
3 Kernen en Deeltjes** 49
F QUANTUMWERELD & RELATIVITEIT 53
1 Quantumwereld 53
2 Relativiteitstheorie** 56
G BIOFYSICA & GEOFYSICA 59
1 Biofysica** 59
2 Geofysica** 59
Index 60

**Dit onderdeel hoort niet bij het Centraal Examen.*

*** Kernen en Deeltjes, Relativiteitstheorie, Biofysica en Geofysica zijn keuzeonderwerpen. Je school kiest twee van deze vier onderwerpen als onderdeel van het schoolexamenprogramma. Informeer op jouw school voor meer informatie.*

Inleiding

Heb je de goede versie?

Van *Natuurkunde-in-het-kort* bestaat een HAVO en een VWO versie.

(Daarnaast bestaan er ook versies voor het oude examenprogramma. Deze heb je alleen nodig als je in de bovenbouw een keer bent blijven zitten en volgens het oude programma examen doet)

De examenstof

De examenstof bestaat uit 2 delen:

- Onderdelen die op het Centraal Examen (CE) gevraagd worden
- Onderwerpen die hier niet gevraagd worden en alleen in het schoolexamen (SE) gevraagd worden. Deze worden op de meeste scholen getoetst als onderdeel van het Programma van Toetsing en Afsluiting (PTA).

Als een onderdeel niet bij de centraal examenstof hoort heb ik dit aangegeven in de inhoudsopgave en in de tekst zelf.

Oefenen

Natuurkundetoetsen bestaan voor het overgrote deel uit opgaven waarin natuurkundige problemen opgelost moeten worden. De beste manier om je hierop voor te bereiden is dan ook het maken van opgaven. Hierdoor leer je welke problemen je tegen kunt komen en bouw je routine op. De beste oefenopgaven voor het centraal examen zijn examenopgaven van afgelopen jaren. Op *natuurkundeuitgelegd.nl* staat een handig overzicht van alle examenopgaven vanaf het jaar 2000, gesorteerd op onderwerp. Zo kun je per onderwerp altijd makkelijk de geschikte opgaven vinden.

Videolessen

Dit boek is een samenvatting en geen uitgebreide uitleg. Mocht je toch iets niet snappen dan kun je eens kijken of de videolessen op *natuurkundeuitgelegd.nl* iets voor je zijn. In korte filmpjes leg ik je alles rustig en duidelijk uit. Je kunt alles bekijken waar en wanneer je maar wilt.

Veel succes met je toets of examen!

Videolessen op natuurkundeuitgelegd.nl

Erik van Munster

A ALGEMEEN

Natuurkunde heet ook wel **fysica** en maakt onderdeel uit van de **natuurwetenschappen** net zoals biologie en scheikunde. Natuurkunde is onderverdeeld in onderdelen zoals mechanica, optica, elektriciteitsleer, atoomfysica, kernfysica. Er zijn twee stromingen:

- **Wetenschappelijk**: vergroting van natuurkundige kennis
- **Technisch**: toepassing van natuurkundige kennis

Experimentele natuurkunde probeert door het doen van waarnemingen kennis te vermeerderen. **Theoretische natuurkunde** probeert dit door berekeningen, wiskundige modellen en theorieën.

Iets wat gemeten kan worden en met een getal weergegeven kan worden heet een **grootheid**. Een grootheid wordt uitgedrukt in een **eenheid**. Dit is een afgesproken hoeveelheid. Zowel grootheden als eenheden worden afgekort met een **symbool**: meestal een hoofdletter, kleine letter of griekse letter. In het Système International (**SI**) bestaan 7 **basiseenheden** (BINAS tabel 3A):

- meter (m)
- kilogram (kg)
- seconde (s)
- ampère (A)
- kelvin (K)
- candela (cd)
- mol (mol)

Daarnaast bestaan er **afgeleide eenheden** (BINAS tabel 4) die zijn samengesteld uit de basiseenheden. M.b.v. formules kan herleid worden welke eenheid bij welke grootheid hoort. Sommige afgeleide eenheden hebben een aparte naam gekregen. $kg \cdot m \cdot s^{-2}$ wordt bijvoorbeeld Newton (N) genoemd. Ook in eenheden kunnen positieve of negatieve exponenten voorkomen bv $m \cdot s^{-2}$ (=meter per seconde kwadraat).

Oppervlakte van een **rechthoek** kan berekend worden uit de lengte en breedte. De eenheid volgt uit de berekening: [meter]*[meter] = m^2 ook wel **vierkante meter** genoemd.

$$A = l \cdot b$$

A = oppervlak (m^2)
l = lengte (m)
b = breedte (m)

Oppervlaktes van **cirkels** en een **bollen** kunnen berekend worden met:

$$A_{cirkel} = \pi \cdot r^2$$

A = oppervlak (m^2)
π = 3,14159265…
r = straal (m)

$$A_{bol} = 4\pi \cdot r^2$$

A = oppervlak (m^2)
π = 3,14159265…
r = straal (m)

Volume van een blok kan berekend worden uit lengte, breedte en hoogte. De eenheid wordt hier [m]*[m]*[m] = m^3, ook wel **kubieke meter** genoemd:

$$V_{blok} = l \cdot b \cdot h$$

V = volume (m^3)
l = lengte (m)
b = breedte (m)
h = hoogte (m)

Volume van een bol kan berekend worden met:

$$V_{bol} = \tfrac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$$

V = volume (m^3)
π = 3,14159265…
r = straal (m)

NB: Formules voor oppervlak en inhoud staan in BINAS (tabel 36B)

In de natuurwetenschap worden getallen genoteerd in **wetenschappelijke notatie**: Een getal gevolgd door een macht van 10. Bijvoorbeeld: 230 s wordt geschreven als $2{,}30 \cdot 10^2$ s.
Er worden zowel positieve (10^3 = 1000) als negatieve machten (10^{-3} = 1/1000 = 0,001) gebruikt. Invoeren in de rekenmachine kan met de [EXP] toets of de [2nd][EE] toets. Andere manieren kunnen leiden tot fouten. In de **standaardnotatie** heeft het getal voor de macht van 10 één cijfer voor de komma ongelijk aan 0.

Met de **orde van grootte** wordt de macht van 10 bedoeld zonder de factor die hiervoor staat. Twee getallen heten van dezelfde orde van grootte als ze niet meer dan een factor 10 schelen.

Om praktische redenen worden eenheden soms vooraf gegaan door **voorvoegsels** (milli, micro, mega), elk met een eigen afkorting (BINAS tabel 2).

Elk resultaat van een meting bevat **meetfouten**. Deze zijn te verdelen in 2 soorten:

- **Meetonzekerheid** zijn fouten ten gevolge van het schatten of een beperkte nauwkeurigheid van het meetinstrument. Bij ALLE meetinstrumenten, zelfs de meest nauwkeurige, is sprake van meetonzekerheid. Afwijking door meetonzekerheid worden ook wel **toevallige fouten** genoemd.
- **Systematische fouten** zijn fouten door bijvoorbeeld een foute ijking van een meetinstrument of het verkeerd gebruik ervan.

Bij natuurkundeopgaven wordt (tenzij dit wordt vermeld) ervan uitgegaan dat afwijkingen alleen aan meetonzekerheid te wijten zijn.

Er bestaan 3 manieren om meetonzekerheid in een getal aan te geven:

- Absoluut: 27 ± 2
- Procentueel: 340 ± 2%
- Zonder expliciete notatie: 345,6
  (hiermee wordt bedoeld dat de waarde tussen 345,55 en 345,65 ligt)

Het aantal **significante cijfers** in een getal is het aantal cijfers in een getal waarbij de nullen links niet meetellen. Na een berekening moet het antwoord worden **afgerond** op het juiste aantal significante cijfers. Regel is dat het resultaat wordt afgerond op kleinste aantal significante cijfers van de gebruikte gegevens.

Voor optellen/aftrekken gelden aparte regels: Het resultaat wordt afgerond op het kleinste aantal cijfers achter de komma van de gebruikte gegevens. De gegevens moeten vooraf in dezelfde eenheid en macht van 10 gezet zijn.

Omdat optellen en aftrekken niet veel voorkomen in natuurkundige formules wordt in de praktijk voornamelijk de 1e regel toegepast.

Waarnemingen kunnen **kwalitatief** (vergelijkend) of **kwantitatief** (metend) zijn. Kwantitatieve waarnemingen resulteren in een getal.

Bij metingen is een **onafhankelijke variabele** een grootheid die je zelf verandert. Een **afhankelijke variabele** is een grootheid die verandert ten gevolge van een verandering in de onafhankelijke variabele.

In een **tabel** staan meetwaarden in verticale kolommen. In de eerste kolom staat de onafhankelijke variabele. De volgorde is logisch (bijvoorbeeld regelmatig oplopend). De grootheid en de eenheid staan in de **kop** boven elke kolom.

Een **diagram** is een grafische weergave van meetwaarden in een assenstelsel. In de standaardvorm geldt:

- Assen staan loodrecht op elkaar
- Er is een roosterachtergrond
- De onafhankelijke variabele staat horizontaal
- Bij de assen staat de grootheid met de eenheid tussen haakjes erachter
- Er staat een pijltje bij de grootheid in de richting waarin de waarde toeneemt
- Langs elke as staat een logische, makkelijk af te lezen, schaalverdeling
- De nul staat links op de X-as en onderaan op de y-as. Als dit anders is moet dit duidelijk worden aangegeven
- Elk meetpunt is als een duidelijk punt weergegeven in het diagram
- Er is een vloeiende lijn getrokken. De punten hoeven NIET allemaal op deze lijn te liggen
- De naam van de vloeiende lijn in een diagram is **grafiek**. Een diagram kan meerdere grafieken bevatten

Interpoleren is bepalen van een waarde tussen twee meetpunten in. Dit kan door het aflezen van een grafiek of door een berekening. **Extrapoleren** is het bepalen van een waarde die buiten de reeks meetpunten ligt. Het **hellingsgetal** of de **helling** van een grafiek op een bepaald punt is de verhouding tussen de verandering van de grootheid op de y-as en de verandering van de grootheid op de x-as op dat punt. Hellingsgetal is een maat voor de steilheid van een grafiek: Hoe steiler de grafiek loopt hoe groter het hellingsgetal. Het **hellingspercentage** is het hellingsgetal uitgedrukt in een percentage (bv 40% i.p.v. 0,40).

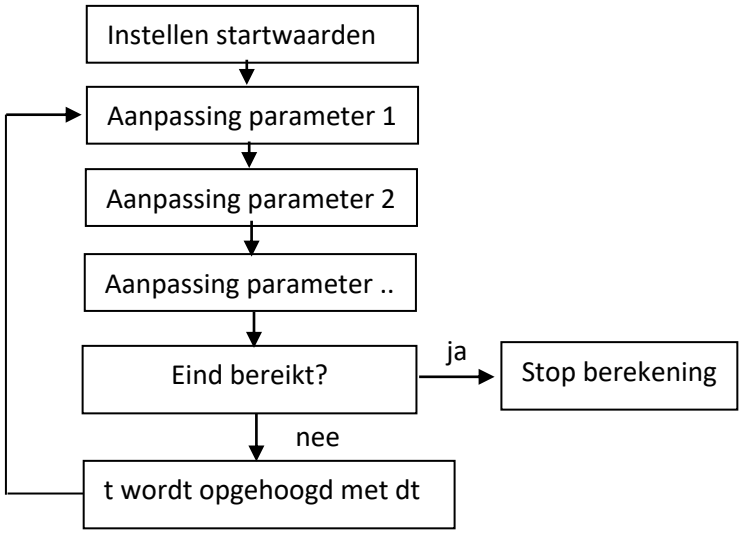
Twee grootheden, A en B, zijn **recht evenredig** met elkaar als geldt: als A n keer zo groot wordt, wordt ook B n keer zo groot De meest voorkomende verbanden zijn:

- Recht evenredig verband (B=constante * A)
- Omgekeerd evenredig verband (B = constante * 1/A)
- Kwadratisch verband (B = constante * A^2)
- Omgekeerd kwadratisch verband (B = constante * $1/A^2$)
- Wortelverband (B=constante*√A)

De in de formule voorkomende constante wordt de **evenredigheidsconstante** genoemd.

Een recht evenredig verband is te herkennen aan de grafiek: een rechte lijn door de oorsprong. De evenredigheidsconstante is gelijk aan het hellingsgetal van de grafiek. Met behulp van een **coördinatentransformatie** kunnen ook andere soorten verbanden geïdentificeerd worden. Als bijvoorbeeld een omgekeerd kwadratisch verband vermoed wordt, wordt een grafiek gemaakt met horizontaal ($1/A^2$) en verticaal B. Als de grafiek in deze situatie een rechte lijn door nul is, is het verband inderdaad omgekeerd kwadratisch evenredig.

Soms kunnen grootheden niet uitgerekend worden door het invullen van een formule omdat parameters niet constant zijn. In dit geval kan gebruik gemaakt worden van de **numerieke rekenmethode**: Berekeningen worden opgedeeld in kleine stapjes. Bij elk stapje worden de parameters die veranderen aan gepast waarna de rekencyclus opnieuw begint. Dit wordt een **numeriek model** of **rekenmodel** genoemd. Vaak wordt de tijd (t) opgedeeld in kleine stapjes, aangeduid met dt.



Voorbeeld:

modelregels	startwaarden
1 F:=m*g	m=2,0
2 a:=F/m	g=9,81
3 dv:=a*dt	y=100
4 v:=v+dv	v=0
5 dy:=v*dt	t=0
6 y:=y-dy	dt=0,01
7 if y<0 stop	
8 t:=t+dt	

Model van vallend voorwerp

Hoe kleiner dt is hoe nauwkeuriger de berekeningen de werkelijkheid benaderen maar ook hoe langer de berekening duurt; er zijn immers dan ook meer rekencycli nodig. Vaak worden wel duizenden rekenstappen gemaakt voor een berekening. Een op scholen veel gebruikt programma hiervoor is **Coach**, maar ook met bv **Excel** en een grafische rekenmachine zijn dergelijke berekeningen te doen. Meer over modellen? Kijk op natuurkundeuitgelegd.nl/modelleren

---

Bij het doen van een meting wordt deze opgeschreven. Doel hiervan is het later kunnen nakijken en het communiceren met anderen. Op school wordt dit gedaan in de vorm van een **verslag**, onder wetenschappers in de vorm van een **wetenschappelijk artikel**. Een verslag of wetenschappelijk artikel bevat altijd de volgende onderdelen:

Een duidelijke **titel** die beschrijft waar het onderzoek over gaat.
Een **inleiding** met daarin:

- Uitleg van de belangrijkste onderwerpen in het artikel.
- De reden waarom het onderzoek gedaan is
- Een **hypothese** (verwachting over de uitkomst)

Een beschrijving van de gebruikte **materialen en methoden**
De **resultaten** van het onderzoek, vaak in de vorm van een tabel of grafiek.
De **conclusie** die uit de resultaten getrokken wordt, vaak gevolgd door een **discussie**.
Aan het eind staat een lijst met gebruikte externe **bronnen** (boeken, andere artikelen etc…)

Bij VWO examens natuurkunde mag gebruik worden gemaakt van het **BINAS informatieboek HAVO/VWO 6e editie**. Voor natuurkunde zijn de roze (algemeen) en blauwe gedeelten

(natuurkunde) van belang. De gegevens staan op onderwerp gegroepeerd. Ook de meest gebruikte formules zijn terug te vinden. Om het opzoeken te vergemakkelijken staat voorin een inhoudsopgave en achterin een index.
Ook mag op het examen een **wetenschappelijk calculator** gebruikt worden (een rekenmachine met sin, cos, tan en wetenschappelijk notatie etc.). Een **grafische** rekenmachine is niet toegestaan bij het natuurkunde-examen.

Let op: oudere edities van BINAS zijn niet toegestaan bij het examen.

Op zoek naar voorbeeldopgaven?
In de app van deze samenvatting vind je meer dan 100 voorbeeldvragen.
Ideaal om checken of je alles écht snapt.

Installeer gratis via natuurkundeuitgelegd.nl/samenvatting

B GOLVEN

Dit onderdeel gaat over wat golven en hun belangrijkste eigenschappen maar ook over licht en andere vormen van elektromagnetische straling. Licht is namelijk ook een golfverschijnsel. Ook enkele belangrijke toepassingen van golven, zoals het overzenden van informatie met radiogolven en medische toepassingen worden behandeld.

1 Trillingen en Golven

Een **periodieke** beweging rond een **evenwichtsstand** wordt een **trilling** genoemd.
De **uitwijking** is de positie ten opzichte van de evenwichtsstand. Tijdens een trilling verandert de uitwijking doorlopend: De uitwijking is afwisselend positief en negatief. De maximale uitwijking tijdens een trilling wordt de **amplitude** genoemd. Amplitude heeft altijd een positieve waarde.

De tijdsduur waarin de de gehele beweging éénmaal doorlopen wordt heet de **trillingstijd** of **periode. Frequentie** is het aantal trilling in één seconde. De eenheid van frequentie is de **Hertz (Hz)**

$$f = \frac{1}{T}$$

f=frequentie (Hz)
T=trillingstijd (s)

In een (uitwijkings,tijd)-diagram of (u,t)-diagram is de beweging af te lezen.

Een trilling waarbij de amplitude afneemt in de loop van de tijd wordt een **gedempte trilling** genoemd.

Voorbeelden van (u,t)-diagrammen in de praktijk:

In een **elektro-cardiogram** (ECG) worden de elektrische spanninkjes die in het hart worden opgewekt tijdens het kloppen gemeten en continue op een scherm of op papier bijgehouden. Onregelmatigheden en hartritmestoornissen kunnen zo worden opgespoord.

In een **seismogram** worden kleine bewegingen van het aardoppervlak zichtbaar gemaakt en geregistreerd.
Een **oscilloscoop** is een apparaat dat op een schermpje de elektrische spanning als functie van de tijd laat zien. Ook extreem snelle trillingen kunnen zichtbaar gemaakt worden. Door bv een **microfoon** aan te sluiten op een oscilloscoop kunnen geluidstrillingen zichtbaar gemaakt worden. Met twee knoppen kunnen de **tijdbasis** (horizontaal) en de **gevoeligheid** (verticaal) ingesteld worden. Ook een computer kan als oscilloscoop gebruikt worden.

Bij een periodieke beweging kun je aangeven hoeveel hele periodes er al doorlopen zijn en ook op welk punt in de periode de beweging zich bevindt. Dit heet de **fase** van de beweging (symbool: φ). Elke geheel doorlopen periode telt als 1. De fase neemt dus continu toe. Fase heeft geen eenheid. Fase kan berekend worden met:

$$\varphi = \frac{t}{T}$$

φ=fase
t=tijd (s)
T=trillingstijd (s)

Gereduceerde fase (symbool: φ_r) is alleen het deel van de laatst begonnen periode. Gereduceerde fase kan uit de fase bepaald worden door alle héle periodes ervan af te trekken. De gereduceerde fase ligt altijd tussen 0 en 1.

Het **faseverschil** (symbool: Δφ) is het verschil in fase tussen twee momenten. Faseverschil is te berekenen met:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta t}{T}$$

Δφ=faseverschil
Δt=tijdverschil (s)
T=trillingstijd (s)

Een **harmonische trilling** heeft de volgende eigenschappen:

1) Het (u,t)-diagram is sinusvormig.
2) De kracht waarmee iets teruggeduwd wordt naar de evenwichtsstand is rechtevenredig met de uitwijking. In formulevorm:

$$F(t)=-C\cdot u(t)$$

F(t)=kracht(N)
C=(veer)constante (N/m)
u(t)=uitwijking (m)

Een voorbeeld van een harmonische trilling is een **massa-veersysteem** (een massa hangend aan een veer die op en neer kan trillen). Trillingstijd kan berekend worden met:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{C}}$$

T=trillingstijd(s)
m=massa (kg)
C=veerconstante(N/m)

De **veerconstante** in deze formule geeft het verband tussen de kracht waarmee aan een veer getrokken wordt en hoeveel de veer hierdoor uitrekt. Hoe stugger een veer hoe groter C. C kan berekend worden met:

$$C = \frac{F}{u}$$

C=veerconstante (N/m)
F=kracht(N)

u=uitrekking(m)

De uitwijking als functie van de tijd bij een **harmonische** trilling kan beschreven worden als:

$$u(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

u=uitwijking(m)
A=amplitude (m)
f=frequentie (Hz)
t=tijd(s)

Tijdens een trilling worden verschillende energiesoorten doorlopend in elkaar omgezet. Afhankelijk van het soort trilling kan dit veerenergie (E_{veer}), zwaarte-energie (E_z of E_{pot}), en kinetische energie (E_{kin}) zijn. De hoeveelheid energie die tijdens een trilling wordt omgezet heet de **trillingsenergie**. Als we aannemen dat in de evenwichtsstand alle trillingsenergie is omgezet in kinetische energie volgt voor de maximale snelheid tijdens een harmonische trilling:

$$v_{max} = \frac{2\pi A}{T}$$

v_{max}=maximum snelheid(m/s)
A=amplitude(m)
T=trillingstijd(s)

De trilling die een systeem uitvoert als er geen invloed meer van buitenaf is (behalve een 'zetje') heet de **eigentrilling**. De frequentie waarmee dit gebeurt heeft de **eigenfrequentie** (f_{eigen}).

Een beweging waarbij een systeem continu in een periodieke beweging gehouden wordt door een kracht van buitenaf wordt een **gedwongen trilling** genoemd. De frequentie waarmee dit gebeurt heet de **aandrijffrequentie**. De mate waarin een systeem mee gaat trillen hangt af van het verschil tussen de aandrijffrequentie en de eigenfrequentie:

$f_{aandrijf} << f_{eigen}$	Het systeem beweegt met $f_{aandrijf}$
$f_{aandrijf} = f_{eigen}$	Het systeem gaat meebewegen met een steeds groter wordende amplitude. Dit kan uiteindelijk zelf uit de hand lopen. Dit wordt **resonantie** genoemd.
$f_{aandrijf} >> f_{eigen}$:	Het systeem beweegt helemaal niet mee.

Een trilling kan aan de omgeving worden doorgegeven. Het zich verplaatsen van een trilling leidt tot **golfverschijnselen** of **golven**.

Een **lopende golf** is een trilling die zich continu voortplant. Als elk individueel punt een trilling uitvoert loodrecht op de voortplantingsrichting heet de golf **transversaal**. Een voorbeeld hiervan is een golf die zich door een koord of snaar voortplant. Als elk individueel punt een trilling uitvoert in de voortplantingsrichting heet de golf **longitudinaal.** Een voorbeeld zijn geluidstrillingen.

