

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 ^e ed.) hoofdstuk 17 <i>Menselijk lichaam</i>
Biofysisch inhoudsgebied					
Bewegen		G-krachten	Voedingsstoffen en bewegen	Gevaren van de ruimte; Sport en natuurkunde	
Bloedsomloop			Waarnemen en reageren; Voedingsstoffen en bewegen	De bloedsomloop	Druk in je lichaam
Warmtehuishouding			Warmtehuishouding	Warmtehuishouding van het menselijk lichaam	Warmte en lichaamstemperatuur
Zintuigen	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
Informatie-transport		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^e ed.) hoofdstuk 15 Biofysica</i>
Bewegen			Bewegen en heffen	Voedingsstoffen en bewegen	Lopen op biologische benen	
Bloedsomloop	Het Hart	Transport door de bloedbaan	Hart en bloedvaten	Waarnemen en reageren		Druk in je lichaam
Warmtehuishouding				Warmtehuishouding		Warmte en lichaamstemperatuur
Zintuigen	Het Oog; Het oor		Zien en waarnemen; Horen en spreken	Waarnemen en reageren	Evenwicht: het zesde zintuig	Afbeelding en zicht; Spraak en gehoor; Duiken
Transport van stoffen in de cel		Transport door de celwand			Moleculaire motoren; Nanowetenschap	
Informatie-transport		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.

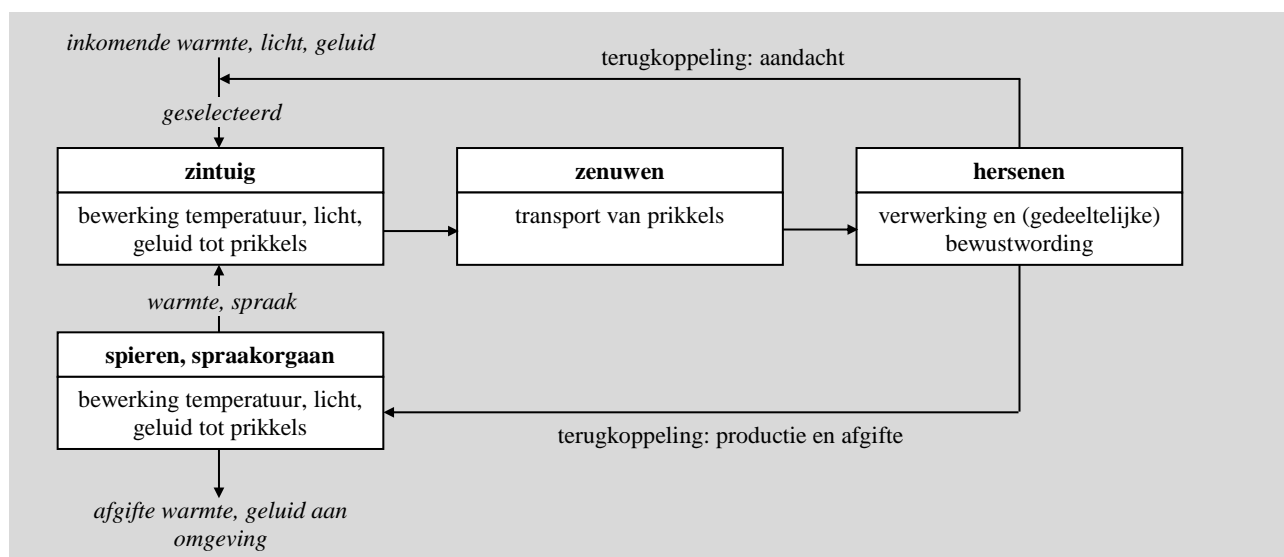
Wanneer je (al dan niet als sectie) gekozen hebt voor *Biofysica/Menselijk lichaam*, dan is er de vervolgkeuze: op welk(e) inhoudsgebied(en) richt je je? Het ligt voor de hand de inhoudsgebieden te kiezen die in je lesmethode uitgewerkt zijn. Je kunt daar ook één of twee van kiezen en daar wat dieper 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 begrip-probleem 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.

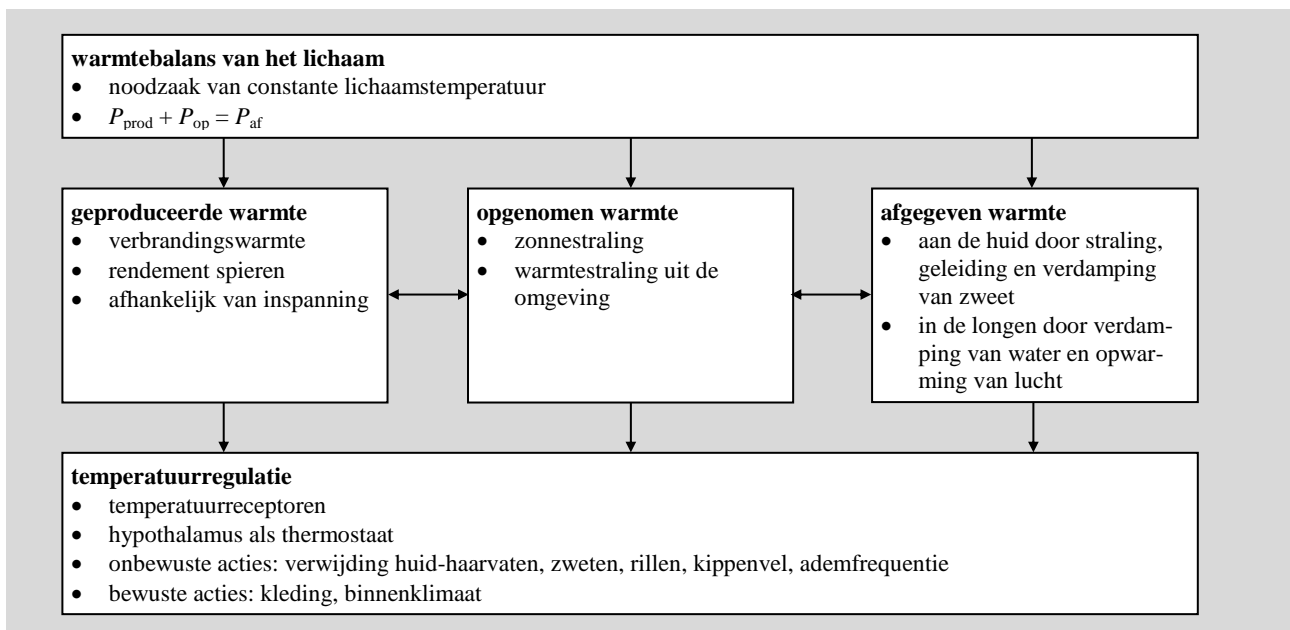
Opwarmen en warm houden – In het dagelijks leven wordt het werkwoord ‘verwarmen’ zowel voor *opwarmen* als voor *op temperatuur houden* (boven de omgevingstemperatuur) gebruikt. Het is belangrijk in de klas onderscheid te maken tussen beide betekenissen, want het verwarren van de twee leidt tot fouten. Immers, voor berekeningen over ‘opwarmen’ heb je de soortelijke warmte c van het op te warmen materiaal nodig, de massa m en het temperatuurverschil ΔT 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 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ houden als het warmtevermogen P_{prod} dat je lichaam zelf produceert plus het warmtevermogen P_{op} dat het uit de omgeving opneemt (bijvoorbeeld door warmtestraling uit de omgeving) gelijk is aan het aan de omgeving afgegeven warmtevermogen P_{af} : $P_{\text{prod}} + P_{\text{op}} = P_{\text{af}}$. Het lichaam kent een regulatiesysteem waardoor de lichaamstemperatuur $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 ($> 42\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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_{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_{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.

