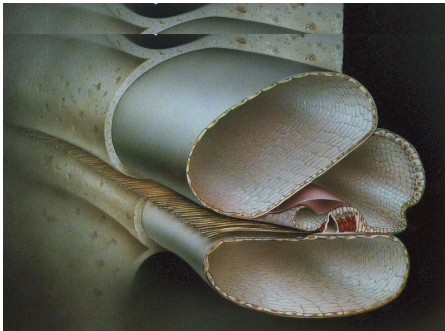


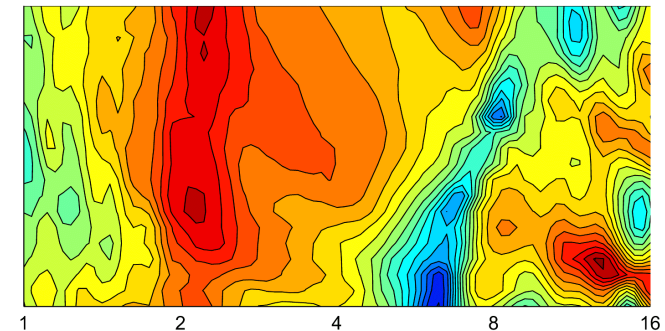


# Ogen, Oren en Evenwicht hebben elkaar nodig: de wereld is niet zoals ie lijkt....



John van Opstal  
Sectie Neurofysica

Donders Centrum voor Neurowetenschappen  
Radboud Universiteit Nijmegen





# OVERZICHT

## INLEIDING

Gehoor, zien, en evenwicht.  
Elk heeft zijn eigen beperkingen.  
Er is een sterke relatie tussen zien en horen.

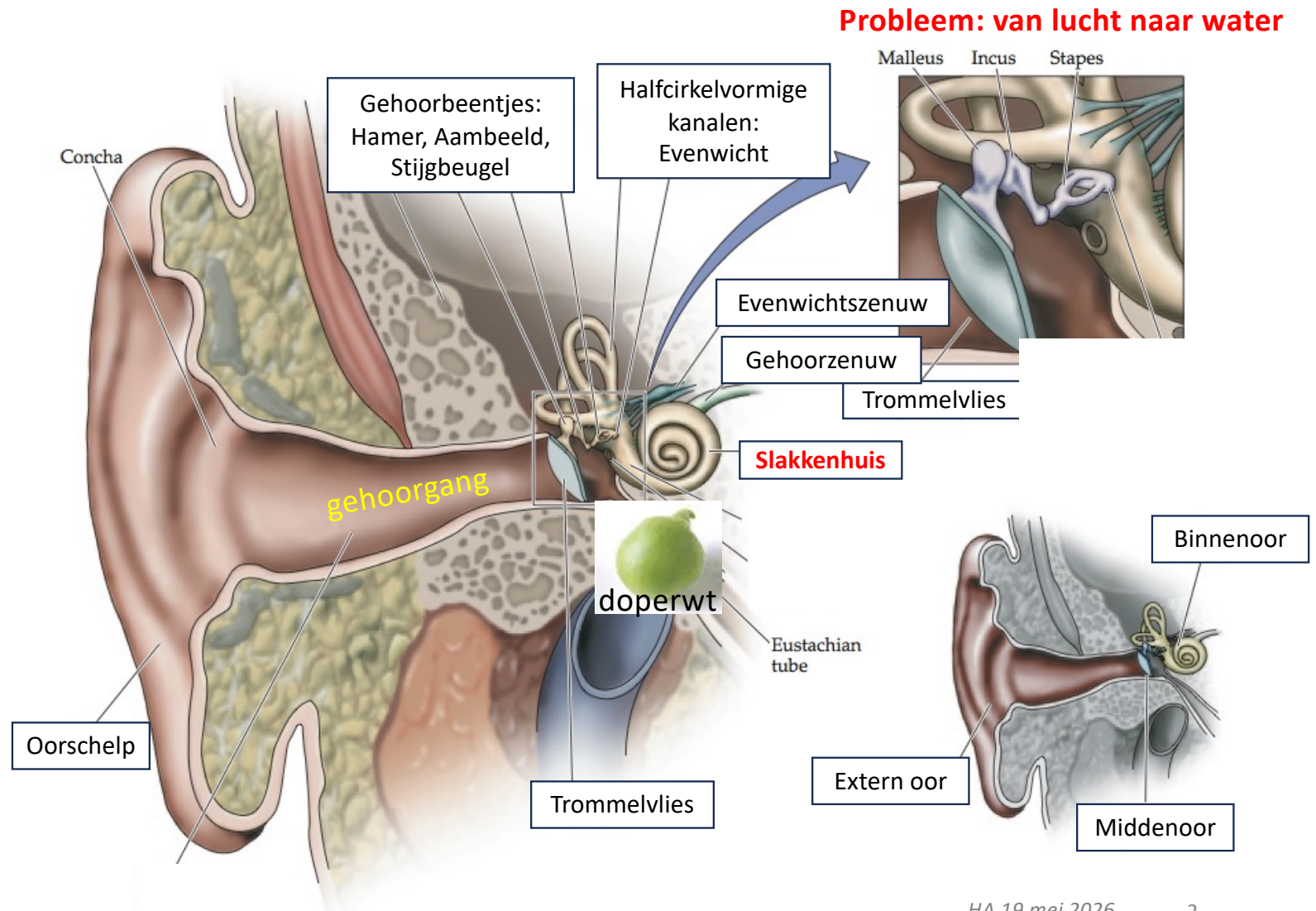
## ACHTERGROND

Oog-hoofdbewegingen:  
nauwe samenwerking van drie zintuigen,  
en twee (complexe) motorsystemen.

Hoe onderzoeken we dit in het lab?  
Enkele van onze resultaten

## TIJD VOOR VRAGEN

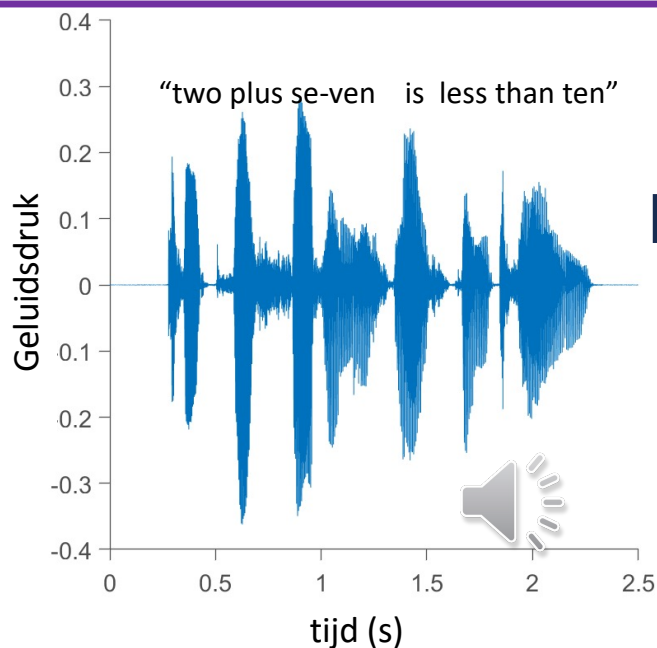
# 1. Ons gehoororgaan



# Geluid:

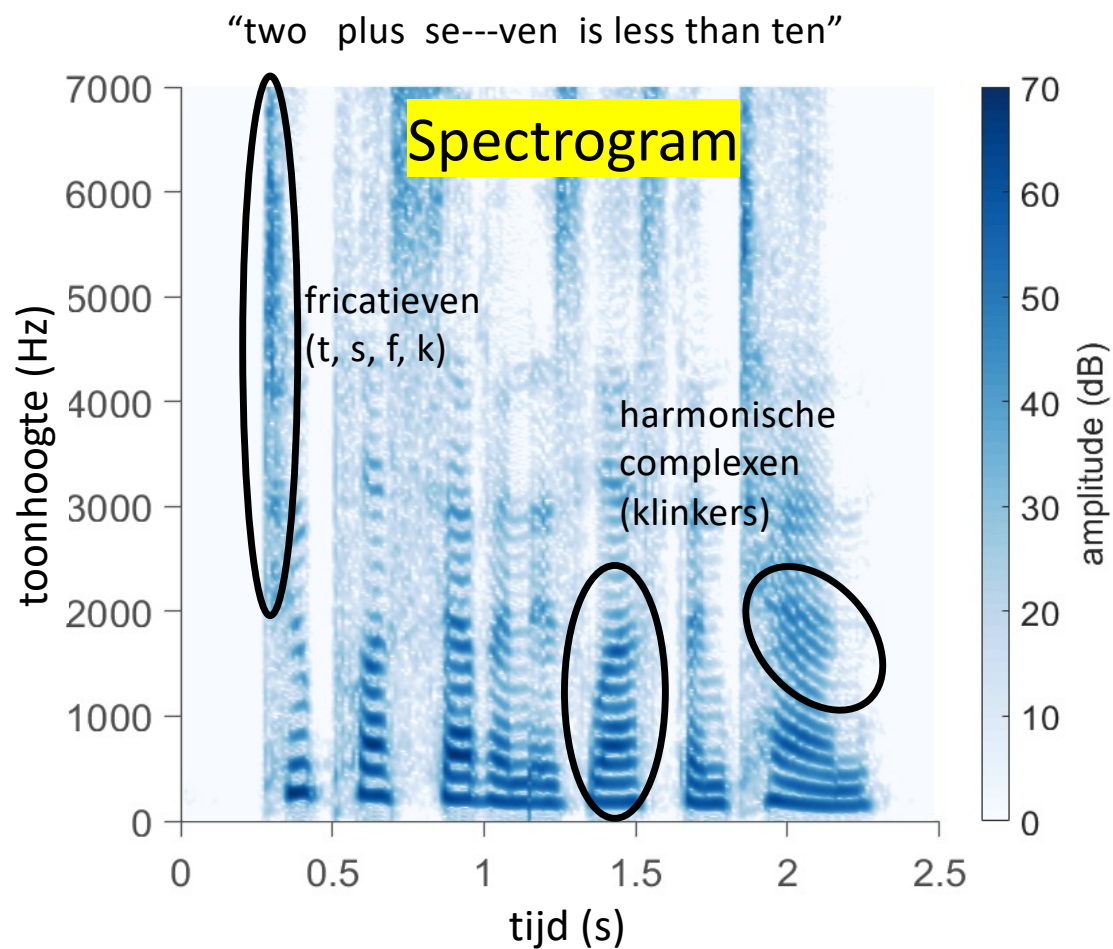
## Belangrijk:

Elk geluid dat wij kunnen horen is opgebouwd uit **verschillende tonen**: lage tonen, middentonen, hoge tonen, allemaal met hun eigen sterkte.



Een betere manier om de informatie te tonen

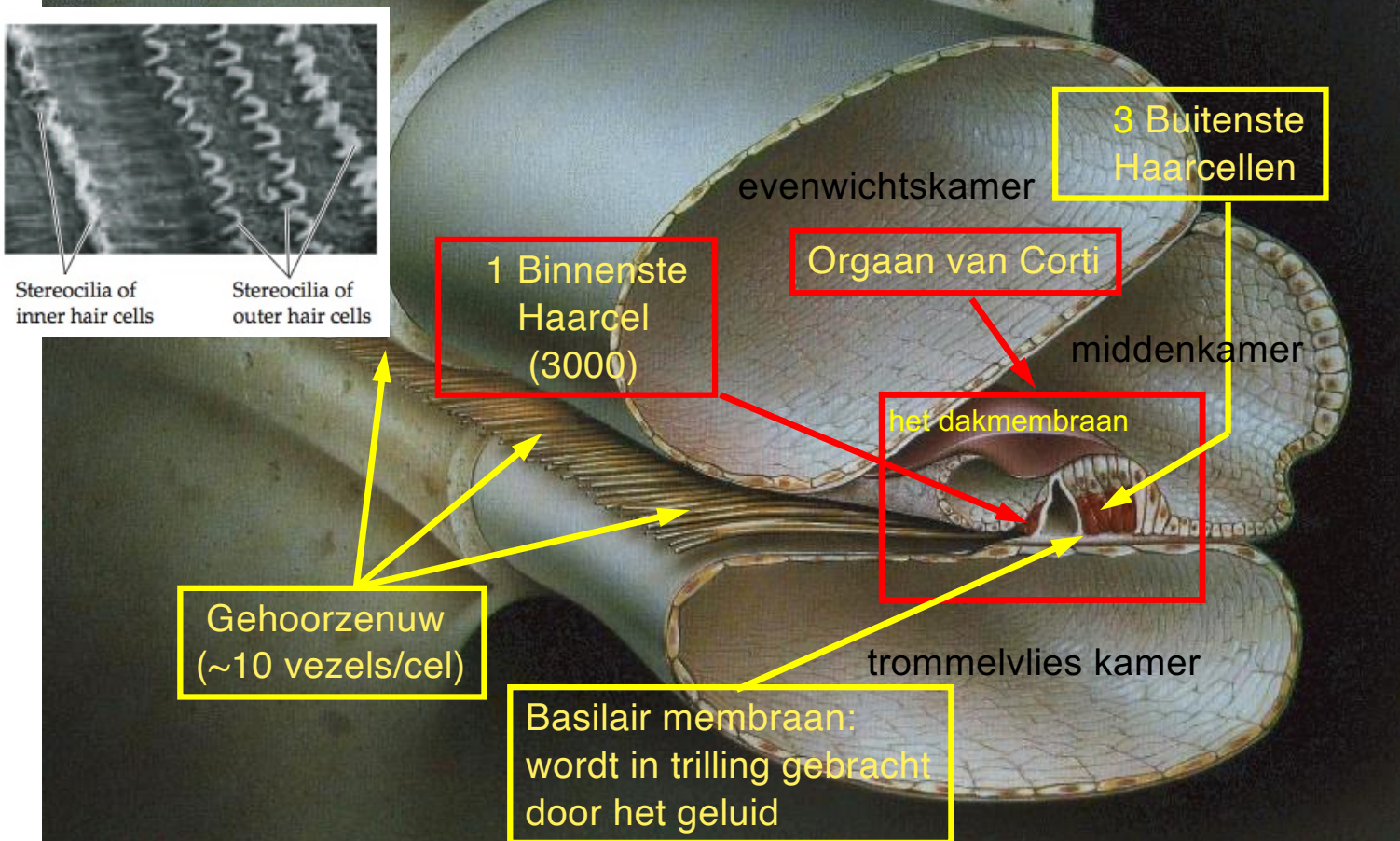
Een **natuurlijk geluid** verandert continu van samenstelling. Het gehoor moet dit precies kunnen volgen.