Golflengte is de afstand van een punt tot het eerstvolgende punt in dezelfde fase van een trilling. De snelheid waarmee een bepaalde fase van een golf zich beweegt heet de **voortplantingsnelheid** of **golfsnelheid:**

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

λ=golflengte (m)
v=golfsnelheid (m/s)
T=trillingstijd (s)

Het faseverschil tussen twee punten in een golf kan berekend worden met:

$$\Delta\varphi = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Δφ=faseverschil
Δx=weglengteverschil (m)
λ=golflengte (m)

Geluid plant zich voort vanaf een **geluidsbron**. Als de beweging van de geluidsbron een harmonische trilling uitvoert heet de resulterende toon een **zuivere toon**. Een zuiver toon heeft één bepaalde frequentie en een sinusvormige golfvorm.

Geluid heeft een **medium** nodig om zich in voort te planten. Dit kan een gas, vloeistof of vaste stof zijn. De voortplantingsnelheid is voor alle frequenties en amplitudes gelijk.

Alleen geluid met een frequentie tussen de 20 Hz (**onderste gehoorgrens**) en de 20 kHz (**bovenste gehoorgrens**) is voor mensen hoorbaar.

Geluidsdrukniveau is de grootheid die weergeeft hoe hard een geluid is (eenheid: decibel dB). Dit heeft een logaritmische schaal: Bij verdubbeling van de sterkte van het geluid neemt het geluidsdrukniveau met 3 dB toe. Bij verdubbeling van de afstand tot de bron neemt de geluidsdrukniveau met 6 dB af.

Het zwakste geluidsdrukniveau wat nog hoorbaar is heet de **gehoordrempel**. De gehoordrempel hangt van de frequentie af.

Het verschijnsel dat verschillende golven elkaar beïnvloeden als er sprake is van meer dan één trillingsbron in hetzelfde medium heet **interferentie**.

Als de golven afkomstig van verschillende bronnen op een bepaald punt altijd met elkaar in fase zijn, versterken de golven elkaar. Dit verschijnsel heet **constructieve interferentie.** Een punt waar dit gebeurt heet een **buikpunt** of **buik**. Verschillende buiken op een lijn heten een **buiklijn**. In dit geval geldt voor het fase verschil: Δφ = 0,1,2,3...

Als de golven afkomstig van verschillende bronnen op een bepaald punt altijd met elkaar in tegenfase zijn, verzwakken de golven elkaar of ze doven elkaar zelfs helemaal uit. Dit verschijnsel heet **destructieve interferentie**. Een punt waar dit gebeurd heet een **knooppunt** of **knoop**. Verschillende **knopen** op een lijn heten een **knooplijn**. In dit geval geldt voor het faseverschil: Δφ = ½, 1½, 2½,...

Storend geluid van een geluidsbron kan bestreden worden met **antigeluid**. Geluid met dezelfde frequentie maar een zodanige fase dat op de gewenste plaatsen knopen ontstaan.

Snaarinstrumenten zijn muziekinstrumenten waarbij de trillingsbron een snaar is (bv piano, gitaar, viool). Een gespannen snaar kan in trilling gebracht worden. De voortplantingssnelheid van de golf in een snaar is afhankelijk van de massa en de spanning in de snaar. Als gevolg van interferentie tussen de zich voortplantende lopende golf en de aan de uiteinde gereflecteerde lopende golf ontstaan **staande golven**. In een staande golf blijven knopen en buiken op dezelfde plaats in de snaar. Omdat de uiteinden niet bewegen en dus altijd knopen zijn past er altijd een geheel aantal halve golflengtes op de lengte van een snaar.
Er geldt dus:

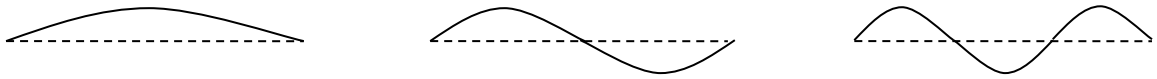
$$l = n \cdot \tfrac{1}{2} \cdot \lambda$$

l=snaarlengte (m)
n=1,2,3...
λ=golflengte (m)

voor de frequenties geldt:

$$f = n \cdot \frac{v}{2l}$$

f=frequentie (Hz)
n=1,2,3...
v=golfsnelheid (m/s)
l=snaarlengte (m)



n=1 n=2 n=3

De frequentie met n=1 is de laagste toon die de snaar kan voortbrengen. Dit heet de **grondtoon**. De frequenties met n=2,3,4,… worden **boventonen** of **harmonischen** genoemd. In de praktijk is de toon die een snaar voortbrengt een combinatie van de grondtoon met meerdere boventonen.

Een **blaasinstrument** bestaat uit een buis met een kolom lucht. Welke toon ontstaat wordt niet bepaald door de trillingsbron (meestal een riet of je lippen) maar door het meetrillen van de luchtkolom. Als gevolg van interferentie tussen de zich voortplantende lopende golf en de aan de uiteinde gereflecteerde lopende golf ontstaan **staande golven**. Door de interferentie ontstaan in de luchtkolom knopen en buiken. Aan de open zijden van een buis ontstaat altijd een **buik** aan een gesloten zijde altijd een **knoop**.

Er zijn meerdere mogelijkheden:

Een buis met twee open uiteinden:
Net als bij een snaar past er een geheel aantal halve golflengtes in de buis:

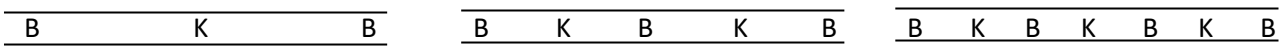
$$l = n \cdot \tfrac{1}{2} \cdot \lambda$$

l=lengte van de luchtkolom (m)
n=1,2,3...
λ=golflengte (m)

Voor de frequentie van de grondtoon en de boventonen geldt:

$$f = n \cdot \frac{v}{2l}$$

f=frequentie (Hz)
n=1,2,3...
v=golfsnelheid (m/s)
l=lengte van de luchtkolom (m)



n=1 n=2 n=3

Een buis met één open en één gesloten uiteinde:
Omdat altijd één kant een knoop is en één kant een buik geldt:

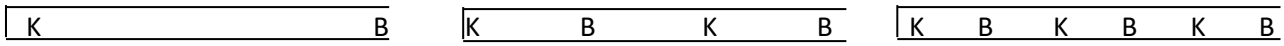
$$l = (2n-1) \cdot \tfrac{1}{4} \cdot \lambda$$

l=lengte van de luchtkolom (m)
n=1,2,3...
λ=golflengte (m)

Voor de frequentie van de grondtoon en de boventonen geldt:

$$f = (2n-1) \cdot \frac{v}{4l}$$

f=frequentie (Hz)
n=1,2,3...
v=golfsnelheid (m/s)
l=lengte van de luchtkolom (m)



n=1 n=2 n=3

Bij blaasinstrumenten kan de toonhoogte veranderd worden door de lengte van de buis te veranderen. Dit kan door de buis met een schuif langer of korter te maken (trombone), door kleppen of gaten in de buis (blokfluit, klarinet, saxofoon, dwarsfluit), of door een systeem met ventielen waarbij de luchtkolom steeds een omweggetje maakt (trompet, hoorn). Ook kan het instrument uit meerdere buizen bestaan met allemaal een andere lengte (kerkorgel, panfluit).

Het onderwerpen Informatieoverdracht, modulatie en digitale signalen horen vanaf 2020 niet meer bij de CE-stof.

Informatieoverdracht is het overzenden van informatie van de ene plaats naar de andere. Hiervoor worden vaak radiogolven gebruikt. Voorbeelden hiervan zijn radio- en TV-zenders, mobiele telefonie, WIFI, etc.. De **voortplantingssnelheid** van radiogolven is gelijk aan de lichtsnelheid (BINAS tabel 7). Radiogolven dragen het verst bij hoge frequenties en dus kortere golflengtes. Typisch worden radiogolven van 100 kHz tot 10 GHz gebruikt.

Om signalen door te geven moet een frequentie zijn afgesproken tussen zender en ontvanger. De zender zendt bij deze frequentie uit en de ontvanger registreert alleen die radiogolven die deze frequentie hebben. In plaats van frequentie wordt ook wel over **kanaal** gesproken: Iedere zend-ontvanger combinatie zit op zijn eigen kanaal.

De golf waarmee de informatie wordt verzonden wordt de **draaggolf** genoemd. Het uit te zenden signaal moet in de frequentie van deze draaggolf verzonden worden. Om het te versturen signaal met de draaggolffrequentie uit te zenden moet het signaal in de draaggolf worden meegezonden. Dit wordt **moduleren** genoemd. Hier bestaan verschillende technieken voor:

Bij **amplitudemodulatie** (AM) wordt de amplitude van de draaggolf gevarieerd met het door te geven signaal.
Bij **frequentiemodulatie** (FM) wordt de frequentie van de draaggolf aangepast volgens het uit te zenden signaal.

Een draaggolf kan een andere draaggolf in de weg zitten als de draaggolffrequenties te dicht bij elkaar liggen. De **kanaalscheiding** is in dit geval niet goed. Het minimale verschil wat nodig is tussen twee draaggolffrequenties om elkaar niet in de weg te zitten hangt af van het signaal wat doorgezonden wordt.

Voor het frequentiegebied wat in beslag wordt genomen door een draaggolf geldt bij amplitudemodulatie:

Ondergrens: $f_{draaggolf} - f_{signaal}$
Bovengrens: $f_{draaggolg} + f_{signaal}$

Let op: Deze formule staat niet in BINAS

Een andere zender mag niet in dit frequentiegebied uitzenden om door elkaar heen lopen van signalen te voorkomen. De grootte van het in beslag genomen frequentiegebied wordt de **bandbreedte** genoemd. Hoe groter de frequentie van het door te geven signaal, hoe groter de benodigde bandbreedte en hoe eerder anderen last zullen hebben van de in beslag genomen

frequenties. Over de te gebruiken draaggolffrequenties en bandbreedtes zijn nationaal en internationaal afspraken gemaakt om te voorkomen dat zenders elkaar in de weg zitten.

Een signaal kan ook als **digitaal signaal** worden doorgegeven. Hiervoor moet het signaal eerst gedigitaliseerd worden. Op regelmatige tijden wordt de hoogte van het signaal gemeten en omgezet in een digitaal getal. Dit meten van het signaal heet **bemonsteren** of (in het engels) **sampling**. De frequentie waarmee wordt gesampled heet de **bemonsteringsfrequentie** of **samplefrequentie**.

Hoe groter de bemonsteringsfrequentie hoe nauwkeurig het signaal wordt weergegeven. De digitale muziek op een CD heeft bijvoorbeeld een bemonsteringsfrequentie van 44,1 kHz.

De bij bemonstering gemeten digitale getallen zijn opgebouwd uit enen en nullen (“1” en “0”). Een enkele één of nul wordt een **bit** genoemd. Hoe meer bits een getal bevat hoe nauwkeurig een bemonstering. Bij een CD bestaan de getallen uit 16 bits.

Bij informatieoverdracht van een digitale informatie is altijd sprake van het ontvangen of verzenden van een stroom bits (enen en nullen). Het aantal bits wat per seconde wordt verzonden of ontvangen heet de **bitrate**. Hoe complexer de overgedragen informatie hoe groter de benodigde bitrate.

Digitale informatieoverdracht vindt eigenlijk overal plaats waarbij iets met digitale informatie gedaan wordt: van het laden van een website in een browser, het openen van een bestand van een harde schijf, het bekijken van een filmpje op YouTube. Zelfs bij het bewegen van je muis wordt digitale informatie doorgegeven.

2 Stralingssoorten en Toepassingen

Licht is, net zoals geluid, op te vatten als een golf. De kleur van licht is direct gerelateerd aan de **golflengte** en de **frequentie** van de golf. Licht van één golflengte heet **monochromatisch**. Er geldt:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ=golflengte (m)
c=lichtsnelheid (m/s)
f=frequentie (Hz)

De snelheid van het licht c is afhankelijk van het medium. In vacuüm is de snelheid het grootst ($c=2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s, BINAS tabel 7). In andere doorzichtige stoffen is de lichtsnelheid altijd lager. Hoeveel lager hangt af van de stof.

Licht is een vorm van **elektromagnetische straling**. Ook radiostraling, IR, UV, magnetronstraling, röntgenstraling en gammastraling zijn vormen van elektromagnetische straling (zie BINAS 19B). Deze straling heeft altijd dezelfde voortplantingssnelheid (in vacuüm). De frequentie bepaalt om wat voor soort straling het gaat. Als er van de golflengte van een bepaalde soort straling wordt gesproken gaat het normaal gesproken om de golflengte in vacuüm. Elektromagnetische straling is een **transversale golf** waarbij de magnetische veldsterkte en de elektrische veldsterkte steeds loodrecht op elkaar staan.

De verschillende soorten elektromagnetische straling hebben elk hun eigen eigenschappen:

<u>Radiostraling</u> wordt opgewekt door met een vaste hoge frequentie spanning op een antenne te zetten. Deze frequentie wordt de **draaggolf** genoemd. Elke zender heeft zijn eigen draaggolf. Een ontvanger wordt afgestemd op de frequentie van een draaggolf. Door kleine variaties in de draaggolf kan informatie (bv geluid) worden verzonden.

Magnetronstraling wordt opgewekt met een zeer hoge frequentie die precies is afgestemd op de eigenfrequentie van watermoleculen. Als de straling wordt opgevangen door een watermolecuul wordt dit in trilling gebracht waardoor de temperatuur (=kinetische energie!) stijgt.

Infraroodstraling wordt uitgezonden door warme voorwerpen. In tegenstelling tot radiostraling is frequentie van infraroodstraling is te groot om elektronisch te kunnen 'maken'.

Zichtbaar licht wordt uitgestraald bij temperaturen van duizenden Kelvin. Dit gebeurt bv in een gloeilamp. Het spectrum van de uitgezonden straling wordt bepaald door de temperatuur. Uit het spectrum kan ook de temperatuur gemeten worden (BINAS tabel 22). Een **laser** is een lichtbron die monochromatisch licht in een nauwe bundel uitzendt. Laserlicht is **coherent**: De uitgezonden golfen vormen een lange regelmatige golf. Dit in tegenstelling tot bv gloeilamplicht wat bestaat uit een zeer groot aantal korte 'pakketjes golf' die geen onderling verband hebben.

Ultraviolet wordt o.a. door de zon uitgezonden en zorgt voor het bruin worden van de huid. Ultraviolet is gevaarlijk (huidkanker).

Röntgenstraling wordt opgewekt in een röntgenbuis. De straling dringt diep in voorwerpen door die voor zichtbaar licht niet doorzichtig zijn. Het wordt o.a. gebruikt in ziekenhuizen en in de beveiliging op vliegvelden.

Gammastraling komt vrij bij verval van radioactieve instabiele atoomkernen en kan gevaarlijk zijn als het direct op het lichaam valt. De straling wordt gebruikt voor het steriliseren van voedsel.

Wat er gebeurt als elektromagnetische straling op een materiaal valt hangt af van de golflengte van de straling en van het materiaal. Straling kan o.a. worden

- Doorgelaten (**transmissie**)
- Geabsorbeerd (**absorptie**)
- Teruggekaatst(**reflectie**)

Bij glas wordt licht bijvoorbeeld doorgelaten maar wordt UV-straling geabsorbeerd. **Absorptie** betekent dat de energie van de straling wordt omgezet in warmte in het materiaal en de straling in feite verdwijnt.

Straling kan ook gedeeltelijk worden geabsorbeerd: Een deel van de straling blijft over en gaat door het materiaal heen. Of en in welke mate dit gebeurt hangt ook weer af van de golflengte van de straling en de eigenschappen van het materiaal.

De intensiteit van de straling die door een voorwerp heen valt hangt o.a. af van de **halveringsdikte** of **halfwaardedikte** en kan worden berekend met:

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

I(x)=Intensiteit op diepte x
I_0=Intensiteit van de opvallende straling
x=diepte in materiaal (m)
$d_{1/2}$=halveringsdikte (m)

Voor röntgen- en gammastraling staat de halveringsdikte van verschillende materialen in BINAS tabel 28F. Het verschil in halveringsdikte tussen bot en wekere delen van het menselijk lichaam (feitelijk water) is de basis van het maken van **röntgenfoto's**. Röntgenstraling komt slechter door bot heen en geeft bij een röntgenfoto een lagere intensiteit dan wekere delen.

Bij een **CT**-scan of **CAT**-scan (Computer Aided Tomography) worden meerdere röntgenfoto's onder verschillende hoeken gemaakt. Een computer bouwt vervolgens op basis van deze verschillende opnames een 3D beeld op van het binnenste van het lichaam.

Begin 20e eeuw is door Max Planck ontdekt dat licht en andere soorten elektromagnetische straling zich niet alleen als golf gedragen maar dat ze ook te beschouwen zijn als een stroom energiepakketjes: **fotonen**. Elk foton heeft een energie die bepaald wordt door de frequentie van de elektromagnetische straling:

$$E_{foton} = h \cdot f$$

E_{foton}=energie per foton (J)
h=constante van Planck (BINAS tabel 7)
f=frequentie (Hz)

Om praktisch redenen wordt de energie per foton meestal niet weergegeven in Joules maar in elektronvolt (eV). 1 eV=$1{,}6022 \cdot 10^{-19}$J

Röntgen- en gammastraling zijn zó energierijk (d.w.z. de fotonen bevatten zoveel energie) dat de straling in staat is de lucht waar de straling doorheen gaat te ioniseren. In plaats van neutraal worden luchtmoleculen door de straling gesplitst in positieve ionen en losse elektronen. Lucht (en andere gassen) worden hierdoor tijdelijk geleidend. Deze straling wordt dan ook **ioniserende straling** genoemd.

Ook andere straling, afkomstig van natuurlijk voorkomende stoffen blijkt in staat te zijn lucht te ioniseren. Deze stoffen worden **radioactieve** stoffen genoemd.

Er zijn 4 soorten ioniserende straling:

Röntgenstraling (engels: X-rays) Elektromagnetische straling met golflengtes tussen 10^{-9}m tot 10^{-11}m
α-straling: straling bestaat uit deeltjes: heliumkernen
β-straling: Straling bestaat uit deeltjes: elektronen
γ-straling: Elektromagnetische straling met golflengtes tussen 10^{-11}m tot 10^{-15} m

---

α-straling, β-straling en γ-straling zijn afkomstig uit de kernen van atomen. Een atoom bestaat uit een extreem kleine positief geladen **atoomkern** met hieromheen een schil van negatief geladen elektronen.

De kern is opgebouwd uit één of meerdere **nucleonen** of kerndeeltjes. Er bestaan 2 soorten:

- **Protonen** zijn positief geladen deeltjes met massa 1 u (afgerond)
- **Neutronen** ongeladen deeltjes met massa 1 u (afgerond)

De massa van de elektronen is verwaarloosbaar. Feitelijk zit alle massa van een atoom dus samengebald in een extreem kleine kern.

Het aantal protonen en daarmee de lading van de kern bepaalt de eigenschappen van een atoom. Het atoomnummer in het **periodiek systeem der elementen** (BINAS tabel 99) is het aantal protonen in de kern. Waterstof (H) heeft nummer 1, Helium (He) heeft nummer 2 etc..

Het aantal neutronen in een kern heeft invloed op de massa van een kern maar niet op de eigenschappen van het atoom. Een koolstofatoom blijft een koolstofatoom ook als er meer of minder neutronen in de kern zitten.
Atomen van dezelfde soort maar met verschillend aantal neutronen in de kern worden **isotopen** van elkaar genoemd. Van de meeste atoomsoorten bestaan meerdere isotopen (BINAS tabel 25A).

Een atoomkern wordt met de volgende notatie beschreven:

$$^{massagetal}_{ladingsgetal}symbool$$

Het **massagetal** (symbool: A) is het totaal aantal nucleonen, dus protonen+neutronen.
Het **ladingsgetal** (symbool: Z) is het aantal protonen, dus de lading. Ladingsgetal is hetzelfde als het atoomnummer.

Bijvoorbeeld: $^{110}_{48}Cd$ betekent een Cadmiumkern met 110 nucleonen waarvan 48 protonen. De rest (62) zijn dus neutronen.

Uit het feit dat het cadmium is weet je eigenlijk al dat er 48 protonen in de kern zitten. Dit getal hoeft er dus niet perse bij de staan. Vaak wordt het dan ook geschreven als "cadmium-110"

Veel isotopen zijn instabiel. Na verloop van tijd **vervallen** ze. Dit betekent dat ze spontaan veranderen in een andere stof en hierbij (meestal) een stralingsdeeltje uitzenden. Dit kan op een aantal verschillende manieren gebeuren. In BINAS (tabel 25A) staat op welke manier ze vervallen:

α-verval: Hierbij wordt een α-deeltje (=2 neutronen en 2 protonen) de kern uitgestoten.
Voorbeeld: $^{214}_{84}Po \rightarrow ^{210}_{82}Pb + ^{4}_{2}\alpha$

β-verval: Hierbij verandert in de kern een neutron in een proton en wordt een elektron uitgestoten.
Voorbeeld: $^{40}_{19}K \rightarrow ^{40}_{20}Ca + ^{0}_{-1}\beta$

β^+-verval: Hierbij verandert in de kern een proton in een neutron. Het uitgezonden deeltje is een positron (het omgekeerde van een elektron). Meestal verdwijnt het positron snel na het uitzenden als het op een elektron botst en verdwijnt.
Voorbeeld: $^{22}_{11}Na \rightarrow ^{22}_{10}Ne + ^{0}_{1}\beta^+$

γ-verval: Hierbij verandert een instabiele kern in een stabiele kern en wordt het energieverschil gecompenseerd door het uitzenden van een γ-foton (=een gammadeeltje). Een instabiele kern heet een **metastabiele kern** (notatie: 'm' bij het massagetal). Dit wordt ook wel een i**someer** genoemd
Voorbeeld: $^{99m}_{43}Tc \rightarrow ^{99}_{43}Tc + ^{0}_{0}\gamma$

K-vangst: Hierbij wordt een elektron uit de schil die het dichtst bij de kern ligt (de K-schil) ingevangen en verandert in de kern een proton in een neutron.
Voorbeeld: $^{109}_{48}Cd + ^{0}_{-1}e \rightarrow ^{109}_{47}Ag + ^{0}_{0}\gamma$

Bij veel isotopen kan verval via meerdere manieren plaatsvinden. Welk type verval in dit geval plaatsvindt is van te voren niet te voorspellen. Een uitzondering is de uitgezonden gammastraling. Dit vindt meestal plaats in combinatie met een andere soort verval. Soms is het product van een

vervalreactie ook zelf weer instabiel waardoor weer een volgende vervalreactie plaatsvindt. Een serie elkaar opvolgende vervalreacties wordt een **vervalreeks** genoemd. Een vervalreeks stopt pas als het ontstane vervalproduct stabiel is.

Wanneer een instabiele kern vervalt is onmogelijk te voorspellen. Wel is het mogelijk van een grote groep kernen te voorspellen hoe lang het duurt voordat de helft van alle kernen vervallen is. Deze tijd wordt de **halveringstijd** of **halfwaardetijd** genoemd. Symbool $t_{1/2}$ eenheid: s, min, dagen, of zelfs jaren. Halveringstijden staan in BINAS (tabel 25A).

