

## 4.2 Domeinspecifieke leerstofopbouw

### 4.2.10 Biofysica

#### Achtergrondinformatie

## Biofysica / Menselijk lichaam

*Ton van der Valk & Aartjan van Pelt*

### Inleiding

Eén van de vier keuzedomeinen in het examenprogramma natuurkunde voor vwo is *Biofysica*, deeldomein G1 van domein G *Aarde en leven*. Voor havo is een specifiek deel van biofysica gekozen: domein F *Menselijk lichaam*. Voor de commissie Nieuwe Natuurkunde (NiNa, 2010) zijn de argumenten om *Biofysica/ Menselijk lichaam* als nieuwe domeinen aan de examenprogramma's toe te voegen: de contextgebieden

- maken het mogelijk de samenhang binnen en tussen de natuurwetenschappelijke vakken te versterken,
- weerspiegelen actuele ontwikkelingen in de wetenschap en technologie waarvan verwacht mag worden dat deze NG-leerlingen zullen interesseren,
- geven mogelijkheden voor modelleren, ontwerpen en experimenten uitvoeren.

Biofysica/Menselijk lichaam wordt als keuzedomein in het schoolexamen (SE) getoetst. Om de school en de leraar een grote vrijheid te geven bij het inhoudelijk invullen van de keuzedomeinen is er in de syllabi geen specificatie voor de keuzedomeinen gegeven, maar wordt de inhoud slechts beperkt door de in figuur 1 weergegeven algemene omschrijving van de examenstof bij het betreffende (deel)domein in de examenprogramma's.

Men heeft in de examenprogramma's ook niet willen vastleggen welk deel van de studielast natuurkunde in de tweede fase (vwo: 480 studielastuur (slu), havo 400 slu) aan een keuzedomein moet worden besteed. Bij het ontwikkelen van het voorbeeldmateriaal is NiNa uitgegaan van 15 lessen van 50 minuten per keuzedomein, wat overeen komt met 20 slu. Naast de randvoorwaarden 'examenstof' en 'tijd', zullen de voorkennis van de leerlingen, de kennis en voorkeuren van de leraar (en de sectie) en de inhoud van het gekozen leerboek bepalen wat er in de klas aan de orde komt.

In het eerste deel van dit stuk beschrijven we welke inhoudelijke keuzen voor de domeinen *Biofysica* en *Menselijk lichaam* gemaakt zijn in het NiNa-voorbeeldmateriaal en in de belangrijkste lesmethodes bij het examenprogramma natuurkunde. Daarbij identificeren we een aantal 'biofysische inhoudsgebieden' die in de lesmethodes behandeld worden. In het tweede deel geven we voor drie geselecteerde inhoudsgebieden aan welke voorkennis relevant is, met aandacht voor leerlingdenkbeelden die bij de begripsvorming een rol kunnen spelen. Ook werken we een mogelijke didactische structuur van de drie deelgebieden uit, met als doel de leraar te helpen bij het kiezen van een inhoudelijke invulling.

### Leerstof

In dit eerste deel geven we de inhoudelijke keuze van NiNa aan en gaan we na welke inhoudelijke keuzen de verschillende lesmethodes hebben gemaakt.

#### Havo: Menselijk lichaam

In haar eindadvies geeft de NiNa-commissie de in figuur 2 weergegeven omschrijving van het havo-keuzedomein *Menselijk lichaam*. Omdat veel leraren het betreurden dat het domein 'licht en geluid' van het oude examenprogramma havo geschrapt werd, heeft NiNa in haar eindadvies expliciet aangegeven dat het

Inhoud	
Leerstof	1
Havo: Menselijk lichaam	1
Vwo: Biofysica	3
Criteria voor inhoudskeuze	4
Focus op drie inhoudsgebieden	4
1 Warmtehuishouding	5
2 Zintuigen	10
Het visuele systeem	10
Het auditieve systeem	14
3 Signaalgeleiding	16

#### Vwo examenstof keuzedomein G1 Biofysica

De kandidaat kan in de context van levende systemen fysische verschijnselen en processen beschrijven, analyseren en verklaren.

#### Havo examenstof keuzedomein F Menselijk lichaam

De kandidaat kan in de context van het menselijk lichaam fysische processen beschrijven, analyseren en verklaren en hun functie voor gezondheid en veiligheid toelichten.

Figuur 1 – Algemene omschrijving van de examenstof in de examenprogramma's natuurkunde vwo en havo.

Het gaat hier om fysische eigenschappen en processen die van belang zijn voor de werking van het menselijk lichaam. Prestaties van het menselijke lichaam worden in verband gebracht met fysische kenmerken en de invloed van omgevingsfactoren op gezondheid en veiligheid. Leerlingen kunnen door ontwerp- en modelleeropdrachten hun kennis verdiepen.

Figuur 2 – Omschrijving van het havo-domein *Menselijk lichaam* in het NiNa-eindadvies.

Mogelijke vakbegrippen – Warmtehuishouding: warmtegeleiding, warmtestroom, verdampingswarmte, verbrandingswarmte, soortelijke warmte, warmtecapaciteit. Sport en gezondheid: kracht, moment, energie, arbeid, spierkracht, signaalgeleiding, actiepotentiaal. Mogelijke contexten – Sport en spel, werking van het hart, werking van spieren, warmtehuishouding in het menselijk lichaam.

Figuur 3 – Suggesties van Paus (2012) bij het keuzedomein *Menselijk lichaam*.

oog ook aan de orde kan komen in *Menselijk lichaam* (of in het havo-keuzedomein *Optica*). In het NiNa-voorbeeldmateriaal (Blom et al, 2012) worden de onderwerpen warmtehuishouding, sportprestaties, en diagnose en therapie (over de praktijk van laborant klinische neurofysiologie) uitgewerkt. Omdat zintuigen al in het ‘oude’ curriculum was opgenomen, ontbreken het oog en het oor in het NiNa-voorbeeldmateriaal.

Paus (2012) doet een aantal suggesties hoe *Menselijk lichaam* inhoudelijk en qua context in te vullen, zoals weergegeven in figuur 3. Daarbij blijft hij dicht bij het NiNa-voorbeeldmateriaal voor havo, waardoor ook bij Paus suggesties voor een onderwerp zintuigen ontbreken.

Kortland (2017, blz. 238) heeft in het *Handboek natuurkundendidactiek* de suggesties van Paus ingedikt tot twee deelthema’s voor havo en vwo: Warmtehuishouding en Sport en gezondheid, waaraan hij Zintuigen als derde toevoegt.

Er zijn bij de educatieve uitgeverijen zes natuurkundemethodes verschenen om het examenprogramma natuurkunde havo te onderwijzen. Op *Stevin havo* na bevatten ze allemaal een uitwerking van *Menselijk lichaam*, maar hun inhoudelijke keuzes verschillen nogal. In figuur 4 vatten we de resultaten van de inhoudelijke analyse van het lesmateriaal voor dit onderwerp uit de verschillende lesmethodes samen. Het bleek niet goed mogelijk de inhoud te typeren aan de hand van de indelingen van Paus (2012) of Kortland (2017). In plaats daarvan hebben we zes *biofysische inhoudsgebieden* onderscheiden (zie de eerste kolom van figuur 4).

	Havo-methode en titel hoofdstuk/katern				
	<i>Systematische Natuurkunde</i> katern B Horen en zien	<i>Overall Natuurkunde</i> hoofdstuk ML	<i>Newton</i> keuzekatern <i>Menselijk lichaam</i>	<i>Nova 5H</i> hoofdstuk 14 <i>Het menselijk lichaam</i>	<i>Pulsar 5H</i> (3 <sup>e</sup> ed.) hoofdstuk 17 <i>Menselijk lichaam</i>
<b>Biofysisch inhoudsgebied</b>					
<b>Bewegen</b>		G-krachten	Voedingsstoffen en bewegen	Gevaren van de ruimte; Sport en natuurkunde	
<b>Bloedsomloop</b>			Waarnemen en reageren; Voedingsstoffen en bewegen	De bloedsomloop	Druk in je lichaam
<b>Warmtehuishouding</b>			Warmtehuishouding	Warmtehuishouding van het menselijk lichaam	Warmte en lichaamstemperatuur
<b>Zintuigen</b>	Bouw en werking van het oog; oogafwijkingen Bouw en werking van het oor; gehoorverlies	Diepte zien Horen	Waarnemen en reageren	Het gehoor	Afbeeldingen en zicht Sprak en gehoor; duiken
<b>Informatie-transport</b>		Zenuwen en prikkels	Waarnemen en reageren		

Figuur 4 – Inhoudelijke uitwerking van *Menselijk lichaam* in de verschillende havo-methodes. In de tabel zijn de titels van de (deel)paragrafen uit de betreffende lesmethodes ingevuld. Bij de analyse is aanvullende informatie op de methodesites (experimenten, onderzoeken en contexten) niet meegenomen.

De methode *Newton* werkt de inhoudsgebieden uit in de specifieke context ‘gezond sporten’. De methode *Systematische Natuurkunde* beperkt zich tot de zintuigen oog en oor. De andere drie lesmethodes hebben drie inhoudsgebieden uitgewerkt, waarbij de overkoepelende context van menselijk lichaam de enige samenhang lijkt te vormen. Figuur 4 laat zien dat de keuze binnen een inhoudsgebied behoorlijk kan verschillen. Zo gaat de ene lesmethode bij het inhoudsgebied bewegen in op G-krachten, terwijl een andere lesmethode ingaat op

sportprestaties bij zwemmen of hardlopen. De meeste lesmethodes geven mogelijkheden tot verdieping aan door practica, open onderzoeken of ontwerpen te suggereren en/of informatie te geven over beroepen waarvoor kennis van het menselijk lichaam vereist is. De methode *Nova*, bijvoorbeeld, besteedt (op de methodesite) aandacht aan de studie bewegingstechnologie.

Fysische processen in de levende cel worden behandeld en gerelateerd aan eigenschappen van organismen. Moderne fysische technieken om de structuur van de cel en informatie-transport in het lichaam waarneembaar en modelleerbaar te maken komen aan de orde. Leerlingen kunnen door experimenten en modelleer-opdrachten hun kennis verdiepen.

Figuur 5 – Omschrijving van het vwo-domein *Biofysica* in het NiNa-eindadvies.

Mogelijke vakbegrippen – Diffusie, viscositeit, zenuwgeleiding, actie-potentiaal, determinisme, entropie, homeostase, terugkoppeling. Mogelijke contexten – Fundamenteel natuurkundig onderzoek zoals in thermodynamica, Nanomotoren, transport van stoffen in het lichaam, Zenuwgeleiding in het lichaam.

Figuur 6 – Suggesties van Paus (2012) bij het keuzedomein *Biofysica*.

### Vwo: Biofysica

Voor het vwo-keuzedomein *Biofysica* geeft de NiNa-commissie in haar eindadvies de in figuur 5 weergegeven omschrijving. Wat in deze omschrijving opvalt, zijn de formuleringen *levende cel* en *fysische technieken*. Die omschrijving klopt met de keuze van de leerstof in het NiNa-voorbeeldmateriaal (Van Pelt et al, 2012). Daarin worden microscopische processen in en rond de cel behandeld, met onderwerpen als diffusie en nanomotoren in de cel en signaalgeleiding in de zenuwen, en komen technieken zoals het optisch pincet aan de orde. Maar de nadruk op de cel en op technieken vinden we niet terug in de examenstof *Biofysica*, waar alleen sprake is van *levende systemen* en *fysische verschijnselen en processen*. Met als gevolg dat deze nadruk in weinig lesmethodes is overgenomen.

Paus (2012) doet een aantal suggesties hoe *Biofysica* inhoudelijk en qua context ingevuld kunnen worden, zoals weergegeven in figuur 6. Omdat hij dicht bij de uitwerking in het NiNa-voorbeeldmateriaal voor vwo blijft, vinden we bij hem de nadruk op de levende cel en op fysische technieken terug. Net als bij zijn suggesties voor havo ontbreken bij Paus ‘zintuigen’, hoewel NiNa ook voor vwo aangeeft dat de werking van lenzen, bijvoorbeeld in de context van de werking van het oog, in dit keuzedomein behandeld kan worden.

Door de educatieve uitgeverijen zijn zes lesmethodes voor het examenprogramma natuurkunde vwo ontwikkeld. Alle zes bevatten ze een uitwerking van het keuzedomein *Biofysica*, al is hun keuze van inhoudsgebieden verschillend. In figuur 7 is aangegeven welke biofysische inhoudsgebieden in de zes lesmethodes zijn uitgewerkt. Grotendeels komen die overeen met de inhoudsgebieden die we gevonden hebben bij het havo-keuzedomein *Menselijk lichaam* (figuur 4).

Biofysisch inhoudsgebied	Vwo-methode en titel hoofdstuk/katern					
	<i>Stevin</i>	<i>Systematische Natuurkunde katern A Biofysica</i>	<i>Overal Natuurkunde hoofdstuk B</i>	<i>Newton</i>	<i>Nova 4V</i>	<i>Pulsar 5V (3<sup>e</sup> ed.) hoofdstuk 15 Biofysica</i>
<b>Bewegen</b>			Bewegen en heffen	Voedingsstoffen en bewegen	Lopen op biologische benen	
<b>Bloedsomloop</b>	Het Hart	Transport door de bloedbaan	Hart en bloedvaten	Waarnemen en reageren		Druk in je lichaam
<b>Warmtehuishouding</b>				Warmtehuishouding		Warmte en lichaamstemperatuur
<b>Zintuigen</b>	Het Oog; Het oor		Zien en waarnemen; Horen en spreken	Waarnemen en reageren	Evenwicht: het zesde zintuig	Afbeelding en zicht; Spraak en gehoor; Duiken
<b>Transport van stoffen in de cel</b>		Transport door de celwand			Moleculaire motoren; Nanowetenschap	
<b>Informatie-transport</b>		Geleiding in de zenuwcel en in zenuwvezels		Waarnemen en reageren		

Figuur 7 – Inhoudelijke uitwerking van *Biofysica* in de verschillende vwo-methodes. In de tabel zijn (hier en daar iets ingekort) de titels van de (deel) paragrafen uit de betreffende lesmethodes ingevuld. Aanvullende informatie op de methodesites (experimenten, onderzoeken en contexten) is niet in deze tabel opgenomen.