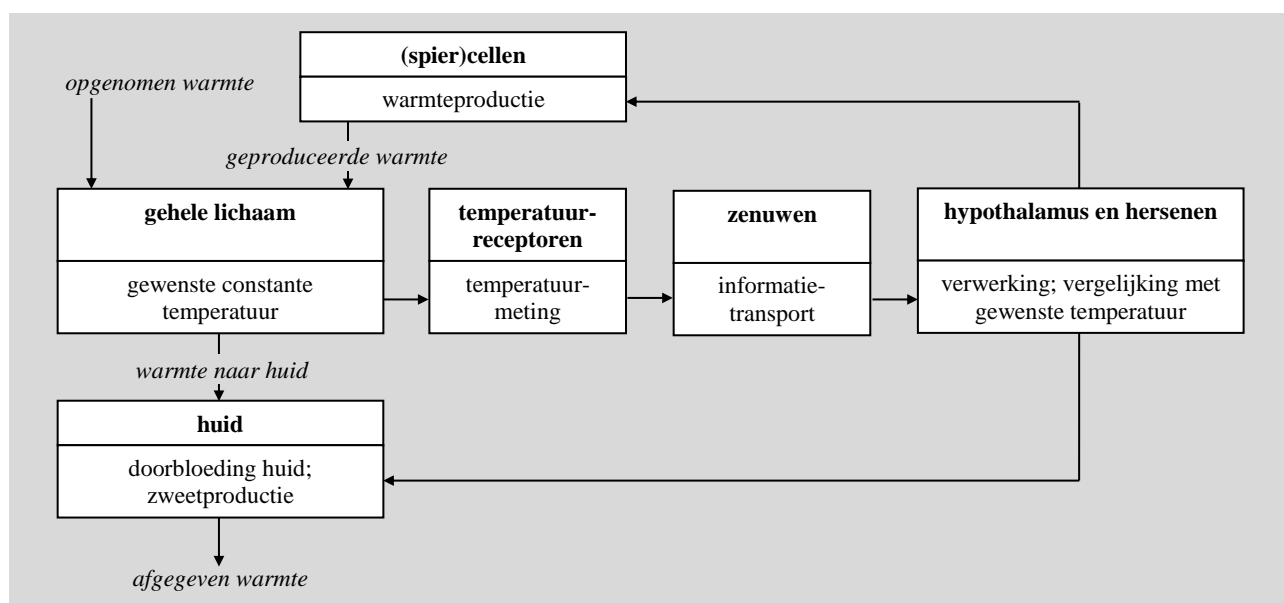
De tweede manier is warmteafgifte door warmtestraling. Deze is sterk afhankelijk van de huidtemperatuur: evenredig met T^4 volgens de wet van Stefan-Boltzmann. Het door straling afgegeven vermogen wordt ook bepaald door de huidbedekking: de haren op de huid en de kleding die je aan hebt. De lagere oppervlaktetemperatuur 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.