De eerste stap in geluidsverwerking door het brein is een uiteenraffeling van het geluid in de afzonderlijke tonen in het slakkenhuis (cochlea)



**HAARCELLEN: VAN MECHANISCHE VIBRATIE NAAR ELECTRISCH SIGNAAL**



**Vergelijking met het zien:**

Slechts 3.000 binnenste haarcellen (en 30.000 gehoorzenuw vezels naar het brein)

tegenover

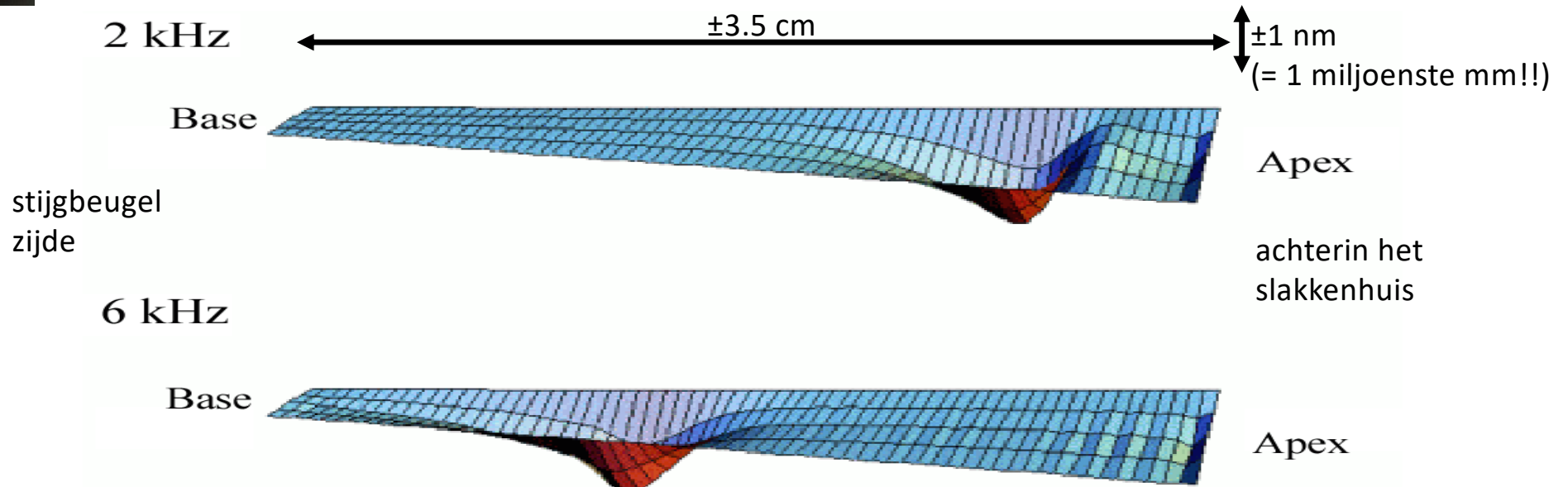
4.5 miljoen kegeltjes en 90 miljoen staafjes (de lichtgevoelige cellen) in het menselijk netvlies!!



# “Tonotopie” langs het Basilair Membraan



Bij pure-toon stimulatie: de Basilair Membraan vibratie volgt de toon-trilling op een plek die afhangt van de toonhoogte



Mechanische terugkoppeling van de buitenste haarcellen naar het basilair membraan leidt tot een sterke opscherping van de BM trilling



Hierdoor verkrijgt ons gehoor een ongelooflijke **toonhoogte-gevoeligheid** (<0.5% bij 1000 Hz; bereik: 0.02-20 kHz), **hard-zacht bereik** (tussen 1 – 1.000.000.000.000), en **tijdsgevoeligheid** (< 10  $\mu$ s = 1 honderd-duizenste seconde)!

# Richtinghoren

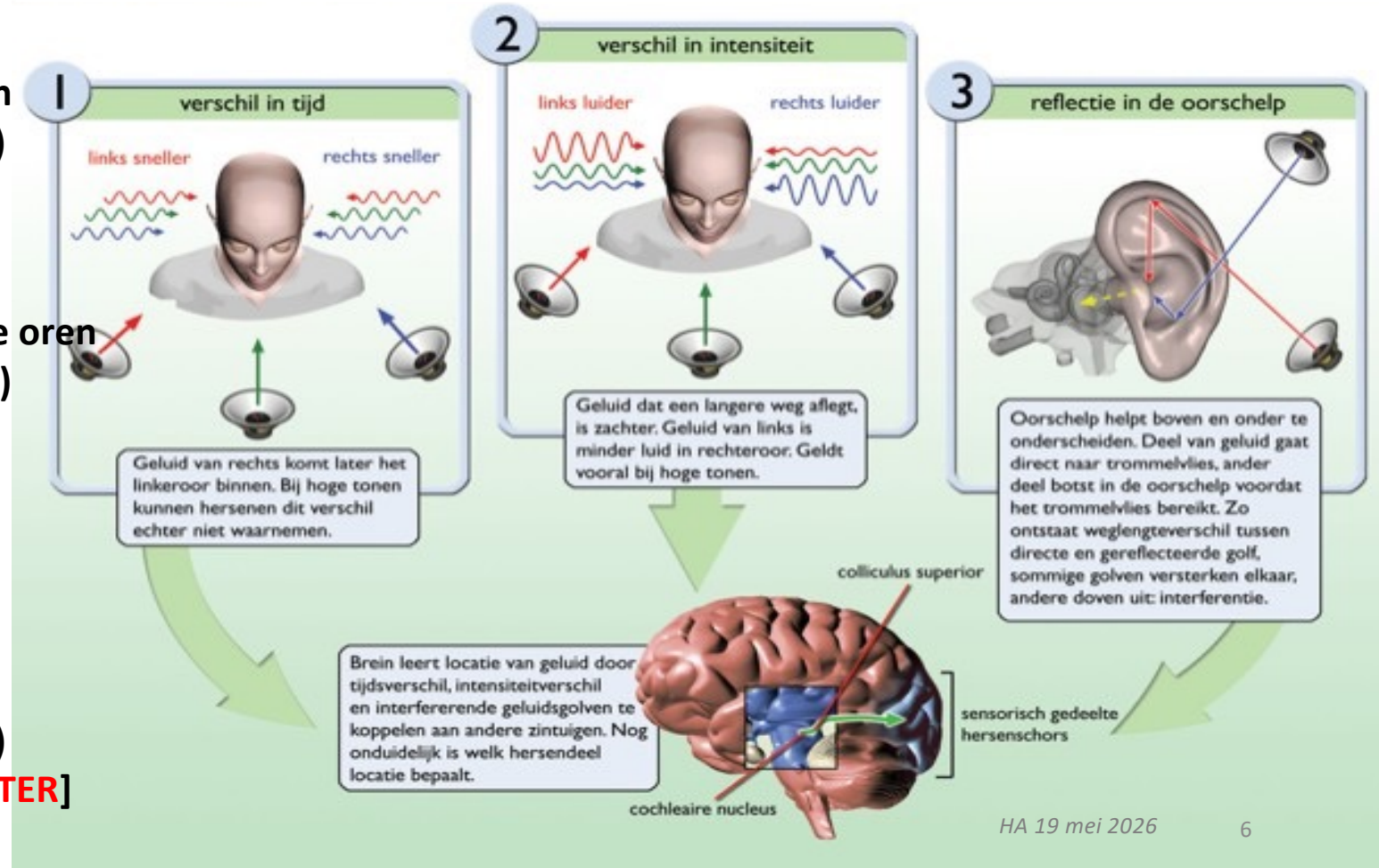
Om de richting van een geluid te kunnen bepalen, gebruikt ons gehoor drie verschillende geluids-kenmerken (die alle drie nodig zijn):

1. Tijdsverschil tussen de oren  
(voor lage tonen, < 1500 Hz)  
[LINKS/RECHTS]

2. Luidheidsverschil tussen de oren  
(voor hoge tonen, > 2500 Hz)  
[ook LINKS/RECHTS]

(2 oren voor nodig!)

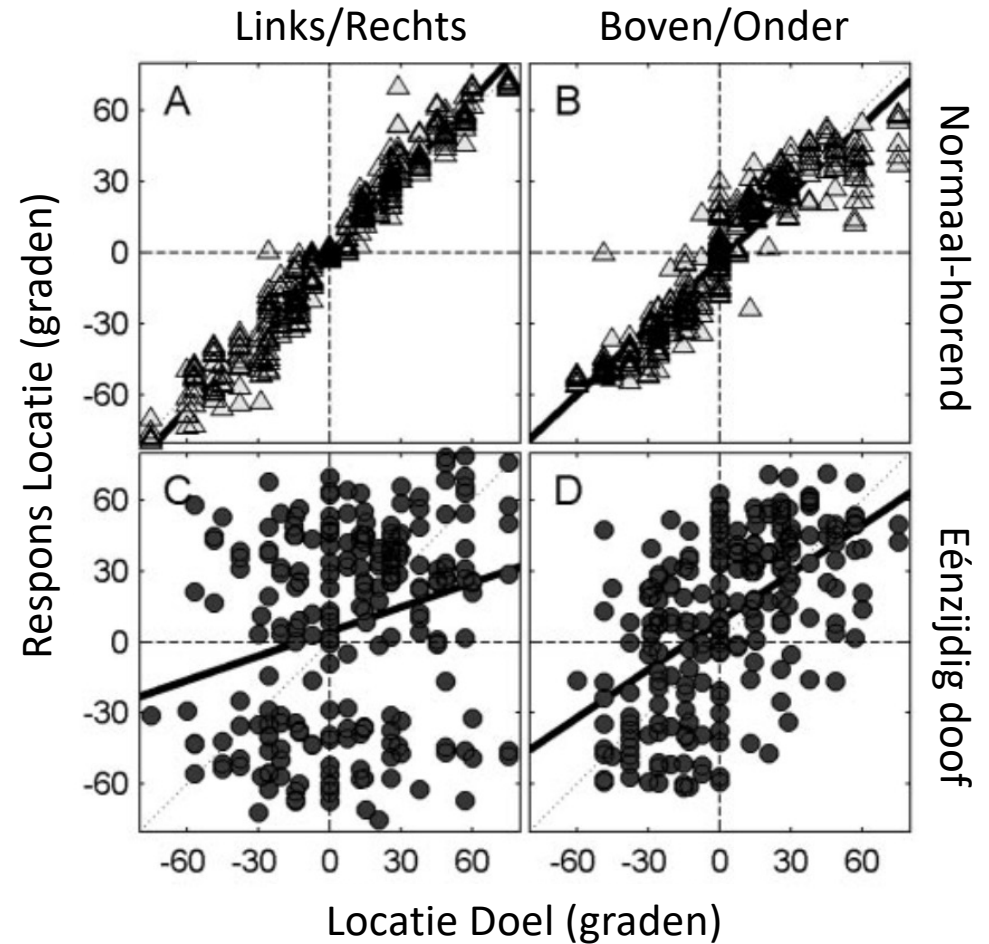
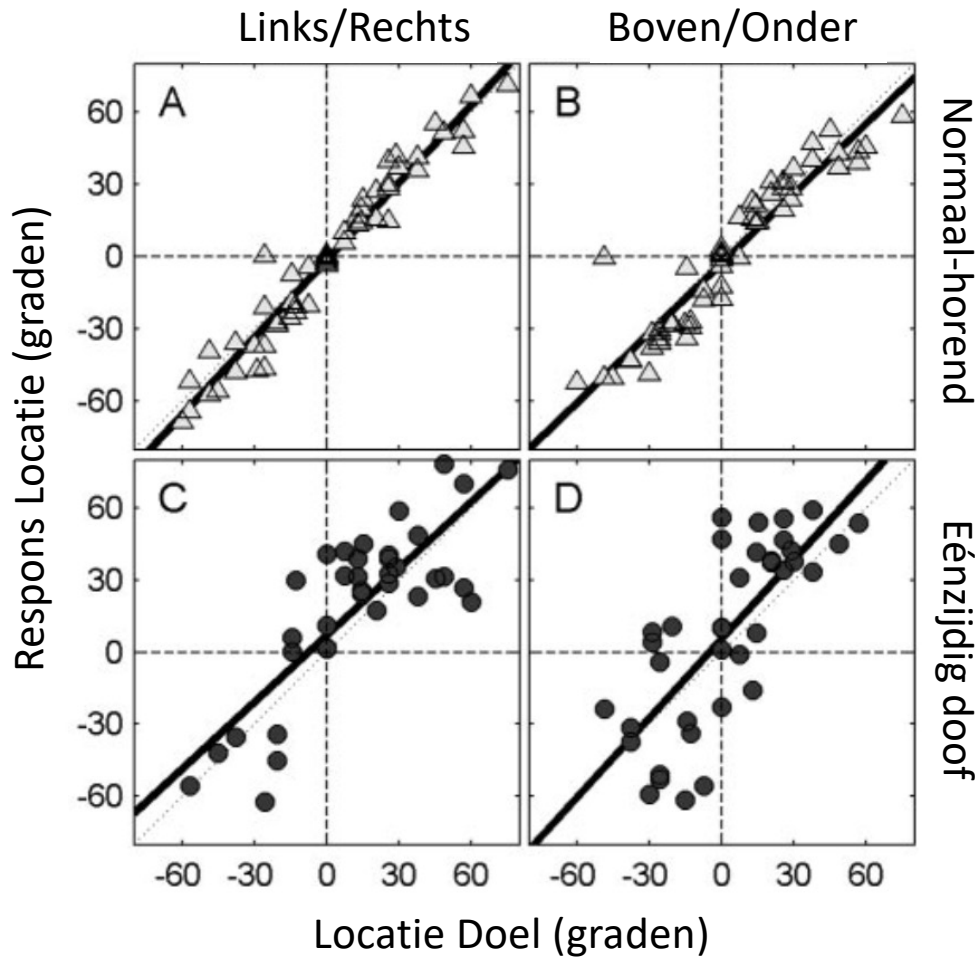
3. Oorschelp vervorming  
(zeer hoge tonen, > 4000 Hz)  
[BOVEN/ONDER/VOOR/ACHTER]