Uit figuur 7 blijkt dat de methodes *Systematische Natuurkunde* en *Nova* globaal het NiNa-voorbeeldmateriaal volgen door in te gaan op de werking van de levende cel en zich niet tot het menselijk lichaam te beperken. Het valt op dat zowel bij de methode *Newton* als *Pulsar* de uitwerking van Menselijk lichaam (havo) en Biofysica (vwo) weinig van elkaar verschillen. Tussen de havo- en vwo-uitgaven van de andere uitgevers zitten wat meer verschillen. Die komen niet bij iedere lesmethode tegemoet aan de verschillen die NiNa heeft willen aanbrengen tussen de havo- en vwo-leerstof, met name niet wat betreft de aard van de gekozen contextgebieden: “*De contextgebieden voor havo hebben een meer maatschappelijke en toepassingsgerichte nadruk, die voor vwo zijn over het algemeen meer theoretisch en onderzoeksgericht.*” (NiNa, 2010). Zo kiezen *Stevin* en *Overal Natuurkunde* ‘menselijke’ contextgebieden die sterk overeen komen met die van de havo (oog, oor en hart).

### Criteria voor inhoudskeuze

Niet alleen de methode-auteurs, maar ook de leraar heeft de vrijheid om inhoudelijke keuzes te maken. Welke criteria kun je daarbij hanteren?

De eerste belangrijke keuze is: al dan niet kiezen voor het onderwijzen van *Biofysica/Menselijk lichaam*. Een belangrijk argument voor dit keuzedomein kan zijn of je zelf veel afweet van het vakgebied biofysica, bijvoorbeeld omdat je specialisatie in de studie op dat gebied lag. Deze keuzedomeinen geven dan volop mogelijkheden je leerlingen iets te laten zien van je (vroegere) onderzoeksgebied of beroepspraktijk. Als je zelf geen specialistische biofysische kennis hebt en er meer in wilt thuisraken, is dat ook een goed motief om voor dit keuzedomein te kiezen. Je kunt dan misschien profiteren van de kennis van een collega die wel veel van biofysica af weet. Samenwerking is dan geboden!

In de praktijk heb je altijd te maken met de voorkeuren van je collega’s in de sectie natuurkunde. Bij de feitelijke keuze spelen praktische redenen een belangrijke rol. Bijvoorbeeld de hoeveelheid tijd die beschikbaar is voor inwerken in nieuwe leerstof. In geval van te weinig tijd kun je (of je sectie) terugvallen op de ervaring uit vorige jaren of zelfs uit het vorige examenprogramma (bijvoorbeeld rond onderwerpen als oog en oor). Overigens is het ook mogelijk je leerlingen te laten kiezen welk keuzedomein ze willen doen.

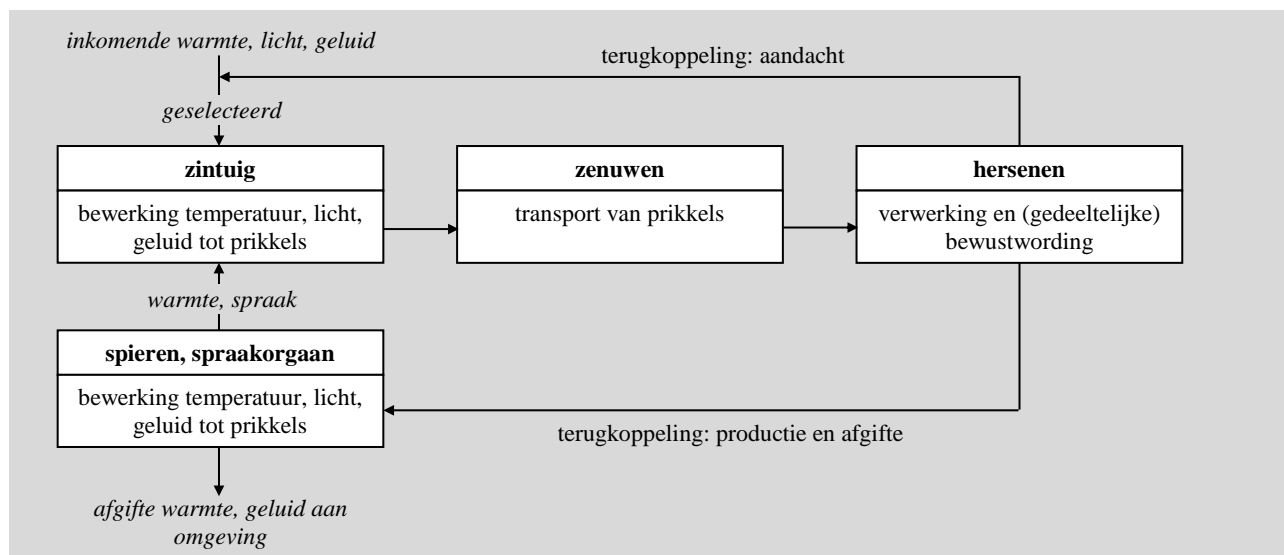
Wanneer je (al dan niet als sectie) gekozen hebt voor *Biofysica/Menselijk lichaam*, dan is er de vervolgkeuze: op welk(e) inhoudsgebied(en) richt je je? Het ligt voor de hand de inhoudsgebieden te kiezen die in je lesmethode uitgewerkt zijn. Je kunt daar ook één of twee van kiezen en daar wat dieper op ingaan dan in het boek het geval is. En je kunt het boek links laten liggen en je eigen biofysisch inhoudsgebied kiezen, al dan niet gebruik makend van wat in andere lesmethodes staat of van je eigen biofysische kennis.

De keuze van inhoudsgebied(en) kan ook overgelaten worden aan de leerlingen, bijvoorbeeld door differentiatie: elke groepje leerlingen mag een in het boek uitgewerkt inhoudsgebied kiezen en verder uitpluizen, al dan niet onderzoeksmatig. Het resultaat van hun werk kunnen ze aan de klas presenteren, zodat het resultaat is dat alle leerlingen een beetje afweten van verschillende inhoudsgebieden.

### Focus op drie inhoudsgebieden

Gezien de veelheid aan biofysische inhoudsgebieden die in de havo- en vwo-methodes uitgewerkt zijn, hebben wij ons bij de inhoudelijke uitwerking van *Biofysica/Menselijk lichaam* beperkt tot drie inhoudsgebieden: warmtehuishouding, zintuigen (het visuele en auditieve systeem) en informatietransport in het lichaam (signaalgeleiding). Bij warmtehuishouding en zintuigen richten we ons op de interactie tussen het lichaam en zijn omgeving. Die interactie vindt plaats via warmte, licht of geluid (zie het schema van figuur 8). Dat kan door het lichaam worden opgenomen, maar ook (in het geval van warmte en geluid) worden geproduceerd en afgegeven. Als warmte, licht of geluid vanuit de buitenwereld bij het lichaam aankomt, wordt informatie uit dat signaal in de temperatuurreceptor, het oog of het oor *bewerkt*: geselecteerd, versterkt of

verzwakt en gescheiden. Dat leidt tot productie van prikkels waarmee informatie kan worden doorgegeven. Die prikkels worden door de zenuwen getransporteerd naar (vooral) de hersenen, waar de informatie wordt *verwerkt* en al dan niet bewust wordt waargenomen. Terugkoppeling naar het zintuig X-gevoelige deel van het lichaam zorgt voor aanpassing van de selectie en versterking/verzwakking. Dat kan leiden tot verandering in de opname van X, en bij warmte en geluid ook tot productie en/of afgifte.



Figuur 8 – Algemeen schema van de interactie tussen het lichaam en de omgeving via warmte, licht en geluid.

Hieronder werken we bij de inhoudsgebieden *Warmtehuishouding* en *Zintuigen* het eerste blok van het schema van figuur 8 uit, met de terugkoppeling. Bij het inhoudsgebied *Informatietransport* werken we uit hoe dit transport in de zenuwen plaats vindt.

Als leraar moet je keuzes maken welke leerstof je gaat behandelen. Zeker als je twee of drie inhoudsgebieden wilt behandelen, moet je je beperken tot een onderdeel van een inhoudsgebied. Het is onze bedoeling dat je aan onderstaande bespreking argumenten voor leerstofkeuze kunt ontleen.

We gaan ook in op voorkennis bij de inhoudsgebieden. De voorkennis die leerlingen vanuit het dagelijks leven hebben, kan leiden tot denkbeelden die niet overeenstemmen met (bio)fysische inzichten. Hoewel die denkbeelden in de onderbouw al vervangen zouden moeten zijn door fysische inzichten, weten we uit de literatuur dat ze op onverwachte momenten toch nog naar voren kunnen komen en ten grondslag kunnen liggen aan begripsproblemen die leerlingen in de bovenbouw ontmoeten. Dat is de reden om bij de uitwerking van de inhoudsgebieden ook aan leerlingdenkbeelden aandacht te besteden.

## 1 Warmtehuishouding

NiNa suggereert dat het inhoudsgebied *Warmtehuishouding* vooral voor havo geschikt is. Drie havo-methodes volgen deze suggestie (zie figuur 4). Twee vwo-methodes behandelen dit inhoudsgebied ook (zie figuur 7) – niet toevallig, want die twee lesmethodes hebben voor havo en vwo min of meer dezelfde inhouds-keuze gemaakt.

### Voorkennis

We bespreken hieronder een aantal begrippen die als voorkennis nodig zijn bij het inhoudsgebied *Warmtehuishouding*. Daarbij komen ook begripsproblemen aan de orde die kunnen optreden als de voorkennis niet functioneert.

**Verschil tussen warmte en temperatuur** – Voor het begrijpen van de warmtehuishouding van het menselijk lichaam is een correct onderscheid tussen warmte

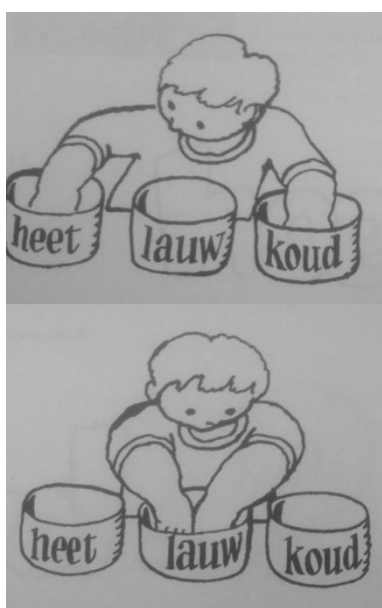
en temperatuur van groot belang. *Temperatuur* is een toestandsgröotheid die gedefinieerd is aan de hand van de gemiddelde kinetische energie van de moleculen van de stof waarvan de temperatuur wordt gemeten. In de onderbouw wordt vaak gesproken over ‘temperatuur als maat voor de gemiddelde snelheid van de moleculen’. In de bovenbouw kunnen leerlingen begrijpen dat dit geen adequate omschrijving is. Immers, de snelheid van de moleculen van een stof is, rekening houdend met de richting van de snelheden, gemiddeld nul. *Warmte* is een procesgröotheid: de gröotheid van de energie-uitwisseling tussen twee systemen die in warmtecontact met elkaar zijn, door middel van geleiding, stroming en/of straling.

In het onderwijs wordt wel eens vergeten dat warmte en temperatuur voor (jonge) leerlingen nog min of meer hetzelfde zijn. Het onderwijs versterkt soms ongewild het verwarren van warmte en temperatuur, doordat het de indruk wekt dat warmtetoevoer *altijd* tot temperatuurverhoging leidt (Frederik & Van der Valk, 2002). Dat kan worden voorkomen door op andere effecten van warmtetoevoer te wijzen. Bijvoorbeeld bij koken en smelten: er wordt wel warmte toegevoerd, maar de temperatuur blijft constant op de kook- of smelttemperatuur (Van der Valk & Frederik, 2001). Omgekeerd zijn er ook situaties waarin de temperatuur van een voorwerp verandert zonder dat er warmte wordt toegevoerd. Adiabatische compressie en expansie zijn daar voorbeelden van: wanneer je een geïsoleerd gas samenperst, stijgt de temperatuur zonder dat warmte wordt toegevoerd. Bij expansie van dat gas daalt de temperatuur zonder dat er warmte afgevoerd wordt. Zie [hier](#) voor een Wikiwijs-filmpje over de didactiek van het verschil tussen warmte en temperatuur.

**Warm en koud voelen** – We zijn gewend ‘warm en koud’ te voelen met ons lichaam. Bij de introductie van ‘temperatuur’ ligt het voor jonge leerlingen voor de hand te denken dat hun lichaam geschikt is om ‘warm en koud’ niet alleen te voelen, maar ook te meten. Een bekend proefje laat ze ervaren dat hun lichaam niet geschikt is voor temperatuurmeting. De leerlingen dompelen hun ene hand voldoende lang (zo’n 30 s) in warm water en de andere tegelijkertijd in koud water (zie figuur 9). Daarna worden beide handen in een bak met lauw water gehouden. De ‘warme’ hand zegt dan: ‘Dit water is koud’. De ‘koude’ hand rapporteert: ‘Dit water is warm’. Zie [hier](#) voor een filmpje over dit experiment op NVON-Leswerk.