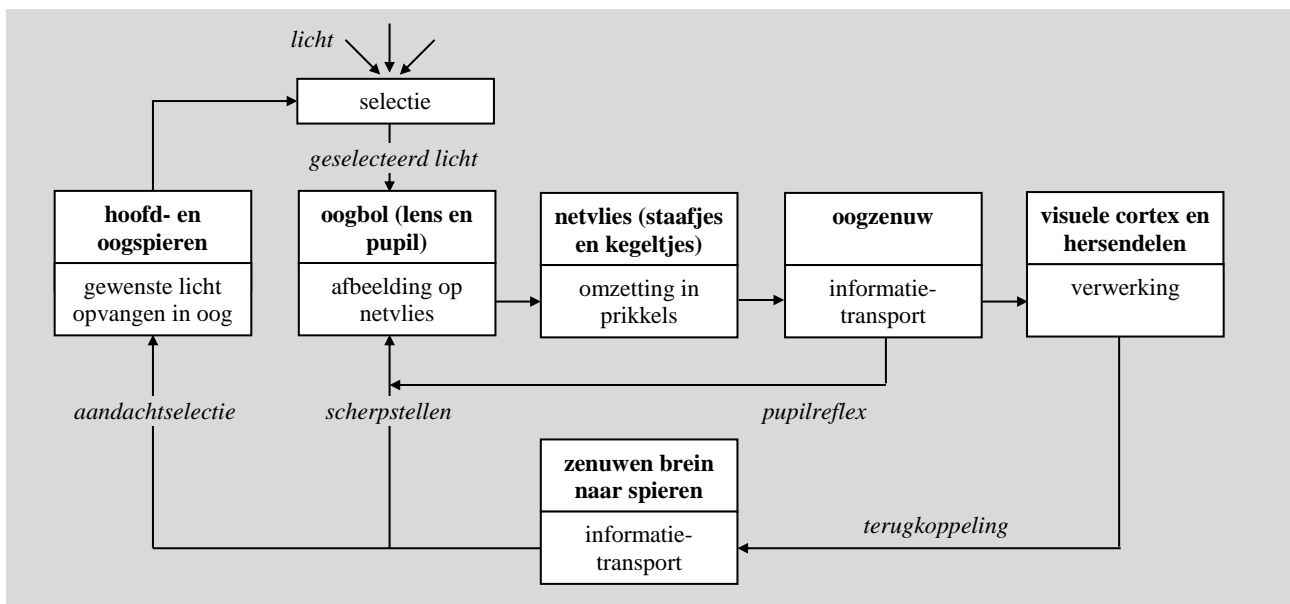
Sommige van de genoemde denkbeelden, zoals die van ‘het oog als bron’ en ‘licht als ruimtevulling’, lijken meer bij jongere dan bij oudere leerlingen voor te komen. Veel uitspraken van leerlingen over licht zijn nogal diffuus: er klinken één of meer van de bovengenoemde denkbeelden in door zonder dat 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 verwarring 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 pupilreflex. 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 modelleerbaar 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 oogafwijkingen. Daarbij past een nadruk op het opvangen van licht en op de beeldvorming 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 ooglens, 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 daarvan zijn de grootte van het beeld van voorwerpen dichtbij en veraf, en voorwerpen op de voorgrond die voorwerpen op de achtergrond bedekken. Binoculaire 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

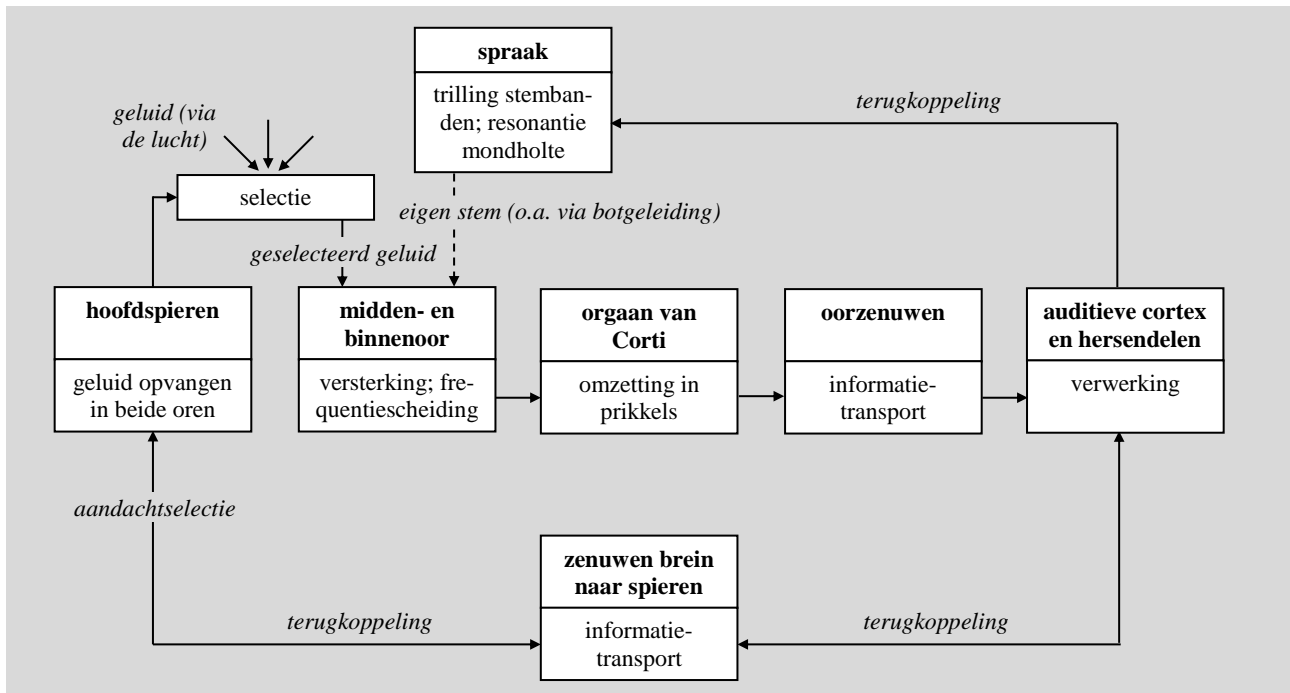
Uit een overzicht van leerlingdenkbeelden over geluid (Leijenaar, 1990), toegepast op het gehoor, komt het volgende naar voren:

- 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 (zie paragraaf 4.2.4 in het handboek en het stuk *Denkbeelden en analogieën bij elektrische schakelingen* op de handboekwebsite bij die paragraaf), zoals het verwarren van spanning en stroom. Dit soort denkbeelden kan ook bij het onderwerp signaalgeleiding opspelen, vooral omdat er dan ook nog het verschil tussen lading en spanning/potentiaal bij komt.

Het begrip *potentiaal* is, in de vorm van rustpotentiaal en actiepotentiaal, belangrijk bij het biofysische onderwerp signaalgeleiding. Het maakt echter geen deel (meer) uit van het in 2013 vernieuwde examenprogramma natuurkunde vwo. Waarom wordt het begrip potentiaal bij signaalgeleiding gebruikt? Is 'elektrische spanning' een alternatief? Potentiaal is een begrip uit de theorie van de elektrische velden: elk punt in een elektrisch veld krijgt een potentiaal toegerekend, die negatief of positief kan zijn (zie figuur 14). Het gedrag van ionen in en rond een axon veroorzaakt een elektrisch veld in het celmembraan. Daarom kun je aan elk punt in de cel een potentiaal toekennen.