# Met één oor is richtinghoren onmogelijk!

Alle geluiden dezelfde sterkte

Geluiden met verschillende sterktes  
random door elkaar



## Ons gehoor wordt geconfronteerd met een serieus (= onoplosbaar) probleem .....

Omgeving: vele bronnen (maar onbekend hoeveel)

- alle op verschillende lokaties
- alle met hun eigen (onbekende) geluidseigenschappen



Bregman's metafoor



Het totale geluid dat binnenkomt op de trommelvliezen is de som (= mengsel) van alle geluidsbronnen.

### MAAR:

Er zijn **oneindig veel** mogelijke geluid-scènes die **precies hetzelfde** totaalgeluid op de twee trommelvliezen opleveren.

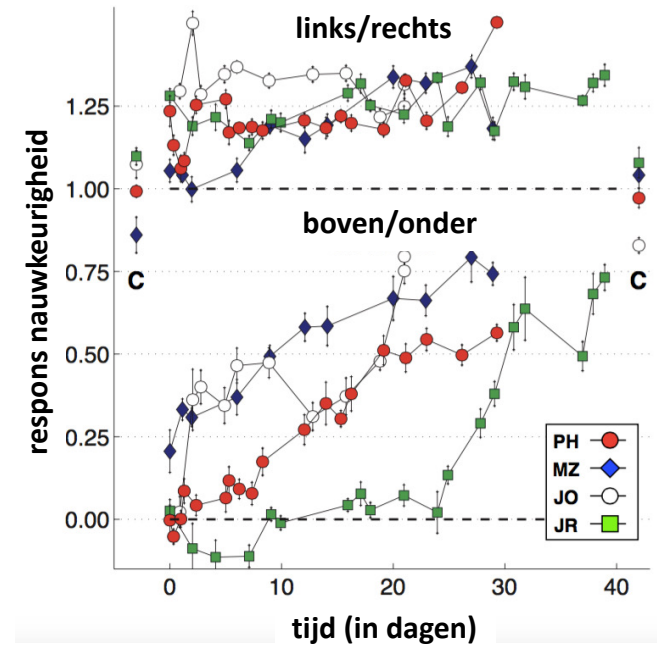
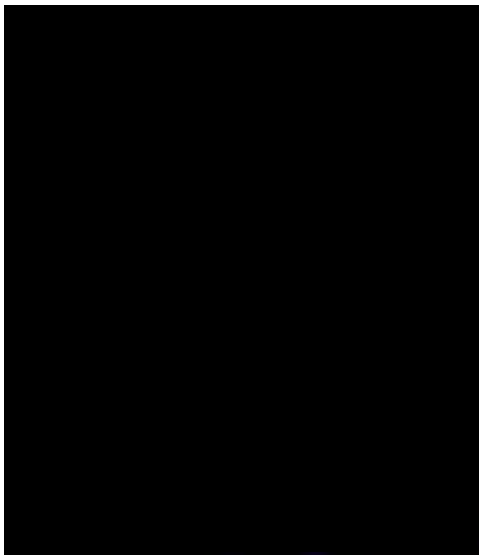
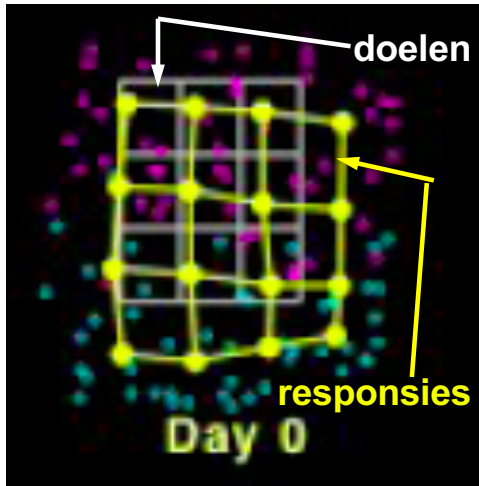
Voor het brein is het dus **ONMOGELIJK** om zeker te zijn wélk van al die mogelijkheden de juiste is!

Want:

Eén meting met heel veel onbekenden:

→ de identificatie en lokalisatie van geluidsbronnen is een **onoplosbaar** probleem!

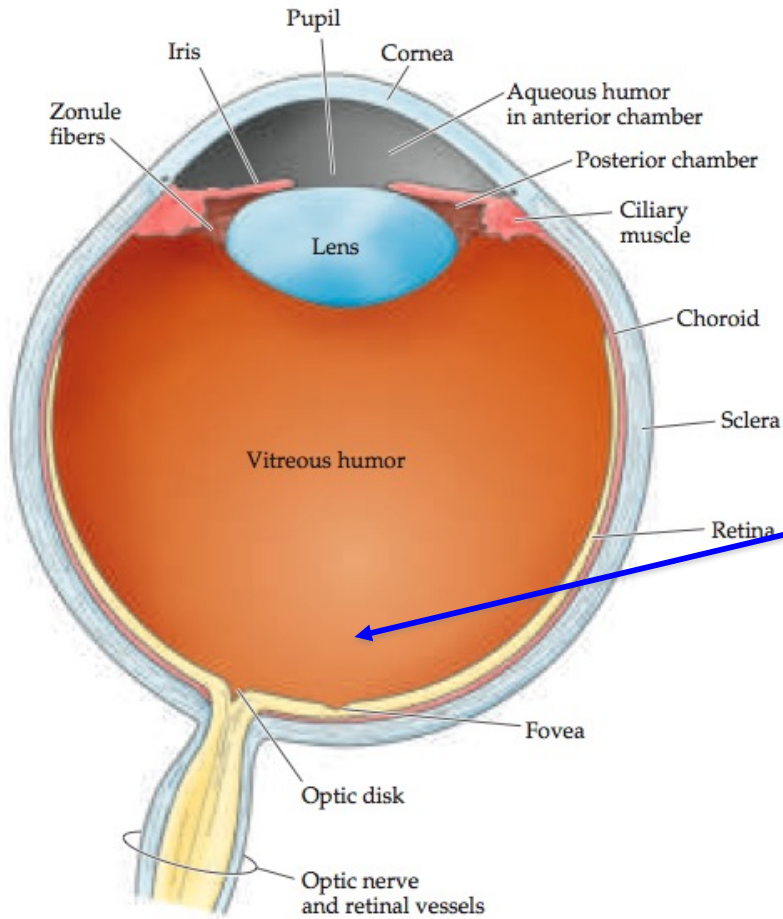
We hebben aangetoond dat het menselijk gehoor *levens-lang* plastisch is



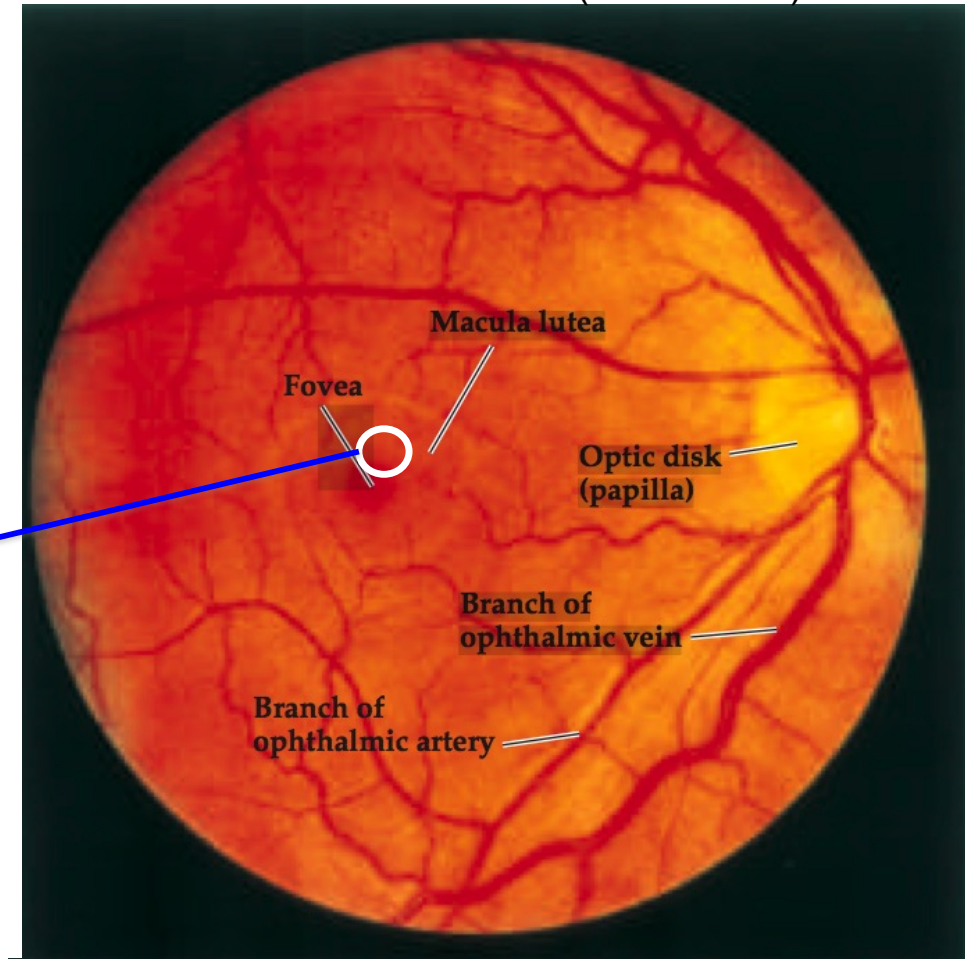
► Het brein heeft inderdaad intern opgeslagen versies van haar eigen richtingsafhankelijke oorschelp vervormingen!  
  
(en kan nieuwe bijmaken!)