De hoeveelheid instabiele kernen is te berekenen met

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

N(t)=hoeveelheid instabiele kernen
N_0=beginhoeveelheid instabiele kernen
t=tijd(s)
$t_{1/2}$=halveringstijd (s)

Activiteit is het aantal vervalreacties wat per seconde plaatsvindt in een voorwerp. Symbool: A, eenheid Becquerel (Bq). Omdat de activiteit direct afhankelijk is van de hoeveelheid instabiele kernen neemt de activiteit in de loop van de tijd op dezelfde manier af als de hoeveelheid instabiele kernen:

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

A(t)=activiteit (Bq)
A_0=activiteit op t=0
t=tijd(s)
$t_{1/2}$=halveringstijd (s)

In de twee bovenstaande formules mag ook een andere eenheid van tijd gebruikt worden mits dezelfde eenheid voor zowel t als $t_{1/2}$ gebruikt wordt.

De activiteit van een voorwerp kan berekend worden als het aantal instabiele kernen en de halveringstijd bekend zijn:

$$A_0 = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} N_0$$

A_0=activiteit op t=0 (Bq)
N_0=aantal instabiele kernen op t=0
$t_{1/2}$=halveringstijd (s)

Het getal ln(2) wat in bovenstaande formule voorkomt is 0,69314718… In een rekenmachine kan het berekend worden door [ln][2][=] in te typen.

De energie die nodig is voor het ioniseren van de moleculen die een deeltje onderweg passeert gaat ten koste van de kinetische energie en dus de snelheid van een deeltje. De afstand die een deeltje in een materiaal kan afleggen voordat het al zijn kinetische energie kwijt is heet **dracht***. Dracht hangt af van het materiaal en van de soort straling en de energie van de uitgezonden deeltje: In lucht is de dracht van deeltjes groter dan in lood.
De mate waarin een deeltje in staat is om moleculen te ioniseren wordt het **ioniserend vermogen** genoemd. Als een deeltje een groot ioniserend vermogen heeft betekent dit dat het snel zijn kinetische energie kwijt is en dus een relatief kleine dracht heeft.

In onderstaande tabel staan ioniserend vermogen en dracht van de verschillende soorten straling samengevat (++ = zeer goed, -- = zeer slecht)

Soort straling	Dracht	Ioniserend vermogen
α-straling	-	++
β-straling	+/-	+
Röntgenstraling	+	+/-
γ-straling	++	-

**Dit geldt niet voor röntgen- en gammastraling: dit zijn vormen van elektromagnetische straling net zoals licht. Ze bewegen dus altijd met de lichtsnelheid. Hun dracht is de gemiddelde weglengte voordat het geabsorbeerd wordt.*

Straling kan op verschillende manieren schadelijk zijn:

Bij **bestraling** staat iemand korte of langere tijd bloot aan straling als een stralingsbron te dichtbij komt. De ioniserende straling die in het lichaam doordringt brengt hier schade aan. Door weg te lopen of de bron af te schermen is ook de blootstelling aan de straling weg.

Bij **besmetting** is een radioactieve stof op of in het lichaam gekomen. De bron zit dan dus op of in het lichaam en de schadelijke effecten van de straling blijven doorlopend aanwezig.

De schadelijkheid van straling hangt af van de totale geabsorbeerde energie en de massa van het orgaan of de persoon die de straling ontvangt. De energie per kg massa wordt de **dosis** genoemd (eenheid: **Gray**, Gy)

$$D = \frac{E_{abs}}{m}$$

D=dosis (Gy)
E_{abs}=geabsorbeerde stralingsenergie (J)
m=massa(kg)

Omdat straling met een groot ioniserend vermogen veel schadelijker is dan straling met een laag ioniserend vermogen moet ioniserend vermogen meegenomen worden in het bepalen van de schadelijk. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een **weegfactor** waarmee het **dosisequivalent** kan worden berekend. Eenheid **Sievert** (Sv).

$$H = W_R \cdot D = W_R \cdot \frac{E_{abs}}{m}$$

H=dosisequivalent (Sv)
w_R=weegfactor
D=dosis (Gy)
E_{abs}=geabsorbeerde stralingsenergie (J)
m=massa(kg)

Soort straling	Weegfactor W_R
α-straling	20
β-straling	1
Röntgenstraling	1
γ-straling	1

NB: De weegfactoren staan ook in BINAS (tabel 27-D3)

De normale dosisequivalent die een persoon in een jaar ontvangt is hooguit enkele millisievert en komt o.a. van **kosmische straling** (afkomstig uit de ruimte) en natuurlijke radioactiviteit in de omgeving. De normale straling die iedereen eigenlijk continu ontvangt wordt de **achtergrondstraling** genoemd. Bij het maken van vliegreizen en het laten maken van Röntgenfoto's is er sprake van een verhoogde dosis.

Werknemers in een beroep met een verhoogd risico op straling dragen tijdens hun werk een **dosimeter**. Dit is een klein apparaatje, meestal in de vorm van een **badge**, waarmee de totale opgelopen stralingsdosis gemeten wordt. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij röntgenafdelingen in ziekenhuizen en bij kerncentrales.

In BINAS tabel 27 D staat het verband tussen dosisequivalent en gezondheid.

In de **nucleaire diagnostiek** worden radioactieve isotopen bewust ingebracht in het lichaam om meer te weten te komen over een patiënt. Door te meten waar de door de isotoop uitgezonden straling precies vandaan komt in het lichaam kan het verloop van bepaalde ziektes gevolgd worden (getraced). De gebruikte isotoop wordt een **tracer** genoemd.

Een bijzondere vorm hiervan is de **PET** (Positron Emission Tomography). Hierbij wordt een isotoop in het lichaam gebracht die β^+ deeltjes, ook wel **positronen** genoemd, uitzendt. Een positron is een **antideeltje** van een elektron: De lading van een positron is positief (+1). Zodra een door de isotoop uitzonden positron een elektron ontmoet, ontstaat een **elektron-positronpaar** en verdwijnen de twee deeltjes. Dit proces waarbij een deeltje en zijn antideeltje elkaar 'opheffen' wordt **annihilatie** genoemd. Bij annihilatie worden twee gammafotonen uitgezonden in twee precies tegengestelde richtingen. Door rondom het lichaam detectoren op te stellen die de gamma-fotonen meten kan door het verschil in aankomsttijd precies berekend worden waar de annihilatie heeft plaats gevonden. Door de computer kan zo een beeld worden opgebouwd van de plaatsen in het lichaam waar de ingebrachte isotoop zich bevindt.

Een andere diagnostische techniek maakt gebruik van een **ultrasone geluidsgolf**. Dit is geluid geproduceerd door een luidspreker met een frequentie ver boven de bovenste gehoorgrens. De luidspreker wordt in direct contact gebracht met het lichaam. In het lichaam kan transmissie, reflectie of absorptie plaatsvinden afhankelijk van de objecten die de geluidsgolven tegenkomen. Bij een grensvlak tussen twee lichaamsdelen met een verschillende geluidssnelheid worden de geluidsgolven (gedeeltelijk) gereflecteerd. Aan de hand van dit teruggekaatste geluid kan door de computer een beeld opgebouwd worden van structuren binnen het lichaam. Deze techniek wordt ook wel **ultrasound** of **echografie** genoemd. Vooral bij onderzoek bij zwangerschap, waar röntgenstraling een stralingsrisico op zou leveren, wordt ultrasound toegepast.

Bij **MRI** of **Magnetic Resonance Imaging** wordt de te onderzoeken persoon binnen een extreem sterk magneetveld geplaatst. Kernen van atomen in het lichaam, zoals waterstofkernen, vertonen ook zelf magnetische eigenschappen en richten zich naar het aangelegde externe magneetveld. Door een puls (onschadelijke) radiostraling krijgen deze atoomkernen een klein zetje. Hierna 'vallen' ze weer terug naar de richting van het externe magneetveld. Bij dit terugvallen zenden ze zelf radiostraling uit die in een MRI-scanner opgevangen wordt door rondom gemonteerde antennes. Door een computer kan zo in kaart worden gebracht waar de radiostraling precies van afkomstig was. Er kan zo een beeld worden opgebouwd met de plaatsen met veel of juist weinig waterstofatomen. MRI geeft dus andere informatie (aanwezigheid van waterstof) dan röntgenfoto's of ultrasound. MRI-apparaten zijn extreem ingewikkeld en relatief duur. Met name vanwege het sterke magneetveld wat moet worden opgewekt. Ook aanwezigheid van metalen voorwerpen (pacemakers bijvoorbeeld) zijn hierdoor een probleem.

MRI, CAT-scan, röntgenfoto, nucleaire diagnostiek, PET en echografie zijn allemaal **beeldvormende technieken** waarmee in het binnenste van het lichaam kan worden gekeken. Welke techniek precies wordt gebruikt hangt van de situatie af, vaak wordt ook een combinatie van verschillende technieken gebruikt.

Op zoek naar voorbeeldopgaven?
In de app van deze samenvatting vind je meer dan 100 voorbeeldvragen.
Ideaal om te checken of je alles écht snapt.

Installeer gratis via natuurkundeuitgelegd.nl/samenvatting

C BEWEGING

Het onderdeel van de natuurkunde wat zich bezighoudt met kracht en beweging heet **mechanica**. Mechanica is onder te verdelen in 3 deelgebieden:

- **Kinematica** gaat over bewegingen
- **Statica** gaat over krachten op voorwerpen die in evenwicht zijn en niet bewegen
- **Dynamica** gaat over de wisselwerking tussen kracht en beweging

1 Kracht en Beweging

Onderzoek naar beweging en snelheden kan gedaan worden met:
Stroboscoop: Een apparaat dat met een vaste frequentie lichtflitsen geeft. Wanneer een foto gemaakt wordt met een lange belichtingstijd ontstaan meerdere beeldjes van een bewegend voorwerp. Als op de foto ook een liniaal staat kunnen afstanden gemeten worden
Videometen: Een video-opname bestaat uit meerdere beeldjes die achter elkaar afgespeeld worden. Door de beeldjes apart te bekijken kunnen afstanden en snelheden bepaald worden
Ultrasone plaatssensor: Een apparaat dat met ultrasoon (heel hoog) geluid de afstand meet door het tijdsverschil tussen uitgezonden en ontvangen geluid (de echo) te meten.
Lasergun: Meet aan de hand van de weerkaatsingsingtijd van infrarood laserlicht twee keer snel achter elkaar de afstand. Uit het verschil in afstand berekent het apparaat de snelheid.
Radar: Meet snelheden met radiostraling.

Gemiddelde snelheid over een bepaalde periode wordt berekend met

$$v_{gem} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

V_{gem}=gemiddelde snelheid (m/s)
Δx=verschil in plaats (m)
Δt=tijdverschil (s)

Δx is het verschil in plaats (x_{eind}-x_{begin}), Δt is het verschil in tijd (t_{eind}-t_{begin}).

Als in een bepaalde periode de snelheid niet verandert dan heet de beweging in deze periode **eenparig.**

In een **(x,t)-diagram** staat horizontaal de tijd (t) en verticaal de plaats (x). De steilheid/richtingscoëfficiënt van een grafiek is gelijk aan de snelheid.
In een **(v,t)-diagram** staat horizontaal de tijd (t) en verticaal de snelheid (v). De hoogte van een grafiek is gelijk aan de snelheid. De oppervlakte onder de grafiek is gelijk aan de verplaatsing.

Verplaatsing tussen twee tijdstippen is de kortst mogelijke afstand tussen begin en eindpunt.
Afgelegde weg is de werkelijk afgelegde afstand.

Snelheden worden altijd gegeven ten opzichte van het aardoppervlak tenzij uit de context anders blijkt. Van twee objecten met verschillende snelheden en beginposities kunnen ontmoetingstijd , inhaalafstand etc. bepaald worden met een (x,t)-diagram of door gebruik te maken van de **relatieve snelheid** die objecten ten opzichte van elkaar hebben.

De snelheid op een bepaald moment is de **afgeleide** van de plaats en is dus af te leiden uit de helling van een (x,t)-diagram. Met de **raaklijnmethode** kan deze afgeleide en dus de snelheid op één bepaald tijdstip uit een (x,t,)-diagram gehaald worden:

- Teken door het punt van de grafiek waar de snelheid bepaald moet worden een lijn met dezelfde helling als de grafiek (raaklijn).
- Maak een zo groot mogelijke driehoek met de getekende raaklijn als schuine zijde.
- Bepaal de hoogte (Δx) en de breedte (Δt) van de driehoek

Bereken de snelheid vervolgens met

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Om een (x,t) diagram om te zetten naar een (v,t)-diagram moet voor stukken waarbij de beweging niet eenparig is de raaklijnmethode op zoveel mogelijk plaatsen gebruikt worden.

De raaklijnmethode wordt niet alleen gebruikt bij het bepalen van snelheid maar in alle situaties waarbij de helling van een grafiek bepaald moet worden als de grafiek geen rechte lijn is. Bijvoorbeeld het bepalen van versnelling op een bepaald tijdstip uit een (v,t)-diagram.

Met de **oppervlaktemethode,** ook wel **hokjesmethode** genoemd kan de verplaatsing op een bepaald tijdstip uit een (v,t)-diagram gehaald worden. Verplaatsing is gelijk aan de oppervlakte tussen de grafiek en de x-as in een (snelheid,tijd)-diagram. Oppervlakken onder de x-as tellen hierbij negatief mee omdat de beweging hier de andere kant op is (v = negatief).

NB: De oppervlaktemethode kan bij alle soorten beweging worden toegepast, niet alleen bij eenparige beweging.

Een **eenparig versnelde beweging** is een beweging waarbij de snelheid met een vaste hoeveelheid per tijdseenheid toe- of afneemt.

Versnelling in een bepaalde periode kan berekend worden met:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

a=versnelling (m/s^2)
Δv=verschil in snelheid (m/s)
Δt=tijdverschil (s)

Als a negatief is spreken we ook wel van een eenparig **vertraagde** beweging.
Een eenparig versnelde of vertraagde beweging is te herkennen aan:

- De (x,t)-grafiek is een parabolische kromme
- De (v,t)-grafiek is een schuine rechte lijn.

De versnelling op een bepaald moment is de **afgeleide** van de snelheid en is dus af te leiden uit de helling van een (v,t)-diagram. Met de **raaklijnmethode** (zie boven) kan deze afgeleide en dus de versnelling op één bepaald tijdstip uit een (v,t,)-diagram gehaald worden. Uit de raaklijnmethode volgen Δv en Δt. Met bovenstaande formule kan vervolgens de versnelling bepaald worden.

Een voorbeeld van een eenparig versnelde beweging is de **vrije val:** een valbeweging waarbij de invloed van luchtwrijving verwaarloosd mag worden. Alle voorwerpen ondergaan bij een val dezelfde versnelling (ongeacht massa!). Deze versnelling wordt **valversnelling** genoemd en wordt aangeduid met de letter **'g'**. In Nederland op zeeniveau geldt $g=9{,}81\ m\cdot s^{-2}$. Tenzij uit de context van de opgave anders blijkt mag deze waarde van g altijd gebruikt worden.

Een **kracht** is een **vectorgrootheid** en wordt genoteerd als een pijl.
Elke kracht heeft een:

- Grootte (lengte van de pijl)
- Aangrijpingspunt (begin van de pijl)
- Richting (richting van de pijl)

Met de notatie $\vec{F}$ wordt de krachtvector bedoeld, met F alleen de grootte van een kracht.

Kracht wordt gemeten met een **krachtmeter** of **veerunster**. De eenheid van de grootte van kracht is Newton (N).

Voor het effect van een kracht op een voorwerp is het totaal van de krachten van belang. Dit heet de **somkracht**, **resultante**, **nettokracht** of **resulterende kracht** (betekent allemaal hetzelfde).
In formulevorm:

$$\overrightarrow{F_{res}} = \sum_i \overrightarrow{F_i}$$

$\vec{F}_{res}$ = resulterende kracht (N)
$\vec{F}_{1,2,3...}$=afzonderlijke krachten (N)

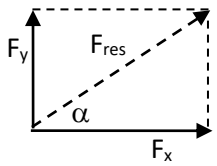
Krachten kunnen bij elkaar opgeteld door:

Constructie (Kop-staartmethode of de parallelogrammethode) of **berekening**:

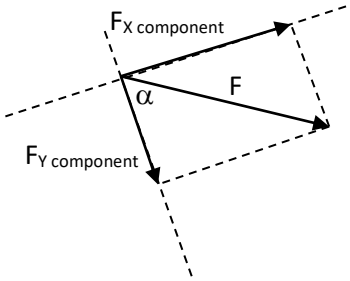
Loodrecht op elkaar staande krachten F_x en F_y kunnen opgeteld worden met

$$F_{res} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right)$$



Vaak moeten krachten eerst ontbonden worden in onderling loodrechte **componenten**. Afhankelijk van de situatie moeten hier de rekenregels voor sinus, cosinus en tangens gebruikt worden.



Als de som van alle krachten op een voorwerp 0 N is, is er sprake van **evenwicht.**
Voor evenwicht moet dit gelden voor alle richtingen:

$$\sum F_x = 0$$
$$\sum F_Y = 0$$

NB: In werkelijkheid zijn er geen 2 maar 3 dimensies. In de meeste natuurkundeopgaven wordt uitgegaan van twee dimensies (x en y) en zijn de krachten in derde dimensie in evenwicht.

Om te beoordelen of er in een bepaalde situatie evenwicht is moeten de krachten meestal eerst in onderling loodrechte richtingen ontbonden worden.

NB: Het hoeft niet perse horizontaal of verticaal te zijn. Vaak is het handig om twee andere onderling loodrechte richtingen te kiezen.

Massa is een maat voor de hoeveelheid van een bepaalde stof of materie. Het is het resultaat van de optelsom van alle atomen en moleculen. Massa van een voorwerp is onafhankelijk van de plaats waar het voorwerp zich bevindt. Eenheid van massa is de kilogram (kg)

Zwaartekracht is de kracht waarmee voorwerpen door andere voorwerpen aangetrokken worden. Deze kracht is afhankelijk van de massa's van de twee voorwerpen. In het dagelijks leven is één van de twee voorwerpen meestal de aarde.

De grootte van de zwaartekracht is te berekenen met

$$F_z = m \cdot g$$

F_z = zwaartekracht (N)
m=massa (kg)
g=zwaartekrachtsversnelling (m/s^2)

(g is normaliter 9,81 m·s^{-2}) Het <u>aangrijpingspunt</u> van de zwaartekracht is het zwaartepunt van een voorwerp. In de praktijk is dit meestal het midden van het voorwerp.
<u>Richting</u> van de zwaartekracht is in de richting van het zwaartepunt van de aarde. In de praktijk dus meestal recht naar beneden.

Gewicht is de kracht die door een massa op een <u>ander</u> voorwerp wordt uitgeoefend. Meestal ten gevolge van de zwaartekracht die op de massa werkt. Bijvoorbeeld: Bij een boek wat op tafel ligt is het gewicht de kracht die op de tafel wordt uitgeoefend. Dit is een gevolg van de zwaartekracht die het boek naar beneden trekt.

Normaalkracht is de kracht die door een oppervlak wordt uitgeoefend op een voorwerp als reactie op de kracht die door het voorwerp op het oppervlak wordt uitgeoefend. De richting van de normaalkracht is loodrecht op het oppervlak.

De **eerste wet van Newton** luidt in woorden:

"Als de resulterende kracht op een voorwerp 0 N is, blijft het in rust of beweegt het in een eenparige rechtlijnige beweging"

In formulevorm:

$\Sigma F=0$ N $\Leftrightarrow$ v=constant (kan dus ook 0 zijn)

Het omgekeerde is ook waar: Beweegt een voorwerp met een constante snelheid of staat het stil dan is de resulterende kracht 0N.

Traagheid is de neiging van een voorwerp om zich tegen een verandering in snelheid te verzetten.

Tenzij een beweging **wrijvingsloos** (bijvoorbeeld in de ruimte) is, treden bij beweging altijd wrijvings- en weerstandskrachten op tegengesteld aan de bewegingsrichting.

Schuifwrijving treedt op bij het schuiven van een voorwerp over een oppervlak.

- Als het voorwerp niet beweegt is de schuifwrijving even groot als de op het voorwerp uitgeoefende kracht maar tegengesteld gericht zodanig dat $\Sigma F=0$ tot een bepaald maximum. Als de schuifwrijvingskracht dit maximum bereikt komt het voorwerp in beweging.
- Zodra een voorwerp beweegt blijft de schuifwrijving op deze maximale grootte. Bij een bewegend voorwerp is de schuifwrijvingkracht dus constant.

De maximale schuifwrijving is rechtevenredig met de normaalkracht die de ondergrond op het voorwerp uitoefent:

$$F_{s,\max} = f \cdot F_N$$

$F_{s,max}$=maximale schuifwrijving (N)
f=constante
F_N=normaalkracht (N)

De constante f die in deze formule voorkomt is afhankelijk van het soort contactoppervlak. Hoe gladder het oppervlak hoe kleiner de waarde van de constante f en dus hoe kleiner de maximale schuifwrijving.

Rolweerstand treedt op bij wielen e.d. Grootte is constant. Richting is tegengesteld aan de bewegingsrichting.

Luchtweerstand wordt veroorzaakt door het botsen tegen luchtmoleculen tijdens het bewegen. Grootte van de luchtwrijving is afhankelijk van de snelheid in het kwadraat om twee redenen:
Hoe groter de snelheid hoe groter het aantal moleculen waartegen elke seconde gebotst wordt.
Hoe groter de snelheid hoe groter de snelheid waarmee tegen ieder molecuul wordt opgebotst.
Voor de luchtwrijvingskracht geldt:

$$F_{w,l} = \tfrac{1}{2}\rho \cdot c_w \cdot A \cdot v^2$$

$F_{w,l}$=luchtwrijvingskracht (N)
ρ=dichtheid lucht (kg/m^3)
c_W=weerstandscoëfficient
A=frontaal oppervlak (m^2)
v=snelheid (m/s)

De **weerstandscoefficiënt** of **luchtwrijvingscoefficiciënt** (**c_w**) die in deze formule voorkomt is een maat voor de stroomlijn van het voorwerp of voertuig. Hoe gestroomlijnder en gladder het voorwerp hoe kleiner c_W en hoe minder luchtwrijving.

NB: De c_w-waarde van verschillende vormen en voertuigen staan in BINAS (tabel 28A)

De **tweede wet van Newton** luidt in formulevorm:

$$\vec{F}_{res} = m \cdot \vec{a}$$

$\vec{F}_{res}$=resulterende kracht op een voorwerp (N)
m=massa voorwerp (kg)
$\vec{a}$=versnelling voorwerp (m/s^2)

De eerste wet van Newton is af te leiden uit de tweede wet van Newton, constante snelheid betekent immers a=0 m/s^2.

Let op: De tweede wet van Newton geeft niet alleen het verband tussen de grootte van de resulterende kracht en de grootte van de versnelling maar ook de richting.