Een deel van de verklaring van deze tegenstrijdige ervaring is dat je met je handen geen temperatuur voelt, maar temperatuurveranderingen die veroorzaakt worden door warmtestromen als gevolg van het temperatuurverschil tussen hand en water. De huid van de ene hand is warmer dan het lauwe water en koelt af, de huid van de andere hand is kouder en warmt op.

**Metaal is ‘koud’** – Die gevoeligheid voor temperatuurverandering zet leerlingen ook op het verkeerde been als het gaat om het voelen en vergelijken van de temperatuur van metalen en niet-metalen voorwerpen. Een ijzeren tafelpoot op kamertemperatuur voelt koud aan omdat het ijzer de warmte uit je hand snel afvoert, waardoor je huid daar snel in temperatuur zakt. Raak je met je hand een houten tafelblad, dan voelt dat ‘warm’ aan. Het houten blad is een slechte warmtegeleider en je hand registreert dus nauwelijks een temperatuurverlaging. Het gevolg van deze ervaringen is dat leerlingen nauwelijks kunnen geloven dat de ijzeren poot en het houten blad dezelfde temperatuur hebben: de omgevings-temperatuur. Dit probleem is moeilijk weg te nemen door metingen, want de temperatuur van vaste stoffen zoals ijzer en hout is lastig te meten: je kunt er geen thermometer in stoppen. Zie [hier](#) voor een YouTube-filmpje waarin te zien is dat ook volwassenen de temperatuur van een geleidend en niet-geleidend voorwerp verkeerd inschatten. Bovendien toont het een manier waarop het begripsprobleem aangepakt kan worden. Je kunt eenvoudig laten zien dat een ijsblokje sneller smelt als het op een metalen plaat ligt dan wanneer het op een plaat piepschuim ligt. Het (warm-aanvoelende) piepschuim heeft dus geen hogere temperatuur dan het (koud-aanvoelende) metaal. Immers, als het piepschuim een hogere temperatuur had, zou het ijsblokje daar sneller moeten smelten dan op het metaal. Dit maakt het plausibel dat de geleidende eigenschappen van de materialen bepalend zijn voor de verschillen in smelten en in warm of koud aanvoelen.



Figuur 9 – Warm en koud voelen met je handen.

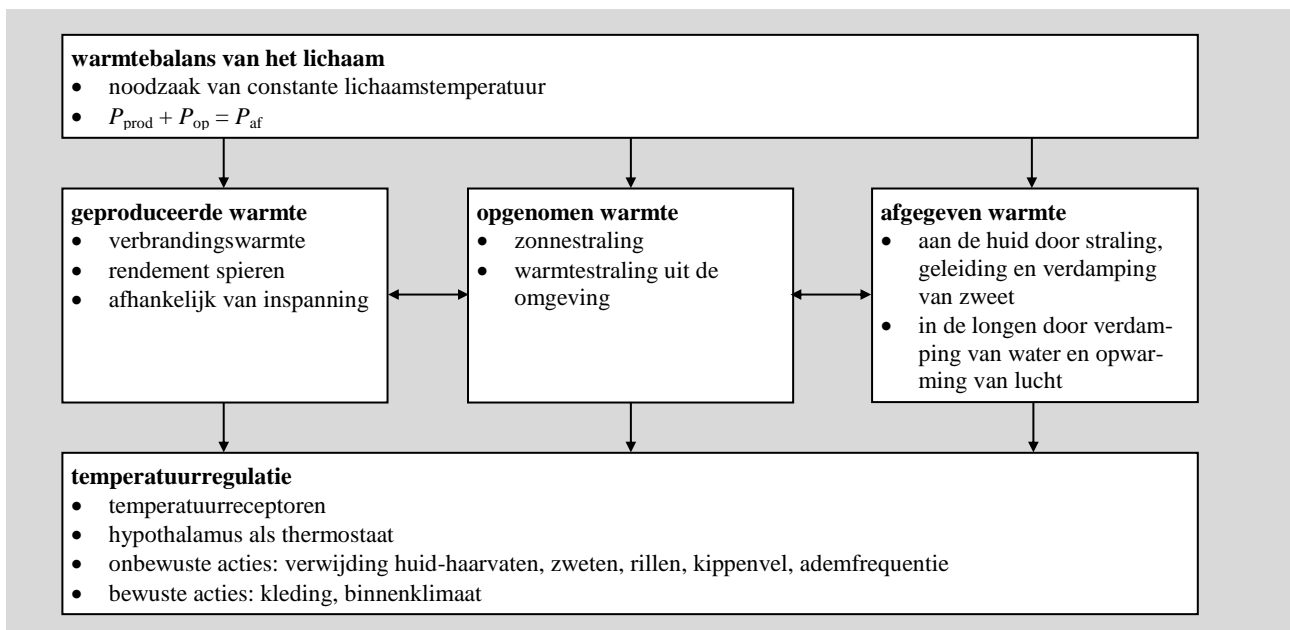
**Opwarmen en warm houden** – In het dagelijks leven wordt het werkwoord ‘verwarmen’ zowel voor *opwarmen* als voor *op temperatuur houden* (boven de omgevingstemperatuur) gebruikt. Het is belangrijk in de klas onderscheid te maken tussen beide betekenissen, want het verwarren van de twee leidt tot fouten. Immers, voor berekeningen over ‘opwarmen’ heb je de soortelijke warmte  $c$  van het op te warmen materiaal nodig, de massa  $m$  en het temperatuurverschil  $\Delta T$  tussen de begin- en gewenste eindsituatie. Voor de toegevoerde warmte  $Q$  geldt dan de formule  $Q = c \cdot m \cdot \Delta T$ . Je krijgt dan een hoeveelheid warmte in joule. Het begrijpen van ‘op temperatuur houden’ is essentieel voor warmtehuishouding. Situaties rond ‘op temperatuur houden’ komen in andere delen van de natuurkunde in het voortgezet onderwijs niet veel voor.

In de klas kan het niet goed onderscheiden van opwarmen en warm houden ertoe leiden dat leerlingen bij warmtehuishouding naar de formule voor soortelijke warmte grijpen in een situatie waarin de temperatuur constant wordt gehouden.

### Begripsopbouw

De kern van het onderwerp ‘warmtehuishouding van het lichaam’ ligt in het idee van de *warmtebalans* van het lichaam: je kunt je lichaam alleen op een constante (kern)temperatuur van 37 °C houden als het warmtevermogen  $P_{\text{prod}}$  dat je lichaam zelf produceert plus het warmtevermogen  $P_{\text{op}}$  dat het uit de omgeving opneemt (bijvoorbeeld door warmtestraling uit de omgeving) gelijk is aan het aan de omgeving afgegeven warmtevermogen  $P_{\text{af}}$ :  $P_{\text{prod}} + P_{\text{op}} = P_{\text{af}}$ . Het lichaam kent een regulatiesysteem waardoor de lichaamstemperatuur 37 °C blijft.

Het schema van figuur 10 geeft mogelijke routes vanuit die kerngedachte naar verschillende onderwerpen die rond de warmtehuishouding aan de orde kunnen komen. Hieronder bespreken we kort de inhoud van de blokken in dit schema.



Figuur 10 – Overzicht van het inhoudsgebied *Warmtehuishouding van het menselijk lichaam*.

**Warmtebalans** – Besproken kan worden waarom het menselijk lichaam gebaat is bij een constante *kerntemperatuur* van 37 °C. De huid en de ledematen hebben een wat lagere temperatuur: er is een bepaalde temperatuurverdeling in het lichaam. Als de *kerntemperatuur* in het lichaam te laag wordt, werken de enzymen te langzaam, wat levensbedreigend is. Bij te hoge temperatuur (> 42 °C) werken de enzymen te snel, de ene meer dan de andere, wat tot disbalans in het metabolisme van vitale organen leidt. Ook dat is levensbedreigend.

Er is dus een warmtebalans nodig om de lichaamstemperatuur constant op

37 °C te houden. Bij de introductie van de warmtebalans kunnen begrippen uit de kernleerstof in de context van de warmtehuishouding opgefrist worden. Denk aan warmtevermogen, aan geleiding, stroming en straling, aan soortelijke warmte, warmtecapaciteit en verdampingswarmte.

**Geproduceerd warmtevermogen** – Het geproduceerde warmtevermogen  $P_{\text{prod}}$  wordt bepaald door de mate van verbranding in de cellen. Deze warmteproductie kan het makkelijkst gereguleerd worden door de inspanning van de spieren te vergroten of verkleinen. Het rendement van spieren is ongeveer 20%, dus 80% van het omgezette vermogen komt in het lichaam vrij als warmte. Bij de kwantitatieve uitwerking van het geproduceerde warmtevermogen is, naast rendement, verbrandingswarmte een belangrijk begrip.

**Opgenomen warmtevermogen** – Het uit de omgeving opgenomen warmtevermogen  $P_{\text{op}}$  wordt vooral bepaald door het stralingsvermogen dat op je huid valt. Opgevangen zonnestraling is daarvan een voor-de-hand-liggend voorbeeld. Minder zichtbaar, maar wel voelbaar en in de praktijk wel zo belangrijk, is de warmtestraling die alle voorwerpen in de omgeving uitzenden. De hoeveelheid is afhankelijk van de temperatuur van die voorwerpen: volgens de wet van Stefan-Boltzmann evenredig met  $T^4$ .

**Afgegeven warmtevermogen** – Op twee plaatsen, via je huid en in je longen, en op vier manieren wordt warmtevermogen door het lichaam aan de omgeving afgegeven.

De eerste manier is door warmteafgifte van de huid naar de lucht door geleiding, waarna de warmte door stroming van de lucht verder wordt getransporteerd. Het afgegeven vermogen is evenredig met het temperatuurverschil tussen de huid en de omgeving. Geleiding speelt ook een rol bij het transport van warmte van de huidbloedvaten naar het huidoppervlak. De huid zelf en de onderhuidse vetlaag hebben een bepaalde warmteweerstand. Door de isolerende eigenschappen van kleding wordt de warmteafgifte beperkt.

De tweede manier is warmteafgifte door warmtestraling. Deze is sterk afhankelijk van de huidtemperatuur: evenredig met  $T^4$  volgens de wet van Stefan-Boltzmann. Het door straling afgegeven vermogen wordt ook bepaald door de huidbedekking: de haren op de huid en de kleding die je aan hebt. De lagere oppervlaktetemperatuur van de huidbedekking vermindert het door straling afgegeven warmtevermogen. De netto warmteafgifte is het verschil tussen de aan de huid afgegeven warmte (bij een huidtemperatuur van 37 °C = 310 K:  $\sim 310^4$ ) en de opgenomen warmtestraling uit de omgeving, bijvoorbeeld uitgestraald door de wanden van de kamer. De temperatuurafhankelijkheid van de netto warmteafgifte heeft tot gevolg dat je het verschil tussen een wandtemperatuur van 288 K (15 °C) en van 293 K (20 °C) heel goed kunt voelen. Daardoor kan een kamer waarvan de wanden koud zijn (zoals die van een slecht geïsoleerd huis in de winter), ondanks een (meestal ‘aangename’) luchttemperatuur van 20 °C, onaangenaam koud aanvoelen.

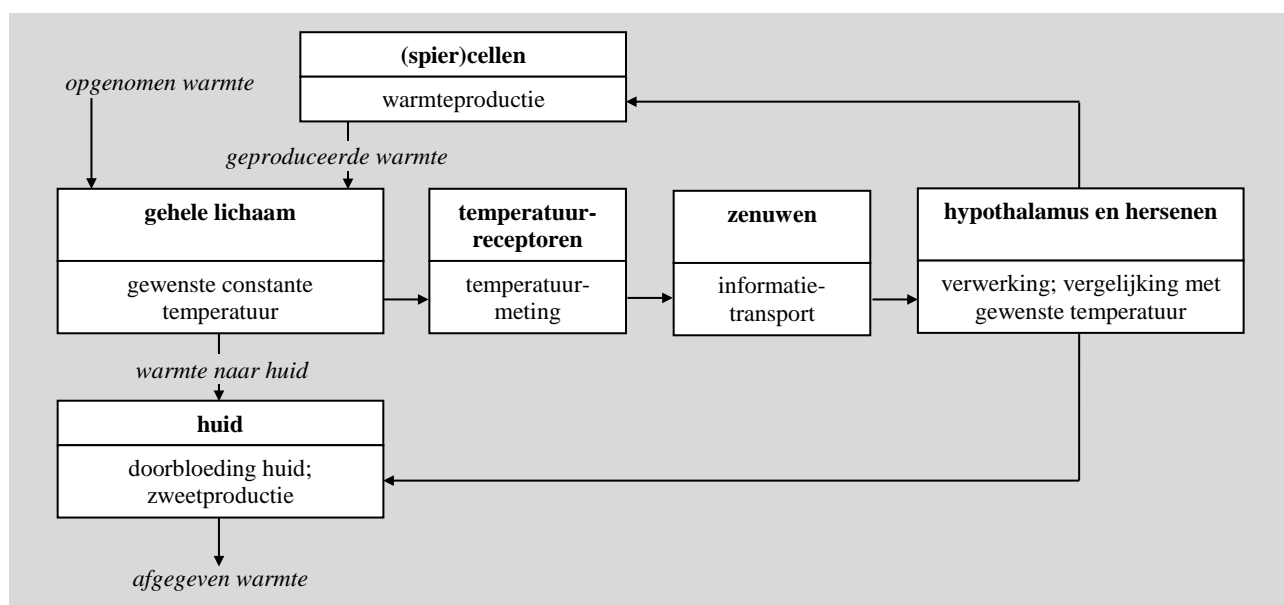
De derde manier is door verdamping van transpiratievocht op de huid. Het regelsysteem van het lichaam zorgt voor uitscheiding van transpiratievocht als de temperatuur in het lichaam te hoog dreigt te worden. De verdamping van water kost veel warmte als gevolg van de grote verdampingswarmte van water. De mate waarin het transpiratievocht verdampt, wordt bepaald door de relatieve vochtigheid van de lucht, met name van de luchtlaag rond de huid.