# 2. HET OOG

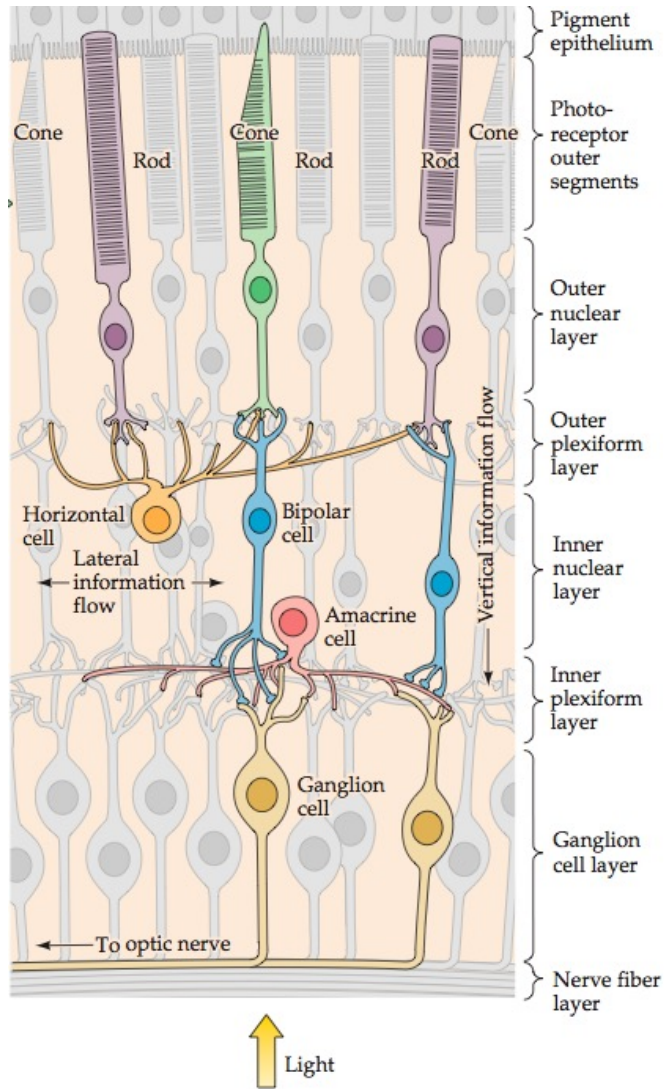
VANGT LICHT MET BEHOUD VAN DE RUIMTELIJKE RELATIES



DE RETINA (NETVLIES)



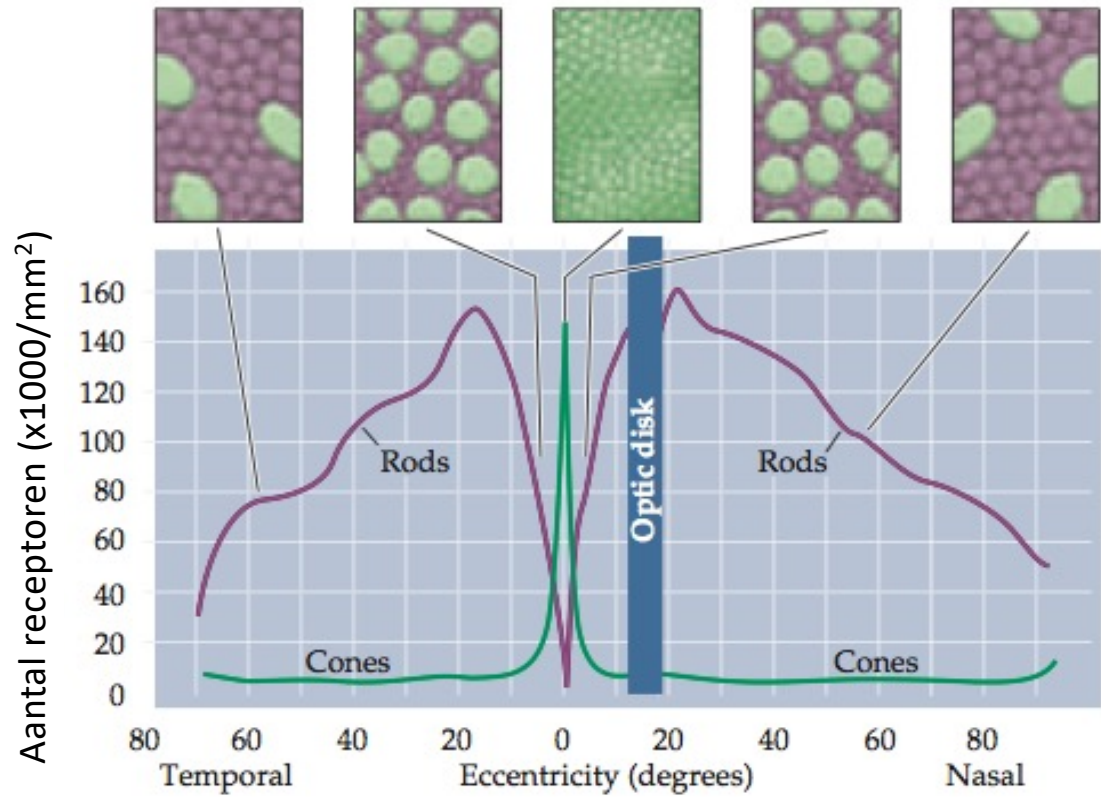
# OPBOUW NETVLIES: OMGEKEERD!



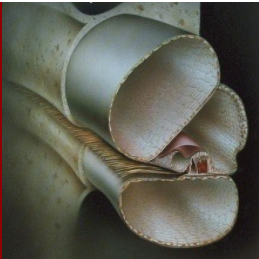
**FOTO-RECEPTOR CELLEN:**  
 van Electro-Magnetische trillingen  
 naar Electrisc Signaal in de Optische Zenuw



## VERDELING LICHTGEVOELIGE CELLEN OVER DE RETINA: ZEER INHOMOGEEN!



HA 19 mei 2026



# Zien vs. Horen

Zintuig zenuwcellen zijn topografisch georganiseerd (als in een 'atlas'): zenuwcellen die naast elkaar liggen in de hersenen zijn gevoelig voor stimuli met vergelijkbare eigenschappen.

Dit geldt voor zowel het zien als het horen:

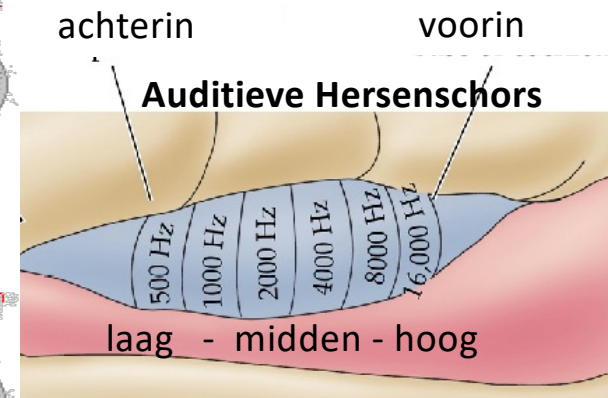
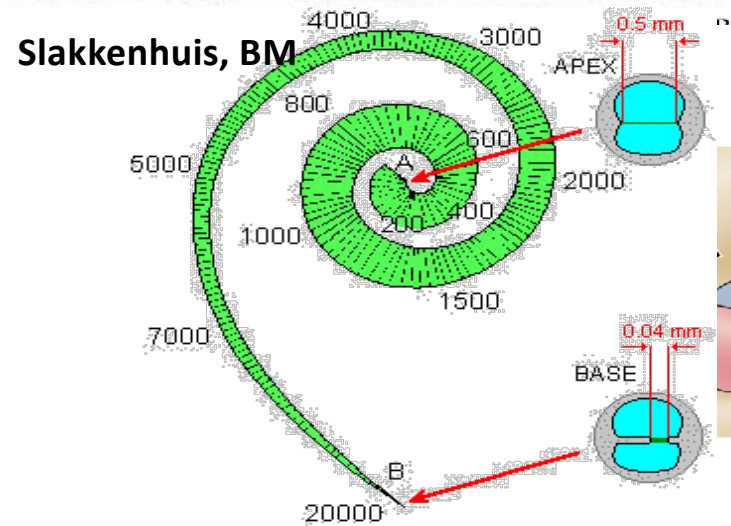
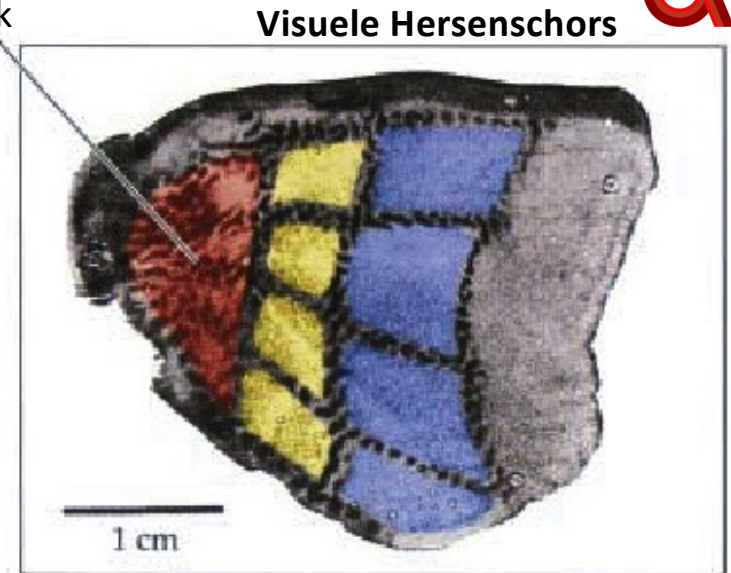
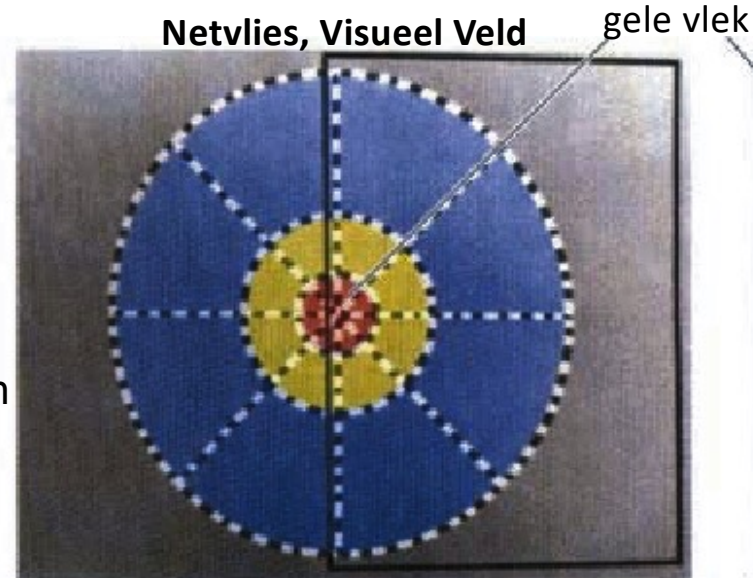
## ZIEN: retinotopie

(ruimtelijk: positie op netvlies)

vs.

## HOREN: tonotopie

(toonhoogte: positie langs het basilair membraan)

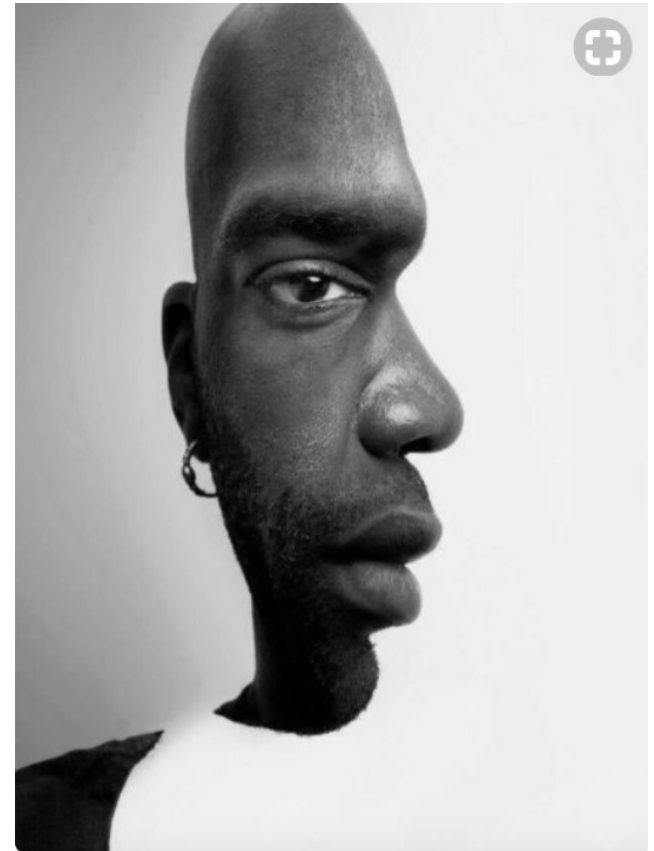


## Ook ons zien is soms ambigu



Zien we de  
gezichten  
van voren?

of van opzij?