Het begrip *spanning* speelt een rol bij stromende elektriciteit. De waarde van de spanning wordt meestal positief genomen, waarbij je kijkt naar de schakeling (de plus- en minpool van de spanningsbron) om te bepalen in welke richting de stroom loopt. Spanning kan worden opgevat als het potentiaalverschil tussen twee punten, met als gevolg dat spanning dan een negatieve waarde kan hebben.

Potentiaal en spanning

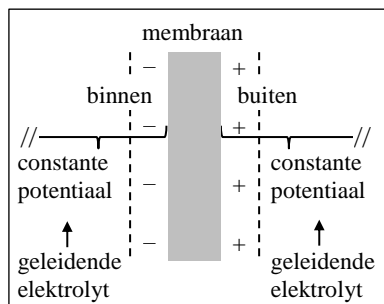
Potentiaal (symbool: V) is een grootte die aan een punt in een elektrisch veld wordt toegekend. Het is de (potentiële) elektrische energie E die een lading q krijgt (ten opzichte van een nulniveau) als de lading in dat punt wordt geplaatst: $V = E/q$. Daaruit volgt de eenheid volt: $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$. Een punt kan een potentiaal hebben zonder dat in dat punt een lading aanwezig is, een punt in een vacuüm bijvoorbeeld.

Spanning (symbool: U) staat over iets, een draad bijvoorbeeld. Spanning gaat over het verschil tussen twee punten in een schakeling en komt overeen met een potentiaalverschil.

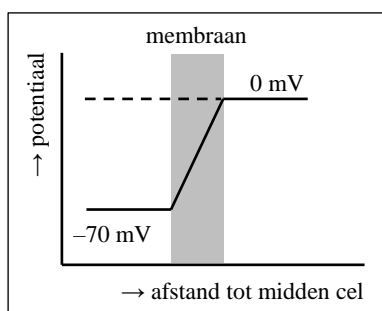
Potentiaal is afhankelijk van een gekozen nulniveau, spanning niet.

Figuur 14 – Definitie van de begrippen potentiaal en spanning.

Rustpotentiaal en actiepotentiaal zijn grootheden die de elektrische toestand van vloeistoffen in de zenuwcel of het axon karakteriseren. Die toestand ontstaat door ladingsscheiding rond het celmembraan. De vloeistof buiten de cel heeft per definitie een potentiaal nul (aarding), in de cel heerst de rust- of actiepotentiaal. Kijken we aan weerszijden van het celmembraan, dan vinden we een potentiaalverschil ΔV . Dit potentiaalverschil kunnen we de membraanspanning noemen. Deze spanning komt niet van een externe spanningsbron, zoals het geval is in de gebruikelijke stroomkringen, maar door de wisselwerking tussen de ionen en het membraan. Dat is enigszins vergelijkbaar met de spanning over de polen van een chemische cel. Een leuk historisch detail is de ontdekking van Galvani: hij (of zijn vrouw of dienstmeid) merkte op dat de poten van een kikker samentrokken als een zenuw in contact kwam met een metalen schaal (bij het klaarmaken van kikkerbiljetjes?). Daarmee werd de basis voor de ontdekking van signaalgeleiding gelegd. Bovendien gaf het de aanzet tot de ontdekking van de chemische cel door Volta.



Figuur 15 – De celwand en omgeving als condensator.



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

Neutraliteit van de cel – In het extracellulaire vocht en in het cytoplasma in de cel zitten positieve en negatieve ionen. De rustpotentiaal is een gevolg van diffusie door het celmembraan ten gevolge van grote concentratieverschillen. Daarbij gaat het vooral om K^+ - en Na^+ -ionen. De concentratieverschillen worden gehandhaafd door de Na/K-pomp, een ‘moleculaire machine’ in het celmembraan. Een en ander zorgt voor een ladingsverschil tussen de binnenkant (–) en de buitenkant (+) van het membraan, dat tot uiting komt in de membraanspanning. Het membraan zelf vormt een isolerende tussenlaag (zie figuur 15). De dunne, geladen lagen kunnen worden beschouwd als de platen van een condensator, met het membraan als diëlektricum.

Door de aanwezigheid van de ionen zijn de extracellulaire vloeistof en het cytoplasma (elektrolytische) geleiders, waarin (in rust) geen potentiaalverschillen zijn. Binnen de zenuwcel is de potentiaal overal -70 mV (zie figuur 16). De negatieve lading bevindt zich echter alleen langs de binnenkant van het membraan (zie figuur 15). Net zoals bij een condensator is de lading aan de binnenkant van het membraan even groot als aan de buitenkant. Dat maakt de lading van de cel als geheel nul, als de dunne geladen laag aan de buitenkant als deel van de cel wordt meegerekend.

Begripsopbouw

Bij de behandeling van signaalgeleiding moet er rekening mee worden gehouden dat het onderwerp ook voorkomt in de syllabus vwo van biologie (zie figuur 17). Afstemming met de biologiesectie is dus aan te bevelen. Waar de biologie zich richt op de biologische werking van de signaalgeleiding, gaat de biofysica over de fysische principes erachter, zoals de beweging van K^+ - en Na^+ -ionen in en rond de zenuwcel en de gevolgen daarvan voor de membraanspanning, of de beschrijving van de elektrische stromen die in de zenuwen optreden. Enkele probleempunten bij de afstemming tussen biofysica en biologie worden besproken in twee NVOX-artikelen (Van der Valk & Van Pelt, 2019a; 2019b).

Signaalgeleiding

B4.3 Neurale regulatie

Specificatie – De kandidaat kan in een context: 1 de bouw en werking van het zenuwstelsel en de signaalverwerking beschrijven; 2 [...]