De vierde manier is warmteafgifte door de ademhaling. Ingeademde lucht wordt in de longen opgewarmd tot zo'n 35 °C. De warmte die dat kost, kan berekend worden met de formule voor de soortelijke warmte van lucht. Er verdampt water in de longen, wat flink wat warmte kost. De hoeveelheid water die kan verdampen hangt af van de hoeveelheid ingeademde lucht en van de temperatuur en vochtigheid ervan.

**Temperatuurregulatiesysteem** – De warmtebalans wordt ‘onbewust’ gereguleerd door het temperatuurregulatiesysteem van het lichaam. De werking van dat regulatiesysteem is een voorbeeld van *homeostase*, een belangrijk begrip in de biologie: het vermogen van het lichaam om het interne milieu in evenwicht te houden, ondanks veranderingen in de omgeving en in inspanning van het lichaam, door middel van regelkringen met terugkoppeling.



De hypothalamus werkt als thermostaat door te reageren op de temperatuur van het bloed en de signalen die hij ontvangt van de temperatuurreceptoren in de huid. Het schema van figuur 11 is een uitwerking van het algemene schema van figuur 8 voor het temperatuurregulatiesysteem.



Figuur 11 – Het temperatuurregulatiesysteem van het lichaam met interactie met de omgeving door opname en afgifte van warmte door de huid. NB: De longen en de daar afgegeven warmte zijn vanwege de overzichtelijkheid uit dit schema weggelaten.

De belangrijkste plaats waar de warmteafgifte geregeld kan worden is de huid. De warmteafgifte kan bevorderd of beperkt worden door de huid een hogere of lagere temperatuur te geven door meer of minder doorbloeding. Verder kan de productie van zweet vergroot of verkleind worden. Een derde manier is door de isolatie te laten toenemen door de stand van de haren op de huid: 'kippenvel'. De warmteafgifte in de longen is minder goed te regelen. Alleen de frequentie van de ademhaling kan geregeld worden. Bij dieren met een isolerende vacht (zoals honden) of een verentooi (vogels) is de ademhaling en verdamping van water in de bek de belangrijkste manier om de temperatuur te regelen.

De warmteproductie in de spieren kan bewust geregeld worden door spieren te laten 'werken'. Dreigt onderkoeling, dan wordt de warmteproductie (ook) onbewust geregeld: rillen. Dreigt oververhitting, dan wordt spieractiviteit tegengegaan (je slap voelen).

Een belangrijk onderdeel van de warmteregulatie vindt bewust plaats: door meer of minder warmte op te wekken door zich meer of minder in te spannen, en door het (al dan niet) beperken van de warmteafgifte en -opname aan de huid door kleding (warmte-isolatie, vochtdoorlatendheid, kleur). Ook voorzieningen in de gebouwde omgeving spelen een rol: het regelen van de temperatuur (woningverwarming en -isolatie) en het regelen van de vochtigheid van de lucht (airconditioning).

### Contexten

Warmtehuishouding kan binnen verschillende contexten behandeld worden, waarbij onderwerpen meer of minder nadruk krijgen. De methodes *Pulsar* (havo en vwo) en *Nova* (havo) kiezen voor de warmtehuishouding van het lichaam bij 'normaal' functioneren. Zij behandelen de warmteafgifte door het lichaam door geleiding door de huid en de onderhuidse vetlaag, en door straling. In *Pulsar* komt ook de temperatuurverdeling over het lichaam ter sprake. *Nova* laat zien dat in de context van 'het binnenklimaat in huis' de opgenomen warmte belangrijk is omdat de stralingswarmte uitgezonden door de wanden van de woning heel bepalend is voor hoe comfortabel men zich voelt. Dat zou men kunnen aanvullen met de invloed van de relatieve vochtigheid van de lucht. Dat

onderwerp is nog meer van belang als men de context ‘overleven in extreme omstandigheden’ kiest: overleven in een tropisch oerwoud met temperaturen boven 37 °C en volledig verzadigde luchtvochtigheid: hoe raak je dan je warmte kwijt? Of overleven in een hete, droge woestijn: hoe voorkom je dan uitdroging? De methode *Newton* werkt warmtehuishouding uit in de context ‘Sport en gezondheid’. Besproken wordt hoe een sporter zijn warmte kan kwijtraken tijdens het verrichten van zijn/haar prestatie en beschermd kan worden tegen plotselinge afkoeling erna. Dit zou men kunnen uitbreiden met de vraag wat de ideale buitentemperatuur is voor een marathonloper. Voor toppers is die zo’n 10 °C. Voor recreanten, die immers minder vermogen kunnen leveren, is die temperatuur wat hoger, tot 15 °C. Zie [hier](#) voor een onderzoek naar de optimale marathontemperatuur.

Het onderwerp ‘temperatuurregeling in het lichaam’ is in alle genoemde contexten van belang, maar verdient extra aandacht in de context van ziekte en gezondheid, omdat de temperatuurregeling door het ziek zijn verandert waardoor er koorts optreedt. Dit onderwerp vereist afstemming met biologie. Daarbij moet er rekening mee worden gehouden dat leerlingen het NT-profiel (natuur en techniek) kunnen volgen zonder biologie.

## 2 Zintuigen

NiNa heeft het inhoudsgebied ‘de optica van het oog’ in haar advies opgenomen op aandringen van leraren. Het is gretig overgenomen door de leerboek-auteurs en uitgebreid tot het oor: alle vijf havo-methodes behandelen een of twee zintuigen (zie figuur 4). Drie van de zes vwo-methodes besteden er uitgebreid aandacht aan, en een vierde (*Newton*) heel summier (zie figuur 7). De biofysica is echter uitgebreider en interessanter als de behandeling niet wordt beperkt tot het oog en het oor, maar ook de verwerking in de hersenen en de terugkoppeling in de behandeling worden meegenomen. *Overal Natuurkunde* (havo) en *Pulsar* (havo/vwo) doen dat bijvoorbeeld als zij ingaan op het zien van diepte. Daarom gaan wij in op het visuele systeem en het auditieve systeem. Die systemen omvatten niet alleen de ontvangers, oog en oor, maar ook het transport van de prikkels door de zenuwen, de verwerking in de hersenen en de terugkoppeling. Bij het auditieve systeem besteden we ook aandacht aan de spraak, waarbij de menselijke stem de bron van geluid is.

### Het visuele systeem

#### Voorkennis

In de onderbouw wordt de bouw van het oog behandeld in de biologie en in de natuurkunde. In de natuurkunde gebeurt dat in het kader van de geometrische optica, met nadruk op de beeldvorming op het netvlies. Daarbij wordt het oog vereenvoudigd tot een soort fotoestel met een lens waarvan de brandpuntsafstand kan worden ingesteld.

Er bestaan veel intuïtieve denkbeelden die het begrijpen van het zien bemoeilijken. Dat komt doordat de relatie tussen zien en licht vanuit de dagelijkse ervaring vanzelfsprekend is: zonder licht kun je niet zien, en dat is alles (Wubbels, 1986). De denkbeelden over geometrische optica zijn samen te vatten in zes groepen (Verkerk, 1990). Vertaald naar het zien houden deze denkbeelden het volgende in.

**Wat is licht** – Als je in een donkere kamer een lamp aan doet, zie je dat de hele kamer verlicht wordt. Een leerling kan daaruit de conclusie trekken dat *licht de ruimte vult*, vergelijkbaar met lucht. Ook kan een leerling het *licht met de bron identificeren*. Bijvoorbeeld: ‘Ik zie de lamp’ of ‘Ik zie de lichtvlek op de muur’.

**Voortplanting van licht** – Een leerling ervaart dat de hele kamer onmiddellijk is verlicht zodra je een lamp aansteekt. Hij of zij kan daaruit de conclusie trekken dat licht een *oneindige voortplantingssnelheid* heeft: zodra het licht aan is, is de ruimte geheel met licht ‘gevuld’. Omdat ook het gedeelte van de kamer dat niet direct door de lamp wordt beschenen verlicht wordt, denken leerlingen wel dat het licht de bocht om is gegaan: *niet-rechthoekige voortplanting*. De leerling ervaart dat je een zwakkere lamp op een afstand nauwelijks of niet meer ziet, en

een sterke lamp wel. Daaruit komt het denkbeeld van een *eindig bereik van licht* voort: licht van een sterke lamp komt verder dan licht van een zwakkere lamp. **Interactie van licht en voorwerpen** – Sommige leerlingen beperken terugkaatsing tot spiegelende terugkaatsing en hebben dus *geen begrip van diffuse terugkaatsing*. Veel leerlingen weten niet dat een lichtbundel waar je dwars op kijkt, alleen zichtbaar is als het licht verstrooid wordt: het denkbeeld van de *zichtbare lichtbundel*.

**Ontkoppeling van zien en licht** – Veelal ontbreekt het inzicht dat er licht in het oog moet vallen om iets te zien: *licht is slechts een voorwaarde om te kunnen zien*. Er is een activiteit van het oog nodig om iets te zien. Uit de ervaring dat je je blik ergens op moet richten, trekken sommige leerlingen de conclusie dat het oog zelf ‘visuele stralen’ uitzendt: het denkbeeld van het *oog als bron*. Dit denkbeeld lijkt veel op de klassieke opvatting van Pythagoras over zien: van het oog gaan lichtstralen uit, die op een voorwerp stoten en de stoot op het oog overbrengen.

**Kleuren zien** – Leerlingen kunnen kleur louter als eigenschap van een voorwerp zien: ‘Die bloem is rood’. Van daaruit beschouwen ze wit en zwart ook als kleuren en leggen ze weinig verband tussen duisternis en zwart.

**Beeld zien** – Sommige leerlingen hebben moeite met het idee dat het spiegelbeeld achter de spiegel ligt (‘achter de spiegel is toch niks’) en plaatsen het beeld op de spiegel. Bij reële beeldvorming door een lens redeneren sommige leerlingen dat een beeld van het voorwerp naar het scherm ‘reist’: het denkbeeld van een *reizend beeld*. Dit lijkt op de klassieke opvatting van Empedocles over zien: er vertrekken beelden van een voorwerp die door de gezichtsstralen uit het oog worden ‘gezien’. Ten slotte verwarren leerlingen wel eens het voorwerp en het beeld.

In aanvulling op deze denkbeelden is voor het leerlingen, bij het leren over het visuele systeem als geheel, lastig om het *lichtbeeld* dat op het netvlies gevormd wordt te onderscheiden van het *waargenomen beeld*, dat het brein samenstelt uit de informatie die uit het netvlies afkomstig is.

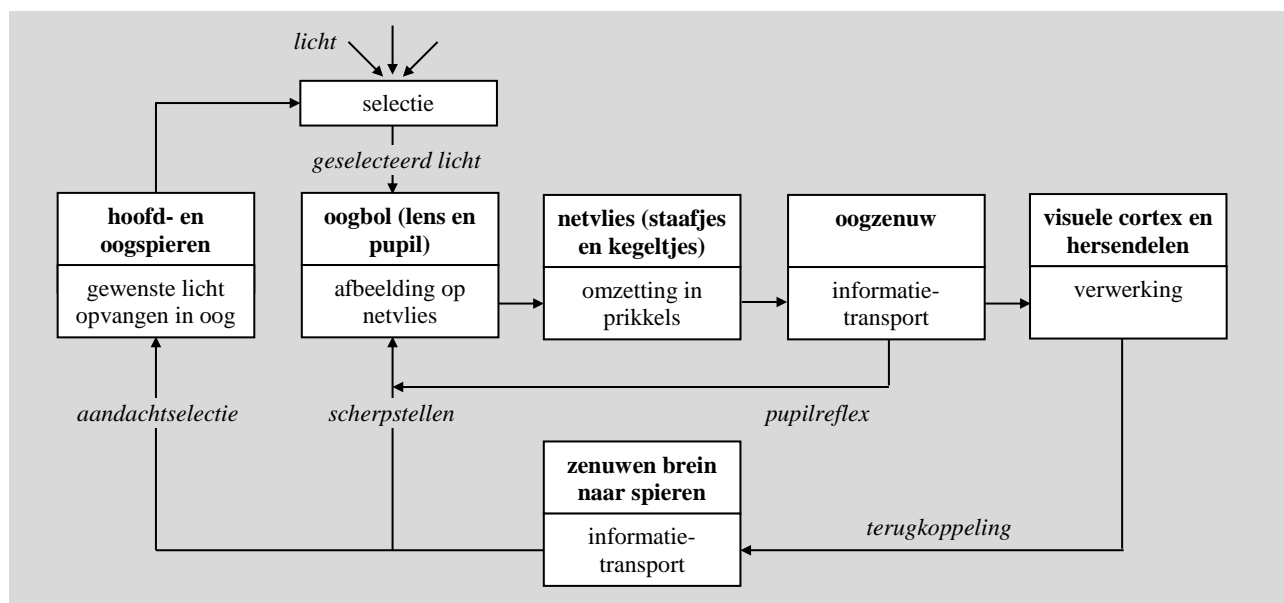
Sommige van de genoemde denkbeelden, zoals die van ‘het oog als bron’ en ‘licht als ruimtevulling’, lijken meer bij jongere dan bij oudere leerlingen voor te komen. Veel uitspraken van leerlingen over licht zijn nogal diffuus: er klinken één of meer van de bovengenoemde denkbeelden in door zonder dat ze scherp aanwijsbaar zijn. De manier waarop leerlingen over licht praten lijkt ook afhankelijk te zijn van de context, dan wel van de vraag die aan ze gesteld wordt (Wubbels, 1986).