De **derde wet van Newton** luidt in formulevorm:

$$\vec{F}_{A\to B} = -\vec{F}_{B\to A}$$

In woorden: Als voorwerp A op voorwerp B een kracht uitoefent, zal voorwerp B op voorwerp A een kracht uitoefenen die even groot is maar tegengesteld gericht. De wet staat ook wel bekend als "actie is – reactie".

Let op: De twee krachten in de formule werken dus NIET op hetzelfde voorwerp en kunnen elkaar dus nooit opheffen.

---

2 Energie en Arbeid

Arbeid is het product van kracht en verplaatsing en is een maat voor hoeveel 'moeite' iets kost:

$$W = F \cdot s$$

W = arbeid (Nm)
F = kracht (N)
s = verplaatsing(m)

Als verplaatsing en kracht niet dezelfde richting hebben moet onderstaande formule gebruikt worden:

$$W = F \cdot s \cdot \cos\alpha$$

W = arbeid (Nm)
F = kracht (N)
s = verplaatsing(m)
α=hoek tussen F en s

Als de richtingen tegengesteld zijn wordt W negatief (**negatieve arbeid**). Dit is bijvoorbeeld het geval bij de arbeid verricht door wrijvingskracht omdat $F_{wrijving}$ tegengesteld is aan de bewegingsrichting. Als F en s loodrecht op elkaar staan wordt W = 0 Nm en verricht de kracht dus géén arbeid.

Bovenstaande formules mogen alleen gebruikt worden als de kracht en de hoek gedurende de beweging constant blijven. Bij een niet constante kracht is de verrichte arbeid het **oppervlak onder een grafiek** met horizontaal verplaatsing en verticaal kracht.

Energie is de capaciteit die iets bezit om arbeid te verrichten. (van het griekse εν εργος, letterlijk: "werk in zich") De eenheid van energie is de **Joule** (J). Eén Joule is één Nm (de twee kunnen uitgewisseld worden).

Energie kan verschillende vormen hebben:

Chemische energie is de energie die opgesloten ligt in bijvoorbeeld voedsel of brandstoffen (benzine, olie , aardgas, steenkool). De hoeveelheid chemische energie is afhankelijk van de hoeveelheid stof en de energie-inhoud van de stof. De energie-inhoud van brandstof wordt **stookwaarde** genoemd en staat in BINAS tabel 28B. Voor de hoeveelheid chemische energie geldt:

$$E_{chemisch} = r_V \cdot V$$
$$E_{chemisch} = r_m \cdot m$$

$E_{chemisch}$ = chemische energie (J)
r_V=stookwaarde in J/m^3
r_m=stookwaarde in J/kg
V = volume(m^3)
m=massa(kg)

Welke formule gebruikt moet worden gebruikt hangt ervan af of de stookwaarde per m^3 of per kg gegeven is.

Bewegingsenergie of **kinetische** energie is energie die zit in bewegende voorwerpen:

$$E_{kin} = \tfrac{1}{2} m \cdot v^2$$

E_{kin}=kinetische energie (J)
m = massa (kg)
v = snelheid (m/s)

Zwaarte-energie of **potentiële** energie is energie die vrijkomt bij het laten zakken van een massa en geleverd moet worden bij het ophijsen van een massa.

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

E_{pot}=potentiële energie (J)
m = massa (kg)
g = zwaartekrachtversnelling (m/s^2)
h = hoogteverschil (m)

Op aarde geldt g= 9,81 m/s^2

NB: Bovenstaande formule geldt alleen in normale omstandigheden d.w.z. op of dichtbij het (aard)oppervlak. In de ruimte moet gebruikt worden gemaakt van de formule voor gravitatie-energie.

Veerenergie is de energie die zit in een ingedrukte of uitgerekte veer:

$$E_{veer} = \tfrac{1}{2} C \cdot u^2$$

E_{veer}=veerenergie (J)
C = veerconstante (N/m)
u = uitrekking of indrukking(m)

De **veerconstante** (C) is een getal wat aangeeft hoe stug of hoe slap een veer is: De veerconstante is de kracht die nodig is om de veer één meter in te drukken of uit te rekken.

Energiesoorten die met kracht of beweging te maken hebben, zoals kinetische-, zwaarte- en veerenergie, worden ook wel **mechanische energie** genoemd.

Warmte
Ook warmte is een vorm van energie. Meestal is warmte een ongewenst bijproduct ten gevolge van **wrijvingskracht**. De hoeveelheid ontstane warmte (in Joule) is gelijk aan de verrichtte (negatieve) arbeid van de wrijvingskracht ($W=F_{wr} \cdot s$).

De **wet van behoud van energie** zegt dat de totale hoeveelheid energie altijd gelijk blijft. Verschillende soorten energie kunnen wel in elkaar worden omgezet maar het totaal blijft gelijk.
In formulevorm:

$$\sum E_{in} = \sum E_{uit}$$

$\sum E_{in}$=totale energie beginsituatie (J)
$\sum E_{uit}$ = totale energie eindsituatie (J)

Voorbeelden:

- Bij een vallend voorwerp wordt potentiële energie omgezet in kinetische energie.

- Bij remmen wordt kinetische energie omgezet in warmte.

De wet van behoud van energie kan gebruikt worden voor het berekenen van hoogtes, snelheden en krachten e.d. door het maken van een overzicht de grootes van de verschillende energiesoorten en hoe ze veranderen (**energiebalans**). In het algemeen geldt dat bij het verrichten van arbeid de ene energiesoort omgezet wordt in een andere.

De energie die omgezet wordt in **warmte** door wrijving kan niet weer terug gevormd worden tot een andere energiesoort. Deze energie is eigenlijk "verloren gegaan".

Vermogen is de hoeveelheid arbeid die per seconde verricht wordt of de hoeveelheid energie die per seconde verbruikt wordt:

$$P = \frac{W}{t} of \frac{E}{t}$$

P = vermogen (W of J/s)
W = arbeid (Nm of J)
E = energie (J)
t = tijd (s)

De eenheid van vermogen (J/s) wordt ook wel de **Watt** (W) genoemd.

PAS OP: De letter W is zowel de afkorting van de grootheid arbeid als van de eenheid van vermogen.

Voor bewegende voorwerpen kan uit de formules voor vermogen, arbeid en snelheid de volgende formule worden afgeleid:

$$P = F \cdot v$$

P = vermogen (W of J/s)
F = kracht (N)
v = snelheid (m/s)

Bij het omzetten van de ene energiesoort in de andere wordt meestal niet alle energie 'nuttig' omgezet. Vaak gaat energie in de vorm van warmte verloren.
Rendement is het percentage energie wat nuttig wordt omgezet.

$$\eta = 100\% \cdot \frac{E_{nuttig}}{E_{in}}$$

η = rendement (%)
E_{in}=totale omgezette energie (J)
E_{nuttig} = nuttige omgezette energie (J)

Bij apparaten, machine of installaties met een constant vermogen kan het rendement ook berekend worden uit het vermogen:

$$\eta = 100\% \cdot \frac{P_{nuttig}}{P_{in}}$$

η = rendement (%)
P_{in}=totale omgezette vermogen (W)
P_{nuttig} = nuttige gebruikt vermogen (W)

3 Gravitatie en Cirkelbeweging

Een **eenparige cirkelbeweging** is een beweging waarbij een cirkelvormige baan doorlopen wordt waarbij v (de grootte van de snelheid) constant blijft. De **omlooptijd** (symbool T, eenheid s) is de tijd die nodig is om precies 1 rondje te maken. Met toerental (RPM) wordt het aantal rondjes in een minuut bedoeld. Met de **baanstraal** wordt de straal bedoeld van de cirkel die doorlopen wordt.
De **baansnelheid** (symbool v, eenheid m/s) is de grootte van de snelheid van het voorwerp en kan worden berekend met:

$$v_{baan} = \frac{2\pi \cdot r}{T}$$

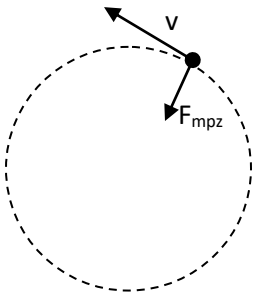
v_{baan} = baansnelheid (m/s)
r = baanstraal (m)
T = omlooptijd (s)

Bij een eenparige cirkelbeweging verandert de grootte van de snelheid niet maar de richting van de snelheid wél. Een verandering in snelheid heet een versnelling. Bij een eenparige cirkelbeweging heet deze versnelling de **middelpuntzoekende versnelling**. Volgens de tweede wet van Newton is voor een versnelling een kracht nodig; de **middelpuntzoekende kracht.**

$$F_{mpz} = m \cdot \frac{v^2}{r}$$

F_{mpz}=middelpuntzoekende kracht (N)
v =baansnelheid (m/s)
r=baanstraal (m)

Bij een eenparige cirkelbeweging moet er altijd een middelpuntzoekende kracht zijn. Bij een gewichtje wat aan een touwtje wordt rondgeslingerd is dit de spankracht in een touwtje, bij een auto die een bocht maakt is dit de wrijvingskracht op de weg, en bij een planeet die om de zon draait is dit de zwaartekracht van de zon.



Newton heeft naast zijn 3 bewegingswetten nog een wet op zijn naam staan: de **gravitatiewet**:

In woorden: Twee voorwerpen trekken elkaar aan met een kracht die evenredig is met de grootte van hun massa's en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand tussen hun zwaartepunten. Deze kracht heet **gravitatiekracht** of **zwaartekracht.**

$$F_{grav} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

F_{grav} = gravitatiekracht (N)
G = gravitatieconstante (Nm^2/kg^2)
$m_{1,2}$ = massa's van de voorwerpen(kg)
r = afstand tussen de zwaartepunten (m)

De gravitatieconstante (G) is $6{,}6726 \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2 en staat in BINAS (tabel 7). G is in het hele heelal constant.

Elke massa heeft dus een invloed om zijn omgeving: Alle andere massa's in de omgeving zullen door de massa worden aangetrokken. Deze invloed wordt het **gravitatieveld** van een massa genoemd. Dichtbij een zware massa is het gravitatieveld het sterkst. Bijvoorbeeld in de buurt van een grote zware ster of in de buurt van een zwart gat.

Twee stilstaande massa's op een afstand r van elkaar ondervinden een aantrekkende gravitatiekracht naar elkaar toe. Hierdoor zullen de massa's naar elkaar toe gaan versnellen en neemt hun kinetische energie toe. Deze energie komt, volgens de wet van behoud van energie, niet uit het niets maar gaat ten koste van de **gravitatie-energie** die de voorwerpen bezitten:

$$E_{grav} = -G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r}$$

E_{grav} = gravitatie-energie (J)
G = gravitatieconstante (Nm^2/kg^2)
$m_{1,2}$ = massa's van de voorwerpen(kg)
r = afstand tussen de zwaartepunten (m)

Als voorwerpen oneindig ver uit elkaar staan (r=∞) is de gravitatie-energie 0 J. Als voorwerpen dichtbij elkaar staan is de gravitatie-energie negatief (door het minteken in de formule) en dus kleiner. Bij het kleiner worden van de afstand komt dus energie vrij en voor het verder uit elkaar brengen is energie nodig. Voor het weghalen van een massa vanaf het oppervlak van een planeet of ster is dus energie nodig. De grootte van deze energie is

$$E_{ontsnapping} = G \cdot \frac{m_{planeet} \cdot m_{voorwerp}}{r_{planeet}}$$

$E_{ontsnapping}$ = energie nodig voor ontsnapping (J)
$m_{planeet}$ = massa planeet (kg)
$m_{voorwerp}$ = massa's voorwerp(kg)
r = straal planeet (m)

Let op: Deze formule staat niet in BINAS

Wanneer het voorwerp weggeschoten krijgt het kinetische energie mee. Als deze kinetische energie minstens de ontsnappingsenergie is kan het voorwerp ontsnappen aan het gravitatieveld van de planeet of ster zonder terug te vallen. De snelheid die hiervoor nodig heet de **ontsnappingssnelheid**. De ontsnappingssnelheid is onafhankelijk van de massa van het voorwerp en hangt alleen af van de massa en de straal van een planeet of ster. Ontsnappingsnelheden van de planeten in ons zonnestelsel staan in BINAS tabel 31.

De reden dat planeten niet op de zon vallen is dat ze zich in een cirkelbaan bevinden. Voor de cirkelvormige beweging van planeten om zon de geldt dat de middelpuntzoekende kracht gelijk is aan de zwaartekracht die ze ondervinden:

$$F_{mpz} = F_{grav}$$

Uitschrijven geeft:

$$m_{planeet} \cdot \frac{v^2}{r} = G \cdot \frac{m_{planeet} \cdot m_{zon}}{r^2}$$

G = gravitatieconstante (Nm^2/kg^2)
$m_{planeet}$= massa planeet (kg)
m_{zon}= massa zon (kg)
v=baansnelheid planeet (m/s)
r = afstand planeet tot zon (m)

Wegstrepen van $m_{planeet}$ links en recht en invullen van v=2πr/T:

$$v^2 = G \cdot \frac{m_{zon}}{r} \Rightarrow \left(\frac{2\pi \cdot r}{T}\right)^2 = G \cdot \frac{m_{zon}}{r} \Rightarrow \frac{4\pi^2 r^2}{T^2} = G \cdot \frac{m_{zon}}{r} \Rightarrow \frac{r^3}{T^2} = G \cdot \frac{m_{zon}}{4\pi^2}$$

De verhouding tussen r^3 en T^2 is dus binnen het zonnestelsel altijd constant en de omlooptijd van een planeet binnen ons zonnestelsel hangt dus alleen van de afstand tot de zon af en niet van de massa van de planeet. Dit verband staat bekend als de **3e wet van Kepler**.

NB: In werkelijkheid zijn de planeetbanen geen perfecte cirkels maar ellipsen. In de praktijk zijn de afwijkingen t.o.v. een cirkelbaan relatief klein.

Ook voor de baan van de maan om de aarde en de baan van **satellieten** om de aarde geldt dat de middelpuntzoekende kracht gelijk is aan de gravitatiekracht. Voor een gelanceerde satelliet wordt de snelheid en hoogte zo op elkaar afgestemd dat:

$$F_{mpz} = F_{grav}$$

Een bijzondere satellietbaan is de **geostationaire baan**: Een satelliet in een geostationaire baan beweegt recht boven de evenaar en heeft een omlooptijd gelijk aan de rotatietijd van de aarde (ongeveer 23 uur en 56 minuten). Ten opzichte van het aardoppervlak bevindt de satelliet zich dus altijd op hetzelfde punt waardoor schotels vanaf aarde op een vast punt op de hemel gericht kunnen worden voor ontvangst van bijvoorbeeld TV signalen.

Op zoek naar voorbeeldopgaven?
In de app van deze samenvatting vind je meer dan 100 voorbeeldvragen.
Ideaal om te checken of je alles écht snapt.

Installeer gratis via natuurkundeuitgelegd.nl/samenvatting

D ELEKTRICITEIT & VELDEN

Elektriciteit en Velden gaat over hoe elektrische schakelingen werken maar ook over wat elektriciteit eigenlijk is en wat het verband is tussen elektriciteit en magnetisme.

1 Elektrische Schakelingen

Atomen bestaan uit een positief geladen kern met hieromheen een negatief geladen wolk met elektronen. Als een voorwerp een overschot of een tekort aan elektronen heeft is dit voorwerp **negatief** of **positief** elektrisch geladen, respectievelijk. Voorwerpen met een tegengestelde elektrische lading trekken elkaar aan. Voorwerpen met dezelfde lading stoten elkaar af.

De hoeveelheid aanwezige elektrische lading wordt gemeten in de eenheid **Coulomb** (Afkorting: C). Als symbool voor lading worden q en Q gebruikt (allebei komt voor).
De lading van een voorwerp is altijd het resultaat van tekort of overschot van een geheel aantal elektronen. De lading van één elektron is $-1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C. De lading van een voorwerp is dus altijd een positief of negatief veelvoud van $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C. Dit getal wordt ook wel het **elementair ladingsquantum** genoemd. Symbool: e. Zie BINAS tabel 7.

Vrije elektronen zijn elektronen die niet zijn gebonden aan een atoom. In stoffen waarin zich vrije elektronen bevinden en waar lading zich dus vrij heen en weer kan stromen heten **geleiders** (bijvoorbeeld metalen). Stoffen waarin zich géén vrije elektronen bevinden en waar lading zich niet kan bewegen heten **isolatoren** (gassen, plastic, rubber).

De deeltjes die voor het transport van de lading zorgen heten **ladingsdragers**. Meestal zijn dit vrije elektronen maar dit kunnen dit ook **ionen** zijn, bijvoorbeeld in een zoutoplossing. In een geïoniseerd gas zijn vrije elektronen en ionen samen verantwoordelijk voor ladingstransport.

Elektrische **spanning** is een maat voor het verschil in elektrische energie per Coulomb lading tussen twee plaatsen. In formulevorm:

$$U = \frac{\Delta E_{elektrisch}}{q}$$

U=elektrische spanning (V)
$\Delta E_{elektrisch}$ = verschil in elektrische energie(J)
q = elektrische lading (C)

Bij aanwezigheid van een spanningsverschil tussen twee plaatsen hebben ladingsdragers de neiging zich te verplaatsen: In de praktijk kan elektrische **spanning** gezien worden als de "kracht" waarmee ladingsdragers een bepaalde kant op geduwd worden in een stof: Zonder elektrische spanning is er geen ladingstransport. Omdat alleen het verschil in energie tussen twee punten van belang is, is ook alleen het spanningsverschil tussen twee punten in een schakeling van belang. Spanning wordt altijd gemeten of berekend "tussen twee punten".

Een **spanningsbron** is een apparaat wat tussen twee punten een bepaalde spanning zet (bv batterij of het stopcontact, U=230V).

De hoeveelheid ladingsdragers die per seconde een bepaald punt passeren wordt de **stroom** of **stroomsterkte** genoemd. Symbool: I, Eenheid: Ampère (A). In formulevorm:

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = stroomsterkte(A)
Q = getransporteerde elektrische lading(C)
t = tijdsduur(s)

Stroom kan alleen blijven stromen in een gesloten **stroomkring** en stroomt van de pluspool (+) naar de minpool (-) van de batterij. De totale stroom die uit een stroombron loopt heet **hoofdstroom.** Door vertakkingen kan er deze stroom zich splitsen in 2 of meer deelstromen. De som van de deelstromen is gelijk aan de hoofdstroom.

Weerstand is de eigenschap van een voorwerp die aangeeft hoe goed het voorwerp spanning 'weerstaat'. Een grote weerstand betekent dat zelfs bij een grote spanning weinig stroom gaat lopen. Daarnaast wordt het begrip **geleidingsvermogen** gebruikt, ook wel **elektrische geleiding, geleidbaarheid** of **conductantie** genoemd. Dit betekent juist het omgekeerde. Een groot geleidingsvermogen betekent dat er bij een lage spanning een hoge stroom loopt. Er geldt:

$$G = \frac{1}{R}$$

G = geleidingsvermogen (Siemens, S)
R = weerstand (Ω)

Voorwerpen met een hoog geleidingsvermogen hebben een kleine weerstand en andersom.

De **wet van Ohm** geeft het verband tussen stroom, spanning en weerstand. De wet van Ohm geldt alleen voor '**Ohmse weerstanden**'. Dit zijn weerstanden waarbij R constant is (en dus ook G constant is). In het algemeen zijn voorwerpen Ohms maar bv **gloeilampen** meestal niet omdat de weerstand toeneemt bij hogere temperatuur.

$$U = I \cdot R$$

U = spanning (V)
I = stroomsterkte (A)

R = weerstand(Ω)

De **wet van Ohm** kan ook in een andere vorm geschreven worden als het verband tussen stroom, spanning en, geleidingsvermogen:

$$I = G \cdot U$$

U = spanning (V)
I = stroomsterkte (A)
G = geleidingsvermogen(S)

Meerdere elektrische componenten met elkaar verbonden wordt een **schakeling** genoemd. Een schematische tekening van de schakeling heet een **schema**. Voor elk component bestaat een symbool (BINAS tabel 17B).

Componenten kunnen op verschillende manieren met elkaar gecombineerd worden:
In serie betekent dat de stroom achtereenvolgens door alle componenten gaat.
Parallel betekent dat de stroom gesplitst wordt en nadat het door de componenten gelopen is weer bij elkaar komt.

Meerdere weerstanden kunnen vervangen worden door één weerstand, de **vervangingsweerstand.** Hoe deze berekend wordt hangt ervan af of weerstanden in serie of parallel staan:

- In serie is de som van de weerstanden de weerstand van de vervangingsweerstand.
- Parallel is de som van de geleidingsvermogens het geleidingsvermogen van de vervangingsweerstand.

In serie: $R_V = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots$

Parallel: $G_V = G_1 + G_2 + G_3 + \ldots$

R_V = vervangingsweerstand(Ω)
$R_{1,2,,3}$ = afzonderlijke weerstanden(Ω)
G_V=geleidingsvermogen van vervangingsweerstand (S)
$G_{1,2,,3}$ = geleidingsvermogens van afzonderlijke weerstanden(Ω)

Door gebruik te maken van vervangingsweerstanden en de wet van Ohm kunnen stroom en spanning op verschillende plaatsen in een schakeling berekend worden door gebruik te maken van onderstaande eigenschappen:

In serie:
$$I_1 = I_2 = I_3 = \ldots$$
$$U_{totaal} = U_1 + U_2 + U_3 + \ldots$$

$I_{1,2,3}$ = stroomsterktes door de verschillende componenten(A)
$U_{1,2,,3}$ = spanningen over de verschillende componenten(V)

Parallel:
$$I_{hoofd} = I_1 + I_2 + I_3 + \ldots$$
$$U_1 = U_2 = U_3 = \ldots$$

In woorden:

- Bij componenten <u>in serie</u> is de stroom door elk van de componenten gelijk en verdeelt de spanning zich over de componenten.
- Bij componenten <u>parallel</u> is de spanning over elk van de componenten gelijk en verdeelt de stroom zich over de componenten.

Ook gelden in een schakeling de **wetten van Kirchhoff**:

Voor elk punt in een schakeling geldt dat de som van alle stromen van en naar dat punt 0 A is. Stroom naar het punt toe (**inkomende stroom**) wordt positief meegeteld, stroom van het punt af (**uitgaande stroom**) telt negatief mee:

$$\sum_i i_i = 0$$

$I_{1,2,3...}$=afzonderlijke stromen (A)

Voor elk gesloten kring binnen een schakeling geldt dat de som van alle spanningen 0 V is. Spanningen over spanningsbronnen (batterij, accu, dynamo etc..) hebben hierbij een tegenovergesteld teken ten opzichte van spanningen over andere componenten (weerstanden, lampje etc..) en tellen negatief mee:

$$\sum_i u_i = 0$$

$u_{1,2,3...}$=afzonderlijke spanningen (V)

De weerstand van een draad kan berekend worden met:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

R = weerstand(Ω)
ρ = soortelijke weerstand (Ωm)
l = lengte (m)
A = oppervlakte (m^2)

Soortelijke weerstand is een stofeigenschap die aangeeft hoe hoog de weerstand van een bepaalde stof is (BINAS 8 tot 10). Soortelijke weerstand is afhankelijk van de temperatuur. Voor de meeste stoffen geldt: Hoe hoger de temperatuur hoe hoger de soortelijke weerstand en dus ook hoe hoger de weerstand.