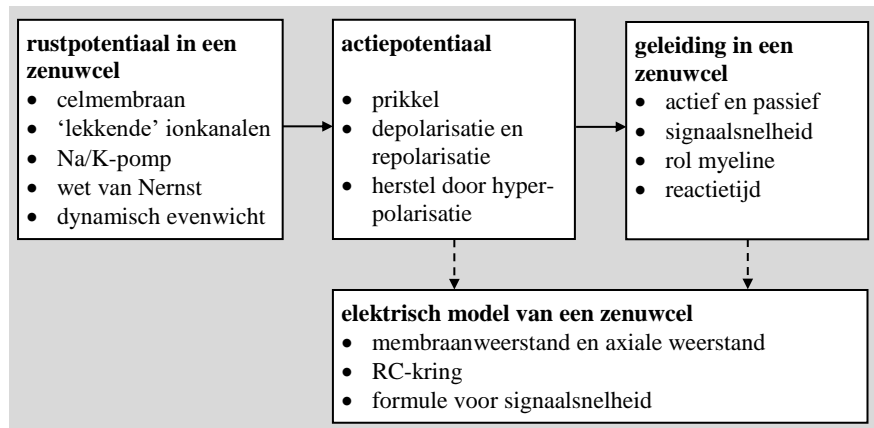
Deelconcepten – [...] neuronen, myelineschede, synaps, Na/K-pomp, impulsgeleiding, saltatoire geleiding, rustpotentiaal, actiepotentiaal, prikkelrempel, refractaire periode, [...]

Figuur 17 – Signaalgeleiding in de syllabus van het examenprogramma biologie vwo.

De kern van het biofysische onderwerp signaalgeleiding betreft het diffusiegedrag van ionen (vooral K^+ en Na^+) in de zenuwcel, het elektrische veld dat daarvoor in het membraan ontstaat, de variabele doorlaatbaarheid van ionkanalen onder invloed van de potentiaal in de cel, en het actieve transport door de celwand van die ionen door de Na/K-pompen.

Het schema van figuur 18 geeft een mogelijke begripsopbouw, waarbij het

onderwerp ‘elektrisch model van een zenuwcel’ leerstof ter verdieping is. Hieronder bespreken we de inhoud van de blokken in dit schema.



Figuur 18 – Begripsopbouw van het inhoudsgebied signaalgeleiding. De gestreepte pijlen geven een onderwerp aan dat al dan niet toegevoegd kan worden.

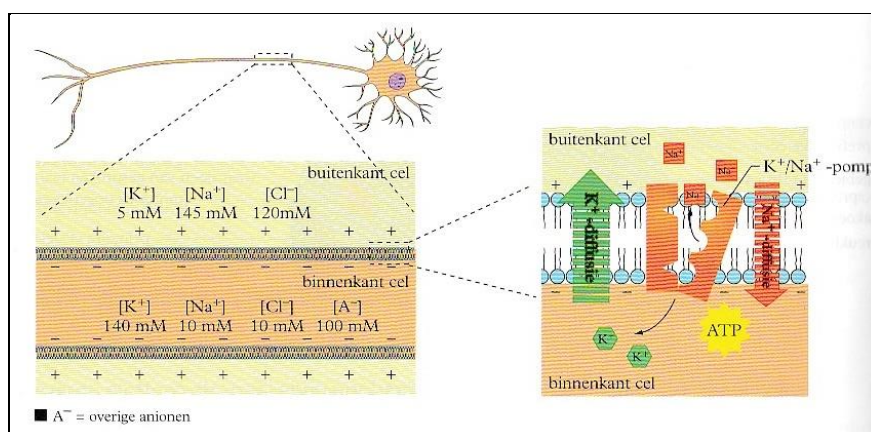
Rustpotentiaal in een zenuwcel – De celwand van een axon, een uitloper van een zenuwcel, bestaat uit een dubbele lipidenlaag. Daarin bevinden zich eiwitten, de zogenoemde ionkanalen, waardoorheen specifieke ionen zoals K^+ en Na^+ naar binnen of naar buiten kunnen diffunderen. Bovendien zitten er Na/K-pompen in de celwand, die Na^+ -ionen naar buiten en K^+ -ionen naar binnen brengen, in een verhouding van 3:2. Deze ‘moleculaire machines’ gebruiken energie (ATP). De lipidenlaag zelf is impermeabel voor ionen.

Er zijn ‘onbewaakte’ (*ungated*) ionkanalen waar altijd ionen doorheen kunnen ‘leken’ en ‘potentiaal-bewaakte’ (*voltage-gated*) ionkanalen, die diffusie toelaten als de membraanpotentiaal boven een drempelwaarde (-55 mV voor Na^+) stijgt. De onbewaakte ionkanalen zijn, samen met de Na/K-pompen, verantwoordelijk voor het handhaven en herstellen van de rustpotentiaal. De potentiaal-bewaakte ionkanalen spelen een rol bij het ontstaan en wegebben van de actiepotentiaal. Overigens kan hierbij worden aangetekend dat het strikt genomen gaat om een didactisch onderscheid: een ionkanaal heeft zowel de ‘onbewaakte’ als de ‘potentiaal-bewaakte’ functie.

Laten we ons het ontstaan van de rustpotentiaal voorstellen en uitgaan van de imaginaire situatie dat de ionconcentraties binnen en buiten het axon gelijk zijn. Dan gaan de Na/K-pompen werken: de concentratie K^+ -ionen neemt toe en de concentratie Na^+ -ionen neemt af in het axon. Door het concentratieverschil gaan K^+ -ionen door de onbewaakte ionkanalen naar buiten diffunderen. Evenzo gaan Na^+ -ionen naar binnen ‘leken’, maar (in eerste instantie) veel minder omdat de permeabiliteitscoëfficiënt van het membraan voor Na^+ -ionen 25 maal zo klein is als voor K^+ -ionen. Zowel door de werking van de Na/K-pomp als door de uitstroom van K^+ -ionen daalt de potentiaal in het axon. Er ontstaat een elektrisch veld in het membraan dat van buiten (+) naar binnen (–) is gericht. Dat veld vermindert de uitstroom van K^+ -ionen sterk, maar bevordert juist de instroom van Na^+ -ionen. Bij een potentiaal van -70 mV, de rustpotentiaal, ontstaat een evenwicht en is de ‘pompstroom’ gelijk aan de ‘lekstroom’. Dat geldt zowel voor K^+ als voor Na^+ . Vanwege de werking van de Na/K-pomp is zowel de instroom als de uitstroom voor K^+ twee-derde van die voor Na^+ . Eén en ander staat in BiNaS tabel 88D (zie figuur 19 rechts). De brede groene pijl van de K^+ -diffusie in die figuur moet niet worden opgevat als een representatie van de omvang van de ionenstroom (zoals vanuit de natuurkunde gezien voor de hand ligt), maar als representatie van het ‘gemak’ (beter gezegd: de permeabiliteitscoëfficiënt) waarmee de K^+ -diffusie plaatsvindt. Want: als de breedte van de groene K^+ -pijl zou staan voor de grootte van de uitstroom, zou die twee-derde van de breedte van de (rode) Na^+ -instroom moeten zijn.