### **Begripsopbouw**

De kern van de biofysische behandeling van het visuele systeem moet ons inziens zijn leerlingen inzicht te geven in de manier waarop informatie uit licht in het lichaam wordt *bewerkt* en hoe die informatie na *verwerking* in het brein teruggekoppeld wordt ten einde licht te selecteren en dus de aandacht ergens op te richten. Gestuurd door je hersenen beweeg je het hoofd of je hele lichaam, richt je de ogen, accommodeer je om de omgeving dichtbij of de omgeving veraf de voorkeur te geven. Dit alles betekent aandacht! Dan pas begint signaalverwerking in de zintuigen, die op hun beurt signalen naar de hersenen sturen waar de gekozen buitenwereld echt wordt waargenomen. Om te laten zien wat er in grote lijnen waar in het visuele systeem gebeurt, werken we in figuur 12 het algemene schema van figuur 8 uit voor het visuele systeem, met een bespreking van de verschillende blokken in dat schema.

**Aandacht richten met hoofd- en oogspieren** – Het hoofd en de oogballen worden zo gericht dat de gewenste lichtbundels worden opgevangen en het gewenste voorwerp ‘in beeld’ komt. Snelle oogbewegingen (saccades) spelen een rol bij het richten van de ogen en het zien van diepte: wat staat op de voor- of achtergrond. De aandachtselectie wordt aangestuurd door het brein en wordt mede bepaald door de vergelijking van opgevangen beelden met eerder waargenomen beelden uit het geheugen. Het brein ontvangt ook informatie van spieren, waaronder de oogspieren die informatie geven over de hoek die de ogen met elkaar maken. Ook die informatie is van belang voor het zien van diepte.

Het inzicht dat de stand van de oogbollen en het hoofd bepalen welke lichtbundels in het oog vallen en dus welke voorwerpen ‘in beeld’ komen, biedt een alternatief voor het denkbeeld van het met de ogen aftasten van de omgeving (het denkbeeld van het *oog als bron*).



Figuur 12 – Het visuele systeem in interactie met de omgeving.

**Beeldvorming in het oog** – In het oog wordt een *licht*beeld gevormd op het netvlies. De hoeveelheid in de oogbol vallend licht wordt gereguleerd door de grootte van de pupil. Bij te veel of te weinig invallend licht zorgt de pupilreflex voor vergroting of verkleining van de hoeveelheid licht. Ook heeft de pupil invloed op het lichtbeeld dat op het netvlies wordt gevormd omdat het de scherptediepte bepaalt.

Samen met de bolling van het hoornvlies bepaalt de ooglenzen de sterkte van de oogoptiek. De kringspier om de ooglenzen bepaalt de variatie in die sterkte, waardoor een scherp lichtbeeld op het netvlies wordt gevormd. De scherpstelling wordt vanuit het brein aangestuurd en het brein ontvangt informatie over de aanspanning van de kringspier, wat van belang is voor het zien van diepte. Als leerlingen de werking van het oog niet goed begrijpen, is er het risico dat denkbeelden ontstaan als:

- Alleen de ooglenzen bepaalt de sterkte van het oog (de invloed van het hoornvlies wordt vergeten). Een remedie hiertegen kan gevormd worden door het begrip ‘gereduceerde oog(lenzen)’ (ontleend aan de methode *Stevin vwo*), dat benadrukt dat de refractie van hoornvlies en ooglenzen zijn samengenomen.
- Het lichtbeeld op het netvlies is gelijkvormig met het afgebeelde voorwerp. Vanwege de kromming van het netvlies is dat niet het geval. Slordige formuleringen kunnen dit denkbeeld versterken, bijvoorbeeld in de methode *Pulsar 5V* (blz. 276): ‘Je netvlies is een plat vlak’.

**Omzetting van het lichtbeeld in prikkels** – Een scherpe afbeelding op het netvlies betekent een goede scheiding van informatie. In het netvlies van de ogen wordt het lichtbeeld door de kegeltjes en de staafjes omgezet in elektrische signalen: prikkels. De prikkels bevatten informatie over kleur of intensiteit van een stipje van het lichtbeeld (pixel).

**Transport van informatie** – De elektrische signalen worden door de oogzenuwen doorgegeven aan de visuele cortex. In het netvlies vindt al een voorverwerking plaats doordat signalen uit verschillende kegeltjes of staafjes worden samengevoegd. Als leerlingen de werking van het visuele systeem niet goed begrijpen, is er het risico dat een denkbeeld ontstaat als: het (licht)beeld dat in het oog gevormd wordt, reist door de zenuwen naar het brein (een variatie op het denkbeeld van een *reizend beeld*).

**Verwerking in de hersenen** – De eerste verwerking van de getransporteerde informatie vindt plaats in een speciaal hersengebied dat goed gelokaliseerd is: de visuele cortex. De verwerking vindt onder andere plaats door vergelijking van de binnenkomende prikkel met een drempelwaarde (prikkel beneden de drempelwaarde worden genegeerd). Verder kunnen de prikkels van twee gelijktijdige beelden (bijvoorbeeld die van het linker- en rechteroog) of van na elkaar komende beelden met elkaar worden vergeleken (onder andere voor het zien van beweging, en voor het schatten van afstanden via oog- of hoofdbewegingen). In de hersenschors komt allerlei informatie samen en vindt vergelijking met informatie uit het geheugen plaats. Uiteindelijk wordt een *perceptueel* beeld gevormd dat het bewustzijn bereikt.

Samenhangend met het hierboven genoemde denkbeeld van een *reizend beeld* bestaat het gevaar dat het optisch beeld dat in het oog ontstaat en het beeld dat in de hersenen gevormd wordt, met elkaar verward worden. Om deze verwar- ring te voorkomen is in de bovenstaande tekst onderscheid gemaakt tussen het *lichtbeeld* in het oog en het *perceptuele* beeld in het brein.

Door het brein wordt een driedimensionaal dieptebeeld van de omgeving gemaakt. Leerlingen kunnen het denkbeeld hebben dat het zien van diepte alleen mogelijk is door de binoculaire informatie, maar ook monoculaire en niet-visuele informatie spelen bij het zien van diepte een rol.

**Terugkoppeling** – Op verschillende plaatsen in het verwerkingsproces vindt terugkoppeling plaats naar andere delen van het visuele systeem. Vroeg in het verwerkingsproces, bijvoorbeeld, treedt onbewuste terugkoppeling op: de pupil- reflex. Die regelt de pupilgrootte al naar gelang de hoeveelheid licht die op het netvlies valt. Aandachtselectie kan plaatsvinden door zowel onbewuste als bewuste terugkoppeling.

Gezien het pleidooi in de omschrijving van het domein *Biofysica* in het NiNa- eindadvies om op het vwo aandacht te besteden aan *de levende cel* en *fysische technieken om informatietransport in het lichaam waarneembaar en modelleer- baar te maken* zou de nadruk bij vwo gelegd kunnen worden op de verwerking in het brein, de terugkoppeling en de aandachtselectie: van het opvangen van licht door kegeltjes en staafjes tot verwerking in de visuele cortex. Volgens de omschrijving van het havo-domein door NiNa gaat het bij havo om ‘prestaties van het menselijk lichaam’ (hier: van het visuele systeem) en om ‘veiligheid en gezondheid’, wat hier opgevat kan worden als oogbeschadigingen en oogaf- wijkingen. Daarbij past een nadruk op het opvangen van licht en op de beeld- vorming in de oogbol.

## Contexten

In contexten waarin het visuele systeem van belang is, kan de nadruk liggen op één of enkele blokken uit het schema van figuur 12. We bespreken hier enkele van die contexten.

**Optimale beeldvorming in het oog en oogafwijkingen** – Bij deze context ligt de nadruk op het toepassen van geometrische optica op het menselijk oog en op oogafwijkingen die het gevolg zijn van de niet-optimale werking van de ooglenzen, zoals bij ver- en oudziendheid. Dat kan aangevuld worden met manieren om oogafwijkingen te corrigeren (bril, contactlens). Ook kan het gevaar voor het ontstaan of verergeren van bijziendheid bij jonge kinderen door veel kijken op beeldschermen of in boeken (verlenging van de oogas bij opgroeiende kinderen) en het voorkomen van [myopie](#) behandeld worden. In december 2017 zijn daarover krantenartikelen verschenen (*NRC* en *de Volkskrant*).

**Diepte zien** – Bij het zien van diepte gaat het om het perceptuele beeld dat in het brein wordt gevormd. Er zijn drie soorten diepte-aanwijzingen: monoculaire, binoculaire en niet-visuele aanwijzingen. Monoculaire aanwijzingen kunnen gehaald worden uit informatie die van één oog afkomstig is. Voorbeelden daar- van zijn de grootte van het beeld van voorwerpen dichtbij en veraf, en voor- werpen op de voorgrond die voorwerpen op de achtergrond bedekken. Binocu- laire aanwijzingen komen voort uit het verschil tussen de beelden die onze twee ogen waarnemen. Niet-visuele diepteaanwijzingen krijg je uit andere bronnen dan het beeld op het netvlies, zoals de hoek die je ogen ten opzichte van elkaar

maken bij het kijken in de verte (kleine hoek) of dichtbij (grote hoek). Ook de spierspanning in de kringspier van de ooglenzen (klein bij ver zien, groot bij nabij zien) is zo'n aanwijzing.

Het vermogen om diepte te zien neemt sterk af bij een [lui oog](#), waarbij de binoculaire diepteaanwijzingen afwezig zijn. Maar dat vermogen valt niet helemaal weg, omdat de monoculaire en diepteaanwijzingen beschikbaar blijven. **Gevoeligheid van het oog** – Het oog heeft het vermogen om een groot bereik aan intensiteiten te zien en is, dankzij de kegeltjes, in staat om kleuren te zien. Kleuren zien is een interessant onderwerp, omdat de biofysica kan verklaren hoe het mogelijk is veel kleuren te zien met slechts drie kleurenpigmenten in de kegeltjes. Daarbij is de manier waarop de verwerking plaats vindt van belang, een onderwerp dat een multidisciplinaire benadering verdient (zie de NLT-module *Kijken en Zien*).

**Optische illusies** – De context van optische illusies is geschikt om inzicht te krijgen in de biofysica van de verwerking en vereist veel biologische kennis. Dit onderwerp wordt uitgebreid behandeld in de NLT-module *Kijken en zien* (Van der Valk & Kieviet, 2011).

### Lesmethodes

De uitwerkingen van het visuele systeem overziend, valt het op dat de havo-methodes die het oog behandelen inderdaad de nadruk leggen op het zien als prestatie. *Systematische Natuurkunde* (havo) is de enige methode die de nadruk legt op de optica en oogafwijkingen (wat min of meer in de NiNa-context gezondheid past). *Overal Natuurkunde* (havo) en *Pulsar* (havo) leggen de nadruk op diepte zien. Dat slechts één havo-methode de optica van het oog behandelt, kan komen doordat het havo-examenprogramma een keuzedomein B3 *Optica* kent, een deeldomein van domein B *Beeld- en geluidstechniek*.

De drie vwo-methodes die het oog behandelen leggen de nadruk op de optica en oogafwijkingen. De reden daarvoor lijkt te zijn dat leraren en leerboekauteurs het belangrijk vinden de optica te behandelen, waarvoor elders in het vwo-examenprogramma geen plaats is. Het is wel jammer dat, als er gekozen wordt voor de optica van het oog, de leerlingen weinig beeld krijgen van de moderne biofysica als uitdagend en belangrijk onderzoeksgebied binnen de huidige natuurkunde. Een illustratief voorbeeld vinden we bij *Overal Natuurkunde*. Voor havo kiest die methode voor een stevig biofysisch onderwerp: diepte zien, waarbij de verwerking van beelden in het brein essentieel is. Echter, voor vwo richt de methode zich helemaal op de beeldvorming in het oog, waardoor niet het inzicht in de biofysica maar in de 'traditionele' optica het leerdoel lijkt te zijn.

## Het auditieve systeem

### Voorkennis

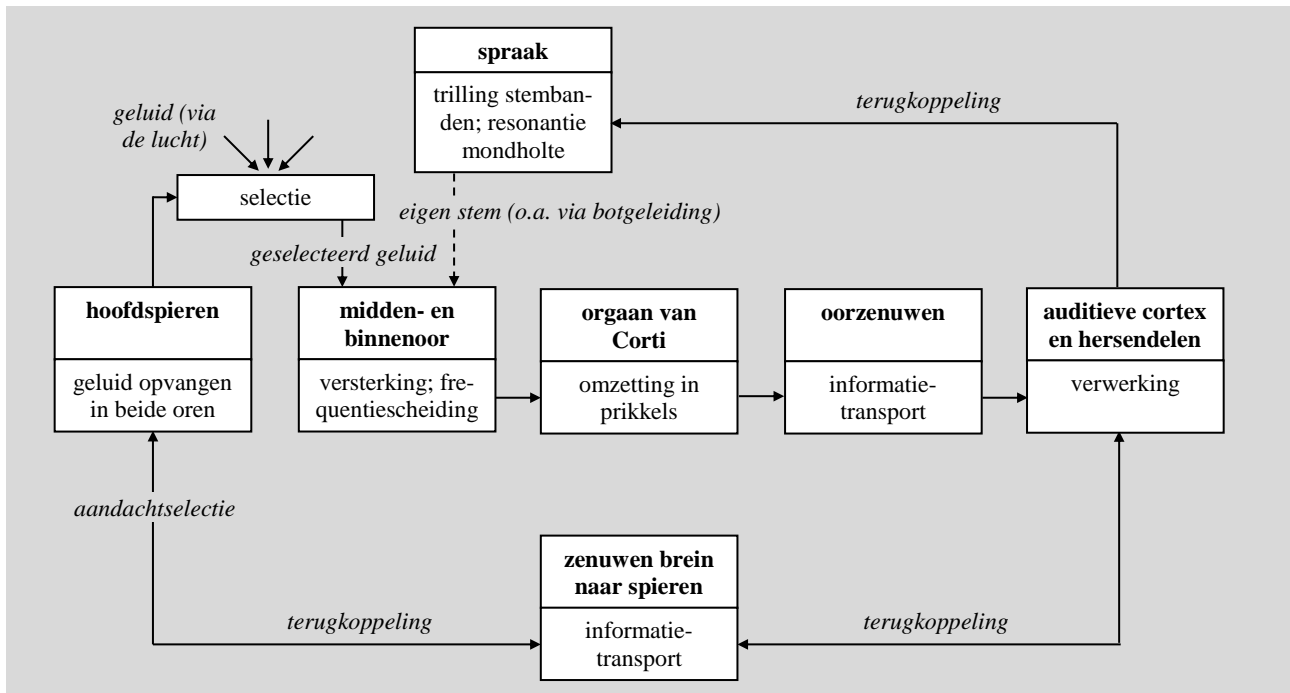
Uit een overzicht van leerlingdenkbeelden over geluid (Leijenaar, 1990), toegepast op het gehoor, komt het volgende naar voren:

- Geluid is identiek aan de bron: 'Ik hoor de bel'.
- Geen duidelijk onderscheid tussen toonhoogte en geluidsstrekte: tussen hard en hoog of tussen zacht en laag.
- Resonantie is 'meetrillen met de bron', niet met één specifieke toon uit de bron. Bovendien treedt resonantie alleen op bij hard geluid, met name bij heel hoge of heel lage tonen.