Elektrisch vermogen is de hoeveelheid energie die per seconde door een schakeling wordt verbruikt en omgezet in een andere energievorm, bv licht, warmte of beweging. Symbool: P, eenheid Joule per seconde (J/s) of Watt (W). De totale verbruikte elektrische energie is te berekenen met:

$$E = P \cdot t$$

E = verbruikte elektrische energie (J)
P = vermogen (W)
t = tijdsduur (s)

Elektrische energie wordt vaak niet gemeten in Joule maar in **Kilowattuur.** 1 kWh is de hoeveelheid energie die correspondeert met het gedurende één uur gebruiken van een vermogen van 1 kW. Dit correspondeert met 3600 s x 1000 J/s = 3.600.000 J. Dus 1 kWh = 3,6 MJ.

Elektrisch vermogen is te berekenen als de stroom en spanning bekend zijn:

$$P = U \cdot I$$

P = vermogen (W)
U = spanning (V)
I = stroomsterkte (A)

Vermogen kan per onderdeel berekend worden of voor een hele schakeling.

Net zoals bij andere energie omzetting is er bij het verbruiken van elektrische energie sprake van een rendement dat in de praktijk altijd < 100% is. Zie hoofdstuk C2 (Energie en Arbeid).

De meeste materialen gedragen zich als positieve- temperatuurcoëfficient-weerstanden (**PTC**): De weerstand neemt toe als de temperatuur toeneemt. Weerstanden waarbij dit effect zeer sterk is worden gebruikt als temperatuursensor.

Een negatieve temperatuurcoëfficient-weerstand (**NTC**) is een weerstand waarvan de weerstand juist KLEINER wordt als het warmer wordt. Belangrijkste toepassing: temperatuursensoren.

Een Light Dependent Resistor (**LDR**) is een weerstand waarvan de weerstand kleiner wordt naarmate er meer licht op valt. Belangrijkste toepassing: Lichtsensoren.

Een **diode** is een voorwerp wat maar in één richting stroom doorlaat. De weerstand is de ene kant op (de doorlaatrichting) vrijwel 0 Ω en de andere kant op (de sperrichting) vrijwel oneindig. Een **LED** (Light Emitting Diode) is een diode die licht geeft als er stroom doorloopt (alleen in de doorlaatrichting).

De symbolen van deze componenten staan in BINAS tabel 17B

De elektrische schakeling van de meeste huizen en kantoren werkt op 230 V **wisselspanning.** Bij een wisselspanning wisselen de + en de – pool 50 keer per seconde om. Ook de stroom die er kan gaan lopen wisselt dus 50 keer per seconde van richting.

Alle stopcontacten in een huis staan **parallel** aan elkaar. Per kamer of verdieping zitten ze meestal samen in een **groep** in de **meterkast**. Elke groep is beveiligd met een **smeltzekering** of een **automatische zekering**. Een zekering "brandt door" als er teveel stroom loopt en laat dan geen stroom meer door. Een **aardlekschakelaar** vergelijkt constant de wegstromende en de terugstromende stroom vanuit de meterkast en schakelt deze automatisch uit als er een verschil is (als extra beveiliging). Leidingen en stopcontacten kunnen 2-aderig of 3-aderig zijn (met **aardleiding**).

---

2 Elektrische en Magnetische Velden

Een eigenschap van elektrisch geladen voorwerpen is dat ze elkaar aantrekken of afstoten:

- Voorwerpen met tegengestelde lading trekken elkaar aan
- Voorwerpen met dezelfde lading stoten elkaar af

Dit geldt niet alleen voor grote voorwerpen maar ook voor de deeltjes waaruit atomen zijn opgebouwd. De kern van een atoom is positief geladen door de aanwezigheid van protonen. De elektronen in de schil om de kern heen zijn negatief geladen. De lading van een proton is $+1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C de lading van een elektron is $-1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C .

De kracht waarmee twee geladen voorwerpen A en B elkaar afstoten of aantrekken kan berekend worden met de **wet van Coulomb**:

$$F = f\frac{Qq}{r^2}$$

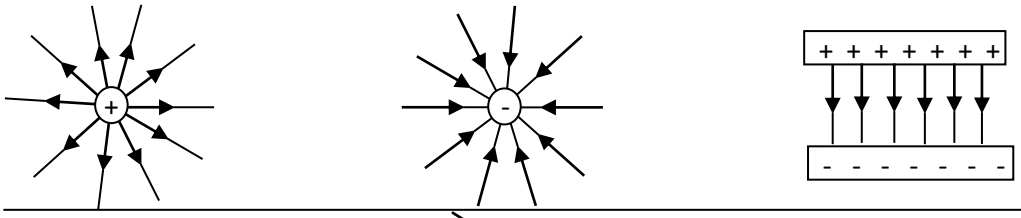
F=kracht(N)
f=$8{,}98755 \cdot 10^{9}$ Nm^2C^{-2}
q=lading voorwerp A(C)
Q=lading voorwerp B (C)

(de constante f staat in BINAS tabel 7)

Het gebied rondom een elektrische lading waar de lading invloed heeft wordt het **elektrisch veld** genoemd. Met een denkbeeldige massaloze **proeflading** van +1 Coulomb kunnen de eigenschappen van een veld onderzocht worden. Op elke plaats ondervindt de proeflading een bepaalde kracht (grootte én richting) die door een vector beschreven kan worden. De verdeling van deze vectoren over de ruimte is het veld. Omdat het veld lastig te tekenen is in de praktijk wordt meestal gebruik gemaakt van **veldlijnen:** Denkbeeldig lijnen in de ruimte waarlangs de proeflading zou gaan bewegen als hij losgelaten zou worden. Veldlijnen hebben de volgende eigenschappen:

- Veldlijnen lopen van positief geladen voorwerpen naar negatief geladen voorwerpen.
- De raaklijn langs een veldlijn is de richting van de kracht op de proeflading
- Veldlijnen staan loodrecht op een geleider
- Hoe dichter veldlijnen op elkaar liggen hoe groter de kracht
- Veldlijnen snijden elkaar nooit.

Het veld van één bolvormig geladen voorwerp wordt een **radiaal veld** genoemd (zie hieronder links en midden). Het veld tussen de twee platen als ze tegengesteld geladen worden heeft overal dezelfde richting en dichtheid van veldlijnen. Dit wordt een **homogeen veld** genoemd (zie hieronder rechts). In de praktijk is het veld nooit helemaal homogeen: Hoe dichter aan de rand hoe groter de afwijkingen.



De **elektrische veldsterkte** (symbool $\vec{E}$) is gelijk aan de kracht die op een lading van 1 Coulomb zou werken op een bepaalde plaats. In formule vorm:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$\vec{E}$=elektrische veldsterkte (N/C)
$\vec{F}$=kracht (N)
q=lading (C)

Omdat elektrische ladingen met hetzelfde teken elkaar afstoten zal lading zich verzamelen aan het buitenoppervlak van een geleider. Als gevolg hiervan is de elektrische veldsterkte binnen een geleider altijd nul omdat de verschillende krachten van verschillende kanten elkaar opheffen.

Een geladen deeltje in een homogeen elektrisch veld ondervindt een kracht waardoor het deeltje versneld wordt. Er wordt dus arbeid (W=F·s) verricht waardoor de kinetische energie van het deeltje toeneemt. Deze energie gaat ten koste van het verschil in **elektrische energie** wat het deeltje op de twee plaatsen heeft. Deze elektrische energie is te vergelijken met de potentiele energie die een massa op een bepaalde hoogte boven het aardoppervlak heeft. Dankzij zijn positie heeft de massa de potentie deze energie om te zetten in een andere energiesoort. Bijvoorbeeld kinetische energie als de massa valt. Het deeltje wat elektrische energie heeft dankzij zijn lading en zijn positie in een elektrisch veld zet deze energie om in kinetische energie als het losgelaten wordt en gaat bewegen. Elektrische energie is niet alleen afhankelijk van het veld maar ook van de lading van het deeltje.

De elektrische energie per Coulomb lading wordt de **elektrische spanning** genoemd (Symbool U, eenheid: Volt (V)).

$$\Delta U = \frac{\Delta E_{elektrisch}}{q}$$

ΔU=verschil in elektrische spanning (V)
ΔE=verschil in elektrische energie (J)

q=lading (C)

Spanning is een eigenschap van het elektrisch veld en is op elke plaats verschillend. Om de toe- of afname van elektrische energie te berekenen moet altijd gekeken worden naar het verschil in spanning tussen twee plaatsen.

In een **versneller** worden geladen deeltjes tussen twee geladen voorwerpen gebracht. Door een spanningsverschil tussen deze twee plaatsen heerst tussen de platen een elektrisch veld en krijgen de deeltjes elektrische energie. De elektrische energie die de deeltjes hierbij verliezen wordt omgezet in kinetische energie. Ze krijgen dus steeds meer vaart. Voor de toename in kinetische energie geldt:

$$\Delta E_{kinetisch} = \Delta E_{elektrisch} = q \cdot \Delta U$$

$\Delta E_{kinetisch}$=toename kinetische energie (J)
$\Delta E_{elektrisch}$=afname elektrische energie (J)
ΔU=elektrische spanning tussen platen(V)
q=lading deeltje(C)

Het verschil in energie dat correspondeert met het versnellen van een elektron door een spanningsverschil van 1 Volt wordt een **elektronvolt** (afkorting eV) genoemd. Uit bovenstaande formule volgt:

$$1\text{eV} = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Het elektronvolt is een alternatieve eenheid van energie die vaak gebruikt wordt voor energie binnen atomen of atoomkernen.

Voorbeeld van een versneller is het **elektronenkanon.** Hierin worden elektronen eerst uit een metaal vrijgemaakt door het verhitten van een negatief geladen **kathode** waarna de elektronen versneld worden in de richting van de positief geladen **anode**. Dergelijke apparaten worden ook wel **elektronenstraalbuizen** of **kathodestraalbuizen** genoemd.

Ook in een **röntgenbuis** zit een elektronenkanon. Als de versnelde elektronen die uit het elektronenkanon komen tegen een metalen blok opbotsen komt bij de botsing röntgenstraling vrij.

In een **lineaire versneller** zijn meerdere versnellers achter elkaar geschakeld waarbij de versnelspanning steeds van teken wisselt zodanig dat de deeltjes bij elke stap versnelt worden.

Magneten zijn metalen voorwerpen die op afstand een aantrekkende of afstotende kracht uitoefenen op andere magneten. Magneten hebben een **noordpool** en een **zuidpool**. De kant die de neiging heeft naar het noorden te wijzen wordt noordpool genoemd*. 'Losse' noord- en zuidpolen bestaan niet.

- Een noordpool en een zuidpool trekken elkaar aan.
- Gelijknamige polen stoten elkaar af.

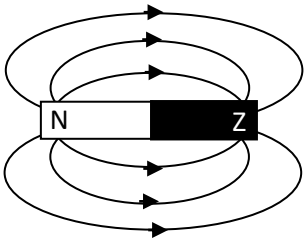
**De aarde is dus ook een magneet. De zuidpool van deze magneet ligt in het geografische noorden.*
Een magneet kan een metalen voorwerp in de buurt (tijdelijk) in een magneet veranderen. Dit wordt **magnetische influentie** genoemd. Magnetische influentie treedt op bij zg. **ferromagnetische** metalen (o.a. ijzer en nikkel maar niet bij koper: zie BINAS tabel 16B)).

Het gebied rondom een magneet waar de magneet invloed heeft wordt het **magnetisch veld** genoemd. Met een denkbeeldige massaloos en wrijvingloos **minikompasje** kunnen de eigenschappen van een veld onderzocht worden. Op elke plaats wordt het kompasje in een bepaalde richting geduwd. De verdeling van deze richtingen over de ruimte is het eigenlijk veld.

Omdat het veld lastig te tekenen is in de praktijk wordt gebruik gemaakt van **magnetische veldlijnen:** Denkbeeldig lijnen in de ruimte waarlangs het kompasje zich zou richten als het hier geplaatst zou worden. Magnetische veldlijnen hebben de volgende eigenschappen:

- Veldlijnen lopen <u>buiten</u> een magneet van noordpool naar zuidpool.
- Veldlijnen lopen <u>binnen</u> een magneet van zuidpool naar noordpool.
- Veldlijnen zijn gesloten kromlijnig lopende lijnen en hebben geen begin en einde.
- Hoe dichter veldlijnen op elkaar liggen hoe groter de kracht waarmee de kompasnaald in een richting geduwd wordt.
- Veldlijnen snijden elkaar nooit.

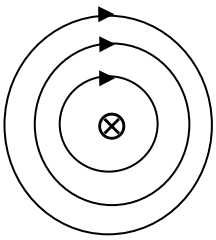
LET OP: Magnetische veldlijnen hebben dus niet alleen een andere betekenis dan elektrische veldlijnen, maar ook andere eigenschappen.

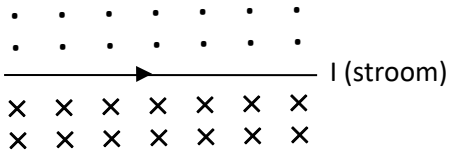


Veldsterkte van een magneetveld wordt ook wel de **magnetische inductie** genoemd. Symbool: $\vec{B}$, eenheid: Tesla (T). Hoe dichter veldlijnen op elkaar staan, hoe groter de veldsterkte.

Om een draad waar stroom doorheenloopt heerst een magnetisch veld. De veldlijnen vormen cirkels rondom de stroomdraad. De richting van het magnetische veld kan bepaald worden met de **rechterhandregel voor draden**: Krom je vingers en steek je duim recht omhoog. Als je duim in de richting van de stroom wijst wijzen je vinger de richting van de magnetische veldlijnen aan.

Tekenafspraken:
Magnetische veldlijnen die het papier ingaan worden genoteerd als **X**
Magnetische veldlijnen die uit het papier omhoog komen worden genoteerd als ·
Stroom die het papier in gaat wordt genoteerd als ⊗
Stroom die uit het papier omhoog komt wordt genoteerd als ⊙





Door een draad in een spoel te wikkelen versterken de veldlijnen van alle stukjes draad elkaar. Hierdoor heerst binnen een **stroomspoel** waar stroom doorheen loopt een krachtig homogeen magnetisch veld. Met de **rechterhandregel voor spoelen** kan de richting van het magnetisch veld

bepaald worden: Krom je vingers en steek je duim recht omhoog. Als je vingers de richting van de stroom aanwijzen wijst je duim in de richting van de magnetische veldlijnen.
Een stroomspoel wordt ook wel een **elektromagneet** genoemd.

Een geladen deeltje dat zich binnen een magneetveld beweegt ondervindt een kracht loodrecht op de bewegingsrichting en loodrecht op de richting van het magneetveld. Deze kracht wordt **Lorentzkracht** genoemd. Als het magneetveld en de snelheid loodrecht op elkaar staan kan de grootte van de Lorentzkracht berekend worden met:

$$F_{lorentz} = B \cdot q \cdot v$$

$F_{lorentz}$=grootte van Lorentzkracht (N)
B=magnetische veldsterkte (T)
q=lading deeltje (C)
v=snelheid (m/s)

De richting van de lorentzkracht kan gevonden worden met de **linkerhandregel**: Strek de vingers van je linkerhand en laat je duim opzij wijzen. Laat de magnetische veldlijnen loodrecht je handpalm inlopen en je vingers in de stroomrichting wijzen. Je duim wijst dan de richting van de Lorentzkracht aan.
Let op: Bij bewegende elektronen is de stroomrichting tegengesteld aan de bewegingsrichting van de elektronen vanwege de negatieve lading van het elektron.

Ook op een draad binnen een magneetveld waarin een stroom loopt wordt een lorentzkracht uitgeoefend loodrecht op $\vec{I}$ en $\vec{B}$. Dit komt omdat een stroomdraad eigenlijk is op te vatten als een lange rij achter elkaar bewegende geladen deeltjes die elk een lorentzkracht ondervinden. De grootte van de lorentzkracht op een (deel van een) draad kan berekend worden met*:*

$$F_{lorentz} = B \cdot I \cdot l$$

$F_{lorentz}$= grootte Lorentzkracht (N)
B=magnetische veldsterkte (T)
I=stroomsterkte (A)
l=lengte van de draad (m)

Ook op een stroom in een **spoel** die zich in een magneetveld bevindt wordt een lorentzkracht uitgeoefend. De totale kracht is de optelsom van alle individuele krachtjes op alle draadsegmentjes van de spoel. Deze krachten resulteren erin dat een elektromagneet een dusdanige kracht ondervindt dat hij zich zodanig probeert te richten dat het in de spoel opgewekte magneetveld samenvalt met het externe magneetveld.

Een toepassing van de lorentzkracht is de **luidspreker** of **speaker**: Binnen een spoel wordt, door een permanente magneet, een magneetveld aangelegd. Wanneer door de spoel stroom loopt zal op de alle stukjes draad van de spoel dezelfde lorentzkracht werken. De spoel beweegt hierdoor afhankelijk van de stroom die er door de spoel loopt. Als er een wisselstroom door de spoel gestuurd wordt gaat deze bewegen heen en weer bewegen. Aan de spoel zit een **conus** vast, een trechtervormige schijf van licht plastic of papier, die de lucht heen en weer beweegt waardoor geluidsgolven ontstaan. Deze geluidsgolven volgen het patroon van de stroom die door de spoel loopt. Het elektrische signaal wat door de spoel gaat wordt zo dus omgezet in geluid.

Een andere toepassingen is de **elektromotor.** Ook hierbij resulteert stroom door een spoel binnen een permanent magneetveld in een lorentzkracht waardoor de spoel gaat bewegen. Een elektromotor is zo ontworpen dat een continue stroom resulteert in een continue, ronddraaiende beweging.

Magnetische flux kan worden gezien als het totaal aan veldlijnen door een bepaald (begrensd) vlak. Als het vlak groter wordt, wordt de magnetische flux dus ook groter. Het symbool van magnetische flux is Φ , de eenheid Tm^2 of Weber (Wb). In een homogeen magneetveld kan de magnetische flux door een oppervlak loodrecht op het magneetveld berekend worden met:

$$\Phi = B \cdot A$$

Φ=magnetische flux(Wb)
B=magnetische inductie (T)
A=oppervlak (m^2)

Als het vlak draait lijkt, gezien vanuit de richting van het magneetveld, het oppervlak kleiner en is dus ook de flux kleiner met een factor *cos α* (α is de hoek waaronder het vlak t.o.v. het magneetveld gedraaid is.

Als de magnetische flux door een stroomspoel (waardoor geen stroom loopt) verandert, ontstaat er een spanningsverschil tussen de aansluitdraden van de spoel. Dit verschijnsel heet **elektromagnetisch inductie** (kortweg **inductie**). De opgewekte spanning wordt **inductiespanning** genoemd. Hoe sneller de verandering van de flux hoe groter de opgewekte spanning. De grootte van de opgewekte spanning is:

$$U_{inductie} = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

$U_{inductie}$=inductiespanning (V)
N=aantal windingen spoel
ΔΦ=verandering in flux (Wb)
Δt=tijd nodig voor verandering (s)

Als de in een spoel opgewekte inductiespanning gebruikt wordt om een stroom te laten lopen, wordt deze stroom **inductiestroom** genoemd. Omdat de verandering van de flux wordt tegengewerkt kost het dus **kracht** om een magneet in een gesloten spoel te bewegen. Er moet dus **arbeid** verricht worden voor het opwekken van een inductiestroom.

Een toepassing van elektromagnetische inductie is de **microfoon**. Binnen een microfoon wordt een stroomspoel door trillende lucht (=geluid) in trilling gebracht binnen een magneetveld. De flux door een stroomspoel neemt hierdoor steeds toe en af waardoor er een inductiespanning wordt opgewekt. Deze inductiespanning is een afspiegeling van het geluid wat de trilling veroorzaakte. Geluidstrillingen worden zo door een microfoon omgezet in elektrische trillingen.

Een andere toepassing van elektromagnetische inductie is de **dynamo**. Hier wordt de magnetische flux door een stroomspoel afwisselend groter en kleiner gemaakt doordat de spoel en een of meer magneten ten opzichte van elkaar bewegen. Hierdoor wordt een inductiespanning opgewekt die als spanningsbron gebruikt kan worden.

Een elektromotor zet elektrische energie om in bewegingsenergie. Een dynamo doet precies het omgekeerde. Wat bouw betreft lijken dynamo's en elektromotoren erg op elkaar. Een dynamo die gelijkstroom opwekt wordt een **gelijkstroomdynamo** genoemd, een dynamo die wisselstroom levert een **wisselstroomdynamo**. Een grote dynamo die in o.a. elektriciteitscentrales wordt gebruikt heet een **generator.**

Op zoek naar voorbeeldopgaven?
In de app van deze samenvatting vind je meer dan 100 voorbeeldvragen.
Ideaal om te checken of je alles écht snapt.

Installeer gratis via natuurkundeuitgelegd.nl/samenvatting

E MATERIE & STRALING

Dit onderdeel gaat over hoe materie is opgebouwd en hoe eigenschappen van materie verklaard kunnen worden uit de deze opbouw. Daarnaast gaat het over hoe straling opgewekt wordt en rol die materie hierin speelt. Uit het spectrum van uitgezonden straling kan veel informatie gehaald worden over de materie die de straling heeft uitgezonden. Dit wordt met name in de sterrenkunde veel toegepast.

1 Eigenschappen van Materie*

**Dit onderdeel hoort niet bij het Centraal Examen. De invulling van dit onderdeel is niet landelijk vastgelegd en kan van school tot school verschillen. Vraag op jouw school wat de precieze stofomschrijving is.*

Stoffen zijn opgebouwd uit **moleculen** (die op hun beurt weer zijn opgebouwd uit atomen). Tussen de moleculen in een stof zit ruimte: de **intermoleculaire** ruimte. Door de elektrische ladingsverdeling binnen moleculen trekken moleculen (ook neutrale moleculen!) elkaar aan. Deze aantrekkingskracht heet de **vanderwaalskracht**. Bij geladen moleculen (ionen) zijn de elektrische krachten veel sterker dan de vanderwaalskracht.

De massa van 1 m^3 van een stof wordt **dichtheid** of **soortelijke massa** genoemd en hangt af van de massa per molecuul en hoe ver de moleculen uit elkaar zitten:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

ρ = dichtheid (kg/m^3)
m = massa (kg)
V = volume (m^3)

NB: Dichtheden bij kamertemperatuur (293 K) staan in BINAS 8 t/m 12.

Moleculen in een stof bewegen ten opzichte van elkaar. Deze beweging ervaren wij als warmte. **Temperatuur** is een directe maat voor de **gemiddelde kinetische energie** van de moleculen in een stof. De temperatuur waarbij alle moleculen stilstaan en de gemiddelde kinetische energie dus 0 J is, wordt het **absolute nulpunt** genoemd (-273,15 ^{0}C, zie BINAS 7).

