

# Fotonisch Reservoir Computing met een netwerk van gekoppelde optische halfgeleiderversterkers

*Kristof Vandoorne*

*promotoren: Peter Bienstman en Joni Dambre*

Auditorium E, Plateau, Gent  
28-09-2011

(a) William Turner

(b) John Constable

(c) Monet

(d) Cezanne



(a) William Turner: The Grand Canal, Venice

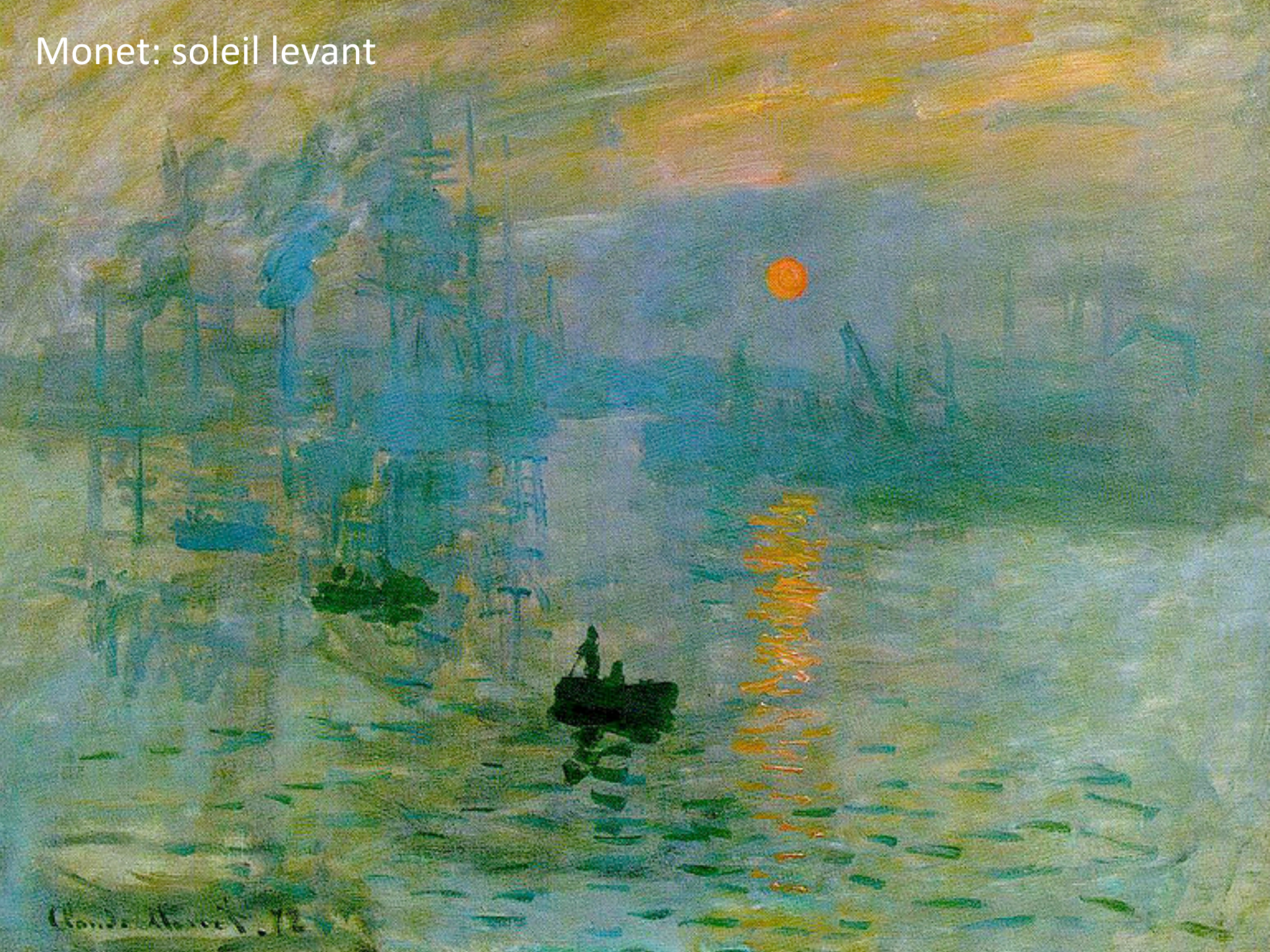




William Turner:  
berth to be broken up

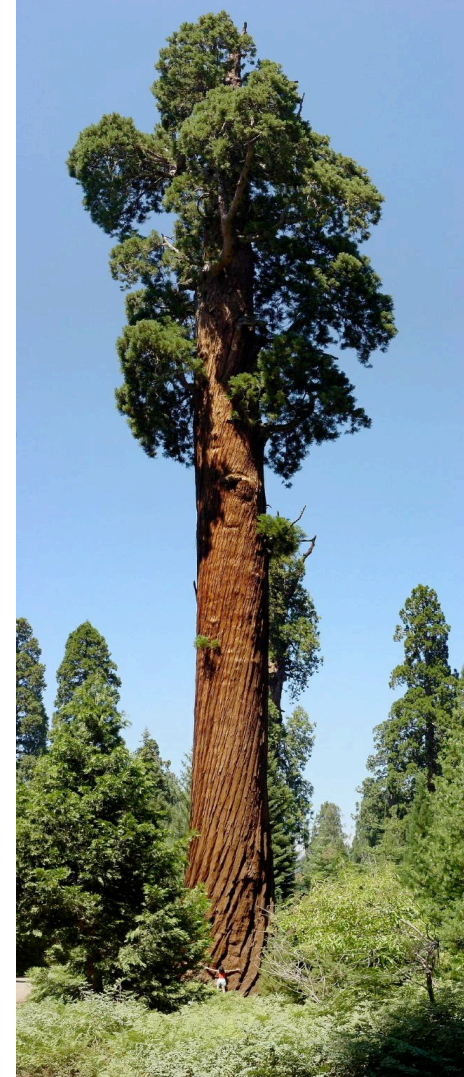
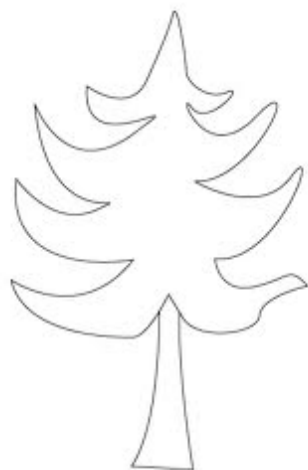
The Fighting "Temeraire" tugged to her last

Monet: soleil levant

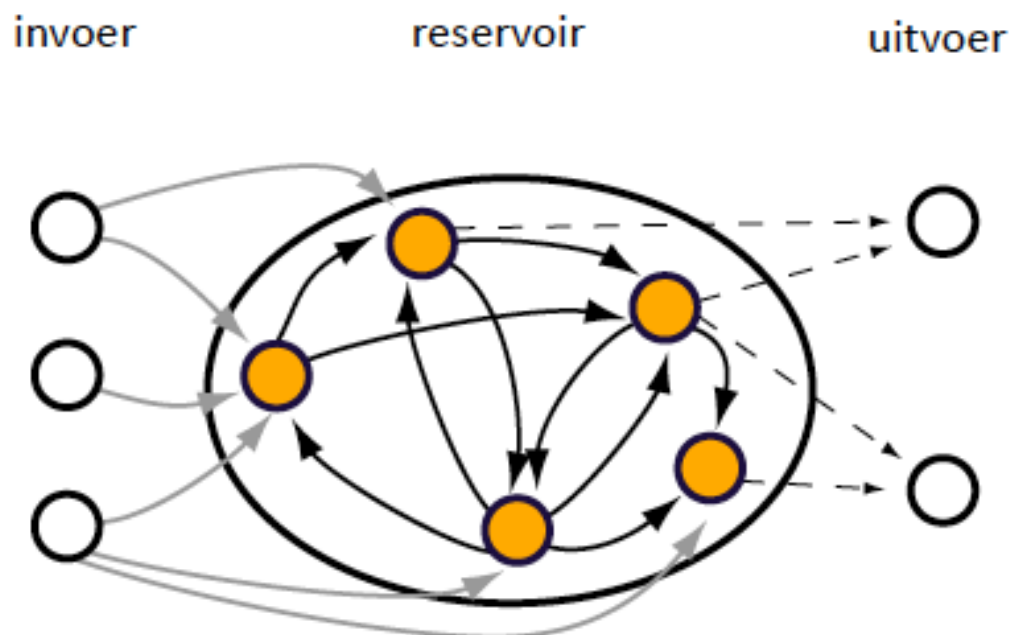


Mensen leren uit voorbeelden en veralgemenen

Het is niet makkelijk om voor dat type probleem 'exacte' oplossingen te vinden



Reservoir computing is a method, inspired by how the brain works, to solve various classification and recognition problems.



Is een reservoir dat met licht werkt interessant?





Is het magie?



reservoir computing

optische halfgeleiderversterkers

spraakherkenning met licht en reservoir computing

Computers zijn heel goede rekenmachines



100110000101010001...

en werken met duidelijke methodes die stap voor stap bepaald zijn (algoritmes)

**begin**

**doe** iets tot een bepaalde voorwaarde vervuld is  
definieer 'iets'

**einde**

**doe** stap 1

**doe** stap 2

**doe** stap 3

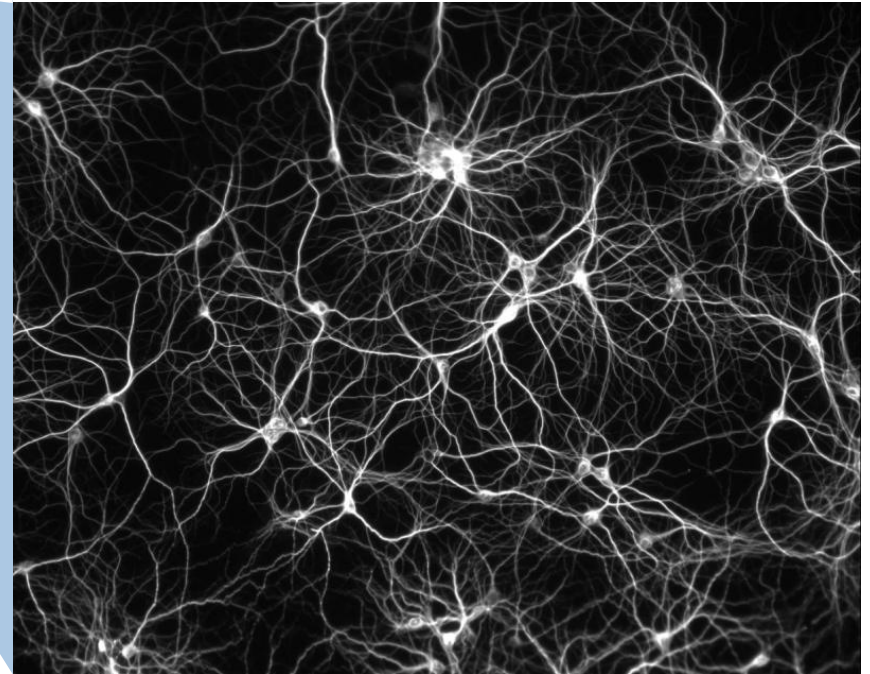
...

**einde**

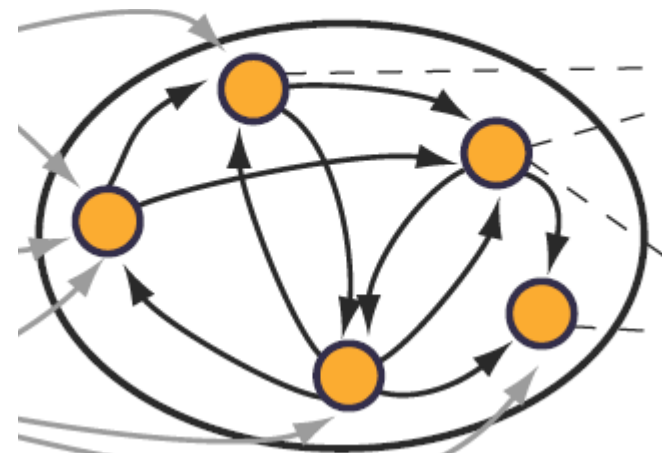
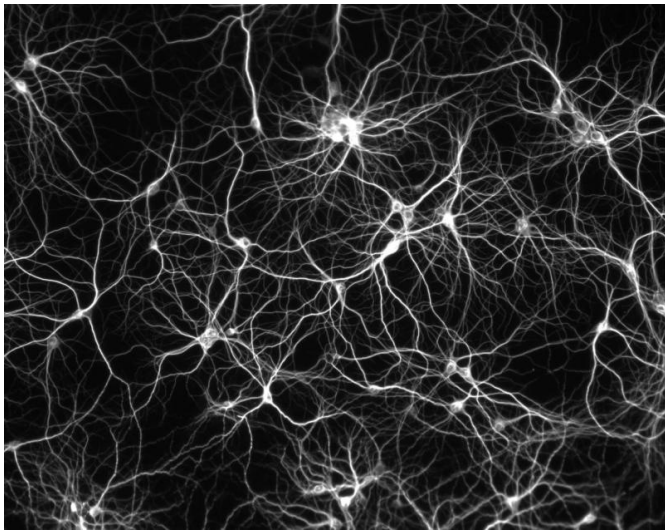
## Mensen leren uit fouten via straf of beloning en uit voorbeelden