### Begripsopbouw

Net als het denkbeeld van het *reizend beeld* bij het visuele systeem kan er bij behandeling van het auditieve systeem het denkbeeld ontstaan dat het 'geluidsbeeld' (de muziek, het gesproken woord, maar ook de luidheid) al in het (binnen)oor wordt samengesteld en via de zenuwen naar het brein reist. Dat is incorrect: de in het oor uiteengelegde informatie ontleend aan de geluidsgolf wordt door de oorzenuwen naar het brein getransporteerd en wordt daar verwerkt: daar worden luidheid, tonen, geruis enzovoort waargenomen en geïnterpreteerd tot muziek, woorden, (gepercipieerd) geluid. Om te laten zien wat er in grote lijnen waar in het auditieve systeem gebeurt, werken we in figuur

13 het algemene schema van figuur 8 uit voor het auditieve systeem (inclusief de spraak), met een bespreking van de verschillende blokken in dat schema.



Figuur 13 – Het auditieve systeem en de spraak in interactie met de omgeving.

**Aandacht richten met hoofdspieren** – Het hoofd wordt zo gericht dat de oren de gewenste geluidsgolven opvangen. Informatie over de stand van het hoofd speelt een rol bij het bepalen uit welke richting het geluid komt. Bij het richting en afstand horen spelen de vorm van de oorschelp en de vorm van het hoofd een rol.

**Versterking en frequentiescheiding** – De geluidsgolf die in de gehoorgang aankomt, wordt gekenmerkt door de aanwezige frequenties en door de geluidsintensiteit. In de gehoorgang treedt bij bepaalde frequenties resonantie op, waardoor we die frequenties beter horen dan andere. De opgevangen luchttrillingen brengen het trommelvlies in trilling, wat wordt overgebracht op de gehoorbeentjes die de trilling versterken en overbrengen naar de vloeistof in het slakkenhuis. Daar vindt frequentiescheiding plaats doordat er plaatselijk resonantie optreedt in het basilair membraan, afhankelijk van de frequentie.

**Omzetting in prikkels** – Het orgaan van Corti, gelegen op het basilair membraan, zet de plaatselijke trilling in het slakkenhuis om in een elektrisch signaal, dat door de zenuwen naar het brein wordt getransporteerd.

**Verwerking in het brein** – De eerste verwerking van de auditieve signalen vindt plaats in de auditieve cortex. Daarna wordt de informatie doorgegeven aan andere delen van het brein, waar het wordt gecombineerd met informatie uit andere bronnen (onder andere de stand van het hoofd, het geheugen) en wordt geïnterpreteerd. De verwerking in het brein leidt tot de waarneming van luidheid (met zijn logaritmisch karakter), van tonen, woorden, muziek enzovoort, waarbij de aandacht gericht wordt op bepaalde delen van de binnenkomende informatie. Het brein zendt prikkels terug naar het oor en de hoofdspieren, waardoor het binnenkomende geluid kan worden geselecteerd.

**Spraak** – De mens produceert met de stembanden luchttrillingen, die door de vorm van de mond-, neus- en keelholte en de stand van de lippen, tong en tanden tot klanken worden bewerkt. Bij de verschillende klinkers en medeklinkers horen formanten die gekenmerkt worden door de frequentiesamenstelling en de sterkte van de verschillende frequenties. Dit spraaksysteem wordt uiteraard vanuit de hersenen aangestuurd. De eigen stem wordt door het auditieve systeem waargenomen. De stemtrillingen bereiken het trommelvlies voornamelijk via bot-

geleiding in het hoofd. Door de perceptie van de eigen stem is terugkoppeling naar het spraaksysteem mogelijk.

### Contexten

Hier bespreken we enkele contexten waarin het auditieve systeem van belang is. In die contexten hoeft meestal slechts een deel van het gehele auditieve systeem bestudeerd te worden.

**Gevoeligheid van het gehoor en gehoorverlies** – We nemen geen absolute verschillen in geluid waar, maar relatieve verschillen. Daardoor is het bereik van ons gehoor groot en heeft het geluidsniveau dat wij (in de hersenen) gewaar worden een logaritmisch karakter. Te zwakke geluiden kunnen we niet horen, te sterke geluiden kunnen ons gehoor beschadigen. Fysisch kunnen we de sterkte van inkomende geluidsgolven goed karakteriseren met de geluidsintensiteit (in  $W/m^2$ ). Echter, biofysisch moeten we rekening houden met hoe de sterkte van het geluid door mensen wordt ervaren. Bij de meting van geluid wordt het ervaren geluidsniveau benaderd door niet de geluidsintensiteit, maar de logaritme daarvan te meten, waarvoor de dB-schaal wordt gebruikt. We spreken dan van luidheid. Echter, het ervaren geluidsniveau is ook sterk afhankelijk van de frequentie: om een lage toon even hard te horen als een toon van 1000 Hz heb je veel meer geluid nodig (tot 70 dB). De meting van de luidheid met een dB(A)-filter (de A van auditief) houdt daar rekening mee: laag geluid van 40 dB(A) hoor je ongeveer even sterk als 1000Hz geluid van 40 dB(A). Het dB(A)-filter houdt echter geen rekening met een andere eigenaardigheid van het ervaren geluidsniveau: dat is niet alleen afhankelijk van de frequentie, maar ook van de intensiteit. Als je het geluidsniveau in foon meet, komt de gemeten sterkte nog beter overeen met de ervaren luidheid.

Het gehoorverlies van een individu door bijvoorbeeld gehoorbeschadiging wordt weergegeven in een audiogram. Daarin wordt aangegeven hoeveel dB die persoon meer nodig heeft dan een ‘gezonder hoorder’ om geluid van een bepaalde frequentie te horen.

**Bepalen van geluidsrichting** – We bepalen op verschillende manieren uit welke richting geluid komt. Ten eerste kunnen we een verschil in aankomsttijd van geluid uit een bron bij de twee oren waarnemen. Ten tweede kunnen we ook een verschil in geluidsintensiteit bij de oren waarnemen. Ten derde wordt geluid door je hoofd en oorschelp vervormd. Dat leidt tot verschillen tussen het geluid dat beide oren waarnemen, wat ook kan worden gebruikt bij de richtingsbepaling. Ten vierde spelen reflecties in de oorschelp een rol.

**Auditieve illusies** – Er bestaan verschillende auditieve illusies. Zo kun je tonen waarnemen met frequenties die niet in de inkomende geluidsgolf aanwezig zijn. Het bekendst zijn de ontbrekende grondtonen. Daarnaast blijkt dat de waarneming van geluid afhankelijk kan zijn van wat je ziet (het McGurk-effect).

### Lesmethodes

In alle havo-methodes en in vier van de zes vwo-methodes worden aspecten van het auditieve systeem behandeld. *Overal Natuurkunde* (vwo), *Stevin* (vwo) en *Pulsar* (havo en vwo) besteden ook aandacht aan de spraakproductie en het herkennen van spraak.

In de methodes *Stevin* (vwo), *Nova* (havo), *Overal Natuurkunde* (vwo), *Pulsar* (havo en vwo) en *Systematische Natuurkunde* (havo) wordt de werking en de gevoeligheid van het oor uitgelegd. Zowel het ontstaan van gehoorbeschadigingen door te veel herrie (te grote druk in het oor) als de gevolgen ervan voor de gevoeligheid van het oor worden behandeld. *Overal Natuurkunde* (havo) behandelt het richting en afstand horen.

## 3 Signaalgeleiding

Signaalgeleiding is essentieel voor allerlei processen in het lichaam en is een gemeenschappelijk deel van de hiervoor behandelde onderwerpen (warmtehuishouding, het visuele en het auditieve systeem). Het biedt veel mogelijkheden om in te gaan op fysische processen in de cel, op het modelleren van die processen en op fysische technieken om ze te onderzoeken, inhoud die volgens NiNa in het



vwo-keuzedomein gewenst is. Dit inhoudsgebied is dan ook uitgewerkt in het NiNa-voorbeeldmateriaal vwo (Van Pelt et al, 2012). Er zijn twee havo-methodes (zie figuur 4) en twee vwo-methodes (zie figuur 7) die dit inhoudsgebied beknopt of wat uitgebreider hebben uitgewerkt, met name voor zenuwgeleiding. Daarnaast is er een vwo-methode (*Nova*) die ingaat op fysische processen in de cel (moleculaire machientjes) en technieken (DNA door nanoporiën trekken).

### Voorkennis

Signaalgeleiding in het menselijk lichaam is nieuw in de natuurkunde voor het voortgezet onderwijs. Er is, voor zover we weten, geen natuurkunde-didactisch onderzoek gedaan naar leerlingdenkbeelden en voorkennis op dit gebied. Daarom noemen we hier slechts enkele *mogelijke* denkbeelden. De leraar kan zelf nagaan of de genoemde denkbeelden voorkomen bij leerlingen, of ook bij collega's of zichzelf!

**Reactietijd** – Een denkbeeld kan zijn dat de reactietijd alleen afhangt van de aandacht: 'Je hebt een reactietijd omdat je je aandacht er niet bij hebt.' Maar zelfs wanneer je maximaal geconcentreerd bent en iets opmerkt, duurt het even voordat spieren reageren. Immers, het kost tijd voordat een signaal in de spieren aankomt en die spieren reageren. Zelfs in het geval van reflexen, wanneer signalen rechtstreeks van zintuig naar spieren gaan en niet via de hersenen, duurt het even voordat een signaal de spieren bereikt. Reactietijd is een meetbaar verschijnsel dat in de eerste plaats wordt veroorzaakt door een eindige snelheid van signaaltransport in het lichaam. Daarmee is het een typisch biofysisch verschijnsel.

**Aandacht** – Aandacht is, biofysisch gezien, een taakgerichte selectie van externe en interne prikkels om de gewenste informatie te krijgen. Het is onwaarschijnlijk dat een mens zijn aandacht kan (ver)delen. Wel is het mogelijk om snel tussen verschillende dingen te schakelen.

Leerlingen kunnen denken dat je aandacht deelbaar is omdat mensen meerdere dingen tegelijk kunnen doen. Je kunt tegelijkertijd je telefoon bedienen en aandacht hebben voor de omgeving. Wanneer je tegelijkertijd dingen kunt *doen* betekent dit nog niet dat je aandacht kunt verdelen. Bewegingen zoals lopen en fietsen gebeuren deels op de automatische piloot. Als je ergens aandacht voor hebt, spelen delen van je hersenen daar een rol in. De aandacht is dan bij één taak, maar kan snel heen en weer springen tussen meerdere taken. Maar er zijn ook hersentaken die geen aandacht vergen, bijvoorbeeld omdat ze geautomatiseerd zijn.

**Potentiaal en spanning** – Leerlingen kennen het begrip elektrische spanning uit de onderbouw als de oorzaak van een elektrische stroom in een stroomkring. Spanning is voor leerlingen een begrip dat met veel begripsproblemen gepaard gaat (Licht & Snoek, 1986; Van den Berg et al, 1995), zoals het verwarren van spanning en stroom. Dit soort denkbeelden kan ook rond potentiaal ontstaan, zeker als het verschil tussen potentiaal en spanning voor leerlingen onduidelijk blijft.

Het kan zijn dat het biofysische onderwerp signaalgeleiding in de klas behandeld wordt voordat het elektrische veld is besproken. Dan zijn leerlingen nog niet bekend met het begrip 'potentiaal'. Waarom is het begrip potentiaal in die context noodzakelijk? Is 'elektrische spanning', bekend uit de onderbouw, een alternatief? Het begrip potentiaal *in een punt* is noodzakelijk omdat informatietransport in zenuwcellen mogelijk is door het gedrag van ionen in een elektrisch veld dat over een celmembraan staat. Dit veld bouwt zich op door diffusie van ionen door ionkanalen. 'Elektrische spanning en stroom' zijn nodig als voorkennis bij de vorming van het potentiaalbegrip. Waar potentiaal gaat over één punt, gaat spanning over twee punten: het verschil in potentiaal tussen die twee punten in een elektrisch veld of een geleider (zie figuur 14).