De **Celsius** temperatuurschaal is geijkt op water: het smelpunt van ijs is gedefinieerd als 0 ^{0}C en het kookpunt van water is gedefinieerd als 100 ^{0}C. Daarnaast bestaat de **Kelvin** temperatuurschaal. Hierbij is het absolute nulpunt gebruikt als nulpunt (0 K). Een temperatuurstijging van 1 K is gelijk aan een temperatuurstijging van 1 ^{0}C. Temperaturen kunnen omgerekend worden met:

$$T_K = T_C + 273{,}15$$

T_c=temperatuur in ^{0}C
T_K=temperatuur in K

Omdat moleculen elkaar aantrekken bezitten ze behalve kinetische energie ook **potentiële energie**. Hoe verder moleculen uit elkaar zitten hoe groter de totale potentiële energie.

De meeste stoffen kunnen in 3 **fasen** of **aggregatietoestanden** voorkomen.

Vaste fase
Moleculen zitten op een vast plaats ten opzichte van elkaar, vaak in een regelmatig rooster. Moleculen kunnen alleen rond hun plaats heen en weer bewegen. Bij stijging van de temperatuur is er meer ruimte voor deze trilling nodig en zet de stof iets uit.

Vloeistoffase
Moleculen kunnen langs elkaar bewegen maar 'kleven' nog wel aan elkaar vast door de vanderwaalskracht. Ook een vloeistof zet uit bij temperatuurstijging.

Gasfase
Moleculen bevinden zich op grote afstand van elkaar en bewegen kriskras door elkaar. Door de grote afstand voelen ze elkaar niet (behalve bij incidentele botsingen). Moleculen gedragen zich als onafhankelijke deeltjes en verspreiden zich spontaan over de beschikbare ruimte. Het volume wordt dus bepaald door de ruimte.

Bij een **faseovergang** gaat een stof van de ene fase over in de andere fase:

Vast	→	Vloeistof:	**smelten**
Vloeistof	→	Vast:	**stollen**
Vloeistof	→	Gas:	**verdampen**
Gas	→	Vloeistof:	**condenseren**
Vast	→	Gas:	**sublimeren**
Gas	→	Vast:	**rijpen**

De temperatuur waarbij dit gebeurt verschilt per stof. De grenstemperatuur tussen vaste en vloeibare fase heet **smeltpunt**. De grenstemperatuur tussen vloeistoffase en gasfase heet **kookpunt** (zie BINAS tabellen 8 t/m 12). Tijdens een faseovergang verandert de temperatuur van een zuivere stof niet.

Kracht per eenheid oppervlak wordt **druk** genoemd. De eenheid van druk is de N/m^2 of **Pascal** (Pa)
Voor druk op een oppervlak geldt:

$$p = \frac{F}{A}$$

p=druk (Pa)
F=kracht (N)
A=oppervlak(m^2)

Gasdruk wordt veroorzaakt door een constante stroom botsinkjes van moleculen met het oppervlak. De grootte van de druk hangt af van de kinetische energie van de individuele moleculen (=de temperatuur) en de hoeveelheid botsingen per second (de concentratie moleculen). Ook in de lucht om ons heen heerst een druk. De gemiddelde luchtdruk op zeeniveau bedraagt $1{,}01325 \cdot 10^5$ Pa. Dit wordt de **standaarddruk** genoemd. In plaats van de **Pascal** wordt ook de **bar** gebruikt als eenheid van druk (1 bar=10^5Pa). Luchtdruk wordt gemeten met een barometer.
De luchtdruk op een bepaalde plaats op een bepaald moment kan enkele procenten hoger of lager zijn. Een gebied met een hoge of een lage druk wordt een **hoge-** respectievelijk **lagedrukgebied** genoemd. De precieze ligging van deze gebieden verandert doorlopend. Deze drukvariaties zijn verantwoordelijk voor het ontstaan van wind en bepalen het weer. Op weerkaarten wordt de druk vaak aangegeven met **isobaren**: lijnen die plaatsen met dezelfde luchtdruk verbinden.
Daarnaast is de luchtdruk afhankelijk van de hoogte. Hoe hoger boven het aardoppervlak hoe lager de druk.

Ook in vloeistoffen heerst een druk. Vloeistofdruk neemt toe met de diepte van de vloeistof door het gewicht van de vloeistof in de bovenliggende lagen:

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

p=druk (Pa)
ρ=dichtheid (kg/m^3)
h=diepte onder het oppervlak(m^2)
g=9,81 m/s^2 (op aarde)

Bij vloeistoffen vaak wordt als eenheid van druk **mm Hg** ('millimeter kwik') gebruikt. Dit is de druk 1 mm onder het oppervlak van een kwikkolom (1 mm Hg=133,322 Pa).
De druk in slagaderen en aderen wordt **bloeddruk** genoemd. Door de werking van het hart varieert de bloeddruk tussen een maximale (**systolische-**) en minimale (**diastolische-**) druk.

Een gas waarvan het volume van de moleculen verwaarloosbaar is t.o.v. het volume van het gas en waarin de invloed van vanderwaalskrachten verwaarloosd kan worden wordt een **ideaal gas** genoemd**.** Onder normale omstandigheden gedragen de meeste gassen zich in de praktijk als ideaal gas. Druk (p), Volume (V), Temperatuur (T) en aantal mol n van een gas worden bij elkaar de **toestand** van een gas genoemd. Een verandering van een of meer van deze parameters wordt een **toestandsverandering** genoemd. Binnen een afgesloten vat gelden voor een ideaal gas de volgende wetten:
De druk in een afgesloten vat met constant volume en temperatuur is afhankelijk van de hoeveelheid gas:

$$\frac{p}{n} = c$$

p=druk (Pa)
n=aantal mol
c=constante

Bij constante temperatuur en hoeveelheid gas geldt de **wet van Boyle** :

$$p \cdot V = c$$

p=druk (Pa)
V=volume(m^3)
c=constante

Bij constant volume en hoeveelheid gas geldt de **wet van Gay-Lussac** :

$$\frac{p}{T} = c$$

p=druk (Pa)
T=temperatuur(K)
c=constante

Bovenstaande 3 gaswetten kunnen gecombineerd worden en vormen samen de **algemene gaswet**:

$$\frac{p \cdot V}{n \cdot T} = R$$

p=druk (Pa)
V=volume(m^3)
T=temperatuur(K)
n=aantal mol
R=gasconstante=8,3145 J mol^{-1} K^{-1} (BINAS 7)

Ook als niet alle variabelen bekend zijn kunnen met de algemene gaswet veranderingen in p, V, T en n berekend worden tussen twee toestanden (1 en 2):

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{n_1 \cdot T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{n_2 \cdot T_2}$$

Een serie toestandsveranderingen waarvan de eindtoestand dezelfde is als de begintoestand heet een **kringproces.**

Warmte is de hoeveelheid energie die toegevoerd of afgevoerd moet worden om een voorwerp in temperatuur te laten stijgen of dalen, respectievelijk. Warmte is dus een vorm van energie (symbool: Q, eenheid: J). **Temperatuur** is een maat voor de gemiddelde kinetische energie van de moleculen in een stof. Een verandering in temperatuur is altijd het gevolg van toe- of afvoer van warmte.

Warmte kan op drie manieren toe- of afgevoerd worden:

Warmtegeleiding: Hierbij wordt de beweging van moleculen aan een kant van een voorwerp van molecuul tot molecuul doorgegeven naar de andere kant van een voorwerp. De moleculen zelf blijven hierbij op een hun plaats. Metalen zijn over het algemeen een goede **warmtegeleiders**, piepschuim is een slechte warmtegeleider.

Warmtestroming: Hierbij verplaatsen de moleculen zelf zich van de ene plaats naar de andere plaats . In vloeistoffen en gassen is, vanwege de bewegelijkheid van moleculen, stroming vaak de belangrijkste manier van warmtetransport.

Warmtestraling: Voorwerpen warmer dan het absolute nulpunt stralen straling uit. Hoe hoger de temperatuur hoe groter de hoeveelheid straling. Bij voorwerpen met normale alledaagse temperaturen heeft de straling de vorm van infraroodstraling. Door het absorberen van straling kunnen voorwerpen in temperatuur stijgen. Donkere voorwerpen absorberen straling beter dan licht gekleurde voorwerpen. Omdat bij warmtetransport door straling geen moleculen te pas komen is warmtestraling de enige manier om warmte te transporten door vacuüm (bv in de ruimte).

Warmte-isolatie is het tegengaan van warmtetransport om een voorwerp zijn temperatuur te laten behouden. Voor isolatie is het nodig alle drie de vormen van warmtetransport zoveel mogelijk tegen te gaan. Een **calorimeter** is een geïsoleerd bakje wat gebruikt wordt bij experimenten met warmte en temperatuur.

De energie die nodig is om een hoeveelheid stof in temperatuur te laten stijgen kan berekend worden met:

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T$$

Q=warmte(J)
c=soortelijke warmte(J kg^{-1} K^{-1})
m=massa (kg)
ΔT=temperatuurverandering (K)

Soortelijke warmte van een stof is een materiaaleigenschap die aangeeft hoeveel warmte nodig is om 1 kg van de stof 1 K in temperatuur te laten stijgen (BINAS 8 t/m 12).

Voor voorwerpen gemaakt van meerdere stoffen kan Q berekend worden met:

$$Q = C \cdot \Delta T$$

Q=warmte(J)
C=warmtecapaciteit(J K^{-1})
ΔT=temperatuurverandering (K)

Warmtecapaciteit is de hoeveelheid warmte die nodig is om een voorwerp 1 K in temperatuur te laten stijgen.

De warmtehuishouding van een voorwerp wordt bepaald door de balans tussen warmteaanvoer en warmteafvoer. Alleen als deze twee even groot zijn is er sprake van **warmte-evenwicht** en blijft de temperatuur constant.

2 Spectra

In een **spectrum** wordt intensiteit van straling weergegeven per golflengte. Het spectrum van zichtbaar licht loopt van rood (grote golflengte) tot violet (kleine golflengte) met daartussen de kleuren van de regenboog (zie BINAS tabel 19A). De verschillende kleuren zijn niet altijd aanwezig in het spectrum. De relatieve sterktes van de verschillende kleuren hangt af van de manier waarop de straling wordt opgewekt.

Elk voorwerp dat warmer is dan het absolute nulpunt (0K) zendt straling uit. Voor een vaste stof en een vloeistof (en een gas onder zeer hoge druk) geldt dat het spectrum ononderbroken is. Dit heet een **continu spectrum**. De relatieve sterkte van de golflengtes die door een voorwerp (zoals een gloeidraad in een gloeilamp) worden uitgezonden wordt bepaald door de temperatuur. Hoe lager de temperatuur hoe sterker de golflengtes aan de rode kant van een spectrum en hoe hoger hoe sterker de blauwe kant. Een grafiek met de golflengte horizontaal en de relatieve intensiteit verticaal bij een bepaalde temperatuur wordt een **Planckkromme** genoemd (BINAS tabel 22). Het oppervlak onder een Planckkromme is een maat voor de totale intensiteit van de uitgezonden straling. De golflengte waar het maximum van een Planckkromme ligt wordt bepaald door de **wet van Wien.** Er geldt:

$$\lambda_{\max} = \frac{k_W}{T}$$

λ_{max}=golflengte maximum(m)
k_W=constante van Wien (BINAS tabel 7)
T=temperatuur (K)

Door het meten van de spectrum van een **ster** kan men aan de hand van Planckkrommen en de wet van Wien, de temperatuur van een ster bepalen: (Relatief) koele sterren zijn rood, hete sterren zijn blauw van kleur. Hierbij wordt ervan uitgegaan dat de bron van zichzelf geen kleur heeft en dat de kleur alleen door de uitgezonden straling bepaald wordt. Een dergelijk bron wordt ook wel een **zwarte straler** genoemd.

Het totaal uitgezonden vermogen is afhankelijk van het oppervlak van de bron en de **oppervlaktetemperatuur** en kan berekend worden met de **wet van Stefan-Boltzmann**:

$$P_{bron} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

P_{bron}=uitgezonden vermogen (W)
σ=constante van Stefan-Boltzmann (BINAS 7)
A=oppervlakte bron(m^2)
T=oppervlaktetemperatuur (K)

Intensiteit is hoeveel Watt aan straling er omgerekend op één vierkante meter valt. Hoe groter de afstand tot de bron, hoe kleiner intensiteit. Als er onderweg van de bron naar de ontvanger geen straling geabsorbeerd wordt geldt de **kwadratenwet**:

$$I = \frac{P_{bron}}{4\pi \cdot r^2}$$

I=opgevangen intensiteit (W/m^2)
P_{bron}=uitgezonden vermogen (W)
r=afstand bron(m)

De intensiteit van de straling van de zon op aarde wordt de **zonneconstante** genoemd en bedraagt $1{,}368 \cdot 10^3$ W/m^2 (BINAS tabel 32C). Beide bovenstaande formules worden ook bij sterren toegepast

en kunnen bijvoorbeeld gebruikt worden om grootte of afstand te bepalen uit de gemeten intensiteit en de temperatuur.

Een diagram waarin groepen sterren staan uitgezet met horizontaal de temperatuur van een ster en verticaal het uitgezonden vermogen wordt een **hertzsprung-russeldiagram** genoemd (HR-diagram, zie BINAS tabel 33). De sterren rechts bovenin worden rode reuzen genoemd, de sterren links onderin zijn de witte dwergen. De meeste sterren, waaronder de zon, liggen op de **hoofdreeks**, een band die diagonaal over het diagram loopt. Uit de plaats die een ster inneemt op het diagram is o.a. de levensloop van een ster te voorspellen. De meeste tijd brengen sterren op de hoofdreeks door. Als een ster 'op' is verlaat hij de hoofdreeks. De manier waarop hangt af van de grootte van de ster: Zeer grote sterren eindigen in een grote explosie (**supernova**), kleinere sterren eindigen als extreem ingekrompen felle ster (**witte dwerg**) en doven langzaam uit.

Gassen onder lage druk zenden geen continu spectrum uit. In plaats hiervan bevat het spectrum alleen bepaalde golflengtes. Een dergelijk spectrum wordt een **lijnenspectrum** genoemd. Een golflengte waarbij straling wordt uitgezonden heet een **spectraallijn**. Spectraallijnen zijn karakteristiek voor een stof. Elke stof heeft zijn eigen 'vingerafdruk' van spectraallijnen. Zie BINAS tabel 20. Aan de hand van de aanwezige spectraallijnen in het spectrum van een ster kan achterhaald worden welke stoffen zich op een ster bevinden.

Het spectrum van een heet gas dat licht uitzend in bepaalde spectraallijnen is zwart met op slecht enkele plaatsen een gekleurde lijn. Dit heet een **emissiespectrum**.
Het omgekeerde kan ook: Als wit licht (met een continu spectrum) door een gas heen schijnt worden de golflengtes van de spectraallijnen juist geabsorbeerd. Het resulterende spectrum is een continu spectrum waar juist de spectraallijnen donker zijn. Zo'n spectrum heet een **absorptiespectrum**. Een spectraallijn in een absorptiespectrum heet ook wel een **Fraunhoferlijn**, genoemd naar de ontdekker van deze lijnen in het **zonnespectrum** (BINAS tabel 20 spectrum 2)

Fraunhoferlijnen ontstaan doordat uit het door de zon uitgezonden licht (continu spectrum) bepaalde golflengtes worden geabsorbeerd door gaslaag die om de zon heen zit.

Om te verklaren waarom spectraallijnen optreden in het spectrum van gassen moeten we naar het atoom kijken: Volgens het model van Rutherford draait een elektron om een positief geladen kern die het elektron aantrekt en voor de benodigde middelpuntzoekende kracht zorgt om het elektron in zijn baan te houden. De potentiële energie is hoger naarmate de baan verder van de kern ligt. Door het absorberen van straling (licht) krijgt het elektron de benodigde energie om naar een hogere baan te gaan. Bij het teruggaan naar een lagere baan zendt het elektron juist straling uit. Volgens Planck geldt voor de energie van dit foton:

$$E_{foton} = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

E_{foton}=energie per foton (J)
h=constante van Planck (BINAS tabel 7)
f=frequentie (Hz)
c=lichtsnelheid(m/s) (BINAS 7)
λ=golflengte(m)

Probleem van dit model is dat het niet verklaard waarom deze geabsorbeerde en uitgezonden straling maar bepaalde specifieke golflengtes heeft. Niels Bohr kwam begin 20^{e} eeuw met een verklaring voor het ontstaan van spectraallijnen. In het **atoommodel van Bohr** kan een elektron maar op bepaalde specifieke afstanden zitten. Het elektron kan alleen sprongsgewijs van de ene naar een andere afstanden springen. Omdat de toegestane afstanden vastliggen en specifiek zijn voor een bepaald atoom is de energie van de straling die geabsorbeerd en uitgezonden wordt ook specifiek.

De ideeën van Planck en Bohr samen vormden een goede verklaring voor het optreden van lijnenspectra: De uitgezonden en geabsorbeerde fotonen hebben een energie die precies overeenkomt met het verschil in energie tussen de twee banen waartussen het elektron zich sprongsgewijs verplaatst. De ligging van deze energieniveaus en banen zijn specifiek voor elke soort atoom. Het laagste niveau wordt heet de **grondtoestand** (n=1), het eerste niveau hierboven heet de **eerste aangeslagen toestand** (n=2) etc. In het hoogste niveau is het elektron zover van de kern dat het hiervan losraakt: de **geïoniseerde toestand**. Energieniveaus worden meestal in een **energieniveau-diagram** weergegeven: een schema met horizontale lijnen voor elk energieniveau (zie BINAS tabel 21). Bij elk niveau hoort een bepaalde energie. Door het verschil in energie kan de fotonenergie berekend worden en daarmee de golflengte:

$$E_{foton} = |E_m - E_n|$$

E_{foton}=energie per foton (J)
E_m=energieniveau vóór overgang(J)
E_n=energieniveau na overgang(J)

De energie nodig om een atoom van de grondtoestand in een keer naar de geïoniseerde toestand te brengen heet de **ionisatie-energie** (zie BINAS tabel 21C).

Spectraallijnen in het licht van sterren kunnen zijn verschoven: Als een ster zich naar ons toe of van ons af beweegt treedt het **Dopplereffect** op. Als de ster naar ons toe beweegt zal de waargenomen golflengte van een spectraallijn iets kleiner worden omdat de golven als het ware in elkaar gedrukt worden. Omdat de golflengte naar het blauw verschuift wordt dit ook wel **blauwverschuiving** genoemd. Omgekeerd zal de golflengte iets groter worden als een ster zich van ons af beweegt. Dit wordt **roodverschuiving** genoemd. De snelheid in de richting naar ons toe of van ons af wordt ook wel **radiale snelheid** genoemd. Aan de hand van de grootte van de waargenomen golflengteverschuiving kan de radiale snelheid worden berekend met:

$$v = c \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$$

v=radiale snelheid (m/s)
Δλ=verschuiving golflengte (m)
λ=echte golflengte (m)
c=lichtsnelheid(m/s) (BINAS 7)

Let op: Bovenstaande formule geldt alleen voor snelheden die klein zijn t.o.v. de lichtsnelheid.

Voor het waarnemen van sterren wordt gebruik gemaakt van **telescopen**. De techniek die gebruikt wordt in een telescoop hangt af van de soort straling die ermee opgevangen wordt. Hoe groter het oppervlak waarmee de straling wordt opgevangen hoe gevoeliger de telescoop en hoe zwakker de objecten die kunnen worden waargenomen. Astronomen zijn geïnteresseerd in alle soorten elektromagnetische straling die uit het heelal komt.

Zichtbaar licht
Een telescoop die zichtbaar licht waarneemt wordt ook wel een **optische telescoop** genoemd. Er bestaan **lenzentelescopen** waarbij lenzen zorgen voor het bundelen van het licht en het maken van een afbeelding en **spiegeltelescopen** waarbij gebruik gemaakt wordt van (gebogen) spiegels. Optische telescopen hebben last van de dampkring waardoor het beeld vertroebelt. Optische telescopen worden daarom zo hoog mogelijk gebouwd (bovenop bergen) om zo min mogelijk last hiervan te hebben. Ook het deel van het infrarode spectrum wat in de buurt van zichtbaar licht ligt kan met een optische telescoop vanaf aarde waargenomen worden. Daarnaast worden telescopen in satellieten in een baan om de aarde gebracht waar ze boven de dampkring zitten en geen last hebben van de dampkring (**ruimtetelescopen**).

Infrarood en microgolven

De meeste infraroodstraling wordt door waterdamp in de dampkring tegengehouden. Voor infrarood worden meestal ruimtetelescopen gebruikt. **Microgolven** zijn de golven die tussen infrarood en radiostraling inzitten. Microgolven kunnen wel vanaf aarde worden waargenomen maar alleen vanaf extreem hoge droge plaatsen.

Radiostraling
Radiostraling wordt niet door de dampkring tegengehouden. **Radiotelescopen** staan dus gewoon op aarde en hoeven niet heel hoog te staan. Ze hebben de vorm van schotelvormige antennes. Omdat ze geen last hebben van wolken of daglicht kunnen ze 24 uur per dag metingen doen.

UV-, röntgen en gammastraling
Deze stralingsoorten komen niet door de dampkring heen. Alleen met ruimtetelescopen kunnen waarnemingen gedaan worden aan UV-, röntgen en gammastraling uit het heelal.

---

3 Kernen en Deeltjes**

Deze paragraaf is geen onderdeel van het Centraal Examen

***Kernen en Deeltjes, Relativiteitstheorie, Biofysica en Geofysica zijn keuzeonderwerpen. Je school kiest twee van deze vier onderwerpen als onderdeel van het schoolexamenprogramma. Informeer op jouw school voor meer informatie. De invulling van dit onderdeel is niet landelijk vastgelegd en kan van school tot school verschillen. Vraag op jouw school wat de precieze stofomschrijving is.*

Om meer over materie te weten te komen laat men deeltjes met grote snelheid op elkaar botsen (dit gebeurt nu o.a. bij CERN in Genéve). Zo is ontdekt dat protonen en neutronen bestaan uit nóg kleinere deeltjes. De kleinste stukjes waaruit deeltjes zijn opgebouwd worden **elementaire deeltjes** genoemd. Het gebied van de natuurkunde wat zich hiermee bezighoudt heet **deeltjesfysica**.
In het **standaardmodel** worden elementaire deeltjes ingedeeld op basis van hun eigenschappen. De elementaire deeltjes waaruit materie is opgebouwd worden ook wel **fermionen** genoemd. Er bestaan twee hoofdsoorten:

Leptonen	**Quarks**
Deeltjes die alleen los kunnen bestaan. Er bestaan 6 soorten: Elektron, muon, tauon, en drie soorten neutrino's.	Deeltjes alleen in samenstelling kunnen bestaan. Er bestaan 6 soorten: up (u),down (d), charm (c), strange (s), top (t), bottom (b).