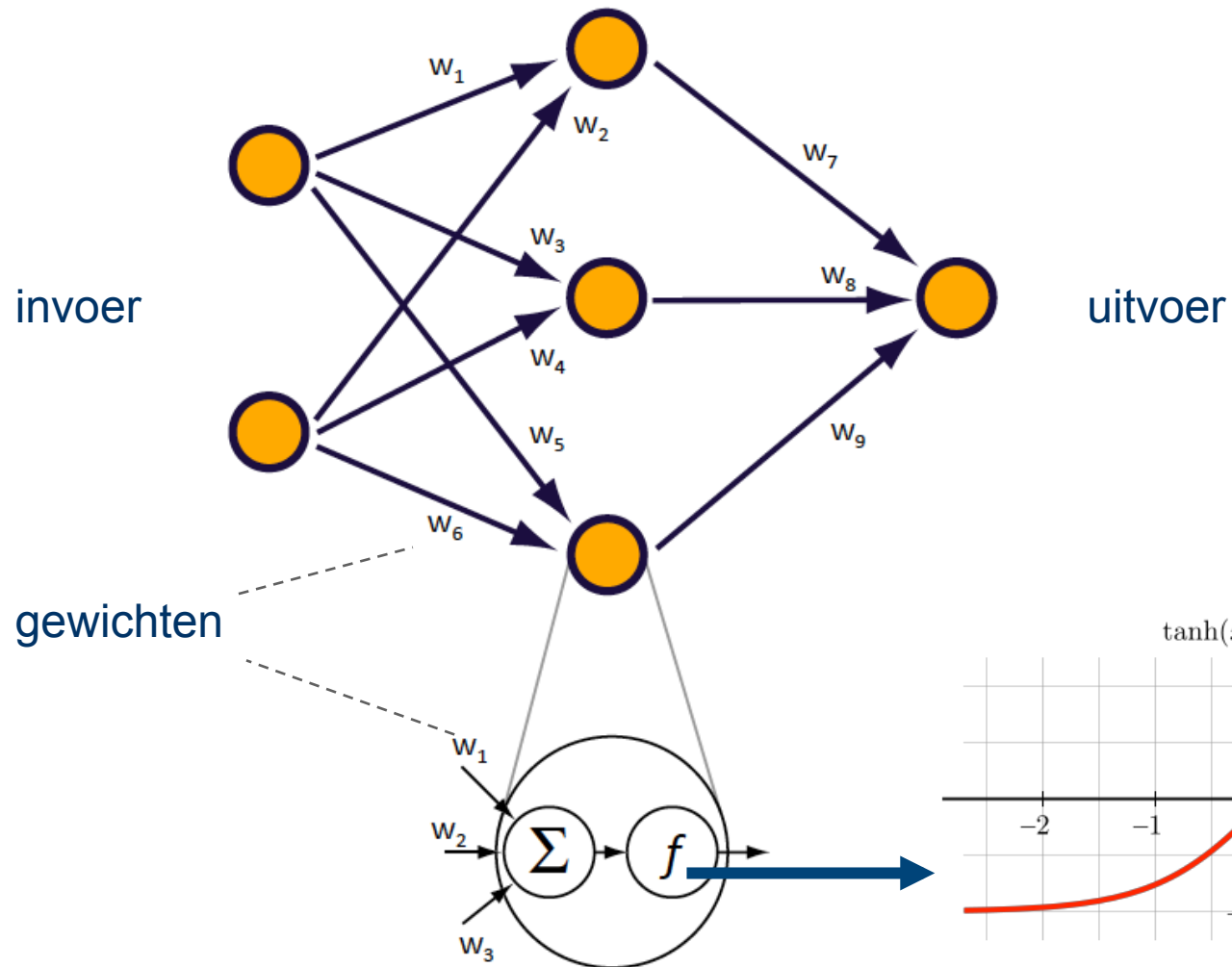
Mensen kunnen dingen leren omdat ze een brein hebben



Een neurale netwerk probeert de essentie van neuronen te vatten in een model

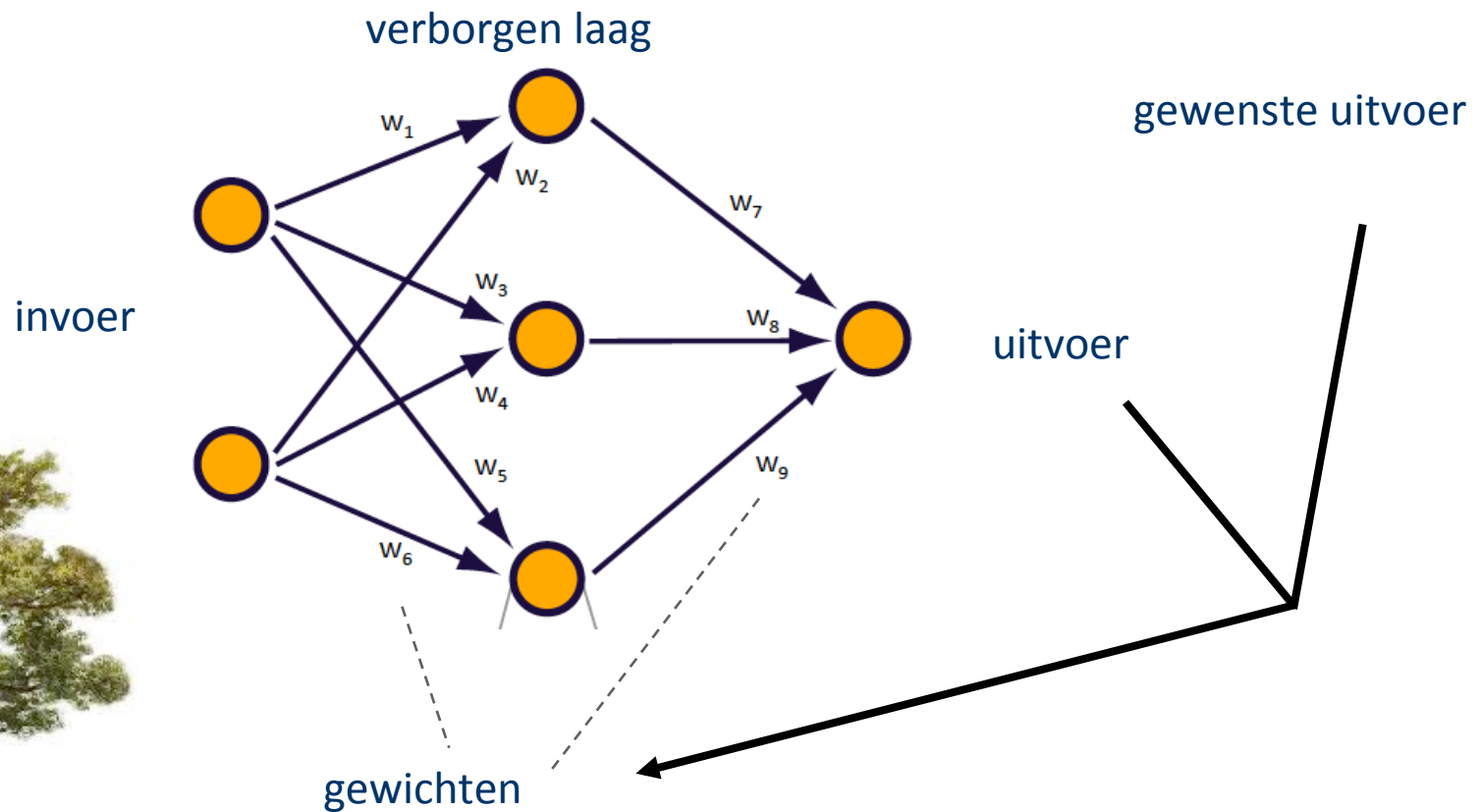


vaak worden dergelijk netwerken vereenvoudigd door geen terugkoppeling te gebruiken

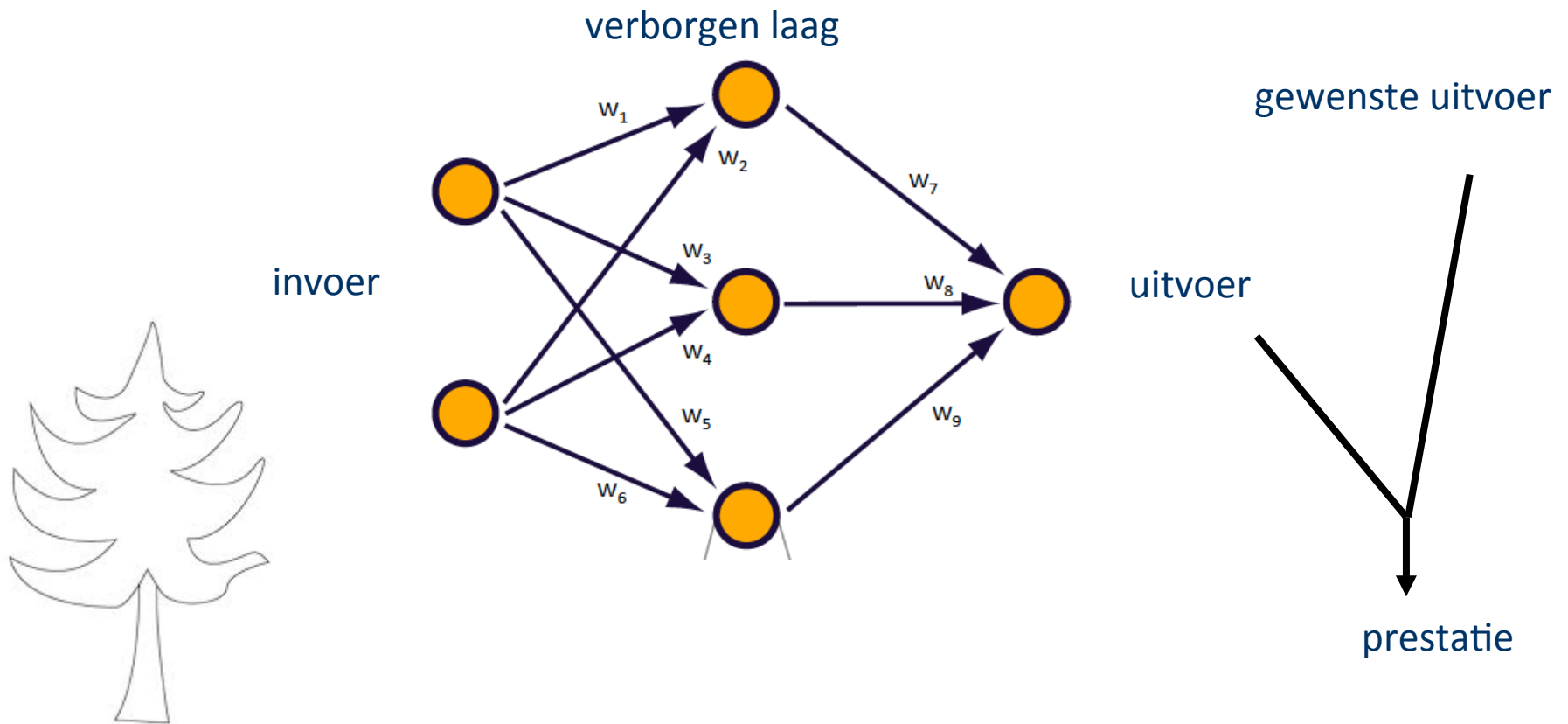




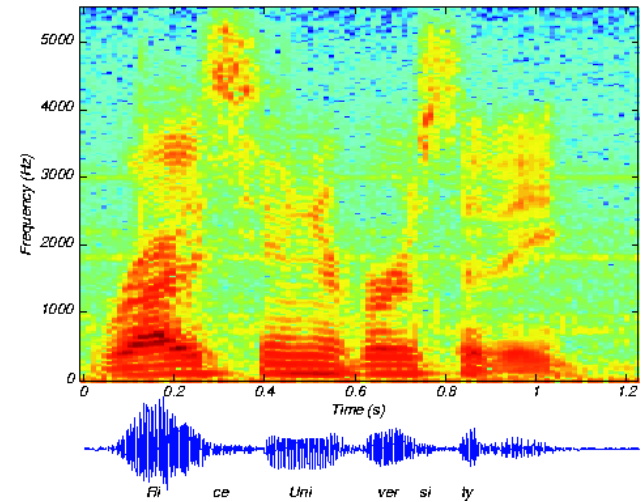
Het 'leren' van het netwerk gebeurt door het aanpassen van de gewichten van de verbindingen



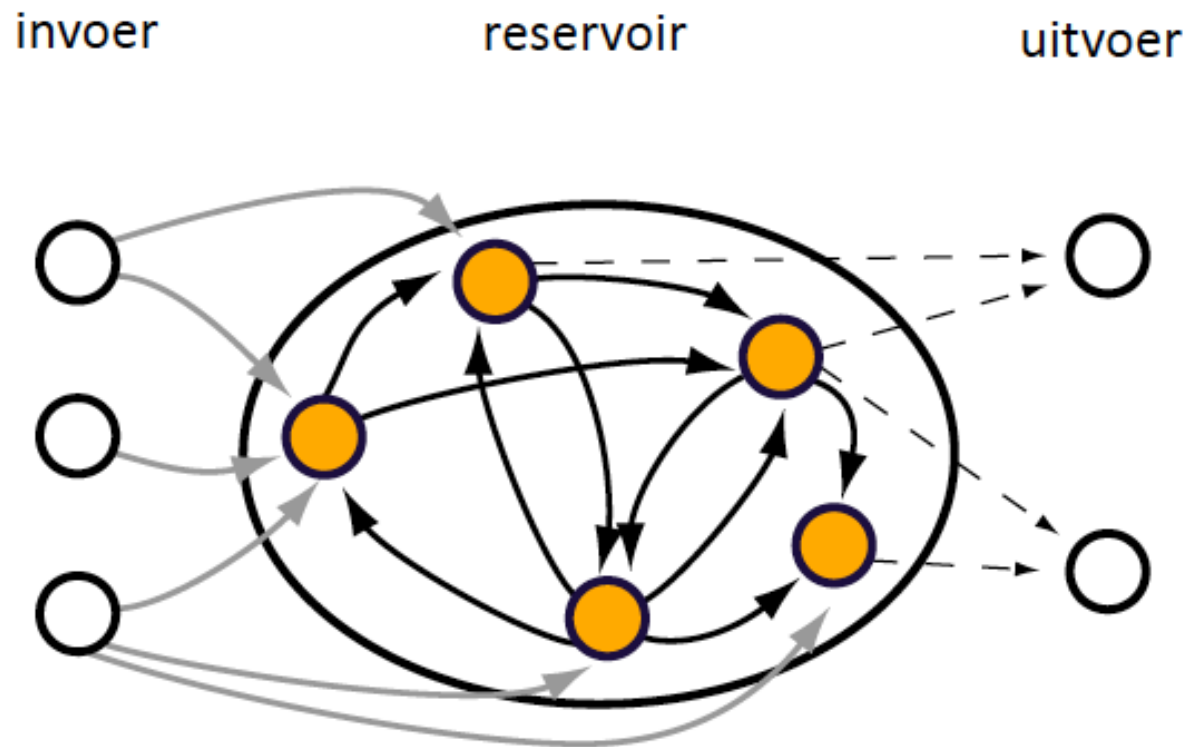
Hetzelfde getrainde netwerk wordt dan getest op andere (niet eerder geziene) invoer



Veel problemen in de echte wereld zijn niet statisch en hebben nood aan geheugen in het systeem (bv. door terugkoppeling)



Netwerken met terugkoppeling zijn moeilijk te trainen.  
Reservoir computing is een elegante oplossing en splitst het netwerk in een reservoir en een (lineaire) uitleesfunctie



Elegant maar waarom zou het werken?