Rustpotentiaal en actiepotentiaal zijn grootheden die de elektrische toestand van vloeistoffen in de cel karakteriseren. Die toestand ontstaat door ladings-scheiding rond het celmembraan. De vloeistof buiten de cel heeft per definitie een potentiaal nul. Kijken we aan weerszijden van het celmembraan, dan vinden

Potentiaal is een grootheid die aan een punt in een elektrisch veld wordt toegekend. Het is de (potentiële) elektrische energie  $E$  die een lading  $q$  krijgt (ten opzichte van een nul-niveau) als de lading in dat punt wordt geplaatst:  $V = E/q$ . Daaruit volgt de eenheid:  $J/C = V$ . Een punt kan een potentiaal hebben zonder dat in dat punt een lading aanwezig is, een punt in een vacuüm bijvoorbeeld. Spanning staat over iets, een draad bijvoorbeeld. Spanning gaat over het verschil tussen twee punten in een schakeling en komt overeen met een potentiaalverschil. Potentiaal is afhankelijk van een gekozen nul-niveau, spanning niet.

Figuur 14 – Potentiaal en spanning.

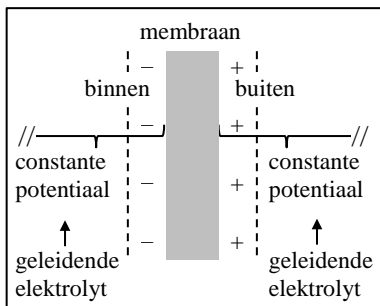
we een potentiaalverschil. Aansluitend bij de voorkennis van leerlingen kunnen we dit potentiaalverschil de spanning over de celwand noemen. In de praktijk van de biofysica kijkt men vrijwel altijd naar punten aan de binnenzijde van de celwand en spreekt men dus over (rust- en actie)potentiaal.

Als leerlingen het begrip potentiaal nog niet kennen aan het begin van de behandeling van signaalgeleiding, kan dat begrip geïntroduceerd worden als een grootheid (in V) die de elektrische toestand van een ion op een bepaalde plaats in een vloeistof kenmerkt en die samenhangt met de elektrische energie die het ion in dat punt heeft.

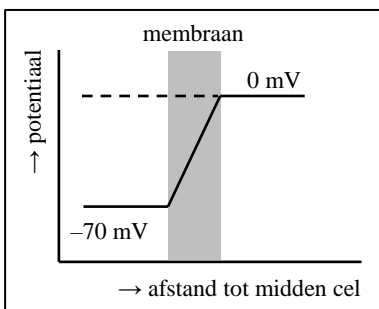
De rustpotentiaal in een zenuwcel kunnen we vergelijken met de potentiaal van de min-plaat van een condensator waarvan de andere plaat geaard is. De celwand werkt als diëlektricum. Het potentiaalverschil komt bij de zenuwcel niet van een externe spanningsbron, zoals bij een condensator, maar door het gedrag van ionen in en buiten de cel. Dat kunnen we vergelijken met het ontstaan van spanning over de polen van een chemische cel (batterij). Een leuk historisch detail is dat elektriciteit ontdekt werd door de werking van zenuwcellen: Galvani (of zijn vrouw of dienstmeid) merkte op dat de poten van een kikker samen-trokken toen een zenuw in contact kwam met een metalen schaal (bij het klaar-maken van kikkerbiljetjes?).

**Neutraliteit van de cel** – De rustpotentiaal in een zenuwcel is ongeveer  $-70$  mV. Dit kan de indruk wekken dat de zenuwcel negatief geladen is. Dat is niet het geval: een cel als geheel is elektrisch neutraal.

Zouten zoals KCl en NaCl voorzien de cel van zowel positieve als negatieve ionen. Het zijn de positieve ionen  $K^+$  en  $Na^+$  die voor een potentiaal zorgen. Zij kunnen de cel in en uit gaan, wat aanleiding geeft tot kleine ladingen in dunne lagen aan de binnenkant van de (isolerende) celwand en een tegengestelde lading aan de buitenkant (zie figuur 15). Die dunne lagen vormen samen een condensator. In het membraan, dat als diëlektricum werkt, heerst een elektrisch veld. Het elektrolyt buiten de cel werkt als ‘aarding’ en heeft dus een potentiaal 0. In rust is de potentiaal binnen de cel overall  $-70$  mV (zie figuur 16). Net zoals bij een condensator is de lading van de cel als geheel nul, waarbij de dunne laag aan de buitenkant van het membraan wordt meegerekend.



Figuur 15 – De celwand en omgeving als condensator.

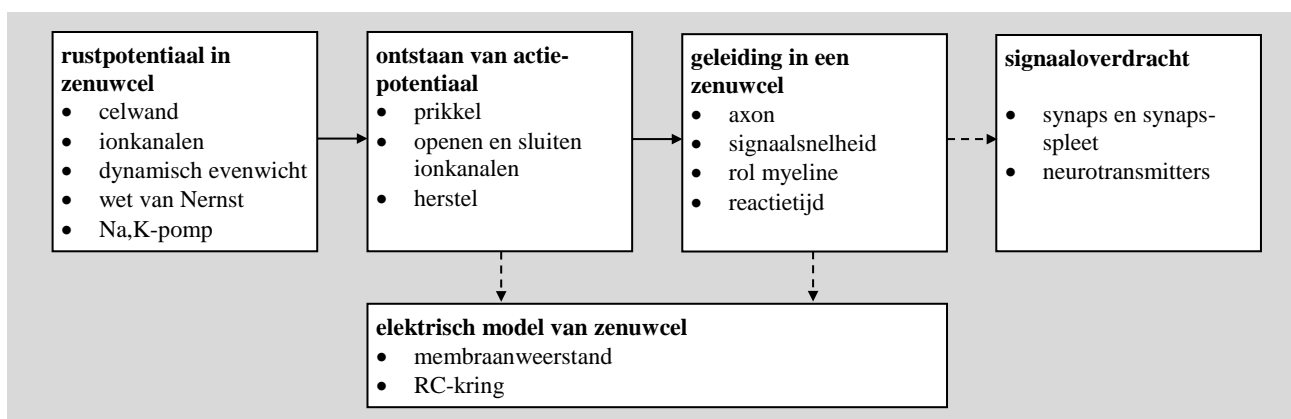


Figuur 16 – Potentiaal in en buiten de cel als functie van de afstand tot het midden.

### Begripsopbouw

De kern van het biofysische onderwerp signaalgeleiding betreft het gedrag van ionen (vooral  $K^+$  en  $Na^+$ ) in de zenuwcel onder invloed van a) diffusie door het celmembraan, b) het elektrische veld dat daardoor ontstaat (de combinatie van a en b leidt tot een dynamisch evenwicht), c) variabele doorlaatbaarheid van ionkanalen onder invloed van de potentiaal in de cel, en d) het actieve transport door de celwand van die ionen door moleculaire machientjes.

Het schema van figuur 17 geeft een mogelijke begripsopbouw, waarbij de onderwerpen ‘signaaloverdracht’ en ‘elektrisch model van zenuwcel’ eventueel kunnen vervallen. Hieronder bespreken we de inhoud van de blokken in dit schema.

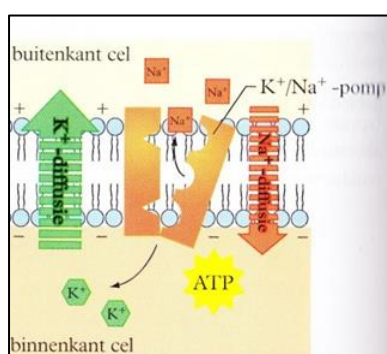


Figuur 17 – Begripsopbouw van het inhoudsgebied signaalgeleiding. De gestreepte pijlen geven onderwerpen aan die al dan niet toegevoegd kunnen worden.

Bij het bestuderen van de biofysica van de zenuwcel in diverse lesmethodes en in BiNaS (tabel 88) bleven we met een aantal vragen zitten. Zo vroegen we ons af hoe het kan dat bij de rustpotentiaal diffusie van  $K^+$  en  $Na^+$  optreedt (BiNaS 88C), terwijl de ionkanalen dan dicht zijn (BiNaS 88F, eerste afbeelding). Ook vroegen we ons af hoe de door de actiepotentiaal veranderde concentraties in de hyperpolarisatiefase weer op hun oude waarde voor de rustpotentiaal gebracht worden. Om een antwoord te geven op deze en andere vragen, geven we hieronder een (bij BiNaS 88D-F aansluitende) beschrijving van de rustpotentiaal en het ontstaan van de actiepotentiaal, die we uit wetenschappelijke bronnen hebben afgeleid.

**Rustpotentiaal in de zenuwcel** – De rustpotentiaal in een zenuwcel is  $-70$  mV. De concentraties van  $K^+$ - en  $Na^+$ -ionen in en buiten de cel zijn daar verantwoordelijk voor, samen met de (geringe) permeabiliteit van de celwand voor deze ionen en de aanwezigheid van Na,K-pompen in de celwand.

De concentratie  $K^+$ -ionen in de cel is aanzienlijk hoger dan eruiten. De concentratie  $Na^+$ -ionen is juist aanzienlijk lager. De celwand is een beetje permeabel voor  $K^+$ -ionen en in (nog) mindere mate voor  $Na^+$ -ionen. Door diffusie gaan er  $K^+$ -ionen de cel uit, waardoor de potentiaal omlaag gaat. Volgens de wet van Nernst zou zich een evenwicht instellen bij een potentiaal die met de formule van Nernst berekend kan worden:  $-80$  mV. De feitelijke potentiaal is iets hoger:  $-70$  mV. Daardoor blijft er een netto uitstroom van  $K^+$ -ionen over. Het membraan is ook een heel klein beetje permeabel voor  $Na^+$ -ionen. Daardoor is er een kleine netto instroom van  $Na^+$ -ionen, want binnen is de  $Na^+$ -concentratie het laagst. Om de concentraties constant en de potentiaal op  $-70$  mV te houden, moeten deze in- en uitstromen gecompenseerd worden. Dat doen de Na,K-pompen in het membraan. Bij elke 'pompslag', die energie kost, gaan drie  $Na^+$ -ionen naar buiten en komen twee  $K^+$ -ionen naar binnen. Dit proces staat in BiNaS 88D getekend (zie figuur 18).



Figuur 18 – Diffusie en werking Na,K-pomp bij rustpotentiaal (Bron: BiNaS 88D).

Drie 'biofysische' opmerkingen bij de groene en rode pijl die in figuur 18 de diffusie van  $K^+$  en  $Na^+$  voorstellen. De eerste opmerking betreft de twee mechanismen waardoor de  $K^+$ -uitstroom wordt aangedreven. Het eerste mechanisme is het concentratieverschil: de concentratie  $K^+$  is binnen veel hoger dan buiten. De stroom naar buiten wordt echter tegengewerkt door het elektrisch veld dat in de celwand is opgebouwd, het tweede mechanisme. Je zou beide mechanismes kunnen voorstellen als een uitgaande 'diffusiestroom' en een (iets kleinere) retourstroom van  $K^+$ -ionen, veroorzaakt door het elektrisch veld – bijna een dynamisch evenwicht. Er is een geringe netto uitstroom van  $K^+$ -ionen.

De tweede opmerking betreft de rode pijl die de instroom van  $Na^+$ -ionen weergeeft. Bij  $Na^+$  werken diffusie en het elektrisch veld dezelfde kant op, beiden geven een instroom. Het membraan is nauwelijks doorlaatbaar voor  $Na^+$ , anders zou de instroom door diffusie en elektrisch veld erg groot zijn.

De derde opmerking betreft de breedte van de groene en de rode pijl. Als de breedte staat voor de omvang van de (in- of uit)stroom, moet de groene pijl smaller zijn dan de rode pijl, in de verhouding 2:3. Immers, in de rusttoestand worden de  $K^+$ - en  $Na^+$ - 'diffusiestromen' gecompenseerd door de Na,K-pomp die zorgt voor een instroom van twee  $K^+$ -ionen bij een uitstroom van drie  $Na^+$ -ionen.

**Ontstaan van actiepotentiaal** – Voor het ontstaan en doorgeven van een actiepotentiaal zijn, naast een prikkel, spanningsafhankelijke kalium- en natrium-ionkanalen vereist. Bij de rustpotentiaal van  $-70$  mV staan weinig ionkanalen open. Als er een prikkel, van bijvoorbeeld een neurotransmitter, bij de zenuwcelwand arriveert, wordt de membraanpotentiaal plaatselijk verhoogd. Zolang de verstoring niet groter is dan 5 tot 10 mV gebeurt er niets bijzonders. De verstoring verspreidt zich en dempt uit. Maar komt de verstoring boven de drempelwaarde van zo'n 10mV, dan gaan veel natriumkanalen en, met vertraging, kaliumkanalen in dat gebiedje open. Door diffusie komen er  $Na^+$ -ionen de cel in. Dit is de *depolarisatiefase*. De sterke toename van de  $Na^+$ -concentratie in het gebiedje waar de prikkel is ontstaan, zorgt ervoor dat de  $Na^+$ -kanalen weer sluiten (bij zo'n +30 mV). Tegen die tijd staan alle  $K^+$ -kanalen open, waardoor  $K^+$ -ionen de cel uitstromen (*repolarisatiefase*). De potentiaal daalt, maar de Na-

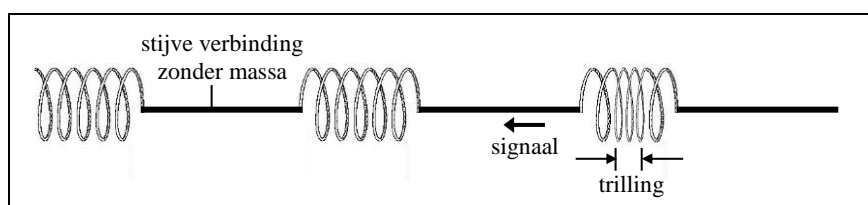
kanalen blijven dicht. Ook de K-kanalen gaan dicht, weer met enige vertraging. Daardoor is de potentiaal flink gedaald.