Elementaire deeltjes hebben ook ieder een **antideeltje** met dezelfde massa maar tegengestelde lading. Zodra een deeltje een antideeltje van dezelfde soort bij elkaar komen **annihileren** ze elkaar: ze verdwijnen allebei waarbij energie in de vorm van fotonen vrijkomt. Alle elementaire deeltjes en hun eigenschappen staan in BINAS tabel 26A.

Samengestelde deeltjes worden **hadronen** genoemd en kunnen bestaan uit twee quarks (**mesonen**) of drie quarks (**baryonen**). Zowel het proton (uud) als het neutron (udd) zijn baryonen. Naast bovenstaande deeltjes zijn er ook deeltjes die een kracht overbrengen. Deze deeltjes heten **bosonen**. Het bekendste deeltje hiervan is het foton. En ander boson, het **gluon**, zorgt voor de **sterke kernkracht**, die nodig is om deeltjes bij elkaar te houden. Ondanks de grote hoeveelheid verschillende soorten deeltjes bestaat de materie om ons heen voor het overgrote deel uit slechts drie verschillende deeltjes: protonen, neutronen en elektronen. Vrijwel alle protonen en neutronen om ons heen zijn gebonden in atoomkernen.

Een **kernreactie** is een proces waarbij de samenstelling of configuratie van de atoomkern verandert. Er bestaan twee soorten kernreacties:

Spontane kernreacties treden op als radioactieve isotopen vervallen en veranderen in een andere stof. Hierbij wordt (meestal) ook een stralingsdeeltje uitgezonden. De manier waarop verschilt van isotoop tot isotoop (zie BINAS tabel 25A).

Kunstmatige kernreacties worden opgewekt door kernen of deeltjes op elkaar te laten botsen. Bij de opgewekte reacties kunnen andere kernen maar bv ook losse protonen of neutronen vrijkomen, bijvoorbeeld:

$$^{27}_{13}Al + ^{4}_{2}\alpha \rightarrow ^{30}_{15}P + ^{1}_{0}n$$

Omdat hiervoor altijd een deeltje nodig is waarmee een kern bestraald wordt staat er bij dit soort reacties aan de linkerkant van de pijl altijd meer dan deeltje.

Als we de massa's aan de linkerkant en de rechterkant van de pijl bij een vervalreactie bekijken dan verdwijnt er massa. Albert Einstein vond in zijn relativiteitstheorie in 1905 dat massa en energie in elkaar omgezet kunnen worden volgens:

$$E = m \cdot c^2$$

E=energie (J)
m=massa (kg)
c=lichtsnelheid (=2,9979·10^8 m/s)

Dit betekent dat er met het verdwijnen van massa energie vrijkomt. De massa wordt omgezet in kinetische energie van het uitgezonden deeltje en de vervallen kern en/of de energie van één of meer γ-fotonen. De energie van een γ-foton is direct gerelateerd aan de golflengte en de frequentie van de straling:

$$E_{foton} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

E_{foton}=energie per foton (J)
h=constante van Planck (BINAS tabel 7)
f=frequentie (Hz)
c=lichtsnelheid (BINAS tabel 7)
λ=golflengte (m)

De massa's van atomen staan in BINAS (tabel 25A) uitgedrukt in atomaire massaeenheden (u-tjes).

Let op!: Voor de massa's van de atoomkernen moet de massa van de elektronen hier nog van afgetrokken worden!

Bij spontane kernreacties verdwijnt er massa waardoor ze energie opleveren. Bij kunstmatige kernreacties moet er altijd eerst energie toegevoerd worden in de vorm van kinetische energie om deeltjes te laten botsen.

Bij het vergelijken van de massa van een helium-4 kern met de massa van 2 losse protonen en 2 losse neutronen blijkt dat de massa van de kern lager is dan de massa van de bestanddelen (!). Voor het splitsen moet er dus massa gecreëerd worden en dus energie toegevoerd. Deze energie word de **bindingsenergie** genoemd. Door de bindingsenergie te delen door het aantal nucleonen in de kern komen we op de bindingsenergie per deeltje. Bij de stof ijzer-56 is het verschil tussen gebonden deeltjes en losse deeltjes het grootst.

Voor atomen met een massa < de massa van ijzer-56 (massa=56u) geldt:
Het bij elkaar brengen van kernen is energetisch voordelig en levert dus energie op.

Voor atomen met een massa > de massa van ijzer-56 (massa=56u) geldt:
Het opsplitsen van kernen is energetisch voordelig en levert dus energie op.

Uranium-235 is een veelgebruikte isotoop waarbij splitsing energie oplevert. Uranium-235 wordt gebruikt als brandstof voor de productie van warmte (kernenergie) of als grondstof voor kernwapens. De isotoop uranium-235 valt uiteen in kleinere kernen als de kern getroffen wordt door een neutron. Dit uiteenvallen kan via een aantal verschillende manieren bijvoorbeeld:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{99}_{42}Mo + ^{134}_{50}Sn + 3^{1}_{0}n + ^{0}_{0}\gamma$$

Bij deze reactie komt, behalve een aantal neutronen, ook een grote hoeveelheid energie vrij in de vorm van warmte en gammastraling. Bij de vervalreactie ontstaan ook meerdere neutronen. Deze neutronen op hun beurt zorgen weer voor een reactie bij een andere uranium-235-kern wanneer deze getroffen wordt. Bij elke stap is het aantal neutronen groter. De mate waarin het aantal neutronen toeneemt na elke stap wordt de **vermenigvuldigingsfactor** genoemd (K).
K is niet automatisch 3 om de volgende redenen:

- Bij sommige reacties ontstaan niet 3 maar 2 neutronen
- De neutronen zijn te snel om tot een volgende reactie te kunnen leiden.
- Een deel van de neutronen ontsnapt aan het materiaal
- Een deel van de neutronen botst op iets anders dan een uranium-235-kern.

Er zijn 3 mogelijkheden:

- Als **K>1** is sprake van een **kettingreactie**. Het aantal reacties en neutronen neemt exponentieel toe en de geproduceerde energie komt in een extreem korte tijd vrij (kernexplosie)
- Als **K=1** is sprake van een evenwicht. De hoeveelheid geproduceerde energie blijft constant.
- Als **K<1** doven de reacties uit en verminderen tot er geen neutronen meer zijn.

In een **kerncentrale** wordt een kettingreactie met uranium-235 gebruikt om energie op te wekken voor elektriciteitsproductie. De reactie wordt streng gecontroleerd en d.m.v. **regelstaven** wordt ervoor gezorgd dat **k=1** tijdens het bedrijf van de centrale. Regelstaven zijn staven met o.a. cadmium en boor die neutronen absorberen en zo zorgen dat ze geabsorbeerd worden voordat ze tot een volgende reactie kunnen leiden. Meestal hebben deze de vorm van staven die tussen het materiaal met uranium-235 bewogen kunnen worden.
Behalve regelstaven worden in een kernreactor ook **moderatoren** gebruikt. Dit zijn materialen die de neutronen die bij het verval van uranium-235 ontstaan afremmen zodat ze een volgende reactie kunnen opwekken als ze tegen een volgende uranium-235 kern opbotsen. Door gebruik van een te moderator kan ook met een lager percentage U-235 gewerkt worden omdat de kans op een volgende kettingreactie groter wordt. O.a. **Grafiet**, en **zwaar water** (water met H-2 i.p.v. H-1) worden gebruikt als moderatoren.

In **kernwapens** wordt van dezelfde kettingreactie gebruik gemaakt alleen dan ongecontroleerd zodat k>1 en dat de kettingreactie exponentieel toeneemt en explosief wordt.

Uranium zoals dit in mijnen gevonden wordt bestaat voornamelijk uit uranium-238. Slechts 0,7% is uranium-235. Deze concentratie is veel te laag om een kettingreactie op gang te brengen. Door het

verrijken wordt het gehalte aan uranium-235 omhoog gebracht. Dit gebeurt door het uranium chemisch om te zetten in het gasvormige uraniumhexafluoride wat in een **ultra-centrifuge** verrijkt kan worden. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in massa tussen U-238 en U-235. Omdat verrijkt uranium zeer gevaarlijk kan zijn en gebruikt kan worden voor de productie van kernwapens is het ingewikkelde ultra-centrifuge proces zeer goed beschermd en beveiligd.

In kerncentrales zit het uranium-235 in **brandstofstaven**. Als een brandstofstaaf op is bevat deze nog bruikbaar uranium-235. De concentratie is echter te laag om het nog te gebruiken. Na terugwinning in een **opwerkingsfabriek** kan het gebruikt worden voor nieuwe staven.

Daarnaast bevatten opgebruikte staven de stof plutonium-239. Deze stof ontstaat als vervalproduct als uranium-238 getroffen wordt door een neutron. Dit laatste gebeurd uiteraard doorlopend in een kernreactor. De stof plutonium-239 kan op zijn beurt ook weer gebruikt worden als splijtstof. Deze stof wordt ook teruggewonnen uit gebruikte brandstofstaven in een opwerkingsfabriek.

Het gehele schema van de winning van uranium in de mijn via de verrijking, het gebruik in kernreactoren en het daarna terugwinnen van bruikbare materialen in een opwerkingsfabriek wordt de **splijtstofcyclus** genoemd.

Voordelen van kernenergie zijn:

- Weinig uranium nodig voor veel energie (relatief goedkoop)
- Weinig CO_2 productie (alleen bij de winning van uranium)
- Uraniummijnen bevinden zich op veel verschillende plaatsen in de wereld ook in niet politiek gevoelige gebieden zoals olie en gas.

Nadelen van kernenergie zijn:

- Afval wat niet hergebruikt kan worden is nog duizenden tot zelfs miljoenen jaren radioactief en gevaarlijk
- Een ongeluk met een centrale kan zeer ingrijpende gevolgen hebben
- Splijtstoffen kunnen ook in verkeerde handen vallen en misbruikt worden voor kernwapens (terrorisme!)
- Ook de werelduraniumvoorraad is eindig, net als olie en gas.

Een andere toepassing van kernreactoren is de fabricage van radioactieve isotopen voor **medische toepassingen**. In een kernreactor kunnen niet-radioactieve stoffen bestraald worden met neutronen en kunnen radioactieve stoffen gemaakt worden die niet op een andere manier te verkrijgen zijn. Deze radioactieve stoffen kunnen dan weer gebruikt worden voor bestraling van patiënten of als tracer. Vaak moeten deze stoffen binnen een paar uur na productie gebruikt worden omdat ze anders vervallen. De kernreactor van **ECN** in het Noord-Hollandse **Petten** is de belangrijkste kernreactor in Europa waar medische isotopen geproduceerd worden.

Op zoek naar voorbeeldopgaven?
In de app van deze samenvatting vind je meer dan 100 voorbeeldvragen.
Ideaal om te checken of je alles écht snapt.

Installeer gratis via natuurkundeuitgelegd.nl/samenvatting

F QUANTUMWERELD & RELATIVITEIT

Begin 20e eeuw werd duidelijk dat de klassieke natuurkunde niet meer in staat was de natuur te verklaren. Voor atomen en nog kleinere deeltjes gelden andere wetten en regels dan voor de voorwerpen om ons heen. Dit heeft uiteindelijk geleid tot de quantummechanica. Ook bij zeer grote snelheden bleken er andere regels te gelden. Dit heeft geleid tot Einstein's relativiteitstheorie. Voor zowel de quantummechanica als de relativiteitstheorie geldt dat we onze gewone alledaagse logica moeten loslaten om het te begrijpen.

1 Quantumwereld

Begin **20e** eeuw was er onduidelijkheid over wat licht nou eigenlijk was. Licht had, net zoals andere golven, een frequentie, amplitude en golflengte en vertoonde interferentie maar licht gedraagt zich in sommige omstandigheden als een stroom deeltjes: Deze lichtdeeltjes werden **fotonen** genoemd. Elk foton heeft een energie die bepaald wordt door de frequentie van het licht:

$$E_{foton} = h \cdot f$$

E_{foton}=energie per foton (J)
h=constante van Planck (BINAS tabel 7)
f=frequentie (Hz)

Een belangrijke aanwijzing dat licht uit fotonen bestaat is het **foto-elektrisch effect:** het verschijnsel dat licht elektronen uit een metaal kan vrijmaken. Dit verschijnsel treedt alleen op als de frequentie van het licht groter is dan een bepaalde grenswaarde. De verklaring hiervoor is dat licht bestaat uit energiepakketjes of **energiequanta** (later fotonen genoemd) en dat de energie per foton groter moet zijn dan de zg **uittree-energie** die voor iedere stof verschillend is (BINAS 24). Als de energie per foton groter is dan de uittree-energie wordt de resterende energie omgezet in kinetische energie van het elektron. Met behulp van een **remspanning** kan gemeten worden hoe groot deze energie is met onderstaande formule:

$$E_{kin} = E_{foton} - E_{uittree}$$
$$q \cdot U = E_{foton} - E_{uittree}$$

E_{fkin}=kinetische energie elektron (J)
E_{foton}=energie per foton (J)
E_{uitree}=uittree energie van het metaal (J)
U=remspanning (V)
q=lading elektron (C)

Voor het verklaren van sommige lichtverschijnselen (lichtbreking, interferentie, buiging) moet licht als een **golfverschijnsel** beschouwd worden. Andere verschijnselen kunnen alleen verklaard worden door aan te nemen dat licht een **deeltjesverschijnsel** is. Licht heeft dus zowel een golfkarakter als een deeltjeskarakter. Dit heet een **dualistisch karakter** of **golf-deeltjesdualiteit**.

Later werd ontdekt dat ook elektronen, die tot dan toe altijd als geladen deeltjes waren beschouwd, **golfverschijnselen** vertonen. Belangrijkste aanwijzing hiervoor was het **dubbelspleet-experiment**. Hierbij werd een stroom elektronen op twee dichtbij elkaar geplaatste nauwe spleten afgeschoten. Achter de twee spleten werd gemeten waar de elektronen precies terechtkwamen. Hier ontstond een interferentiepatroon van elkaar opvolgende plaatsen waar veel van de elektronen terecht kwamen (maxima) en plaatsen waar géén elektronen kwamen (minima). Het interferentiepatroon

leek sprekend wat zou ontstaan als op de spleten golven waren gevallen. Kennelijk kunnen elektronen met elkaar interfereren en elkaar 'uitdoven' of 'versterken' en vertonen golfverschijnselen. Ook als elektronen één voor één werden afgevuurd ontstond na verloop van tijd hetzelfde interferentie patroon. Kennelijk kan ook één enkel elektron met zichzelf interfereren en moet ook een enkel elektron als een golf beschouwd worden**.**

Elk bewegend deeltje heeft een bepaald effect als het ergens tegenaan botst: een peperkorrel heeft minder effect als het ergens tegenaan botst dan een bowlingbal met dezelfde snelheid. De 'hoeveelheid beweging' die een deeltje heeft wordt aangeduid met de grootheid **impuls**:

$$\vec{p} = m \cdot \vec{v}$$

p=impuls (kg·m·s^{-1})
m=massa (kg)
v=snelheid (m/s)

NB: Impuls heeft, behalve een grootte, ook een richting. Deze formule staat in BINAS niet bij de quantumformules maar bij de mechanicaformules (tabel 35-A3).

Elk deeltje is dualistisch. In sommige omstandigheden gedraagt het zich als golf. De golflengte die het deeltje heeft als het zich vrij kan bewegen wordt ook wel de **de Broglie-golflengte** genoemd en hangt af van de impuls van een deeltje:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

λ=golflengte deeltje (m)
h=constante van Planck (BINAS tabel 7)
p=grootte impuls deeltje (kg·m·s^{-1})

NB: Deze formule geldt alleen voor een deeltje dat zich vrij kan bewegen.
Een toepassing is de **elektronenmicroscoop**. In een normale lichtmicroscoop is de resolutie (het kleinste wat gezien kan worden) beperkt door de golflengte van het licht (enkele honderden nm). Door elektronen te versnellen is de zijn golflengtes van elektronengolven tot 0,05 nm te bereiken. Hierdoor kan met een extreem grote resolutie gekeken worden.

Of een deeltje zich ook als daadwerkelijk golf gedraagt hangt af van de omstandigheden. Voor voorwerpen en snelheden die we in het dagelijks leven tegenkomen is de de Broglie-golflengte (λ) zó extreem klein dat we de effecten mogen verwaarlozen en deeltjes gewoon als deeltjes mogen zien. Anders wordt het voor deeltjes als elektronen, protonen en neutronen. Hierbij is de de Broglie-golflengte (λ) van dezelfde orde van grootte als de wereld waarin ze bewegen (atomen). Hier zijn dus wel golf-effecten te verwachten. Een van de manieren waarop het al dan niet optreden van golfverschijnselen naar voren komt is in het spectrum van uitgezonden licht door een materiaal. In het algemeen geldt:

<u>Continu spectrum</u>: Alle energieovergangen zijn toegestaan: in het materiaal zijn geen golfverschijnselen
<u>Lijnenspectrum</u>: Sommige energie overgangen vinden niet plaats omdat de bijbehorende golven door interferentie zijn uitgedoofd: in het materiaal zijn wel golfverschijnselen.

Het bleek onmogelijk om met klassieke natuurkunde het optreden golfverschijnselen bij deeltjes te verklaren. Een echte voorstelling van deze golven, ook wel **golffuncties** genoemd, is moeilijk te maken en het heeft lang geduurd voordat deze **golfmechanica** of **quantummechanica** algemeen geaccepteerd was. Een groot probleem was in de natuurkunde de interpretatie van deze golffuncties: Een golf van wat? Uiteindelijk is men het erover eens geworden dat de amplitude van een golffunctie op een bepaalde plaats een maat voor de **waarschijnlijkheid** om het deeltje bij een waarneming op deze plaats aan te treffen. Op plaatsen waar de golffunctie een grote amplitude heeft is er een

grotere kans om het aan te treffen dan op plaatsen waar de amplitude laag is. De golffunctie moet dus geïnterpreteerd worden als **waarschijnlijkheidsverdeling**.

NB: Dit was voor veel fysici onacceptabel. Een fundamentele onzekerheid hoort niet thuis is een natuurkundige theorie. "God dobbelt niet" zei Albert Einstein.

Onzekerheid werd i.p.v. iets wat alleen bij metingen optrad een fundamenteel gegeven in de natuurkunde. Volgens de **onzekerheidsrelatie van Heisenberg** is het zelfs onmogelijk om precies de plaats van een deeltje te kennen en tegelijkertijd de impuls:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

Δx=onzekerheid in plaats (m)
Δp=onzekerheid in impuls(kg·m·s^{-1})
h=constante van Planck (BINAS tabel 7)

Neem als voorbeeld een vrij elektron met een bepaalde nauwkeurig bekende impuls p. Δp is dus extreem klein. Volgens de Broglie (zie hiervoor) moet dit elektron gezien worden als een golf met één golflengte en is de amplitude in de hele ruimte constant. Een constante amplitude geeft aan dat de kans om het deeltje ergens aan te treffen overal even groot is. Het elektron kan dus overal zitten. De onzekerheid in de plaats (Δx) is dus extreem groot.
Ook bij het absolute nulpunt (waarbij alle beweging stil komt te liggen) zijn de plaats en impuls niet met zekerheid te bepalen. Er moet een resterende beweging overblijven om de onzekerheid te kunnen verklaren. De energie die bij deze beweging hoort wordt de **nulpuntsenergie** genoemd.

Zoals we eerder hebben gezien in het model van Bohr (Zie hoofdstuk E2 over Spectra) zijn bepaalde banen voor elektronen 'verboden'. Dit kan verklaard worden door interferentie van golven. Door destructieve interferentie dooft de golf zich uit en is de waarschijnlijkheid om een elektron op deze plaats aan te treffen nul. Om dit te kunnen verklaren moeten we een waterstofatoom opvatten als een besloten gebiedje waarin de elektronen kunnen voorkomen. De grootte van het de straal van dit gebied om een waterstofatoom wordt ook wel de **bohrstraal** (5,29177 · 10^{-11} m BINAS tabel 7) genoemd. Binnen de bohrstraal 'passen' maar bepaalde golffuncties die zichzelf niet uitdoven. De meeste golffuncties doven zichzelf namelijk wel uit en komen niet voor. Deze 'toegestane' golffuncties hebben ieder een bepaalde energie. Voor het verschil in energie wat deze golven hebben t.o.v. het ionisatieniveau geldt in het waterstofatoom:

$$E_n = -\frac{13{,}6}{n^2}$$

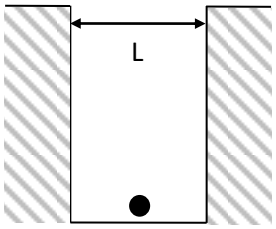
E_n =energie van niveau n (eV)
n=1,2,3…

Het getal n wordt het **hoofdquantumgetal** genoemd en geeft de verschillende niveau's weer die de energie van elektron kan hebben in het waterstofatoom (BINAS tabel 21A)

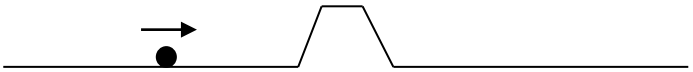
Ook voor een deeltje wat opgesloten zit in een ruimte zijn, door interferentie, niet alle golven toegestaan. De ruimte waarin een deeltje opgesloten zit wordt ook wel een **energieput** genoemd: Aan weerzijden van het gebied waar het deeltje zich bevindt is de energie die het deeltje nodig heeft om daar te komen oneindig hoog. Feitelijk zit het deeltje dus opgesloten. Verreweg de meeste golffuncties zullen zich door destructieve interferentie uitdoven. Er zijn maar een aantal golffuncties. Voor een deeltje in een **één-dimensionale energieput** of **potentiaalput**, waar een deeltje maar in één dimensie kan bewegen, geldt voor de energieniveaus van de toegestane golffuncties:

$$E_n = n^2 \frac{h^2}{8mL^2}$$

E_n =energieniveau (J)
n=1,2,3…
m=massa deeltje (kg)
L=lengte put (m)



Een effect wat met klassieke natuurkunde niet verklaard kan worden is het **tunneleffect**. Wanneer een deeltje een energie-barrière tegenkomt die groter is dan de energie die het deeltje zelf bezit zal het de barrière nooit kunnen passeren. De amplitude van de golffunctie van het deeltje zou nul moeten zijn aan de andere kant van de barrière omdat het deeltje daar nooit aangetroffen zou kunnen worden. In werkelijkheid is de amplitude achter de barrière niet meteen nul maar neemt zeer snel af. Er is dus een (zeer kleine!) kans het deeltje toch aan de andere kant van de barrière aan te treffen. Dit wordt **tunneling** genoemd. Hoe hoger en breder de barrière hoe kleiner de kans dat het deeltje erdoor tunnelt maar echt nul wordt de kans nooit.



Een voorbeeld van het optreden van tunneling is het uitzenden van α-straling. Uit de protonen en neutronen in een kern worden regelmatig α-deeltjes gevormd. De energie hiervan is echter veel te laag om door de energie-barrière (ca. 40 MeV) te komen die gevormd wordt de door de sterkte aantrekkingskracht tussen de kerndeeltjes. Dankzij het tunneleffect ontsnappen er toch af en toe α-deeltjes.