Je brengt gewoon dingen naar een hoger dimensionale ruimte waar ze makkelijker in klassen te scheiden zijn



+

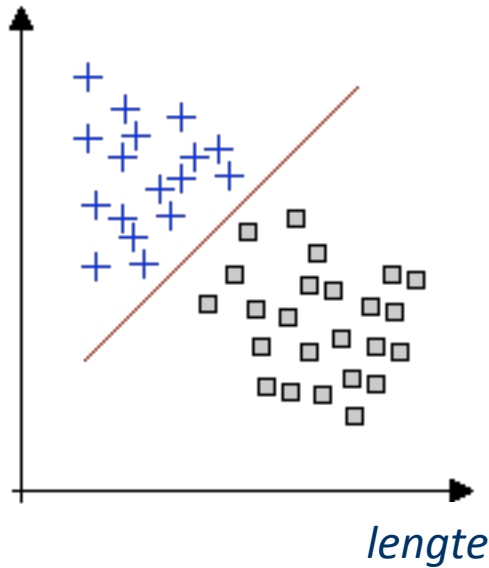


□



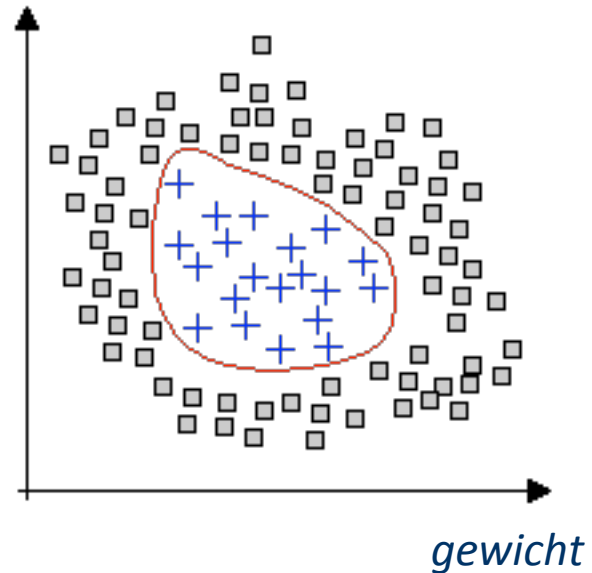
*Aantal vinnen*

**lineair**

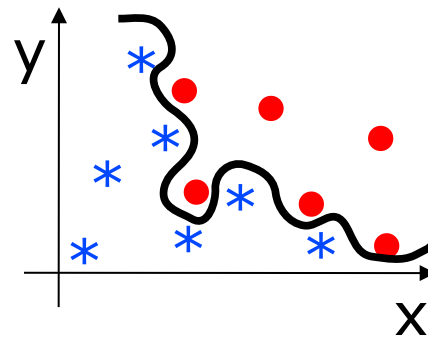


*breedte*

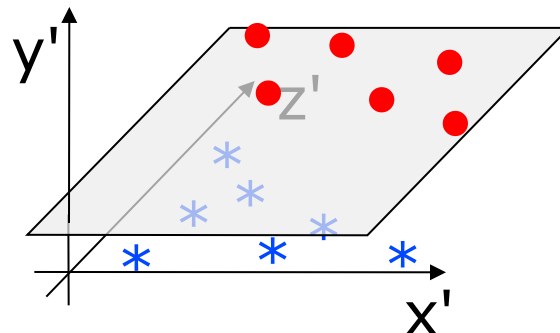
**niet lineair**



Door met een truc de informatie naar een hoger-dimensionale ruimte te projecteren kan scheiden makkelijker lineair gebeuren omdat verschillende klassen de neiging hebben om samen te clusteren

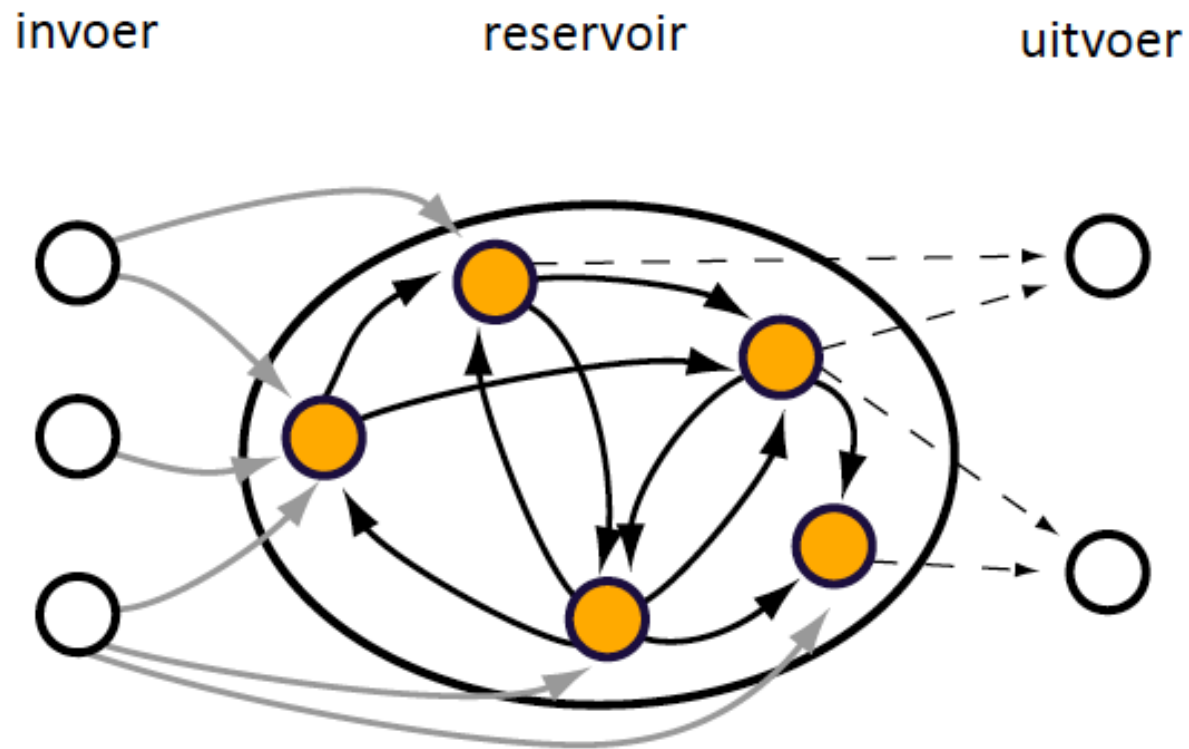


naar meer dimensies

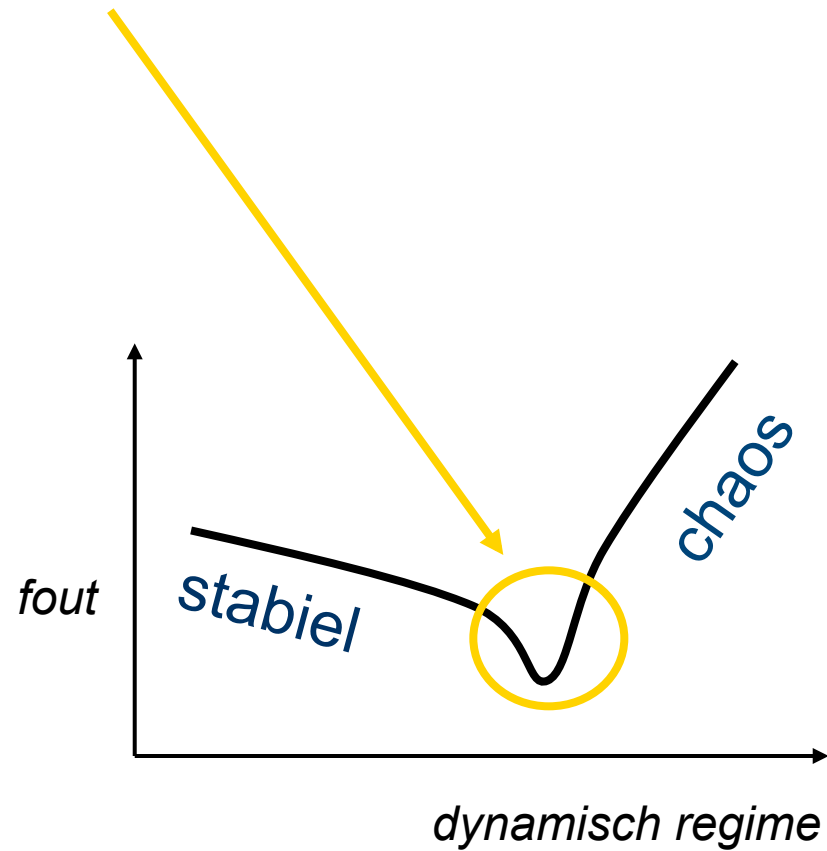




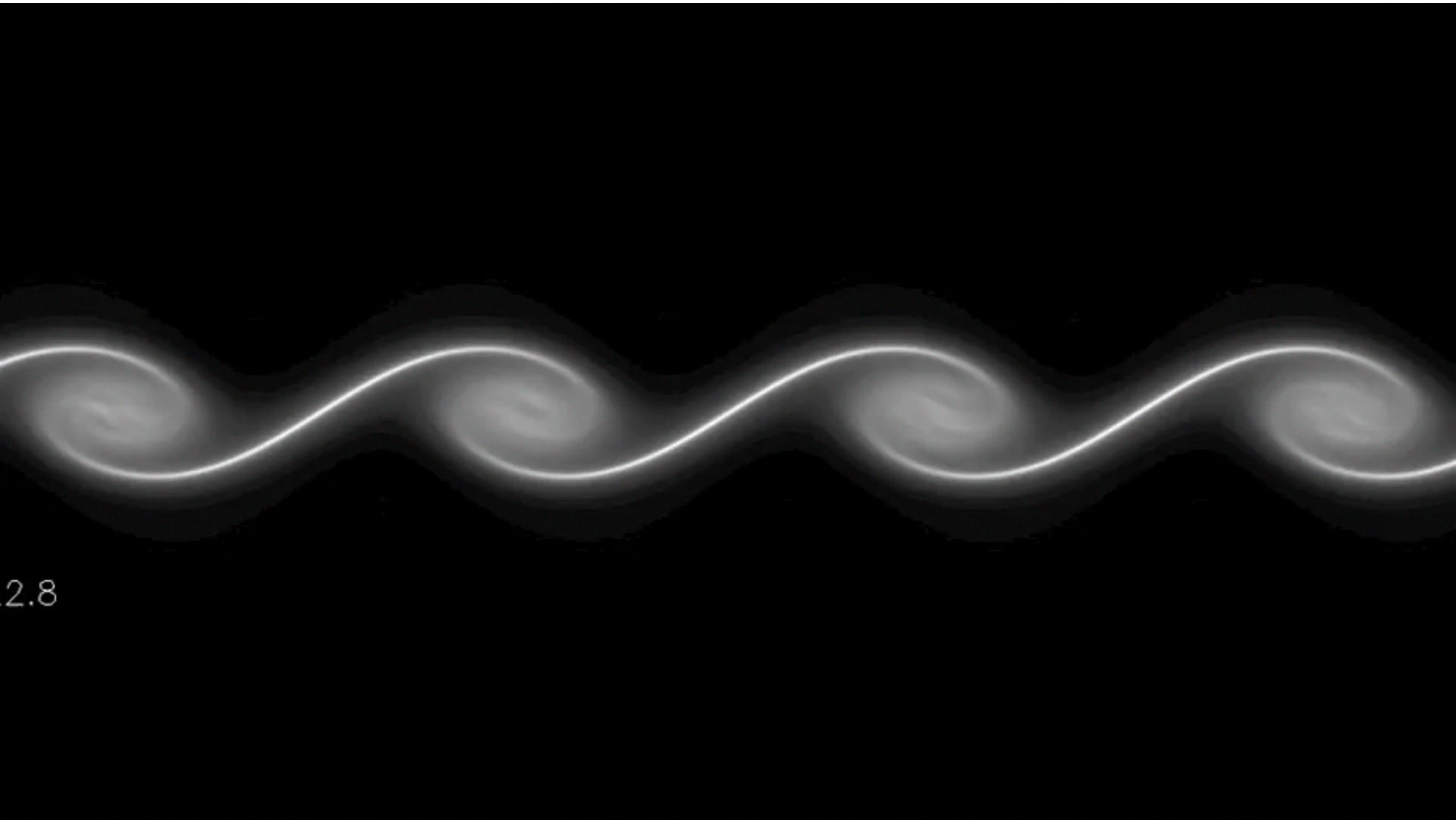
en dat is net wat het reservoir doet.