Het gevolg van de grotere permeabiliteit voor K^+ voor de evenwichtssituatie is dus niet dat de K^+ -uitstroom groter is dan de Na^+ -instroom (die is kleiner:

twee-derde), maar dat bij evenwicht de concentratie K^+ in de cel veel hoger is dan de concentratie Na^+ .



Figuur 19 – BiNaS tabel 88D. Links: de ion-concentraties in een axon. Rechts: diffusie door de onbewaakte K^+ - en Na^+ -kanalen en de werking van de Na^+/K^+ -pomp bij de rust-potentiaal.

De ionconcentraties binnen en buiten het axon-in-rust staan gegeven in figuur 19 links. Een leerling zou zich over deze concentraties kunnen verbazen, want het optellen van de concentraties van de positieve ionen binnen het axon komt uit op $140 + 10 = 150$ mMol, tegenover 110 mMol negatief geladen deeltjes: een overschot van 40 mMol positieve lading waar hij/zij misschien een negatieve lading zou verwachten. Die leerling zou kunnen zeggen: “Ik begrijp er niks van. Het axon moet toch negatief zijn!” Echter, de informatie in BiNaS tabel 88D is niet volledig. In het plaatje ontbreken de gegevens van deeltjes die niet deelnemen aan het ladingstransport door het membraan, zoals negatief geladen eiwitten. Die zorgen ervoor dat de concentraties van positief en negatief geladen deeltjes in het axon, behalve in de dunne laag langs het membraan, aan elkaar gelijk zijn. Evenzo is de concentratie van negatief geladen eiwitten (30 mMol) in de extracellulaire vloeistof weggeleten.

Denkbeelden over rustpotentiaal

- Elektrische lading is net zoiets of hetzelfde als potentiaal. De biologiemethoden *Nectar* en *Biologie voor Jou* maken geen onderscheid tussen beide begrippen.
- Overall in het cytoplasma is de concentratie negatieve ionen groter dan de concentratie positieve ionen. Dit denkbeeld kan ingegeven zijn door het eerste denkbeeld: overall in het cytoplasma is de potentiaal, en *dus* ook de lading negatief.
- De kalium-lekstroom is bij rustpotentiaal groter dan de natrium-lekstroom. Dit denkbeeld kan ontstaan door misinterpretatie van de gekleurde pijlen in BiNaS tabel 88D rechts.
- De diffusie van de ionen door de ionenkanalen wordt alleen bepaald door het concentratieverschil tussen binnen en buiten. De invloed van het elektrische veld in het membraan wordt genegeerd.

Figuur 20 – Denkbeelden over rustpotentiaal zoals gevonden bij een analyse van signaalgeleiding in BiNaS en de biologiemethoden *Nectar* en *Biologie voor Jou*.

Als we slechts naar één ion-soort kijken, kan de membraanspanning waarbij evenwicht voor de onbewaakte ionkanalen wordt bereikt – de Nernstpotentiaal V_{ion} – berekend worden met de formule van Nernst:

$$V_{ion} = \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln \frac{[\text{ionconcentratie buiten}]}{[\text{ionconcentratie binnen}]}$$

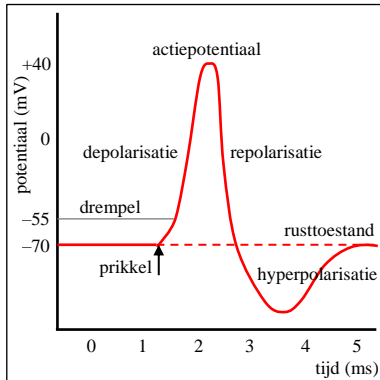
In deze formule is R de gasconstante, T de absolute temperatuur, n de lading van het ion en F de constante van Faraday.

Bij de in figuur 19 gegeven concentraties is de Nernstpotentiaal (bij 37 °C) voor K^+ -90 mV en voor Na^+ +40 mV. Het evenwicht in het axon is dus geen ‘Nernst-evenwicht’. Want er is sprake van meerdere ion-soorten die bijdragen aan het

Actiepotentiaal

De term actiepotentiaal wordt vaak in twee betekenissen gebruikt. Ten eerste staat die voor de maximale potentiaal van de impuls, zoals in figuur 22 staat aangegeven. Ten tweede wordt er het geheel van de-, re- en hyperpolarisatie (de complete actie-impuls) mee aangegeven.

Figuur 21 – De twee betekenissen van de term actiepotentiaal.



Figuur 22 – Het V,t -diagram van een actiepotentiaal.

evenwicht, elk met zijn eigen permeabiliteitscoëfficiënt. De rustpotentiaal ligt tussen de Nernstpotentiaal van Na^+ en K^+ in, dicht bij Nernstpotentiaal van K^+ omdat de doorlaatbaarheid (permeabiliteitscoëfficiënt) voor K^+ -ionen veel groter is dan voor Na^+ -ionen. Verder werken de Na/K -pompen voortdurend om de rustpotentiaal op -70 mV te houden. Dat kost het lichaam dus energie. Maar dat levert op dat de axonen steeds klaar staan om een signaal door te geven.

De rustpotentiaal kan berekend worden met een ingewikkelde vergelijking (de GHK-vergelijking, die wordt behandeld in het biofysica-katern van de methode *Systematische Natuurkunde*, pg. 23). Die vergelijking houdt rekening met de verschillende ion-soorten die aan het evenwicht bijdragen.

Na^+ -kanaal of Na^+ -poort

Zowel de biologiemethode *Nectar* als BiNaS (tabel 88F) spreken over poorten, als bewaakte ionkanalen worden bedoeld. Het begrip poort wordt gebruikt bij logische schakelingen. Een poort kan de waarde 0 of 1 hebben. De afhankelijkheid van de poortvariabelen wordt vastgelegd in een waarheidstabel. Of een natriumpoort diffusie toestaat (1) of niet (0) is afhankelijk van twee variabelen: is het ionkanaal actief of inactief, en ligt de potentiaal boven of beneden de drempelpotentiaal? Die afhankelijkheid is weergegeven in onderstaande waarheidstabel.