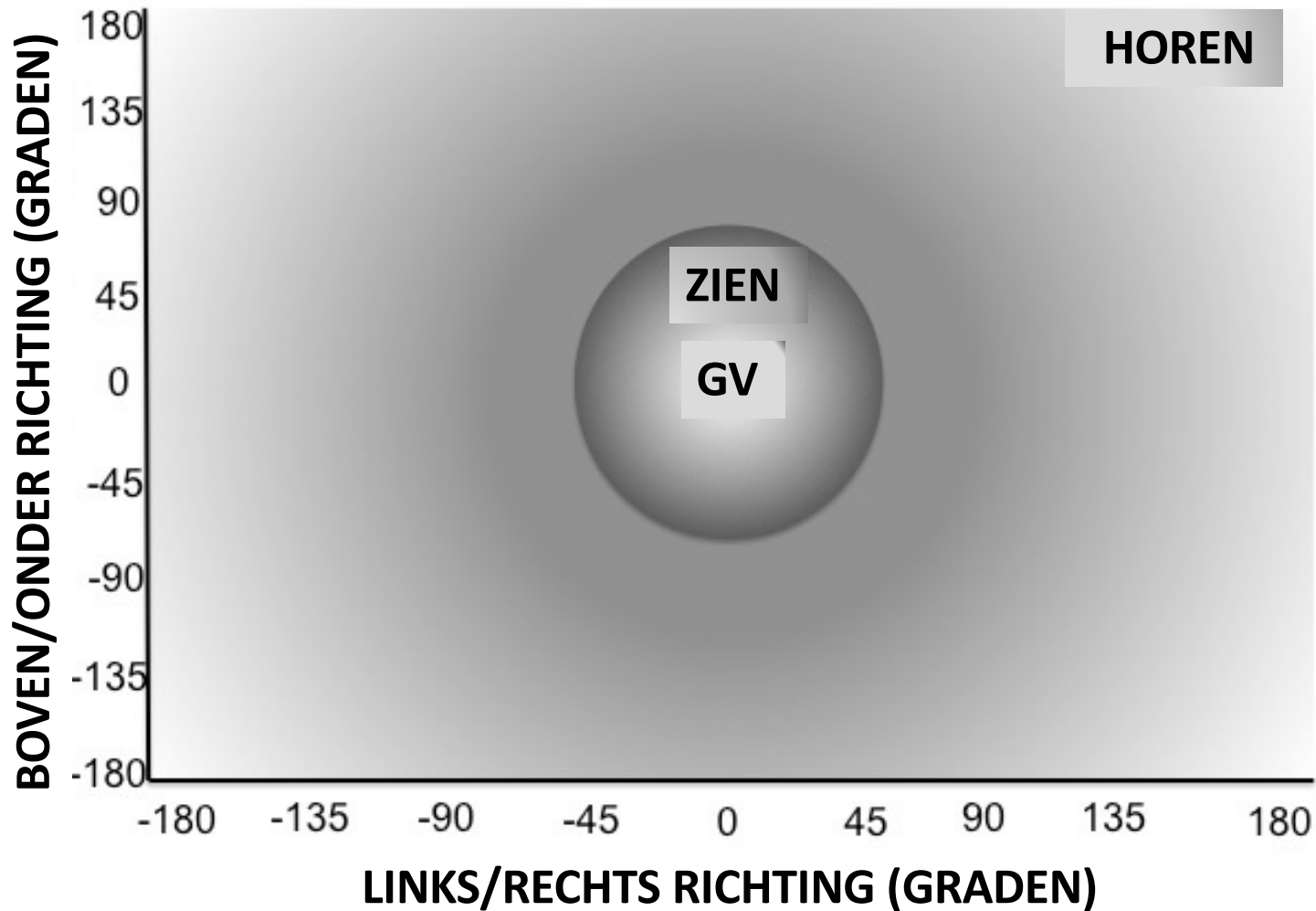
Onze waarneming springt heen en weer tussen de verschillende hypotheses.

Het visueel systeem is 'veranderingsblind' ('*change blindness*')



Dit volgt uit het feit dat het brein de visuele scène selectief scant, en eigenlijk heel weinig 'onthoudt'!

## Zien en Horen vullen elkaar aan



### ZIEN:

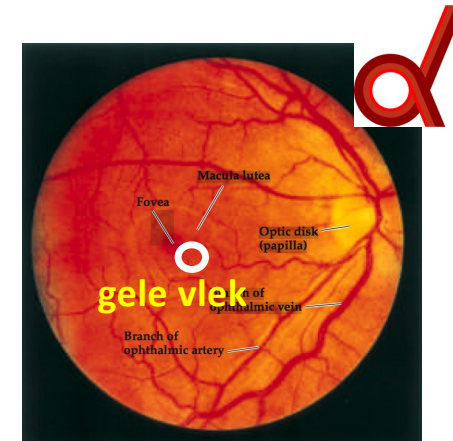
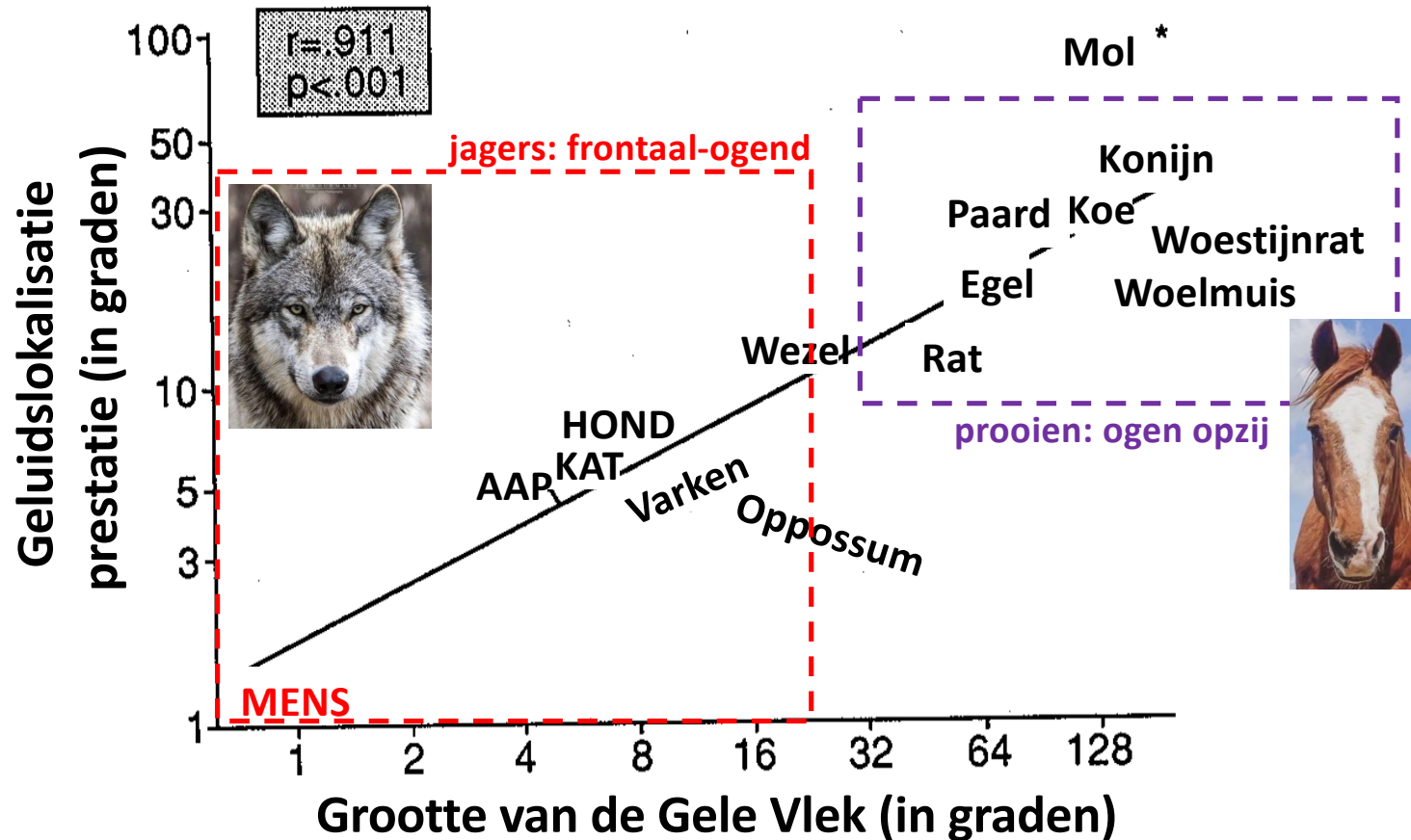
Veel detail in een klein gebiedje (GV)

### HOREN:

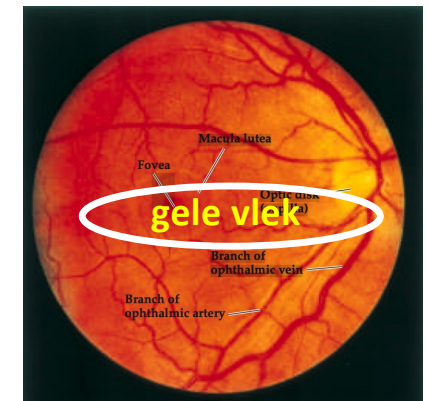
Weinig detail, maar overall rondom!

Helpt het zien om snel en precies de gele vlek (fovea) te kunnen richten.

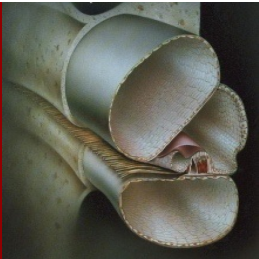
Interessant is dat hoe goed een dier een geluid kan lokaliseren het sterkst afhangt van de grootte van de “gele vlek” in het netvlies!



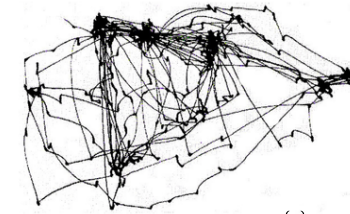
netvlies mens



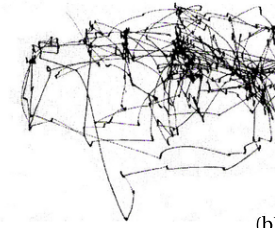
netvlies koe



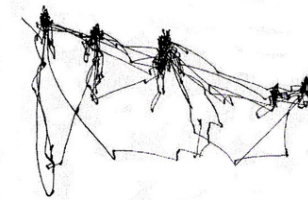
## Hoe kijken wij eigenlijk?



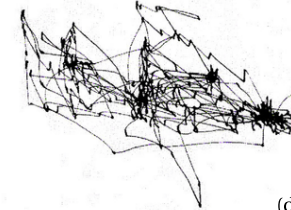
(a)



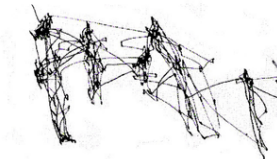
(b)



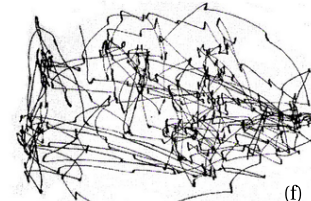
(c)



(d)



(e)



(f)



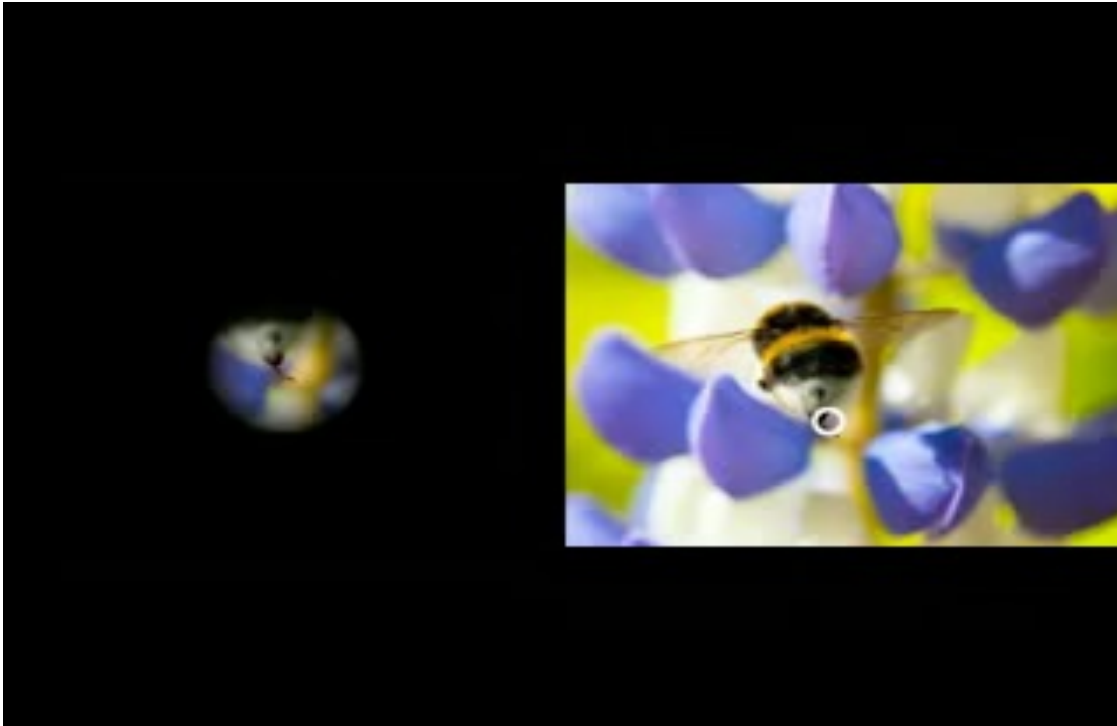
(g)

Onze oogbewegingen hangen in hoge mate af van de ons gestelde taak:  
“identificeer de mensen”, “schat hun leeftijden”, “naar wie kijkt men in het schilderij”, etc.