# Reservoirs blijken best te werken op de rand van stabiliteit



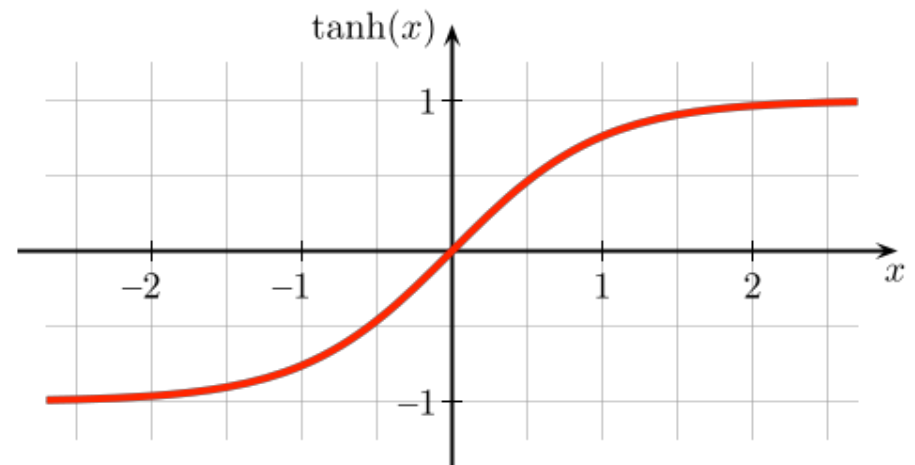
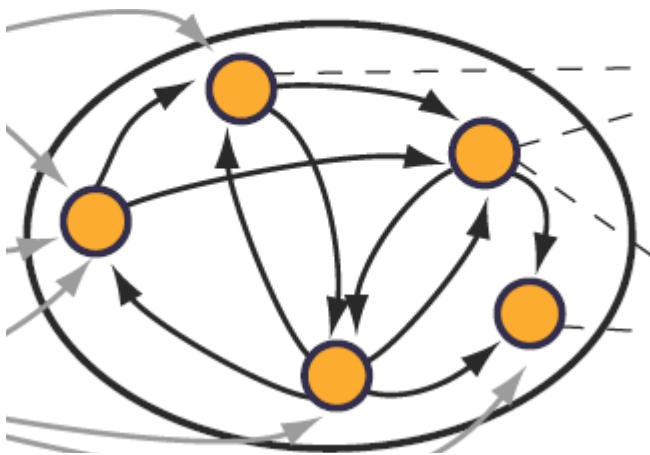
figures taken from B. Schrauwen



2.8

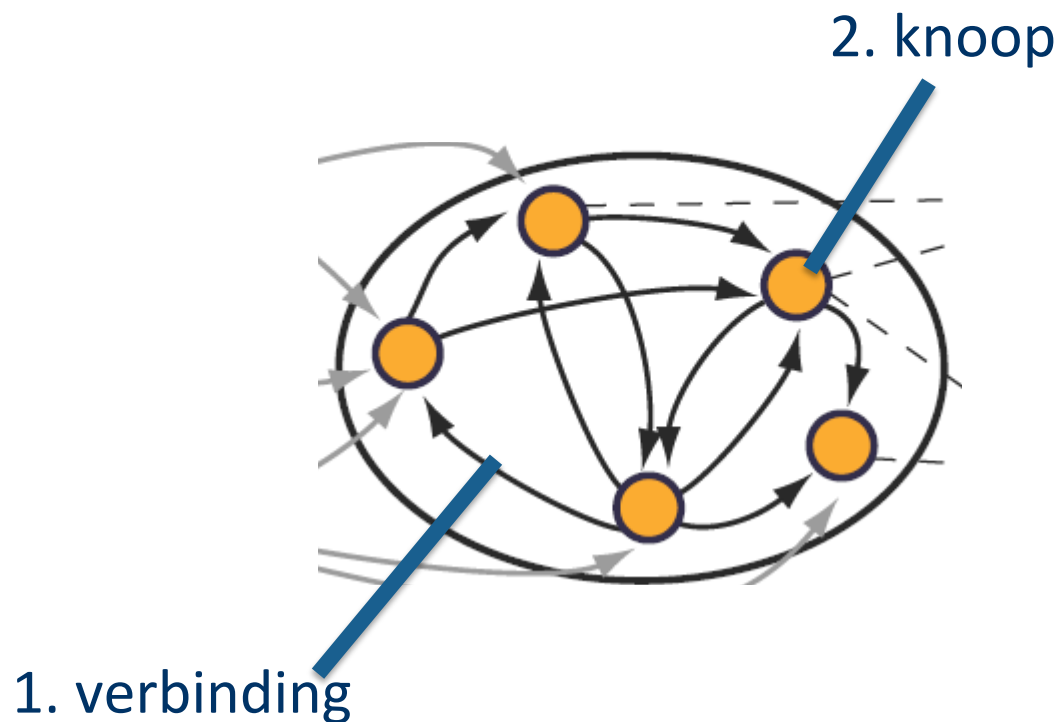
*figures taken from <http://www.cora.nwra.com/dave/KHImovies.html>*

Een van de klassieke implementaties van reservoir computers is met random netwerken en een tangens hyperbolicus als functie in de knopen



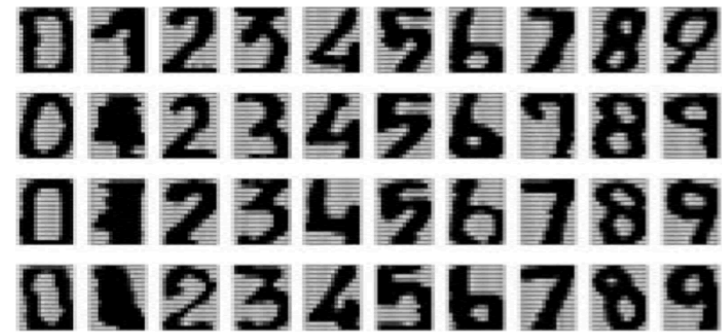
*Pictures from <http://wapedia.mobi/de/Hyperbelfunktion>*

Dit zegt ons dat we twee elementen nodig hebben:



# Reservoir computing kan gebruikt worden voor vele applicaties spraakherkenning

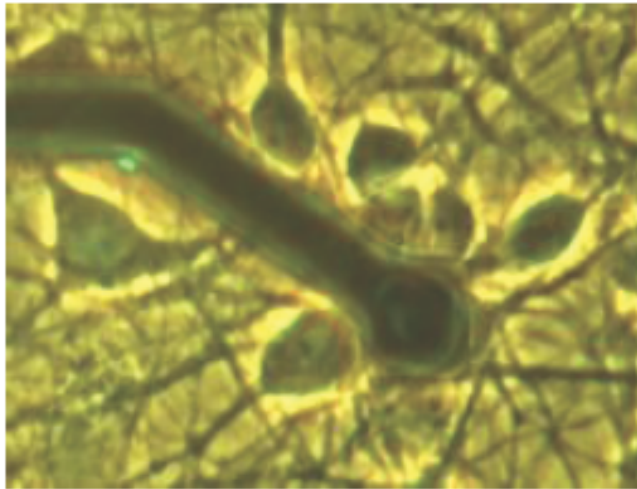
handschriftherkenning



controle van een robot

*figures taken from H. Jaeger*

Eigenlijk kunnen heel veel dynamische systemen gebruikt worden als reservoir



gekweekte neuronen



een emmer met water

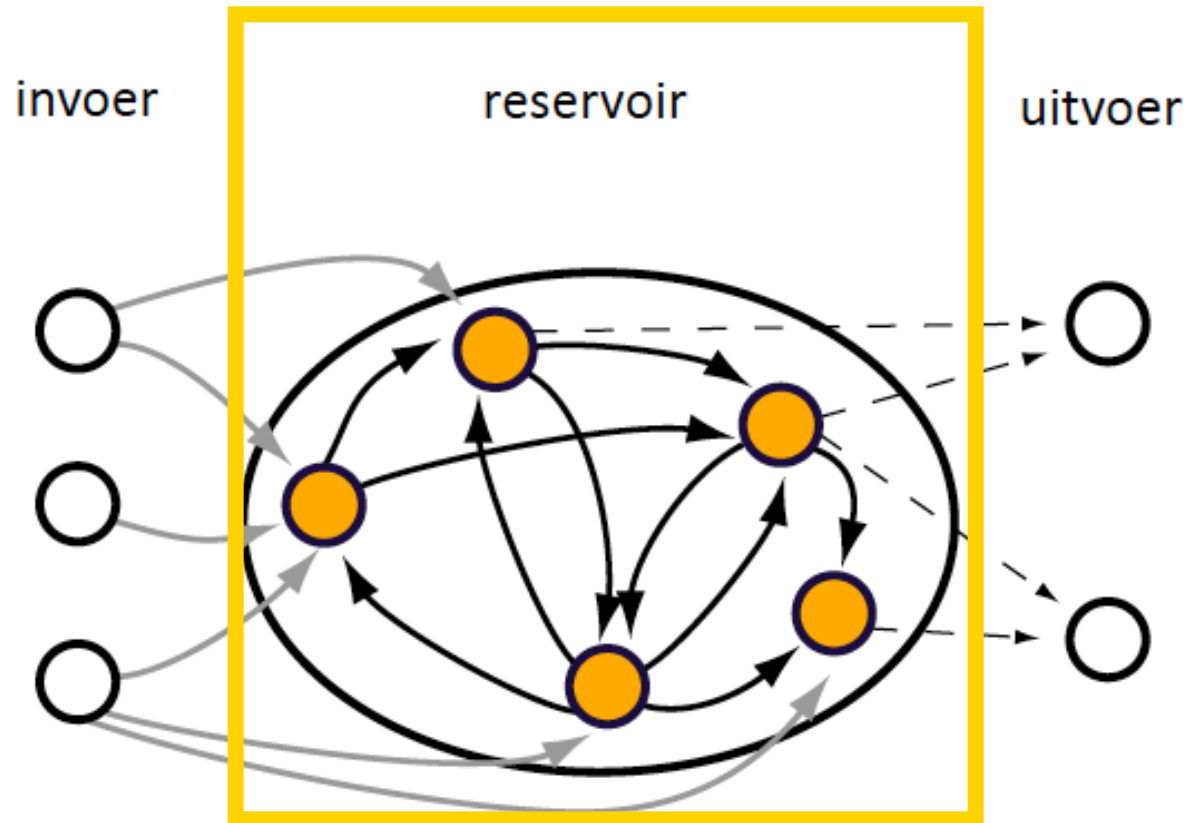
reservoir computing

Fotonica en optische halfgeleiderversterkers

spraakherkenning met licht en reservoir computing



We willen het reservoir met licht doen werken



En een paar goede redenen zijn

omdat het een rechtstreekse implementatie is  
*en daarom zuiniger en sneller*

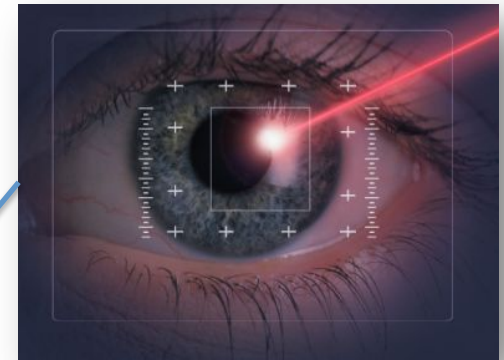
waarom niet?

licht heeft allerlei eigenschappen die elektronica niet heeft  
en die het zo uitdagend en interessant maken

**energie**



**biomedisch**



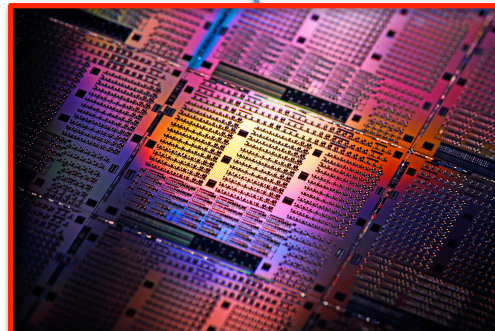
**verlichting**



**Fotonica**



**materiaalbewerking**

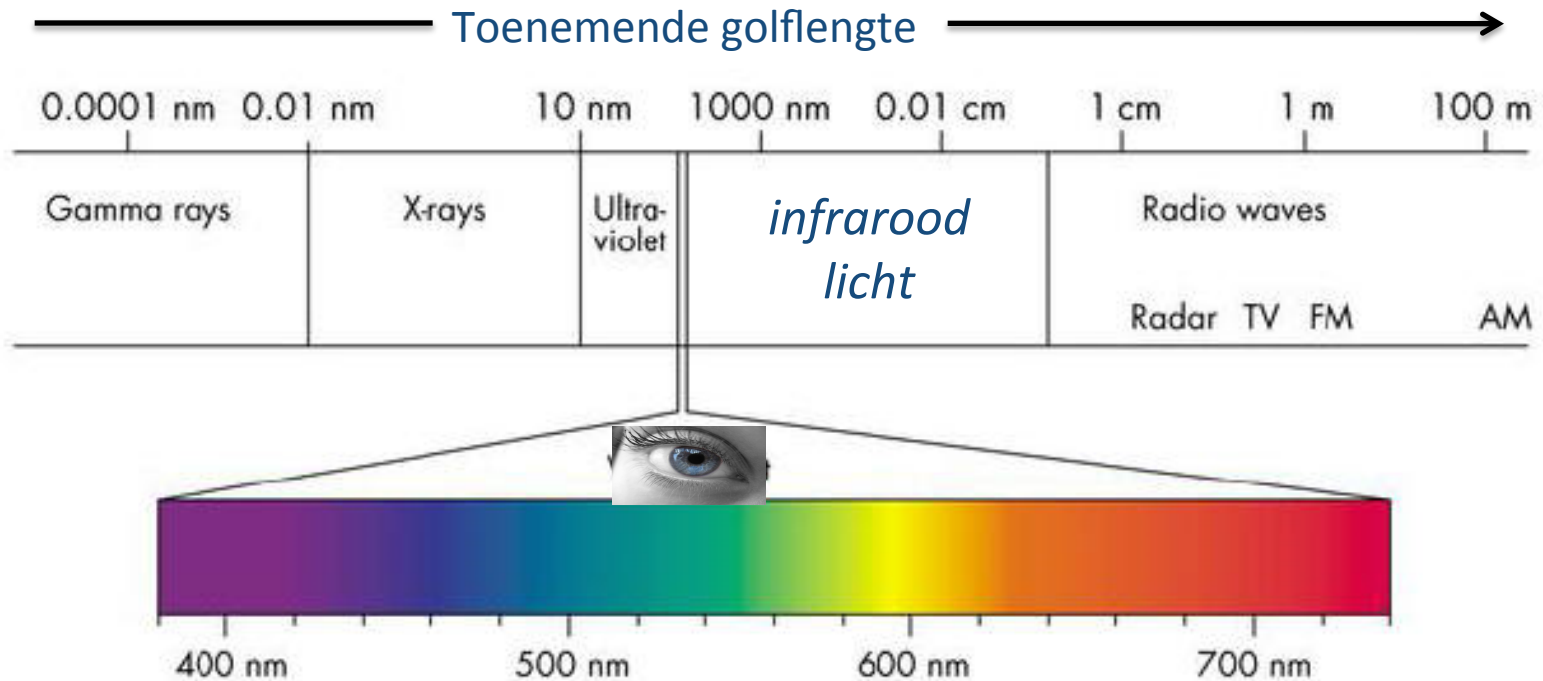
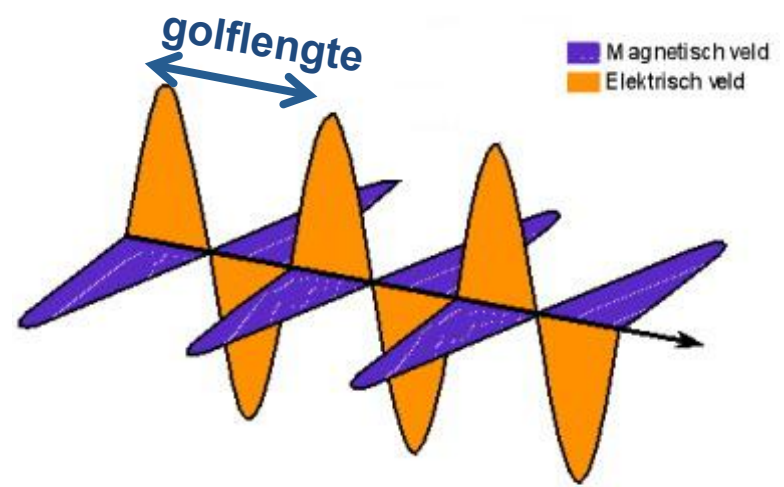