Instroom door Na^+ -poort

		toestand van de poort	
		gesloten	open
activatie van de poort	inactief	0 	0
	actief	0 	1

De figuren in de waarheidstabel komen uit *Campbell Biology*. De gele bolletjes stellen de Na^+ -ionen voor.

Figuur 23 – Bewaakte ionkanalen opgevat als logische poorten.

Actiepotentiaal – Bij het ontstaan en wegebben van de actiepotentiaal (zie figuur 22) spelen de potentiaal-bewaakte K^+ - en Na^+ -kanalen de hoofdrol. Deze kanalen worden ook wel poorten genoemd (zie figuur 23). Bij de rustpotentiaal van -70 mV zijn deze kanalen gesloten, maar wel actief (dat wil zeggen: voorbereid op depolarisatie). Als er een prikkel – bijvoorbeeld van een neurotransmitter – bij de zenuwcelwand arriveert, wordt de membraanpotentiaal plaatselijk verhoogd en gaan enkele Na^+ -kanalen open. Zolang de verstoring klein is (minder dan 15 mV) gebeurt er weinig: de verstoring verspreidt zich en dempt uit. Maar als de verstoring boven de drempelwaarde van -55 mV komt, dan gaan veel meer natriumkanalen in zo'n gebiedje open en stromen Na^+ -ionen de cel in. De membraanpotentiaal stijgt plaatselijk tot bijna de Nernstpotentiaal van Na^+ . Dit is de *depolarisatiefase*. Bij een membraanpotentiaal van zo'n $+35$ mV worden de Na^+ -kanalen geïnactiveerd. Dat gebeurt na ongeveer 1 ms. Tegen die tijd openen de vertraagd reagerende K^+ -poorten zich, waardoor K^+ -ionen de cel uitstromen. Dit is de *repolarisatiefase*. De potentiaal daalt snel tot dicht bij de Nernstpotentiaal van K^+ . Als de potentiaal na 1 ms onder de rustpotentiaal zakt,

gaan de Na^+ -kanalen dicht en worden tevens geactiveerd. Ook de K^+ -kanalen gaan dicht, maar weer met een vertraging van ruwweg 1 ms. Door die vertraging daalt de potentiaal tot beneden de rustpotentiaal: de *hyperpolarisatiefase*.

Na de hyperpolarisatie moet de oorspronkelijke situatie ter plaatse weer hersteld worden: het overschot aan Na^+ moet worden weggewerkt, het tekort aan K^+ moet worden aangevuld, en de potentiaal moet terug naar de rustpotentiaal. De meeste biologieboeken en ook BiNaS vermelden alleen de rol van de Na/K-pompen bij dit herstel. De Na/K-pompen kunnen dat echter niet in hun eentje, want: voor elke drie Na^+ -ionen die ze naar buiten pompen, krijg de cel twee K^+ -ionen terug, waardoor de potentiaal na hyperpolarisatie nóg verder zou dalen.

Herstel van de rusttoestand

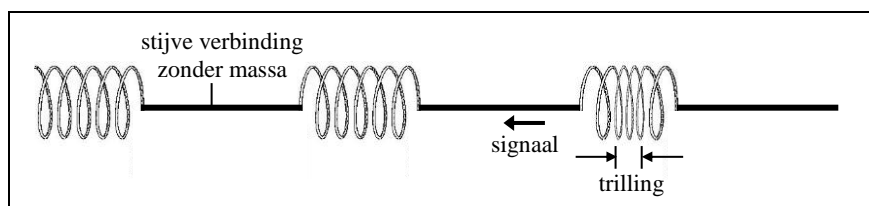
Het overschot aan Na^+ -ionen op een bepaalde plaats diffundeert naar het omringende cytoplasma. Daardoor gaat op die plaats de potentiaal omlaag, wat bijdraagt aan de repolarisatie. Evenzo is er een tekort aan K^+ -ionen ontstaan tijdens de repolarisatie. Hyperpolarisatie heeft tot gevolg dat K^+ -ionen uit de omgeving naar die plaats toestromen, zowel door dat tekort als door de extra negatieve potentiaal. Daardoor gaat de potentiaal daar na de hyperpolarisatie stijgen.

Evengoed moet het K^+ -tekort en het Na^+ -overschot door het membraan heen weggevoerd worden. Omdat de potentiaal bij hyperpolarisatie gedaald is tot dichtbij de Nernst-potentiaal van kalium, stopt de lekstroom van K^+ . Door het vergrote elektrische veld in het membraan neemt de Na^+ -lekstroom dan juist toe. Dat draagt bij aan de verhoging van de potentiaal, maar het vergroot ook het Na^+ -overschot. Dat wordt goedge maakt door de Na/K-pompen. Die werken meer Na^+ -ionen naar buiten dan K^+ -ionen naar binnen. Bovendien werken die pompen de potentiaalstijging tegen. Zo stijgt de potentiaal daar in 2 ms terug naar de rustpotentiaal.

Figuur 24 – Het proces van depolarisatie, repolarisatie en hyperpolarisatie.

Geleiding in een zenuwcel – De verstoring waardoor de actiepotentiaal ontstaat is plaatselijk. De toename van de potentiaal aldaar leidt tot potentiaalverschillen bij de lipidelagen. Daardoor gaat daar een kleine stroom lopen, een verschuiving van ionen onder invloed van een zich voortplantend elektrisch veld. Daardoor stijgt een stukje verderop de potentiaal ook boven de drempelpotentiaal. De daar aanwezige Na^+ -poorten gaan open en ook daar ontstaat een actiepotentiaal. De actiepotentiaal plant zich dus voort: impulsgeleiding. De voortplanting kan niet ‘terug gaan’, want waar de impuls net langs is gekomen, zijn de Na^+ -poorten nog inactief op het moment dat de potentiaal weer omhoog gaat.