Een ander voorbeeld van tunneling is de **Scanning Tunneling Microscope (STM)**. In een STM wordt een geleidend oppervlak afgetast met een zeer fijne geleidende naald die vlák boven het oppervlak gehouden wordt. Dankzij het tunneleffect kunnen elektronen overspringen naar de naald zonder dat er contact is en loopt er stroom. Hoe kleiner de afstand tussen naald en oppervlak hoe groter de tunnelstroom. Door de naald over het oppervlak te scannen kunnen dus zeer kleine hoogteverschillen in kaart gebracht worden en kunnen zelfs individuele atomen in het oppervlak worden 'gezien'.

---

2 Relativiteitstheorie**

Deze paragraaf is geen onderdeel van het Centraal Examen

Kernen en Deeltjes, Relativiteitstheorie, Biofysica en Geofysica zijn keuzeonderwerpen. Je school kiest twee van deze vier onderwerpen als onderdeel van het schoolexamenprogramma. De invulling van dit onderdeel is niet landelijk vastgelegd en kan van school tot school verschillen. Vraag op jouw school wat de precieze stofomschrijving is.

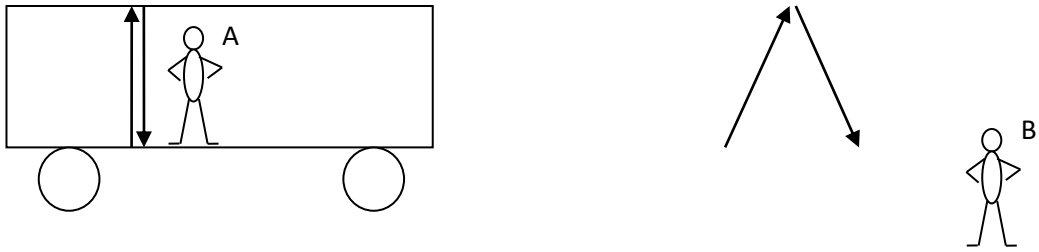
De **lichtsnelheid** in vacuüm bedraagt $2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s (zie BINAS tabel 7). Eind 19e eeuw werd gedacht dat licht, net zoals geluidsgolven en golven op een wateroppervlak, een medium nodig had om zich in voort te planten. Dit medium werd **ether** genoemd. In een poging om de snelheid van de aarde ten opzichte van ether te bepalen bepaalden Michelson & Morley de lichtsnelheid in verschillende richtingen. Toen zij geen verschil vonden werd een aantal dingen duidelijk:

- Licht heeft geen medium nodig om zich te kunnen voortplanten
- Lichtsnelheid is constant voor alle waarnemers onder alle omstandigheden

- Niks kan zich sneller bewegen dan licht

Albert Einstein trok in zijn **speciale relativiteitstheorie** in 1905 de conclusie dat tijd niet absoluut maar relatief is:

Twee personen (A en B) doen een experiment. In een rijdende trein met hoogte h wordt de tijd gemeten die een lichtstraal nodig heeft om vanaf de vloer van de trein via een spiegel in het plafond terug naar beneden te kaatsen. Voor waarnemer A (in de trein) hangt de gemeten tijd af van de afstand (twee maal de hoogte) en de lichtsnelheid (c). Hij zal dus een tijd t = 2h/c meten (tijd = afstand/snelheid). Waarnemer B, die buiten de trein langs de spoorlijn staat, ziet de lichtstraal schuin lopen door de snelheid van de trein. De door de lichtstraal afgelegde afstand is dus voor waarnemer B dus groter. Aangezien de afgelegde afstand groter is en de lichtsnelheid constant is kan dit alleen maar betekenen dat de gemeten tijd voor waarnemer B ook groter zal zijn.



In het algemeen geldt: De tijd verstrijkt voor bewegende waarnemer (A) langzamer dan voor een stilstaande waarnemer (B). Dit effect wordt ook wel **tijddilatatie** of **tijdrek** genoemd. Voor de door een stilstaande waarnemer verlopen tijd geldt:

$$t' = t \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

t' = tijd voor stilstaande waarnemer (s)
t = tijd voor bewegende waarnemer (s)
v=snelheid (m/s)
c=lichtsnelheid ($2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s)

Verschillen in tijd zijn in het dagelijks leven verwaarloosbaar. Alleen bij zeer grote snelheden is het effect meetbaar.

Tijddilatatie leidt o.a. tot de **tweelingparadox**: Wanneer de ene helft van een tweeling per raket een lange reis met grote snelheid maakt en de andere helft van de tweeling op aarde blijft dan zal bij terugkeer op aarde degene die de reis heeft gemaakt jonger zijn dan degene die op aarde bleef.
Let op: Er staat niet dat hij jonger 'lijkt'. Hij <u>is</u> ook echt jonger: In de raket is daadwerkelijk minder tijd verstreken.

Een ander effect wat bij grote snelheid optreedt volgens de relativiteitstheorie is **lengtecontractie** of **lengtekrimp**: Voor een stilstaande waarnemer is een bewegend voorwerpen korter dan hetzelfde voorwerp als het stilstaat. Er geldt:

$$l' = l \cdot \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

l' = lengte bewegend voorwerp (m)
l = lengte in rust (m)
v=snelheid (m/s)
c=lichtsnelheid ($2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s)

Voor een waarnemer die met het bewegende voorwerp meereist verandert er niets. De lengte blijft gelijk aan de rustlengte.
Let op: De lengteverandering vindt alleen plaats in de richting van de snelheid. Het voorwerp wordt dus als het ware in elkaar gedrukt.

Stel dat een elektron door een lineaire versneller versneld wordt met een versnelling-spanning die zo hoog is dat het elektron een snelheid zou moeten krijgen die groter is dan de lichtsnelheid. Volgens de relativiteitstheorie kan dit niet omdat niks zich sneller dan het licht zou kunnen bewegen. Dit lijkt in de tegenspraak met de wet van behoud van energie. De door de versneller geleverde energie moet immers zijn omgezet in kinetische energie van het elektron en kan niet zijn verdwenen. Aangezien voor kinetische energie geldt $E=\frac{1}{2}mv^2$ is er maar een conclusie mogelijk: De kinetische energie is niet gaan zitten in een toegenomen snelheid maar in een toegenomen massa. De massa van een bewegend voorwerp is dus groter dan die van hetzelfde voorwerp als het stilstaat (de **rustmassa**). Er geldt:

$$m = m_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

m = massa bewegend voorwerp (kg)
m_0 =rustmassa (kg)
v=snelheid (m/s)
c=lichtsnelheid ($2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s)

Let op: De massa's die in BINAS gegeven worden, o.a. tabellen 7 en 25A, zijn altijd rustmassa's.
.

Als de snelheid in de buurt van de lichtsnelheid komt neemt, omdat de massa zeer snel toeneemt, de kinetische energie ook zeer snel toe. Bij v=c is de kinetische energie zelfs oneindig. Het bewegen met de lichtsnelheid kost dus oneindig veel energie en is dus onmogelijk voor deeltjes met een massa.

Wanneer het deeltje stilstaat heeft het ook nog massa: de rustmassa m_0. De energie die met deze massa correspondeert wordt ook wel de rustenergie genoemd. Voor deze energie geldt:

$$E_{rust} = m_0 \cdot c^2$$

E=energie (J)
m_0=rustmassa (kg)
c=lichtsnelheid (=$2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s)

In bovenstaande formule wordt duidelijk dat massa een vorm van energie is.

Naast de speciale relativiteitstheorie heeft Albert Einstein ook de **algemene relativiteitstheorie** op zijn naam staan (1916). De twee centrale punten in deze theorie:

Het **equivalentieprincipe**: Voor een waarnemer in een uniform homogeen zwaartekrachtsveld (zoals wij op aarde) geldt exact dezelfde natuurkunde als voor een waarnemer die door een andere reden een versnelling ondervindt. Gevolg hiervan is dat ook in de tijd met verschillende snelheden verloopt op verschillende hoogtes:

$$t = t_o \cdot \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right)$$

t = tijd op hoogte h(s)
t_0 =tijd op hoogte 0 (s)
g=valversnelling (m/s^2)
h=hoogte(m)
c=lichtsnelheid ($2{,}9979 \cdot 10^8$ m/s)

Gekromde tijdruimte: Zwaartekracht is geen kracht maar het resultaat van een 4-dimensionale gekromde tijdruimte. Hoe dichter in de buurt van een grote massa hoe gekromder de tijdruimte. Door deze kromming versnellen we naar de aarde toe. Ook voorspelt de algemene relativiteitstheorie het voorkomen van **zwaartekrachtsgolven** in deze tijdruimte.

G BIOFYSICA & GEOFYSICA

Dit hoofdstuk geen onderdeel van het Centraal Examen

1 Biofysica**

Biofysica gaat over de natuurkunde van het leven: Bijvoorbeeld over

- krachten in spieren
- elektrische processen in zenuwcellen
- invloed van straling op cellen
- werking van het oog of het oor
- toepassing van microscopie in de biologie

2 Geofysica**

Geofysica gaat over de natuurkunde van de aarde. Bijvoorbeeld over

- ontstaan en meten van aardbevingen
- beweging van continenten
- druk en temperatuur in het binnenste van de aarde
- ontstaan van vulkanen
- processen in de aardatmosfeer
- temperatuurhuishouding in de aardatmosfeer

***Kernen en Deeltjes, Relativiteitstheorie, Biofysica en Geofysica zijn keuzeonderwerpen. Je school kiest twee van deze vier onderwerpen als onderdeel van het schoolexamenprogramma. Informeer op jouw school voor meer informatie*

Voor deze onderdelen is geen officiële landelijke stofomschrijving. Het onderwerp is zeer breed en kan dus over van alles gaan. Er is geen samenvatting van te geven omdat dit van school tot school verschilt. Raadpleeg het PTA van je school of je docent voor meer informatie.

Index

aandrijffrequentie, 11
aangeslagen toestand, 47
aangrijpingspunt, 24
aardlekschakelaar, 36
absolute nulpunt, 42
absorptie, 16
absorptiespectrum, 46
achtergrondstraling, 20
activiteit, 19
afgelegde weg, 22
afgeleide eenheid, 5
afhankelijke variabele, 7
afronden, 6
aggregatietoestand, 42
algemene gaswet, 44
algemene relativiteitstheorie, 57
AM, 14
amplitude, 9
amplitudemodulatie, 14
annihilatie, 21
annihileren, 48
anode, 38
antideeltje, 21, 48
antigeluid, 12
arbeid, 27
atoomkern, 17
baansnelheid, 29
baanstraal, 29
badge, 20
bandbreedte, 14
bar, 43
baryonen, 49
basiseenheid, 5
becquerel, 19
beeldvormende technieken, 21
bemonsteren, 14
bemonsteringsfrequentie, 14
besmetting, 20
bestraling, 20
Binas, 8
bindingsenergie, 50
biofysica, 58
bit, 15
bitrate, 15
blaasinstrument, 13
blauwverschuiving, 47
bloeddruk, 43
Bohr, 47
bohrstraal, 54
bol, 5
bosonen, 49
boventonen, 13
brandstofstaaf, 51
Broglie-golflengte, 53
buik, 12
buiklijn, 12
buis, 13
calculator, 9
calorimeter, 44
cardiogram, 9
CAT-scan, 16
CD, 14
Celsius, 42
chemische energie, 27
cirkel, 5
Coach, 8
coherent, 16
componenten, 24
conclusie, 8
condenseren, 42
conductantie, 33
constructieve interferentie, 12
continu spectrum, 45
conus, 40
coördinatentransformatie, 8
Coulomb, 32
CT-scan, 16
c_w-waarde, 26
de Broglie-golflengte, 53
deeltjesfysica, 48
deeltjesmodel, 15
destructieve interferentie, 12
diagram, 7
diastolisch, 43
dichtheid, 41
digitaal signaal, 14
diode, 35
discussie, 8
dosimeter, 20
dosis, 20
dosisequivalent, 20
draaggolf, 14, 15
draaggolffrequentie, 14
dracht, 19
druk, 42
dubbelspleet-experiment, 52
dynamica, 22
dynamo, 41
echografie, 21
ECN, 51
één-dimensionale energieput, 54
eenheid, 5
eenparig, 22
eenparig versneld, 23
eenparige cirkelbeweging, 29
eigenfrequentie, 11
eigentrilling, 11
elektrisch veld, 36
elektrisch vermogen, 35
elektrische energie, 37
elektrische geleidbaarheid, 33
elektrische lading, 36
elektrische spanning, 37
elektrische veldsterkte, 37
elektro-cardiogram, 9
elektromagneet, 39
elektromagnetisch inductie, 40
elektromagnetische straling, 15

elektronenkanon, 38
elektronenmicroscoop, 53
elektronenstraalbuis, 38
elektrongolf, 53
elektron-positronpaar, 21
elektronvolt, 37
elementair ladingsquantum, 32
elementaire deeltjes, 48
ellipsbaan, 31
emissiespectrum, 46
energie, 27
energiebalans, 28
energieniveau-diagram, 47
energieput, 54
energiequantum, 52
equivalentieprincipe, 57
ether, 55
eV, 37
evenredigheidsconstante, 7
evenwicht, 24
Excel, 8
experimentele natuurkunde, 5
extrapoleren, 7
fase, 9, 42
faseovergang, 42
faseverschil, 10
fermionen, 48
ferromagnetisme, 38
flux, 40
FM, 14
foto-elektrisch effect, 52
Fraunhoferlijn, 46
frequentie, 9
frequentiemodulatie, 14
gammastraling, 16
gasdruk, 43
gasfase, 42
gedempte trilling, 9
gedwongen trilling, 11
gehoordrempel, 12
gehoorgrens, 12
geïoniseerde toestand, 47
gekromde tijdruimte, 57
geleidbaarheid, 33
geleiders, 32
geleidingsvermogen, 33
gelijkstroomdynamo, 41
geluidsbron, 11
geluidsdrukniveau, 12
generator, 41
geofysica, 58
geostationaire baan, 31
gereduceerde fase, 10
gewicht, 25
gloeilampen, 33
gluon, 49
golf-deeltjesdualiteit, 52
golffuncties, 53
golflengte, 11
golfmechanica, 53
golfmodel, 15
golfsnelheid, 11
golven, 11
grafiek, 7
grafiet, 51
gravitatiekracht, 30
gravitatieveld, 30
gravitatiewet, 30
Gray, 20
groep, 35
grondtoestand, 47
grondtoon, 13
grootheid, 5
hadronen, 49
halfwaardedikte, 16
halfwaardetijd, 18
halveringsdikte, 16
halveringstijd, 18
harmonisch, 10
harmonischen, 13
Heisenberg, 54
helling, 7
hellingsgetal, 7
hellingspercentage, 7
Hertz, 9
hertzsprung-russeldiagram, 46
hokjesmethode, 23
homogeen veld, 36
hoofdquantumgetal, 54
hoofdstroom, 33
HR-diagram, 46
hypothese, 8
ideaal gas, 43
ideale gas, 43
impuls, 53
inductie, 40
inductiespanning, 40
inductiestroom, 40
informatieoverdracht, 14
infraroodstraling, 15
inkomende stroom, 34
Intensiteit, 46
interferentie, 12
intermoleculaire ruimte, 41
interpoleren, 7
ionen, 32
ionisatie-energie, 47
ioniserend vermogen, 19
ioniserende straling, 17
isobaren, 43
isolatoren, 32
isotoop, 17
Joule, 27
kanaal, 14
kanaalscheiding, 14
kathode, 38
kathodestraalbuis, 38
Kelvin, 42
kerncentrale, 50
kerndeeltjes, 17
kernreactie, 49
kernwapens, 51
kettingreactie, 50
Kilowattuur, 35
kinematica, 22
kinetische energie, 28

Kirchhoff, 34
knoop, 12
knooplijn, 12
kookpunt, 42
kop-staartmethode, 24
kosmische straling, 20
kracht, 24
krachtmeter, 24
kringproces, 44
kubieke meter, 6
kunstmatige kernreactie, 49
K-vangst, 18
kwadratenwet, 46
kwadratisch verband, 7
kwalitatief, 7
kwantitatief, 7
kWh, 35
ladingsdragers, 32
ladingsgetal, 18
laser, 15
lasergun, 22
LDR, 35
LED, 35
lengtecontractie, 56
lengtekrimp, 56
lenzentelescoop, 48
leptonen, 48
lichtsnelheid, 55
lijnenspectrum, 46
lineaire versneller, 38
linkerhandregel, 39
ln, 19
longitudinaal, 11
lopende golf, 11
Lorentzkracht, 39
luchtweerstand, 26
luchtwrijvingscoefficiciënt, 26
luidspreker, 40
magneet, 38
Magnetic Resonance Imaging, 21
magnetisch veld, 38
magnetische flux, 40
magnetische inductie, 39
magnetische influentie, 38
magnetische veldlijnen, 38
magnetische veldsterkte, 39
magnetronstraling, 15
massa, 25
massagetal, 17
massa-veersysteem, 10
materialen en methoden, 8
mechanica, 22
mechanische energie, 28
medium, 12
meetfout, 6
meetonzekerheid, 6
mesonen, 49
meterkast, 35
microfoon, 9, 41
microgolven, 48
middelpuntzoekende kracht, 29
middelpuntzoekende versnelling, 29
millimeter-kwik, 43
model, 8
moderator, 51
moduleren, 14
molecuul, 41
monochromatisch, 15
MRI, 21
muon, 48
natuurkundeuitgelegd.nl, 4
natuurwetenschappen, 5
nettokracht, 24
neutrino, 48
neutron, 17
noordpool, 38
normaalkracht, 25
NTC, 35
nucleaire diagnostiek, 20
nucleonen, 17
nulpuntsenergie, 54
numeriek, 8
Ohmse weerstand, 33
omgekeerd evenredig, 7
omgekeerd kwadratisch, 7
omlooptijd, 29
onafhankelijke variabele, 7
ontsnappingssnelheid, 31
onzekerheidsrelatie, 54
Oppervlakte, 5
oppervlaktemethode, 23
oppervlaktetemperatuur, 45
optische telescoop, 48
opwerkingsfabriek, 51
orde van grootte, 6
oscilloscoop, 9
parallelogrammethode, 24
Pascal, 42
periode, 9
PET, 21
Planck, 16, 52
Planckkromme, 45
plutonium, 51
positron, 21
potentiaalput, 54
potentiële energie, 28
proton, 17
PTC, 35
quantummechanica, 53
quarks, 48
raaklijnmethode, 23
radar, 22
radiaal veld, 36
radiale snelheid, 47
radioactiviteit, 17
radiostraling, 15
radiotelescoop, 48
rechterhandregel, 39
rechtevenredig, 7
rechthoek, 5
reflectie, 16
regelstaven, 50
rekenmachine, 9
relatieve snelheid, 22
relativiteitstheorie (algemene), 57
relativiteitstheorie (speciale), 56

remspanning, 52
rendement, 29
resultante, 24
resultaten, 8
resulterende kracht, 24
rolweerstand, 26
röntgenbuis, 38
röntgenfoto, 16
röntgenstraling, 16, 17
roodverschuiving, 47
ruimtetelescoop, 48
rustmassa, 57
samplefrequentie, 14
sampling, 14
satellieten, 31
Scanning Tunneling Microscope, 55
schakeling, 33
schema, 33
schuifwrijving, 26
seismogram, 9
SI (Système International), 5
Sievert, 20
significante cijfers, 6
slinger, 10
smelten, 42
smeltpunt, 42
smeltzekering, 35
snaar, 12
snaarinstrumenten, 12
somkracht, 24
soortelijke massa, 41
soortelijke warmte, 45
soortelijke weerstand, 35
spanning, 32
spanningsbron, 32
speaker, 40
speciale relativiteitstheorie, 56
spectraallijn, 46
spiegeltelescoop, 48
splijtstofcyclus, 51
staande golf, 12
standaarddruk, 43
standaardmodel, 48
standaardnotatie, 6
statica, 22
ster, 45
sterke kernkracht, 49
STM, 55
stollen, 42
stookwaarde, 27
stroboscoop, 22
stroom, 33
stroomkring, 33
stroomspoel, 39
stroomsterkte, 33
sublimeren, 42
supernova, 46
symbool, 5
systematische fouten, 6
systolisch, 43
tabel, 7
tauon, 48
temperatuur, 41, 44
theoretische natuurkunde, 5
tijdbasis, 9
tijddilatatie, 56
tijdrek, 56
tijdruimte, 57
toestand, 43
toestandsverandering, 43
toevallige fout, 6
traagheid, 25
tracer, 21
transmissie, 16
transversaal, 11
trilling, 9
trillingsenergie, 11
trillingstijd, 9
tunneleffect, 55
tunneling, 55
uitgaande stroom, 34
uittree-energie, 52
uitwijking, 9
ultra-centrifuge, 51
ultrasone geluidsgolf, 21
ultrasone plaatssensor, 22
ultrasound, 21
ultraviolet, 16
uranium, 50
valversnelling, 23
vanderwaalskracht, 41
vaste fase, 42
vectorgrootheid, 24
veerconstante, 10, 28
veerenergie, 28
veerunster, 24
veldlijnen, 36
verdampen, 42
vermenigvuldigingsfactor, 50
vermogen, 29
verplaatsing, 22
verrijken, 51
verslag, 8
versneller, 37
vervallen, 18, 49
vervalreeks, 18
vervangingsweerstand, 33
videometen, 22
vierkante meter, 5
vloeistof, 42
volume, 6
voortplantingsnelheid, 11
voorvoegsels, 6
vrije elektronen, 32
vrije val, 23
waarschijnlijkheid, 53
waarschijnlijkheidsverdeling, 54
warmte, 44
warmtecapaciteit, 45
warmte-evenwicht, 45
warmtegeleiding, 44
warmte-isolatie, 44
warmtestraling, 44
warmtestroming, 44
weegfactor, 20
weerstand, 33

weerstandscoefficiënt, 26
wet van behoud van energie, 28
wet van Boyle, 43
wet van Coulomb, 36
wet van Gay-Lussac, 43
wet van Kepler, 31
wet van Ohm, 33
wet van Stefan-Boltzmann, 45
wet van Wien, 45
wetenschappelijk artikel, 8
wetenschappelijk calculator, 9
wetenschappelijke notatie, 6
wetten van Kirchhoff, 34
wetten van Newton, 25, 26
wisselspanning, 35
witte dwerg, 46
wortelverband, 7
wrijving, 25
X-rays, 17
zekering, 35
zonneconstante, 46
zonnespectrum, 46
zuidpool, 38
zuiver toon, 11
zwaar water, 51
zwaarte-energie, 28
zwaartekracht, 25, 30
zwaartekrachtsgolven, 57
zwaartepunt, 25
zwarte straler, 45
α-straling, 17
α-verval, 18
β^+-verval, 18
β-straling, 17
β-verval, 18
γ-foton, 18, 49
γ-straling, 17
γ-verval, 18