De concentraties van  $\text{Na}^+$  en  $\text{K}^+$  zijn door depolarisatie (grote  $\text{Na}^+$ -instroom) en repolarisatie (grote  $\text{K}^+$ -uitstroom) verstoord. De ionenpompen compenseren dit door de toevoer van  $\text{K}^+$  en afvoer van  $\text{Na}^+$  in de verhouding 2:3. Ook door die ionenverhouding zakt de potentiaal beneden  $-70$  mV (hyperpolarisatie). Door het sterkere elektrisch veld neemt de netto uitstroom van  $\text{K}^+$  door het membraan af, de oude situatie herstelt zich en de potentiaal gaat iets omhoog: bij  $-70$  mV stelt zich het dynamisch evenwicht weer in.

Door de subtiele manier waarop de ionkanalen reageren op potentiaal en concentraties van ionen duurt de actiepotentiaal slechts enkele ms en kan zich verspreiden langs het membraan. Bovendien is het alles (boven de drempelwaarde) of niets (eronder).

**Geleiding in een zenuwcel** – De verstoring waardoor de actiepotentiaal ontstaat is plaatselijk. De actiepotentiaal leidt tot een hogere potentiaal, boven de drempel, in zijn directe omgeving, waardoor daar ook een actiepotentiaal ontstaat. Zo wordt de actiepotentiaal doorgegeven door het axon van de zenuwcel.

Omdat het opbouwen van een actiepotentiaal enige tijd vergt, verloopt de zenuwgeleiding met een beperkte snelheid van ongeveer 20 m/s. Die snelheid kan aanzienlijk opgevoerd worden door steeds stukjes van het axon af te scherm met myeline, waardoor er in zo'n stukje geen ionkanalen zitten. Over dit afgeschermd stukje breidt de verstoring door de actiepotentiaal zich door passieve geleiding uit. Dit gaat veel sneller dan 20 m/s, maar de grootte van de verstoring neemt snel af (volgens een e-macht). Als het stukje niet te lang is, is de door passieve geleiding doorgegeven verstoring van de potentiaal in het deel waar ionkanalen zitten ('knoop') weliswaar kleiner geworden, maar nog groot genoeg (groter dan de drempelpotentiaal) om een nieuwe actiepotentiaal te genereren. Zo springt de actiepotentiaal van knoop naar knoop. Dit kan voorgesteld worden als een in stukken geknipte slinky (veer waardoor zich een longitudinale golf kan voortplanten), waarvan de stukken door stijve stokjes met elkaar verbonden zijn (zie figuur 19).



Figuur 19 – Signaalsnelheid (golfsnelheid) vergroten.

Door de myeline kan een signaalsnelheid van 120 m/s bereikt worden. Deze snelheid bepaalt, samen met de af te leggen afstand en de vertraging die er in synapsen optreedt, de minimale reactietijd van mens en dier.

**Signaaloverdracht** – Een signaal wordt in de synaps van de ene zenuwcel naar de andere overgedragen. Daarbij spelen neurotransmitters een rol (zie BiNaS 88G). Medicijnen, drugs en alcohol hebben invloed op de vorming van de neurotransmitters en beïnvloeden daarmee de signaalgeleiding. Op dit onderwerp gaan we hier niet verder in.

**Elektrisch model van een zenuwcel** – Van de signaalgeleiding in een zenuw kan een elektrisch model gemaakt worden, waarbij de geleiding in een zenuw wordt beschreven in termen van elektronica: membraanweerstand en R,C-kringen (Van Pelt et al, 2012). Op dit onderwerp gaan we hier niet verder in.

### Contexten

Hier bespreken we enkele contexten waarin signaalgeleiding van belang is. In die contexten hoeft meestal slechts een deel van het inhoudsgebied bestudeerd te worden.

**Reactietijd meten** – Een reden om zich te verdiepen in de signaalgeleiding is de vraag waarom een mens niet onmiddellijk reageert op een prikkel, maar pas na

een zekere reactietijd. Dat de reactietijd niet nul is, kun je aantonen met het in figuur 20 beschreven proefje.

6	TE LAAT	0,21 s
5	't GAAT	0,20 s
4	GOED	0,19 s
3	PRIMA	0,17 s
2	UITSTEKEND	0,16 s
1	FANTASTISCH	0,15 s
0	DOE DAT NOG EENS	0,12 s

+ leeftijd = aantal rijlessen

**ANWB**

Figuur 21 – Door de ANWB geijkte strook papier om je reactietijd te meten.

Houd je duim en wijsvinger op een kleine afstand van elkaar. Iemand anders houdt een bankbiljet tussen de duim en wijsvinger en laat het onverwacht los. Het zal je niet altijd lukken om het te grijpen voordat het je vingers ‘gepasseerd is’. Met enige kennis van de valbeweging kun je een schatting maken voor de reactietijd. Je kunt het proefje ook uitvoeren met een geijkt strookje papier (zie figuur 21). Als je dan ook een schatting maakt van de afstand die een signaal moet afleggen van de ogen (waarneming: hij gaat vallen) tot de vingers (dichtknijpen!), kun je een schatting maken van de signaalsnelheid in je zenuwen.

Figuur 20 – Reactietijd en signaalsnelheid schatten.

Een uitgewerkt voorbeeld: als een sprinter na het startschot binnen 0,3 s vertrekt, is het een valse start. De afstand van oren naar benen is grofweg 1,5 m, zodat de snelheid van informatie een waarde heeft van ongeveer 5 m/s. Dit is een veel grotere snelheid dan de snelheid van diffusie of de snelheid van moleculaire machines. Een paar bijzonderheden. De actiepotentiaal is een puls met een duur van ongeveer 1 ms. Er is wat tijd nodig voor de informatieoverdracht bij de synaptische verbindingen, die zijn er in elk geval bij het zintuig en bij de spier. Een reactietijd van 300 ms betekent ongeveer 300 actiepotentialen, dus evenzovele stukjes door myeline afgeschermd stukjes axon.

**Verschillen in dikte van axonen** – Inktvissen hebben veel dikkere axonen dan mensen. Het maken van een elektrisch model van axonen kan helpen bij het begrijpen waaruit dat verschil voortkomt. Leerlingen kunnen praktisch aan de slag gaan door zenuwcellen na te bouwen met wat elektronica.

**Geschiedenis van de wetenschap** – De rustpotentiaal en actiepotentiaal van een zenuwcel, als gevolg van de beweging van  $K^+$ - en  $Na^+$ -ionen door de celwand, zijn al meer dan een eeuw bekend. In 1902 ontdekte Julius Bernstein de doorlaatbaarheid van het celmembran voor  $K^+$ -ionen en begreep dat een selectieve doorlaatbaarheid invloed heeft op spanningspulsjes en op het doorgeven van signalen in zenuwcellen. Toen de technologie wat verder gevorderd was, rond 1938, was er meer bekend over actiepotentialen. In die jaren waren natuurkundigen, biologen en psychiaters geïnteresseerd in het signaaltransport in zenuwen en hersenen.

**Neurotransmitters en hersenen** – Neurotransmitters zijn stoffen die een rol spelen bij alcohol, drugs en medicijnen tegen stress, depressie, angst en concentratieverlies. Het bewegen, handelen en beslissen van een mens wordt beïnvloed door signalen in de hersenen en vooral het stimuleren of remmen van signalen. De kennis over neurotransmitters is de afgelopen jaren enorm toegenomen. En daarmee ook de kennis over drugs en medicijnen voor hersenaandoeningen. Er is tegenwoordig een grote hoeveelheid aandoeningen geregistreerd waarmee kinderen en volwassenen te maken hebben en er is een miljardenindustrie ontstaan alleen al voor psychofarmaca, dus biofysica op dit punt is ook best actueel. Neurotransmitters spelen een rol bij het doorgeven van informatie van een zenuwcel naar de volgende. Vooral in de hersenen, waar meerdere zenuwen invloed op elkaar hebben, zijn enzymen van belang die neurotransmitters vrijmaken of juist vernietigen.

### Lesmethodes

De methode *Newton* (havo en vwo) behandelt de signaalgeleiding in het menselijk lichaam in verband met het snel reageren op sportsituaties. Ook gaat deze methode in op neurotransmitters. Het grootste deel van het biofysica-katern van *Systematische Natuurkunde* (vwo) gaat over signaalgeleiding. Deze methode besteedt uitgebreid aandacht aan het ontstaan van de actiepotentiaal en aan de geleiding door de axonen. Het gaat ook uitgebreid in op een natuurkundig model voor de signaalgeleiding, met gebruik van de daarbij benodigde ingewikkelde formules. Het hoofdstuk *Menselijk Lichaam* van *Overal Natuurkunde* behandelt zenuwen, prikkels en het ontstaan van een actiepotentiaal, en gaat daarbij ook in op energieverbruik (ATP/ADP). Ook besteedt de methode aandacht aan het

elektrisch karakter van de signaalgeleiding en het gevaar van elektrische spanning uit uitwendige bronnen. De methode heeft aandacht voor het moeilijke onderscheid tussen potentiaal en spanning. De methode *Nova* besteedt aandacht aan moleculaire machines, maar niet in de context van signaalgeleiding.

### Literatuur

- Biezeveld, H., L. Mathot & R. Brouwer (2016). *Stevin Natuurkunde vwo – G1 Oog, oor en hart*. Zwaag/Haarlem/Amsterdam: eigen uitgave.
- Blok, B. e.a. (2014). *Newton havo – keuzekatern Het menselijk lichaam*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Blok, B. e.a. (2015). *Newton vwo – keuzekatern Biofysica*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Blom, S., C. van Huis & A.J. van Pelt (2012). [Menselijk lichaam. NiNa module NNH18](#). Enschede: SLO.
- Frederik, I. & T. van der Valk (2002). [Temperatuur en warmte in de natuur- en scheikundeboeken voor de basisvorming](#). *NVOX* 27(5), 237-241.
- JCU (2012). [Kijken en Zien – Een NLT-module voor vwo](#). Utrecht: Junior College Utrecht/ Universiteit Utrecht.
- Kortland, K. (2017). Biofysica. In K. Kortland, A. Mooldijk & H. Poorthuis (Red.), *Handboek Natuurkundedidactiek* (pp. 237-238). Amsterdam: Epsilon Uitgaven.
- Leijenaar, D. (1990). Begripsontwikkeling bij trillingen en geluid. In K.Th. Boersma, P. Licht, P.L. Lijnse & W. de Vos (Red.), *Begripsontwikkeling in het vak natuur- en scheikunde in de basisvorming*. Enschede: SLO.
- Licht, P. & M. Snoek (1986). [Elektriciteit in de onderbouw](#), een inventarisatie van begrips- en redeneerproblemen bij leerlingen. *NVON-Maandblad* 11(11).
- NiNa (2010). [Eindadvies](#). Voluit: Commissie Vernieuwing Natuurkundeonderwijs havo/vwo (2010): *Nieuwe natuurkunde, advies-examenprogramma's voor havo en vwo*. Amsterdam: NNV.
- Noordhoff (2014). *Overal Natuurkunde vwo – Biofysica*. Groningen/Houten: Noordhoff Uitgevers.
- Noordhoff (2014). *Overal Natuurkunde havo – Menselijk lichaam*. Groningen/ Houten: Noordhoff Uitgevers.
- Paus, J. (2012). [Handreiking schoolexamen natuurkunde havo/vwo bij het examenprogramma geldig vanaf schooljaar 2013-2014](#). Enschede: SLO.
- Ten Brinke, L. e.a. (2014). *Pulsar 3<sup>e</sup> editie natuurkunde – leerboek 5 havo*. Groningen/Houten: Noordhoff Uitgevers.
- Ten Brinke, L. e.a. (2014). *Pulsar 3<sup>e</sup> editie natuurkunde – leerboek 5 vwo*. Groningen/Houten: Noordhoff Uitgevers.
- Van Bommel, H., P. van Hoeflaken, L. Koopman & R. Tromp (zj). *Nova natuurkunde 5 havo*. 's Hertogenbosch: Malmberg.
- Van Bommel, H., P. van Hoeflaken, L. Koopman & R. Tromp (zj). *Nova natuurkunde 4 vwo / gymnasium*. 's Hertogenbosch: Malmberg.
- Van Dalen, B. e.a. (2014). *Systematische Natuurkunde – katern B havo Horen en zien*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Van Dalen, B. e.a. (2015). *Systematische Natuurkunde – katern A vwo Biofysica*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Van den Berg, E., W. Grosheide, J. Breedijk & A.Schouten (1995). [Misconcepties, elektriciteit, energie en basisvorming](#). *NVOX* 20(6), 257-260.
- Van der Valk, T. & I. Frederik (2001). [Twee kernexperimenten rond temperatuur en warmte](#). *NVOX* 26(10), 534-537.
- Van der Valk, T. & K. Kieviet (2011). [Biofysica tussen oog en brein. De NLT-module Kijken en Zien](#). *NVOX* 36(2), 63-65.
- Van der Valk, T. (zj). [Begripsproblemen rond warmte en temperatuur](#). Utrecht: Ecent/ Elwier.
- Van Pelt, A.J., M. Dogterom, L. de Vries & F. Zeldenrust (2012). [Leven en Natuurkunde. NiNa-module NN15](#). Enschede: SLO.
- Verkerk, G. (1990). De opzet van een optica curriculum. In K.Th. Boersma, P. Licht, P.L. Lijnse & W. de Vos (Red.), *Begripsontwikkeling in het vak natuur- en scheikunde in de basisvorming*. Enschede: SLO.
- Wubbels, Th. (1986). [Elementaire begrippen in de geometrische optica](#). *TDβ* 4, 19-37.
- Wubbels, Th. (1987). [Denkramen van leerlingen op het gebied van de geometrische optica](#). *TDβ* 5(1), 44-58.