## Wat we zien

## Wat we waarnemen



Is niet essentieel anders dan de manier waarop vleermuizen met geluids-echo's de wereld aftasten!

De vraag is hoe je dit rondkijken zo efficiënt mogelijk kan doen.  
*Hoé verkrijg je zoveel mogelijk informatie in zo kort mogelijke tijd?*

Antwoord: o.a. door de informatie van **zien en horen** te combineren!

Elke seconde maken we 3 à 4 snelle oogbewegingen (die noemen we 'saccades').

Steeds weer moeten de hersenen besluiten:

- WAAR naar toe?
- WANNEER?
- HOE?

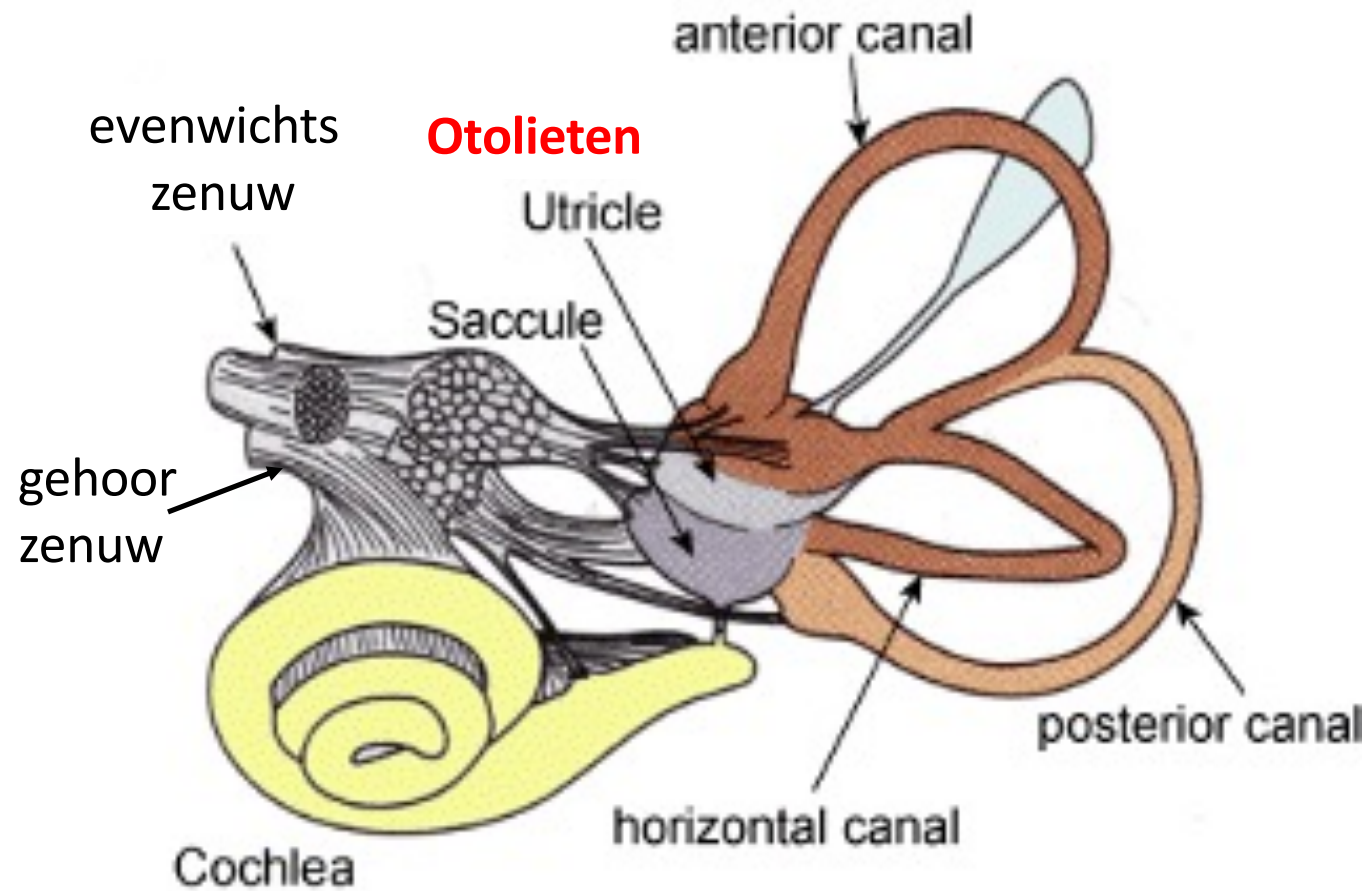
De kleine 'snapshots' moeten worden samengevoegd tot een stabiel, volledig, en coherent beeld.



### 3. HET EVENWICHTSORGAAN:

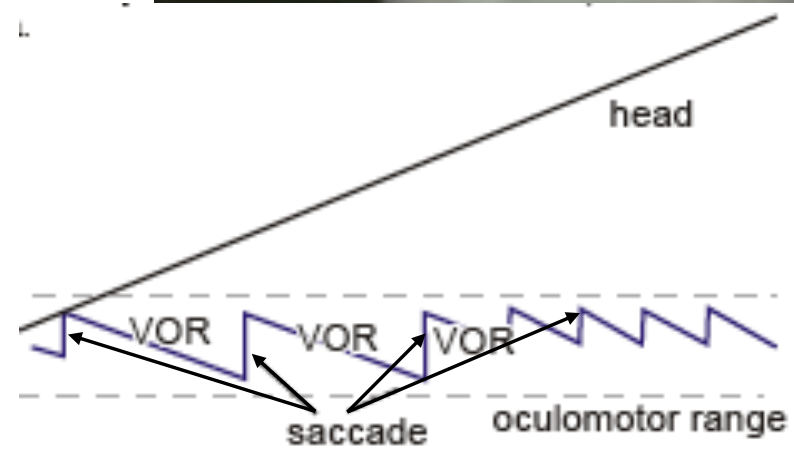
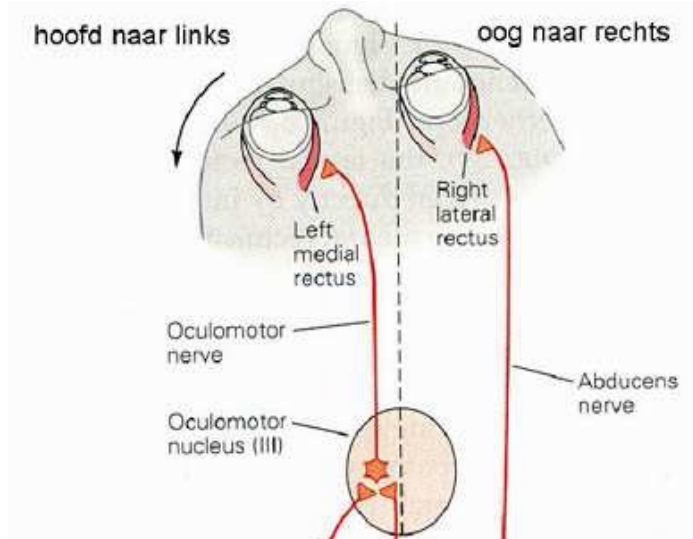
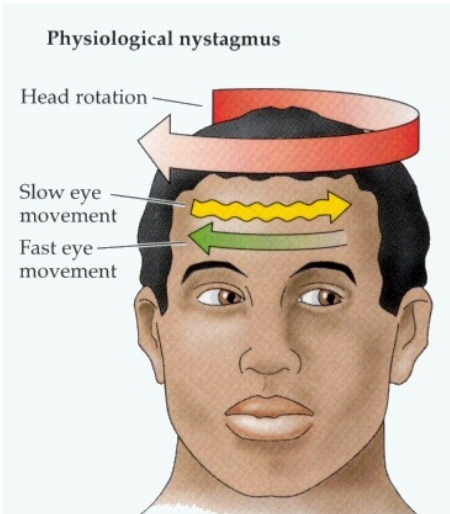
Meet ROTATIES en TRANSLATIES van het hoofd t.o.v. lichaam en wereld

**Half-cirkelvormige kanalen**





# De EVENWICHTSREFLEX: STABILISEERT de kijkrichting in de ruimte (VOR = vestibulo-oculaire reflex & VCR = vestibulo-collic (nek) reflex)



## Otolieten meten translatie en zwaartekracht



translatieversnelling



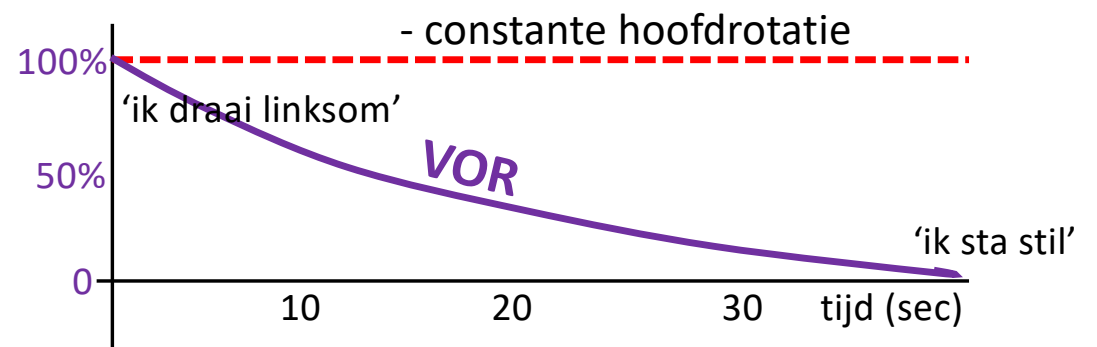
valversnelling

maar beide geven vergelijkbare informatie aan de hersenen...



Dit kan tot een grote desoriëntatie leiden bij piloten (die kunnen voelen dat ze ondersteboven vliegen, terwijl dat niet zo is ....)

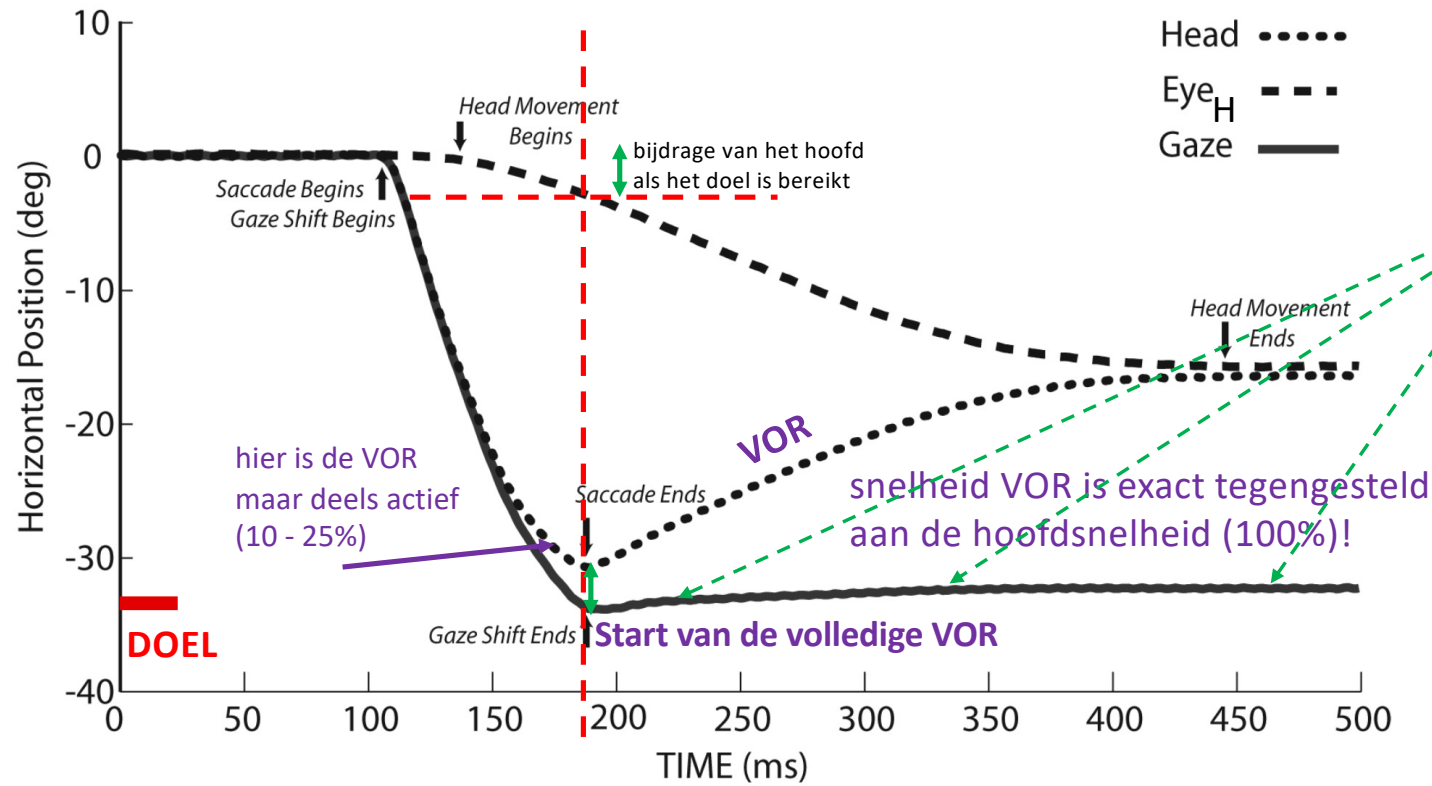
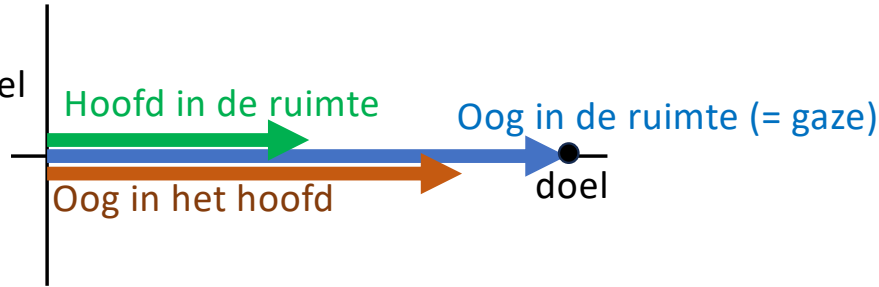
Ook de halfcirkelvormige kanalen hebben een beperking