**informatietechnologie  
& telecommunicatie**

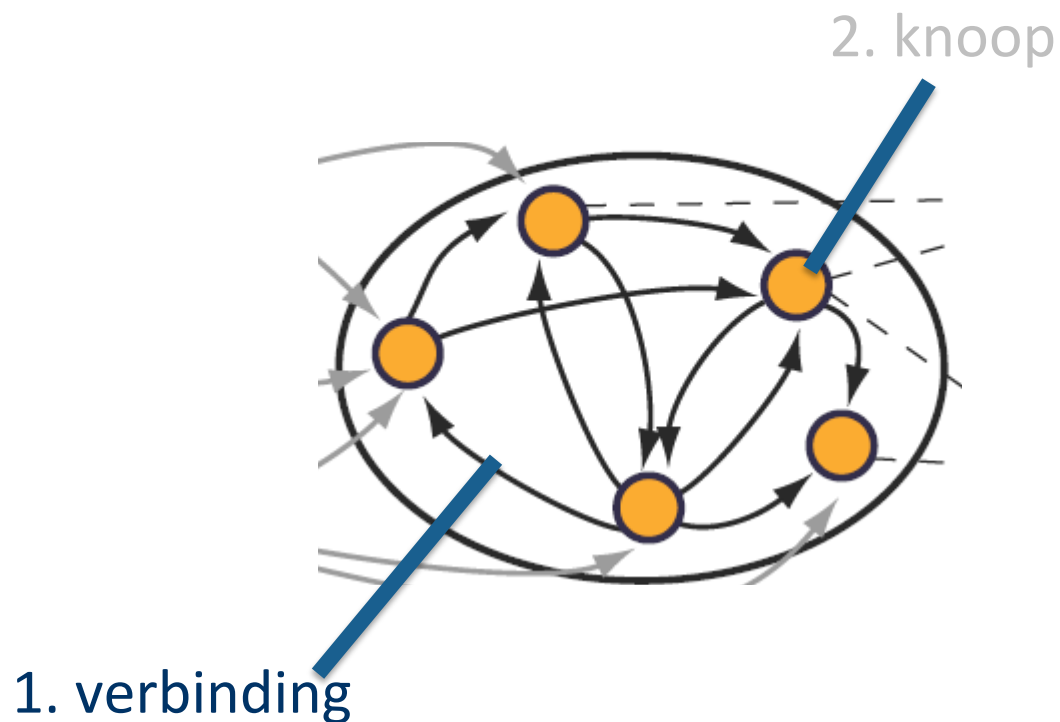


**display, projector**

Licht = Elektromagnetische golf  
Kleur = Golflengte



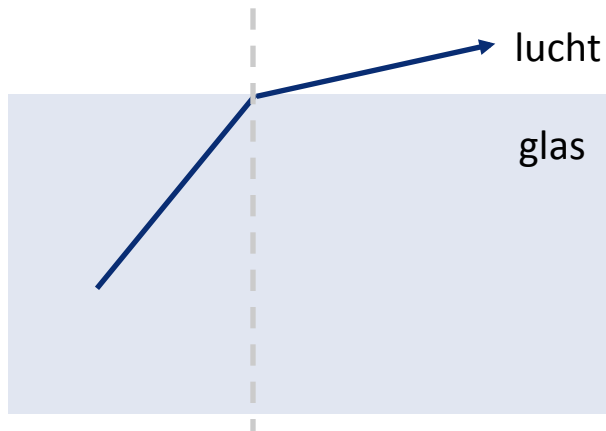
Dit is ons eerste element: de verbinding



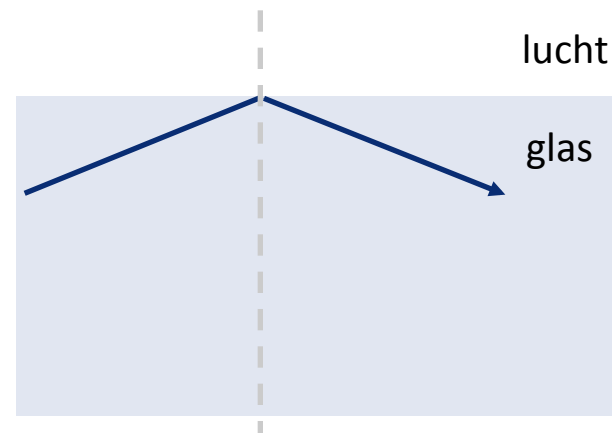
Lichtsnelheid  $c$  in vacuum = 299 792 km/s

Lichtsnelheid in materiaal neemt af met brekingsindex  $n = c/n$

$$n_{\text{glas}} = 1.44$$



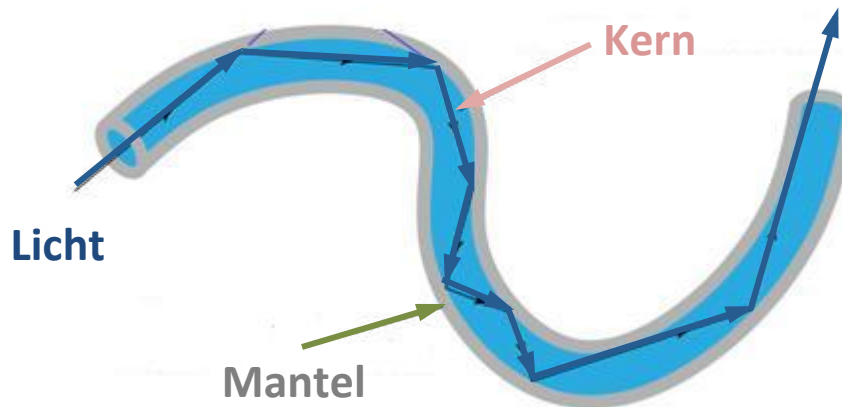
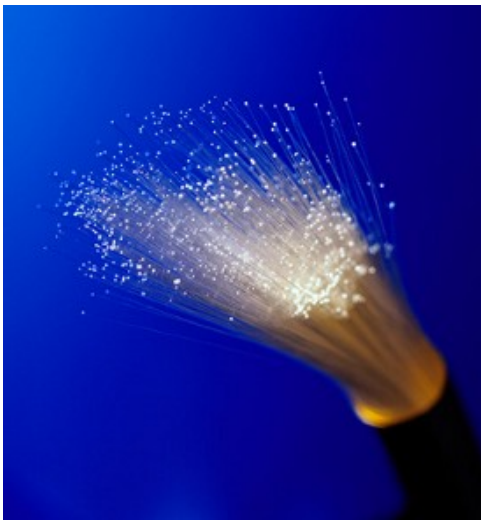
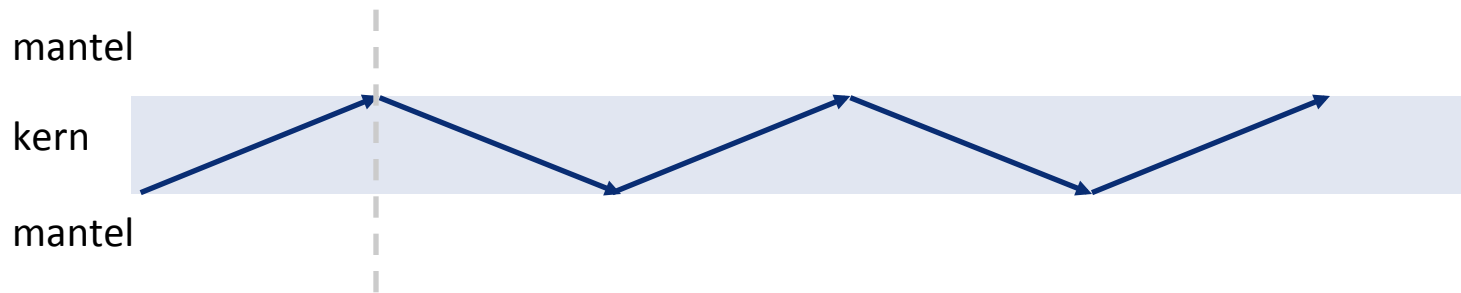
Hoek te groot: licht ontsnapt uit materiaal



Totale interne reflectie:  
alle licht blijft in materiaal

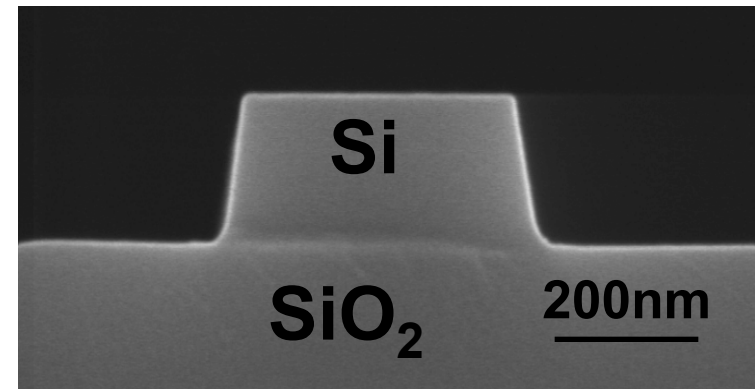
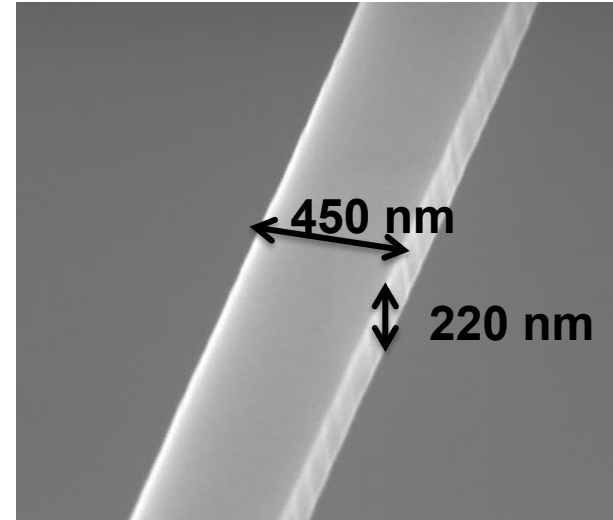
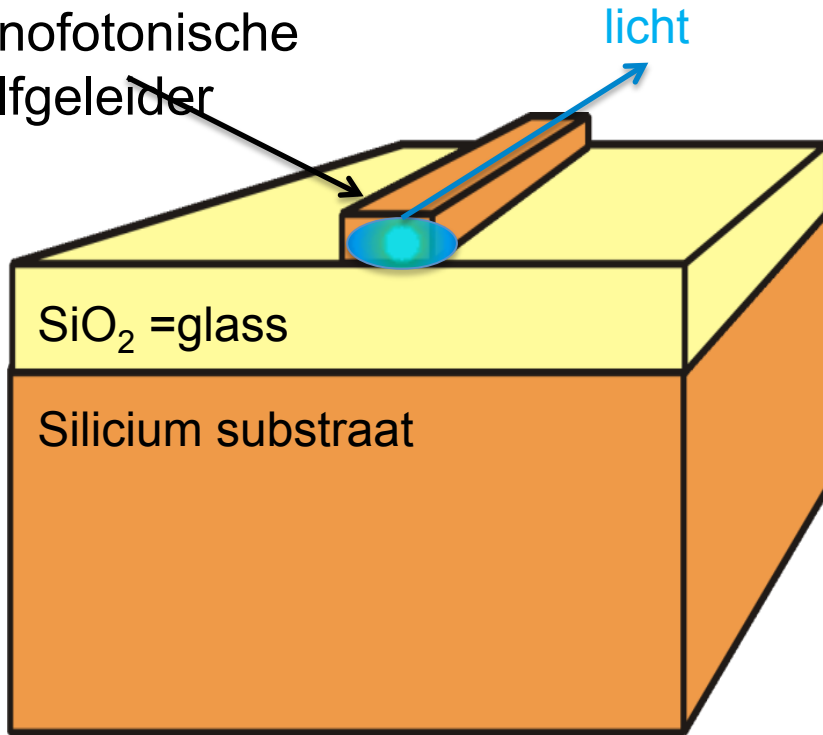
*Wet van Snellius*