De impulsgeleiding verloopt met een beperkte snelheid van zo’n 20 m/s. Die snelheid kan aanzienlijk opgevoerd worden door steeds stukjes van zo’n 1,5 mm van het axon af te schermen met myeline. In zo’n stukje zitten geen ionkanalen. Over dit afgeschermd stukje breidt de impuls zich uit door passieve geleiding. Dat wil zeggen: zonder dat er een nieuwe actiepotentiaal ontstaat. Dit gaat veel sneller dan 20 m/s, maar de sterkte van de impuls neemt af volgens een e-macht. Als het stukje niet te lang is, is de impuls in het deel waar geen myeline zit en wel ionkanalen aanwezig zijn (een ‘knoop van Ranvier’) nog net groot genoeg (groter dan de drempelpotentiaal) om een nieuwe actiepotentiaal te genereren. Zo springt de actiepotentiaal van knoop naar knoop (saltatorische geleiding). Dit kan voorgesteld worden als een in stukken geknipte slinky (een veer waardoor zich een longitudinale golf kan voortplanten), waarvan de stukken door stijve stokjes met elkaar verbonden zijn (zie figuur 25).



Figuur 25 – Signaalsnelheid (golfsnelheid) vergroten.

De signaalsnelheid van 120 m/s bepaalt, samen met de af te leggen afstand en de

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

vertraging die er in de synapsen optreedt, de minimale reactietijd van mens en dier.

Elektrisch model van een zenuwcel – Van de signaalgeleiding in een axon kan een elektrisch model gemaakt worden. Daartoe wordt van het axon een ‘kabelmodel’ gemaakt: een opeenvolging van parallelgeschakelde RC-kringen met weerstanden ertussen (Van Dalen et al, 2015; Van Pelt et al, 2012). De RC-kring wordt gevormd door een stukje zenuw. De condensator is het membraan met de positief en negatief geladen laagjes. De membraanweerstand (loodrecht op het membraan) heeft te maken met de ionkanalen en de Na/K-pompen die voor stromen de cel in en uit zorgen. De axiale weerstand is de weerstand langs de binnenkant van het membraan. De weerstand aan de buitenkant van het membraan, in het extracellulaire vocht, wordt nul verondersteld. Met dit model kan een formule voor de geleidingssnelheid worden afgeleid. Die formule geeft aan dat je de geleidingssnelheid kunt verhogen door dikkere axonen te maken (zoals in een inktvis het geval is) of door de isolerende laag tussen de twee condensatorplaten te vergroten (wat gebeurt door de myelineschede aan te brengen).

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 door het uitvoeren van de in figuur 26 beschreven proef.

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 27). 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 26 – Reactietijd en signaalsnelheid schatten.

Een uitgewerkt voorbeeld: als een sprinter na het startschot binnen 0,3 s vertrekt, is het een valse start. De snelheid waarmee informatie zich door het lichaam verplaatst, is ongeveer 5 m/s. Dat is veel minder dan de signaaltransportsnelheid van 120 m/s in een zenuw, vanwege vertraging in de synapsen. De afstand van oren naar benen is ruwweg 1,5 m, zodat er een tijd van 0,3 s verloopt tussen startschot en beginnen met lopen.

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 celmembraan voor K^+ -ionen en begreep dat een selectieve doorlaatbaarheid invloed heeft op spanningspulsen 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. Helaas stelt *Newton* de rustpotentiaal in een neuron gelijk aan de Nernstpotentiaal van kalium (-90 mV) en bevat de grafiek van de actie-impuls storende fouten: de potentiaal keert niet terug naar de rustpotentiaal, en de depolarisatie- en repolarisatiefase duren te kort (slechts 0,25 ms in plaats van 1 ms).

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 het elektrisch model van een zenuwcel 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.

Literatuur

- Biezeveld, H., L. Mathot & R. Brouwer (2016). *Stevin Natuurkunde vwo – G1 Oog, oor en hart*. Zwaag/Haarlem/Amsterdam: eigen uitgave.
- Blok, B. et al (2014). *Newton havo – keuzekatern Het menselijk lichaam*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Blok, B. et al (2015). *Newton vwo – keuzekatern Biofysica*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Blom, S., C. van Huis & A.J. van Pelt (2012). [Menselijk lichaam. NiNa module NNH18](#). Enschede: SLO.
- Bos, A. et al (zj). *Biologie voor Jou – 5b vwo leeropdrachtenboek* (5^e ed). 's Hertogenbosch: Malmberg.
- Bouwman, M. et al (2014). *Nectar 3^e editie biologie – 5 vwo leerboek*. Groningen/Houten: Noordhoff.
- 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.
- 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.
- Noordhoff (2014). *Overal Natuurkunde havo – Menselijk lichaam*. Groningen/ Houten: Noordhoff.
- Paus, J. (2012). [Handreiking schoolexamen natuurkunde havo/vwo bij het examenprogramma geldig vanaf schooljaar 2013-2014](#). Enschede: SLO.
- Ten Brinke, L. et al (2014). *Pulsar 3^e editie natuurkunde – leerboek 5 havo*. Groningen/Houten: Noordhoff.
- Ten Brinke, L. et al (2014). *Pulsar 3^e editie natuurkunde – leerboek 5 vwo*. Groningen/Houten: Noordhoff.
- 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 al (2014). *Systematische Natuurkunde – katern B havo Horen en zien*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- Van Dalen, B. et al (2015). *Systematische Natuurkunde – katern A vwo Biofysica*. Amersfoort: ThiemeMeulenhoff.
- 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 der Valk, T. & A.J. van Pelt (2019a). De biofysica van signaalgeleiding: rustpotentiaal. Waar biologie en natuurkunde elkaar ontmoeten deel 1. *NVOX* 44(1), nog te verschijnen.
- Van der Valk, T. & A.J. van Pelt (2019b). De biofysica van signaalgeleiding: actiepotentiaal. Waar biologie en natuurkunde elkaar ontmoeten deel 2. *NVOX* 44(2), nog te verschijnen.
- Van Pelt, A.J., M. Dogterom, L. de Vries & F. Zeldenrust (2012). [Leven en Natuurkunde. NiNa-module NNV15](#). 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.