#### 4. Samenwerking ogen en hoofd bij een snelle oriënteringsrespons ('gaze saccade')

Een complex samenspel met milliseconde precisie!



Op elk tijdstip geldt:

**oogbeweging**  
+  
**hoofdbeweging**  
=  
**doellokatie**

## Ons multisensorisch lab in Nijmegen: audiovisueel



125 luidsprekers rondom  
de proefpersoon:

Links/Rechts:  $-115^\circ$  tot  $+115^\circ$

Boven/Onder:  $-60^\circ$  tot  $+90^\circ$

Meetkamer is echovrij, stil,  
én volledig donker

(► doelen zijn onzichtbaar)

Meting:

Snelle (oog- +)hoofdbeweging  
naar het doel

(► natuurlijke, snelle respons)

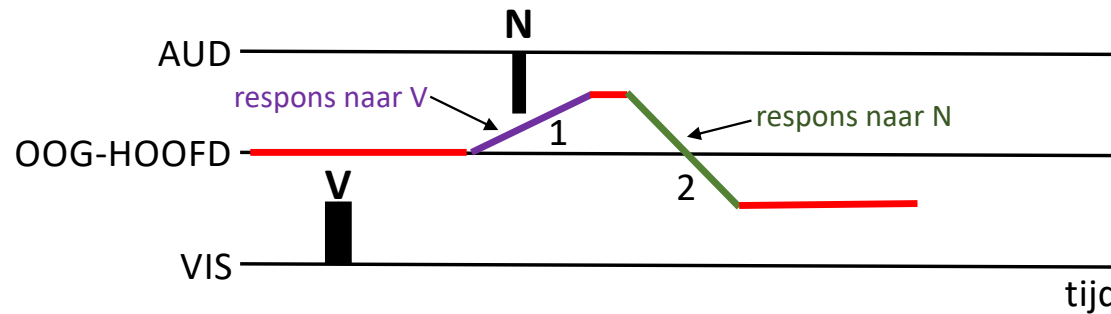
Geluiden:

Vanalles, maar typisch **ruis**  
met een duur van  $\pm 150$  ms,  
en verschillende sterktes.

**Voorbeeld experiment:** Lokalisatie van een auditief doel, kort (0.02 s) aangeboden  
**tijdens** een snelle oog-hoofd saccade naar een visueel doel.

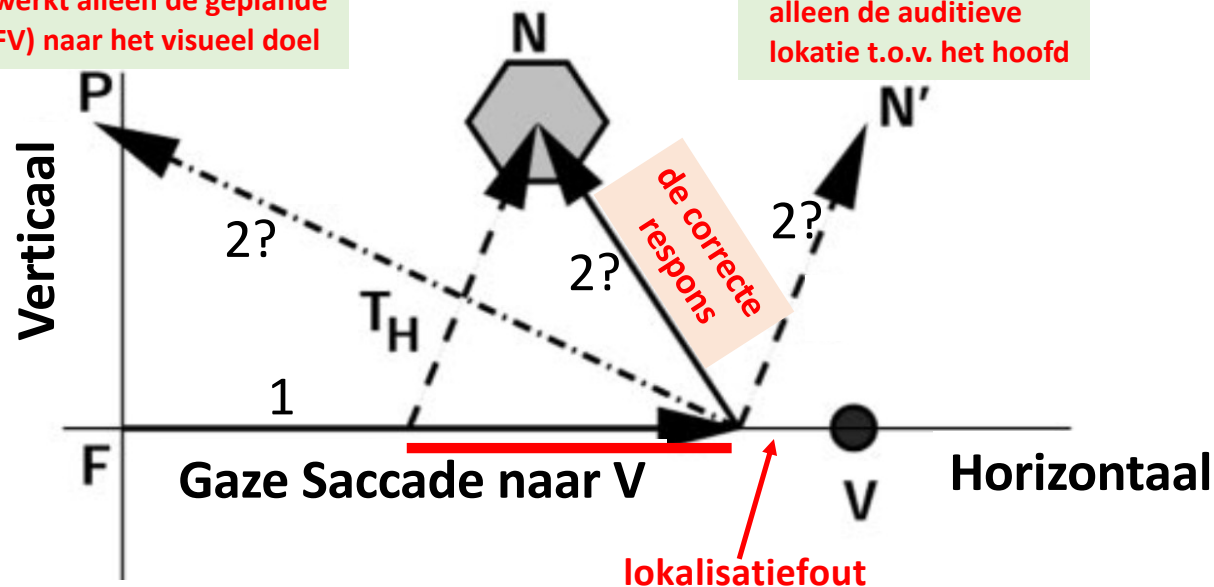


## Voorbeeld: Lokalisatie van een auditief doel tijdens snelle oog-hoofd saccades



foute respons:  
brein verwerkt alleen de geplande saccade (FV) naar het visueel doel

foute respons:  
brein verwerkt alleen de auditieve lokatie t.o.v. het hoofd



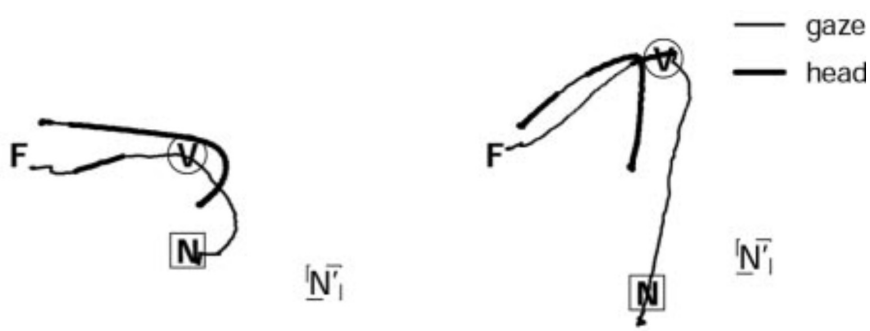
Om dit correct uit te kunnen voeren moeten de hersenen:

de feitelijke oog- en hoofd-beweging meenemen **nà** aanbieden van het geluid (niet de 'geplande' naar V)

Dit is een **zeer complexe taak**:

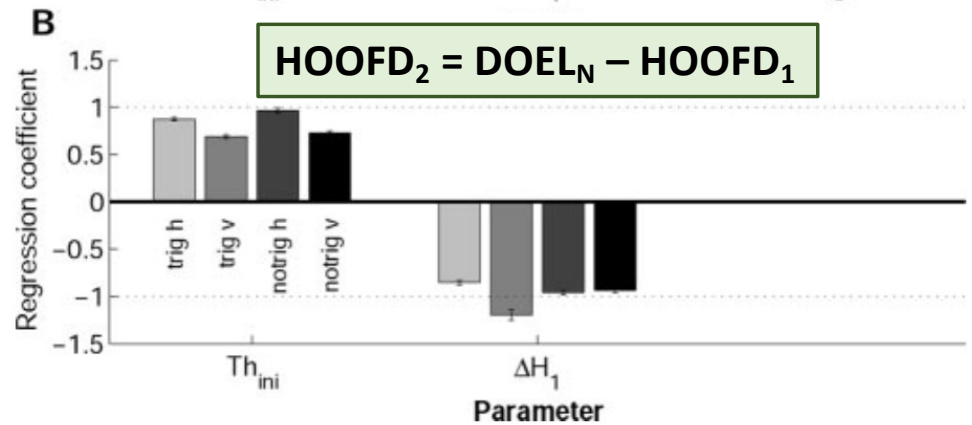
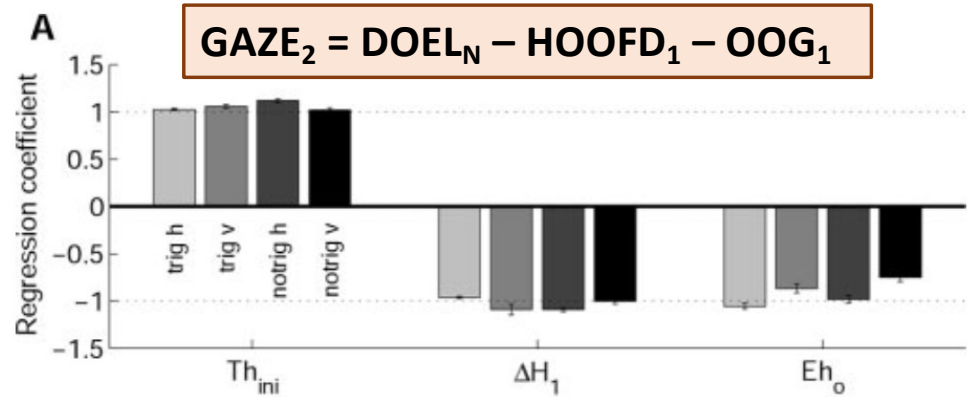
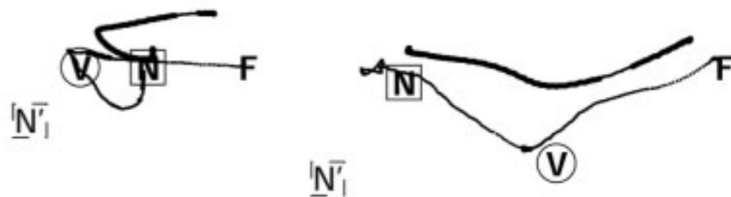
- de lokalisatiefout naar V is niet vooraf bekend
- het moment (en lokatie) van het geluid is niet vooraf bekend
- de snelheid van de oog-hoofd saccade is niet vooraf bekend
- de bijdrage van het hoofd is niet vooraf bekend

# Lokalisatie van een auditief doel tijdens snelle oog- hoofd saccades



enkele voorbeeldresponsies

10 deg



➔ De samenwerking tussen ogen (visueel), hoofd (auditief), en vestibulair systeem is nagenoeg perfect!

## Ons audiovisueel-vestibulair lab in Nijmegen:



### Voorbeeld experiment:

Doelen kunnen met de proefpersoon meedraaien (**vast aan de stoel**), of **vast in de ruimte** worden aangeboden (op de wand).