# Licht kan opgesloten worden in materiaal=golfgeleider



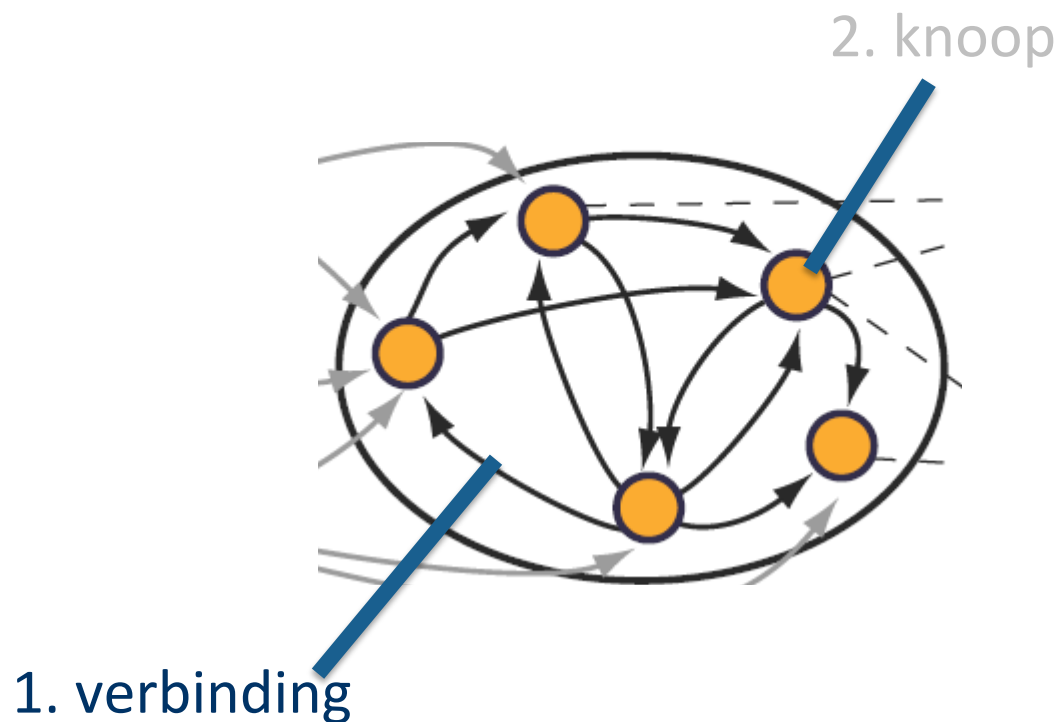
# Nanofotonische golfgeleider op silicium chip = miniaturversie van optische vezel

Silicium  
nanofotonische  
golfgeleider

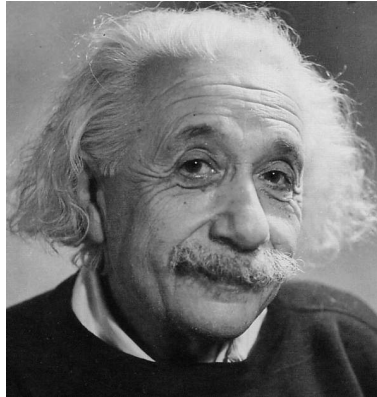




Dit is ons eerste element: de verbinding



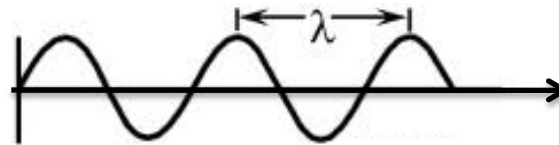
# Deeltje-golf dualiteit



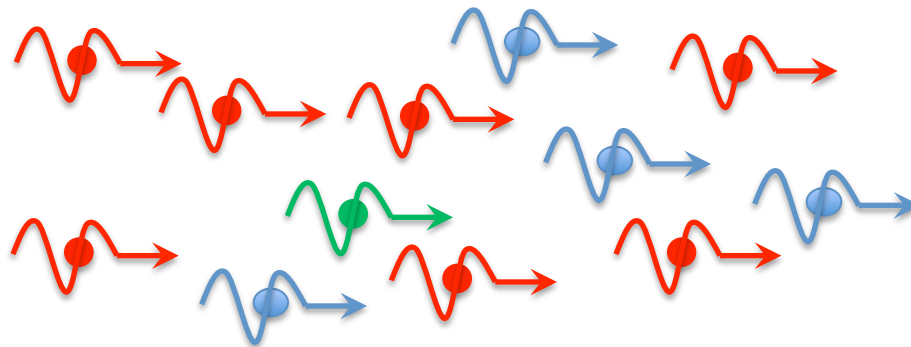
Licht is niet alleen golf,  
ook deeltje

Elementair pakketje licht = foton 

licht = golf



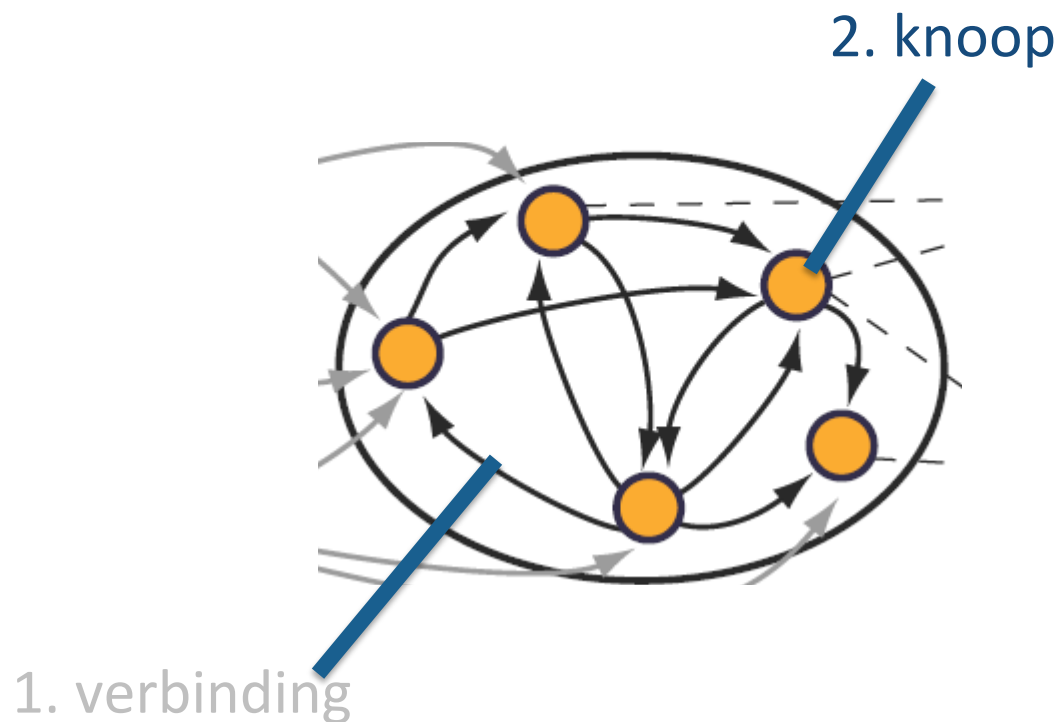
licht = fotonenstroom



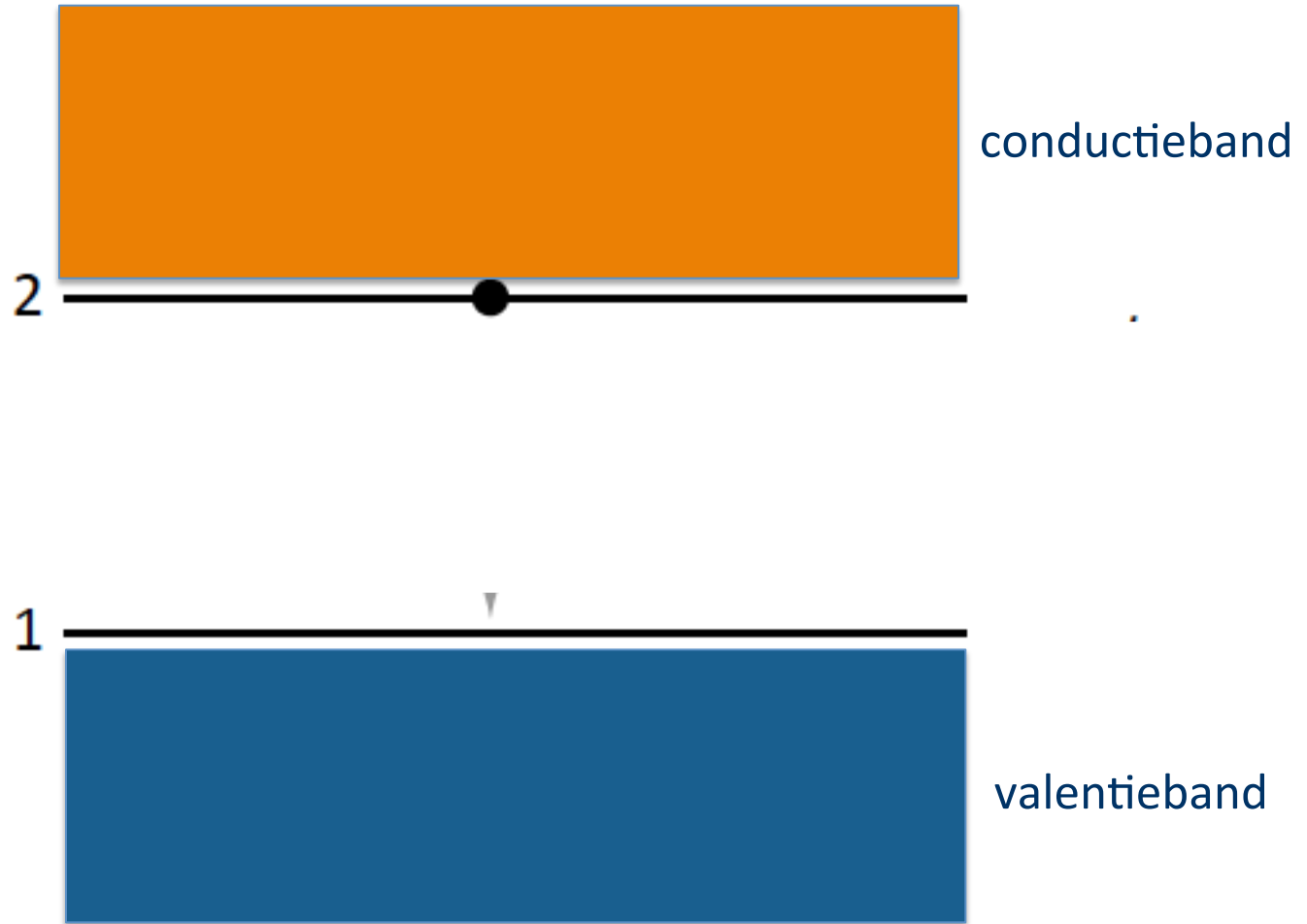
Hoewel er altijd wel sceptici zijn....



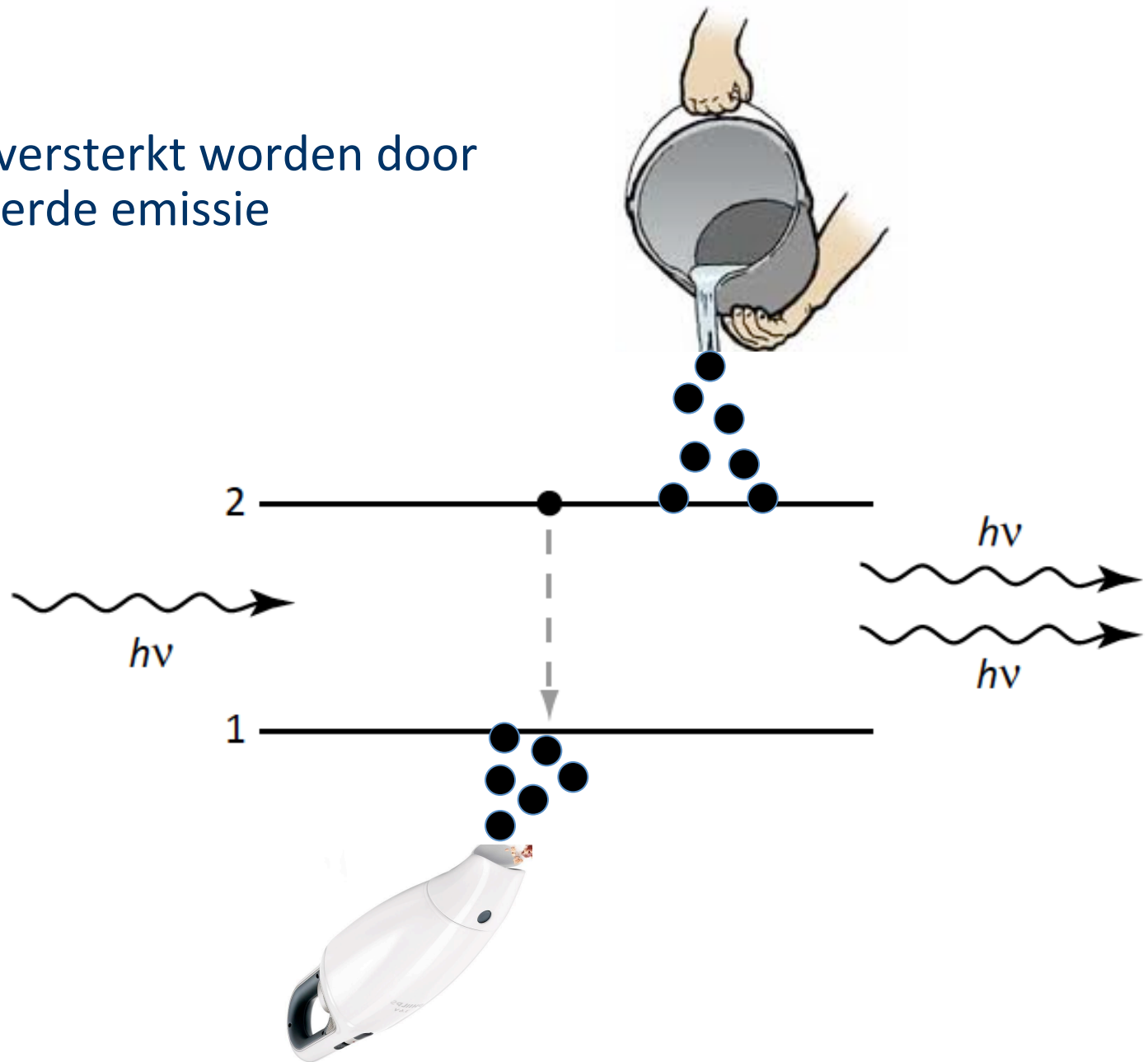
Dit is ons tweede element: de knoop



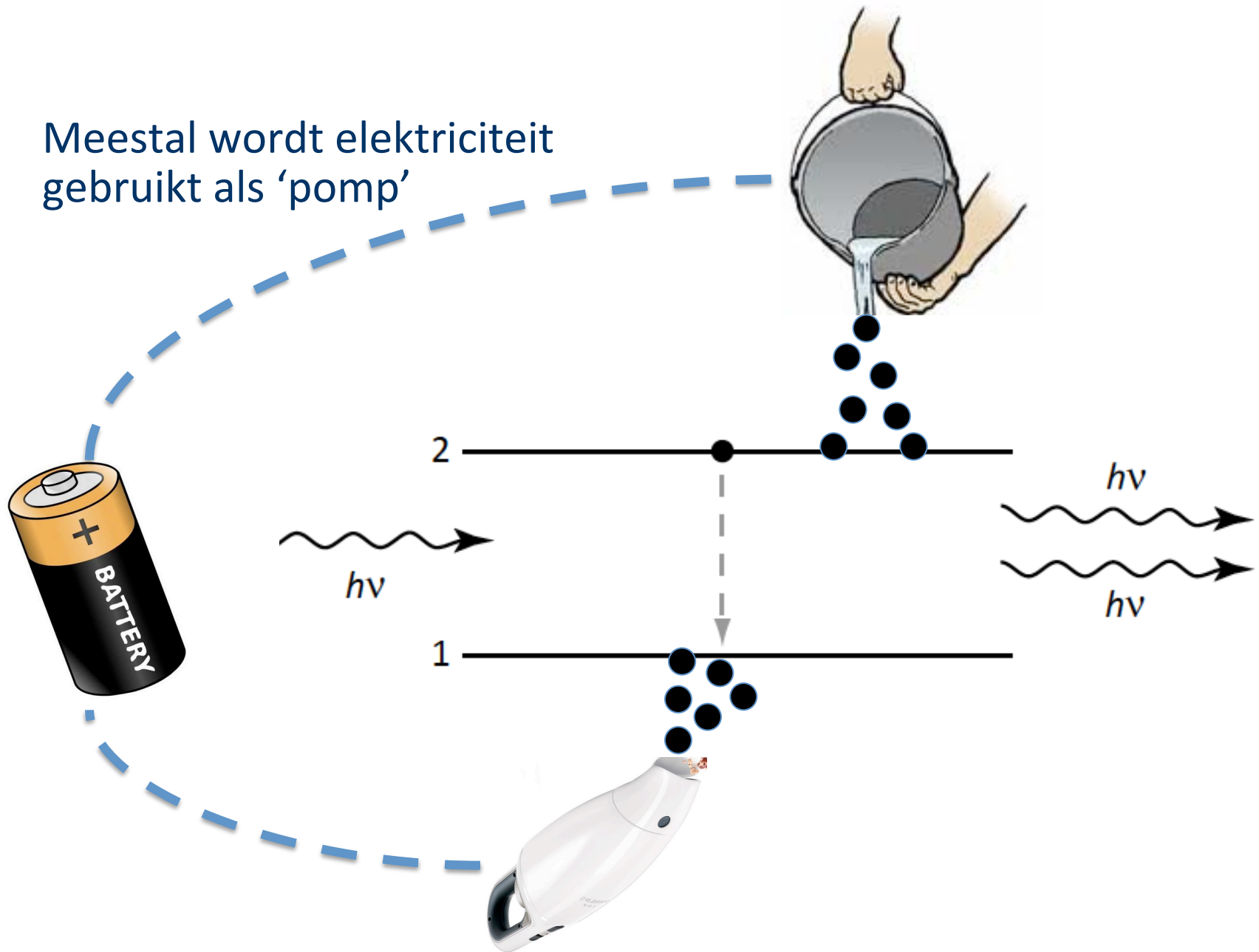
Halfgeleiders zijn materialen met een verboden energiezone



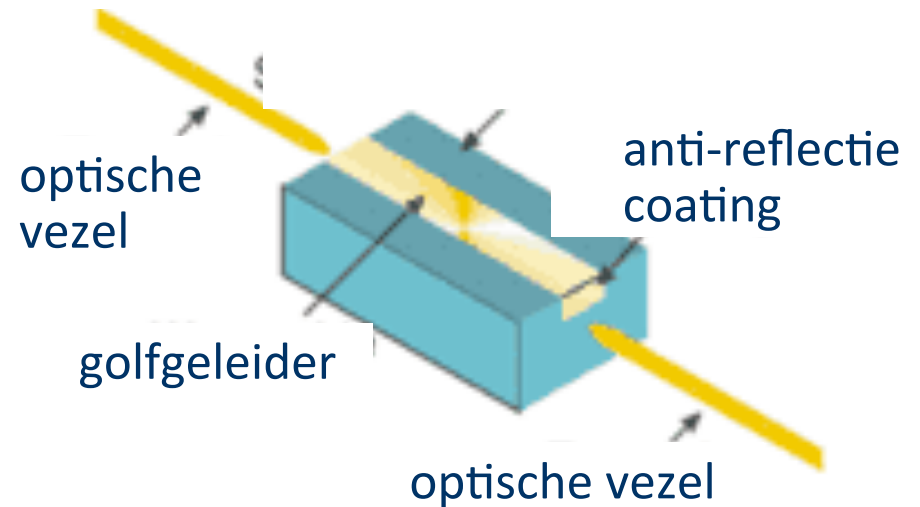
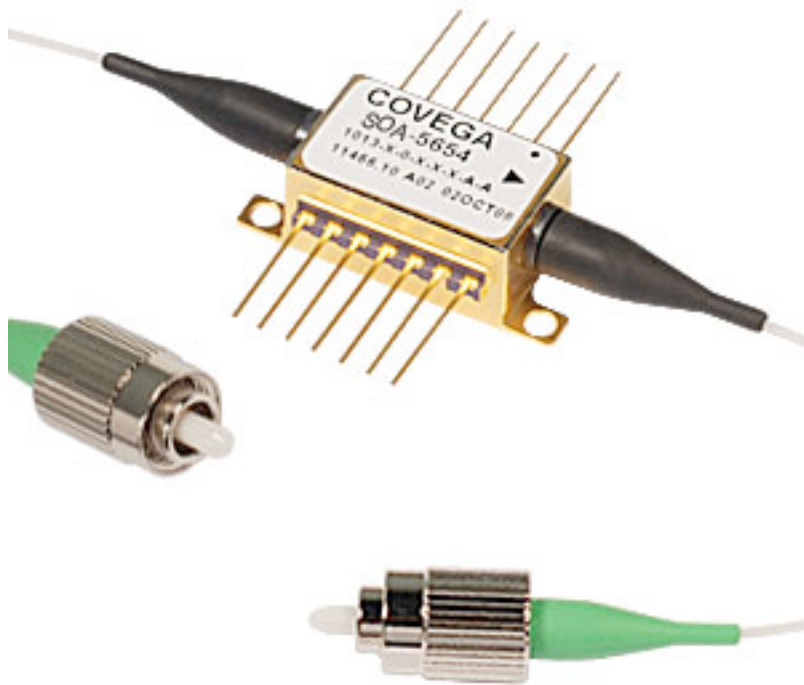
Licht kan versterkt worden door gestimuleerde emissie



Meestal wordt elektriciteit gebruikt als 'pomp'

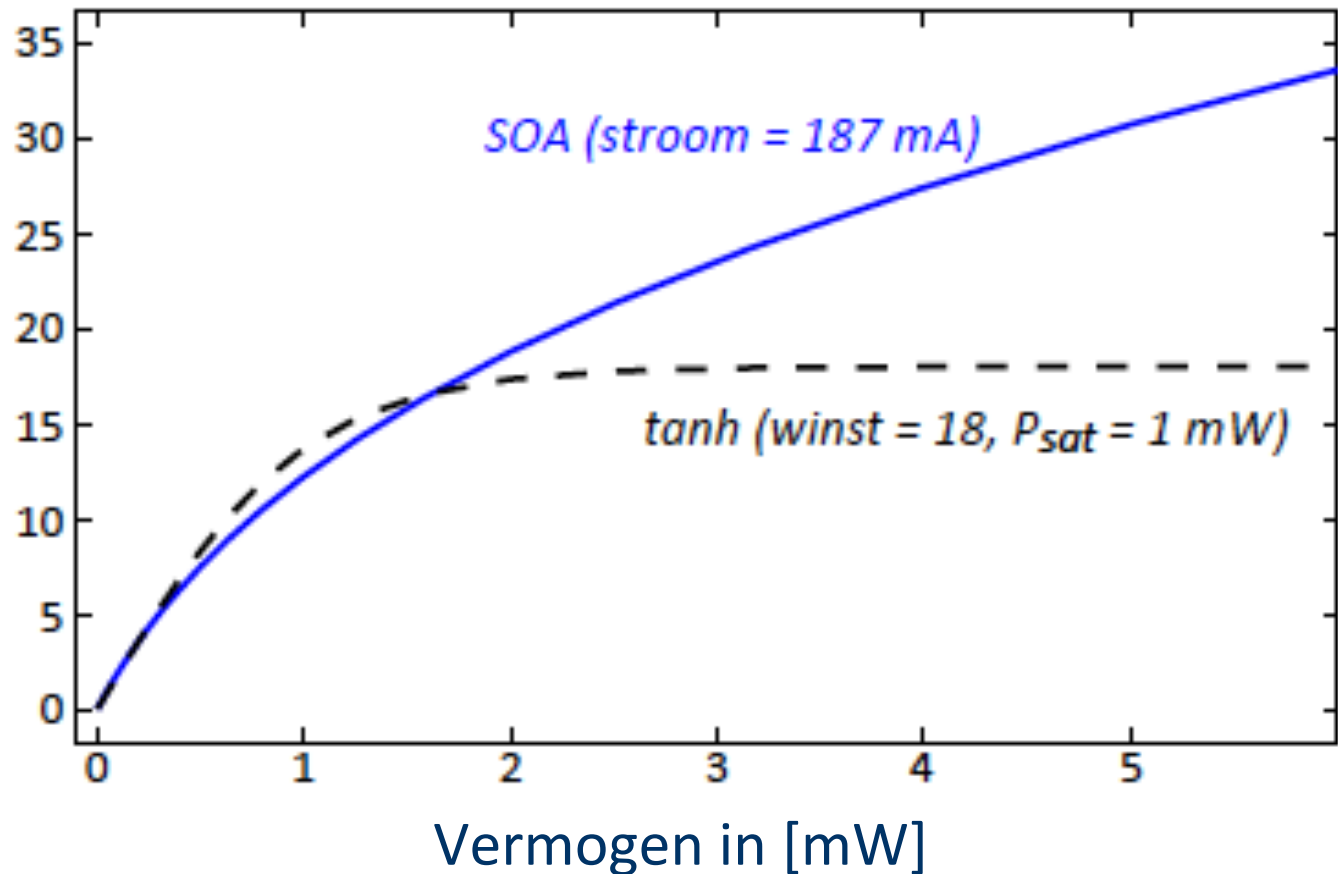


# Alles combineren en we hebben een optische halfgeleider versterker





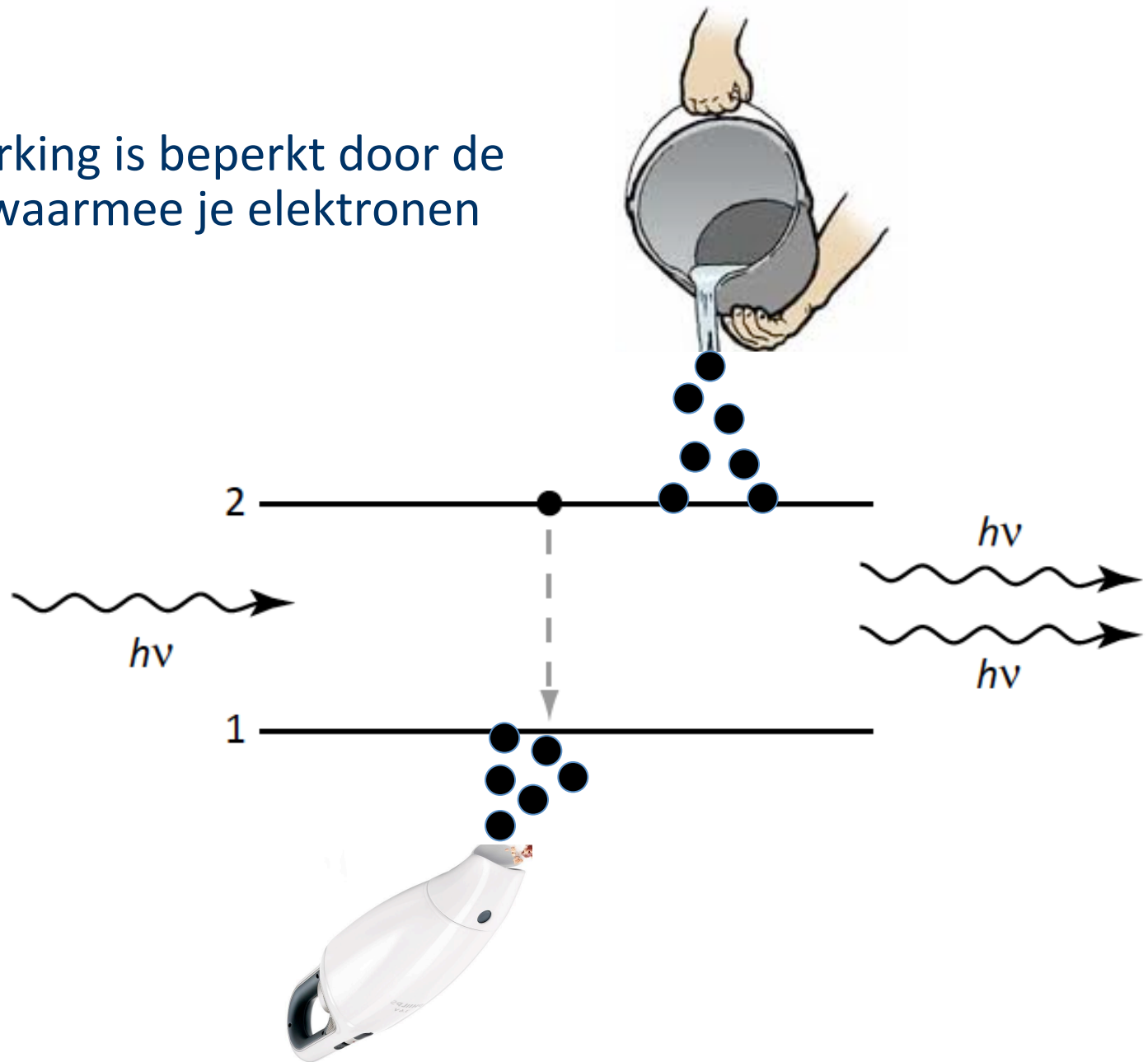
Het 'licht in – licht uit' gedrag van optische versterkers lijkt op de tanh functie van klassieke implementaties