**Vraag:** (hoe) kunnen de hersenen deze situaties van elkaar onderscheiden?



### Unieke vestibulaire stoel:

Twee onafhankelijke rotatie-assen  
Alle zes halfcirkelvormige  
kanalen kunnen worden bemeten

### Ruimte:

Echovrij en volledig donker

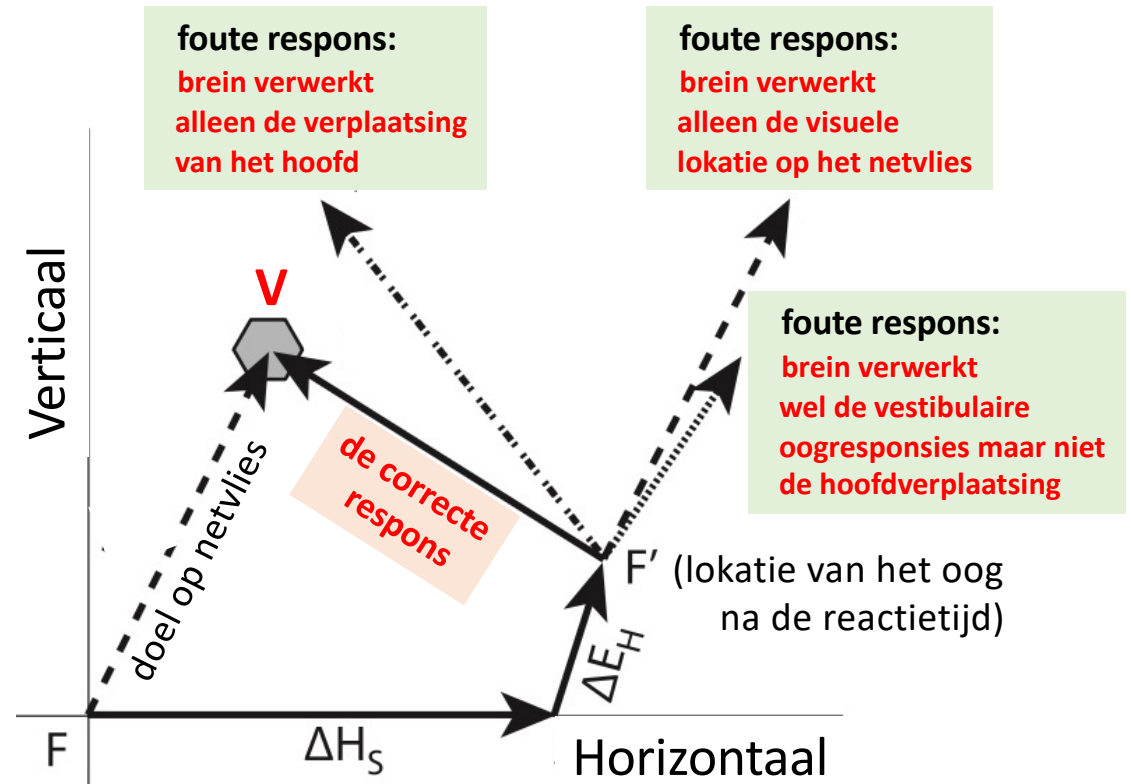
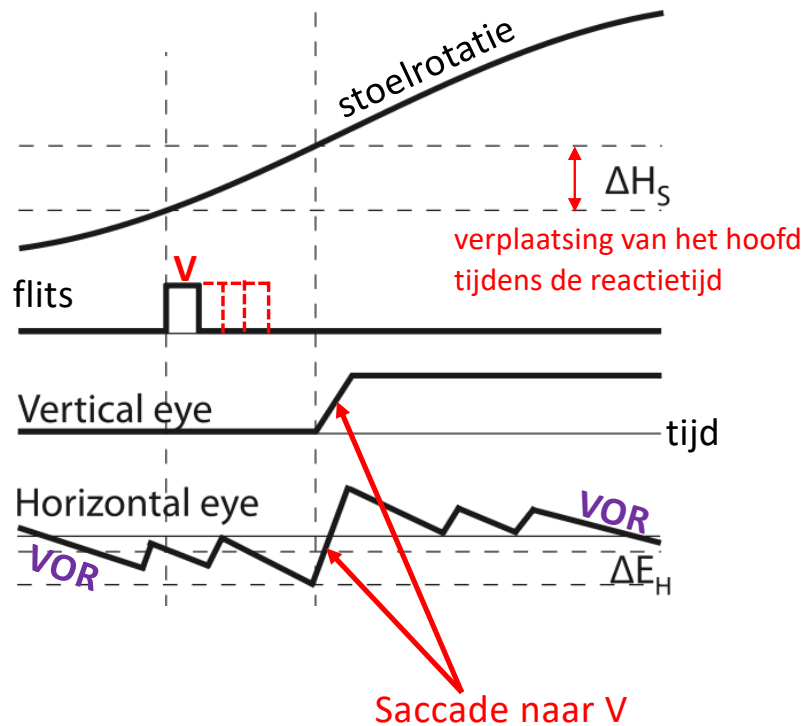
### Oogbeweging:

Infrarood precisiecamera  
(EyeSeeCam, beide ogen)

### Experimenten:

Snelle oog- (+hoofd) beweging  
naar het doel (visueel,  
auditief, of beide) tijdens  
willekeurig aangebrachte  
lichaamsrotaties.

# Lokalisatie van een visueel doel tijdens vestibulaire stimulatie: een grote uitdaging! (flits draait met de stoel/hoofd mee, of is vast op de muur/wereld)



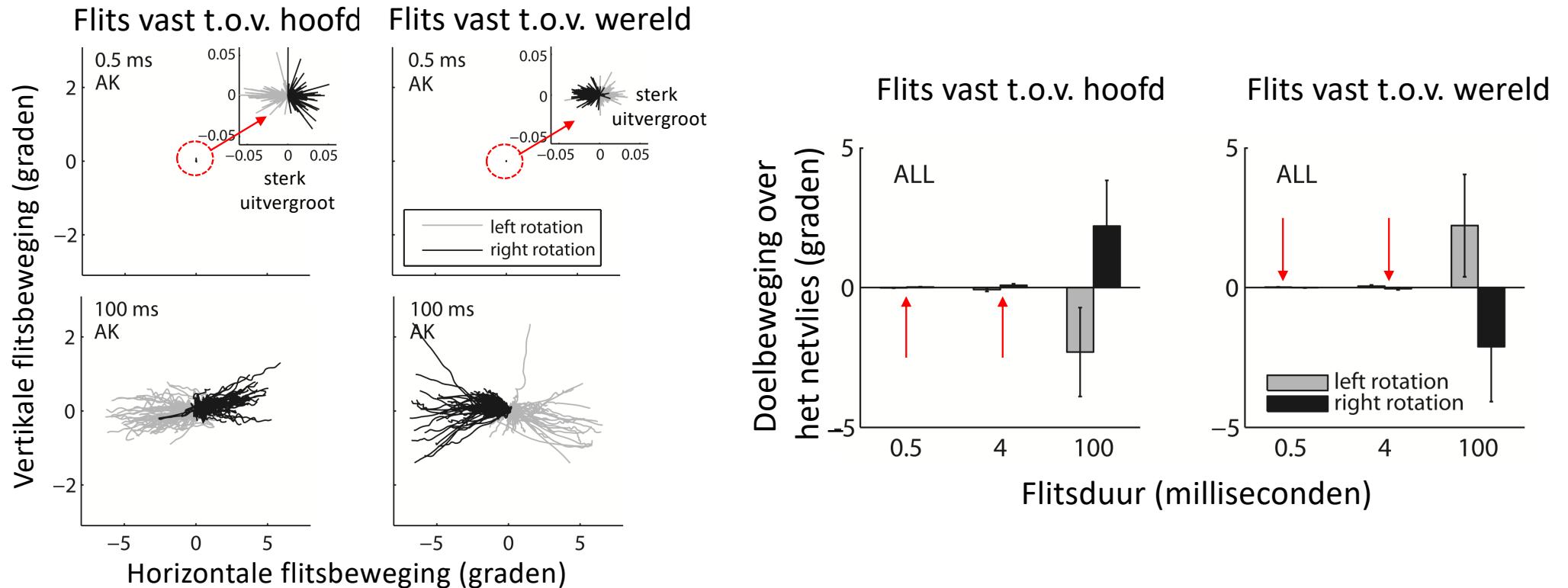
De **correcte respons** moet rekening houden met:

- de lokatie van de lichtflits op het netvlies
- de netto oogbeweging door de evenwichtsreflex (VOR)
- de passieve verplaatsing van het hoofd door de stoelrotatie  
(maar **alleen** als de flits vast staat in de wereld!)

# Lokalisatie van een visueel doel tijdens vestibulaire stimulatie: resultaten



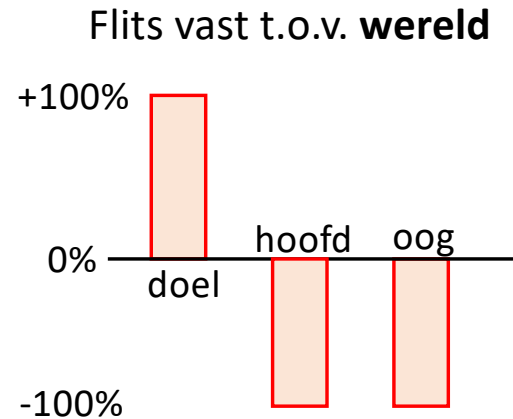
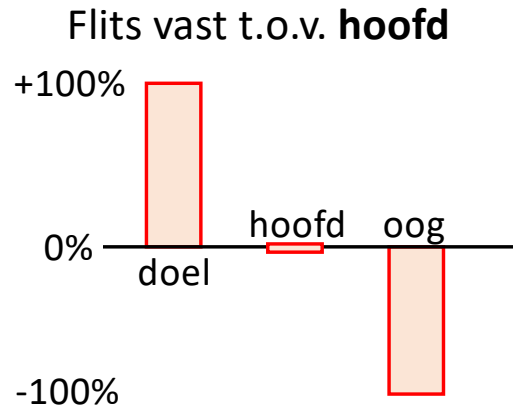
## 1. Sleepbeweging van de flits over het netvlies, a.g.v. de VOR (het oog is als een bewegende camera...)



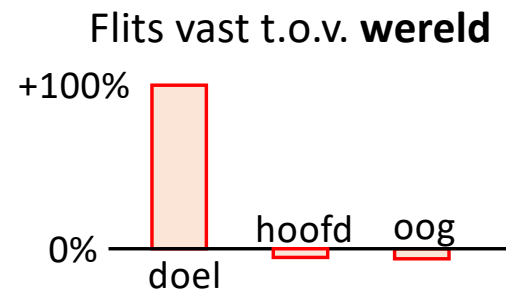
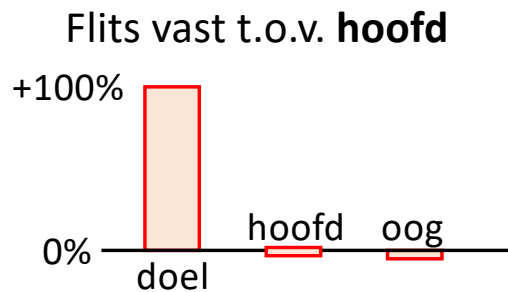
Voor flitsduren korter dan  $\pm 5$  ms kan het brein **geen verschil** meten in de (sleep-)beweging van het doel over het netvlies voor hoofd-vaste vs. wereld-vaste doelen.



Als het brein het onderscheid kan maken tussen wereld-vaste en hoofd-vaste doelen:  
**altijd de correcte respons (flitsen > 5 à 10 ms)**



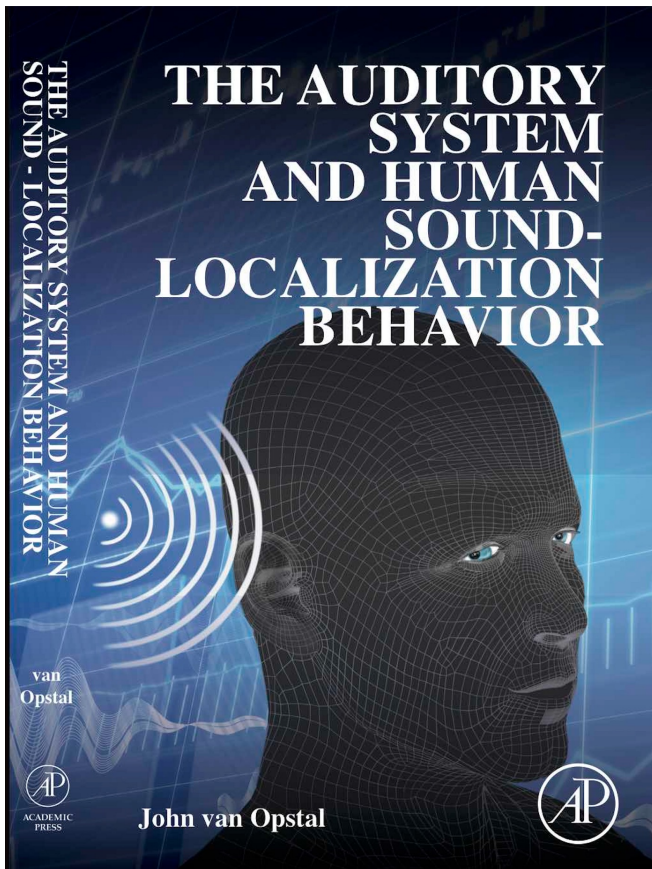
Als het brein geen onderscheid kan maken tussen wereld-vaste en hoofd-vaste doelen:  
**altijd een foute respons: verwerkt alléén de lokatie op het netvlies (flitsen < 5 ms)**  
(ook al weet het precies hoeveel hoofd en oog hebben bewogen!)



**KORTOM:**

De hersenen maken zeer geavanceerde beslissingen over waar doelen zich t.o.v. ons bevinden in zeer complexe en dynamische situaties.

Het kan dit zeer precies en op tijdschalen van honderdsten van een seconde, ondanks de beperkingen van onze sensorische systemen.



Elsevier Academic Press, 2016

# DANK VOOR UW AANDACHT!

Meer informatie op mijn website: <https://www.mbfys.ru.nl/~johnvo>

Radboud Universiteit