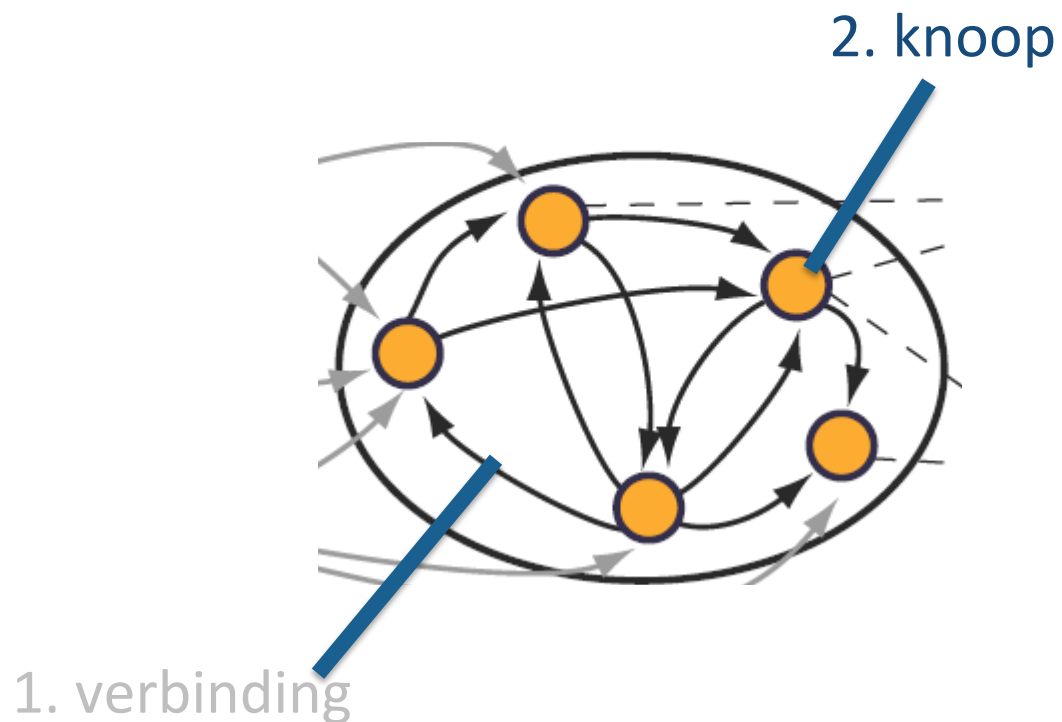
Vermogen uit [mW]

Vermogen in [mW]

De versterking is beperkt door de snelheid waarmee je elektronen injecteert



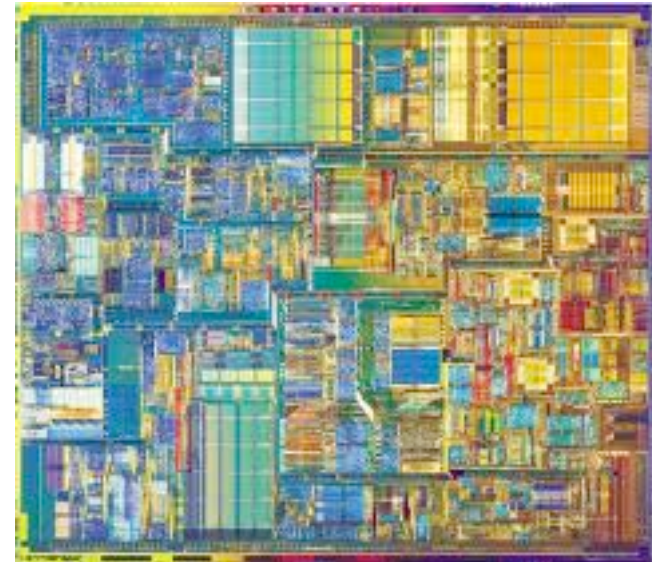
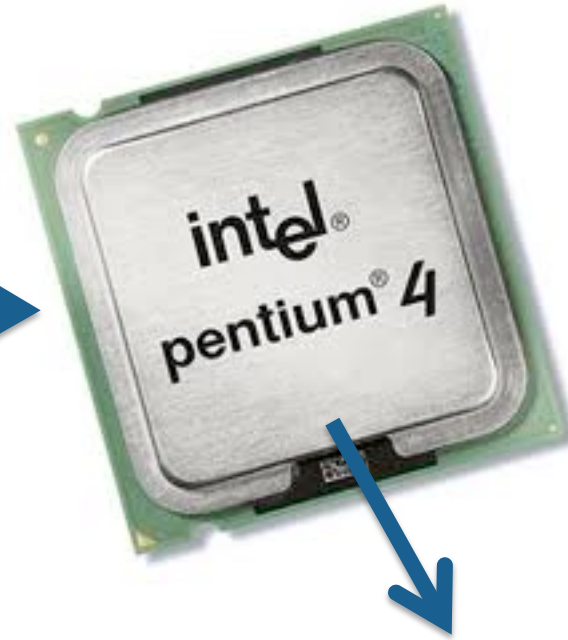
Dit is ons tweede element: de knoop



## Waarom niet optische halfgeleiderversterkers?

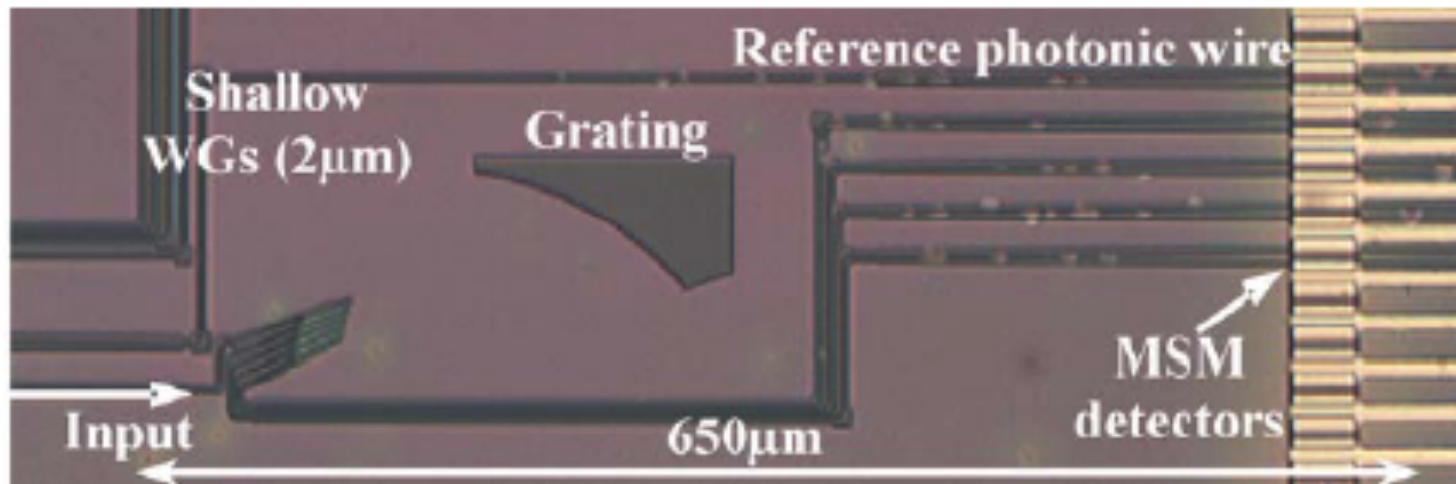
ze compenseren verliezen

ze kunnen 'makkelijk' geïntegreerd worden op een chip



Chip?

Een chip kan je ook maken voor licht met baantjes waar je licht in opsluit, lasers die licht uitstralen, versterkers en detectoren waar je het licht opmeet.



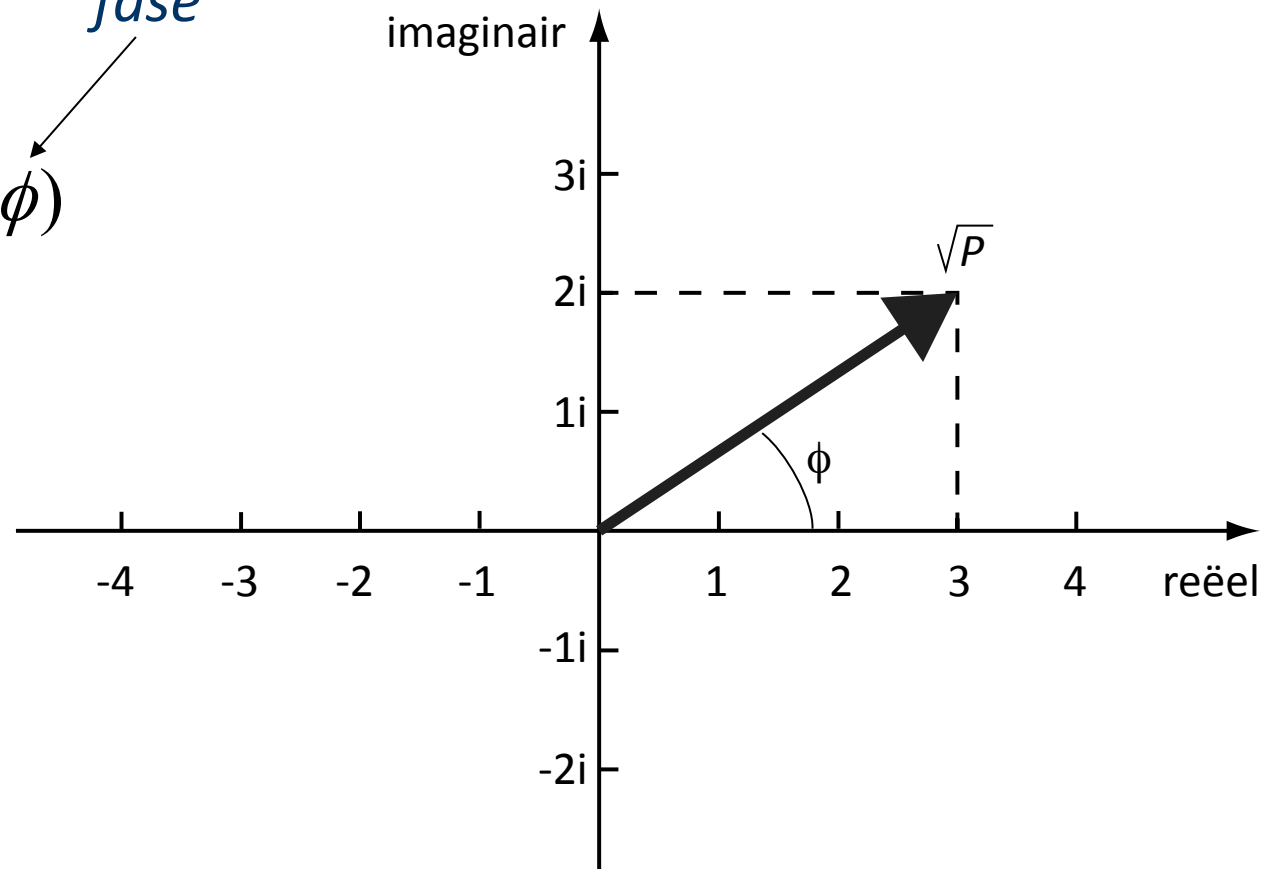
Picture from <http://www.thorlabs.com>

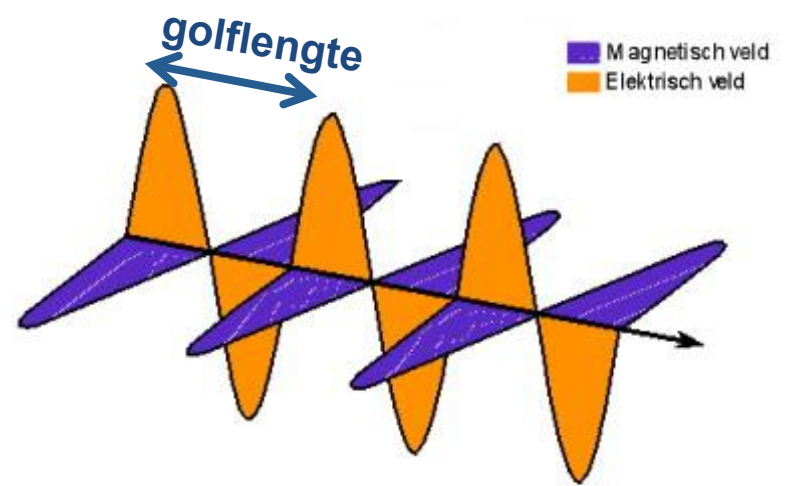
Licht bij 1 golflengte (kleur) kan voorgesteld worden door complexe signalen (coherentie)

$$A = \sqrt{P} \exp(i\phi)$$

*vermogen* (pointing to  $\sqrt{P}$ )

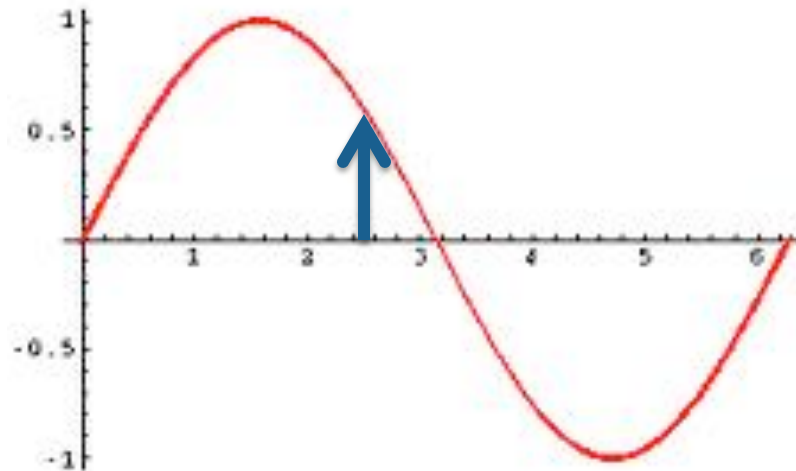
*fase* (pointing to  $i\phi$ )





Vermogen staat in verband met de piekhoogte van de straling

Fase duidt aan waar in de sinus de golf zich bevindt op  $t=0$



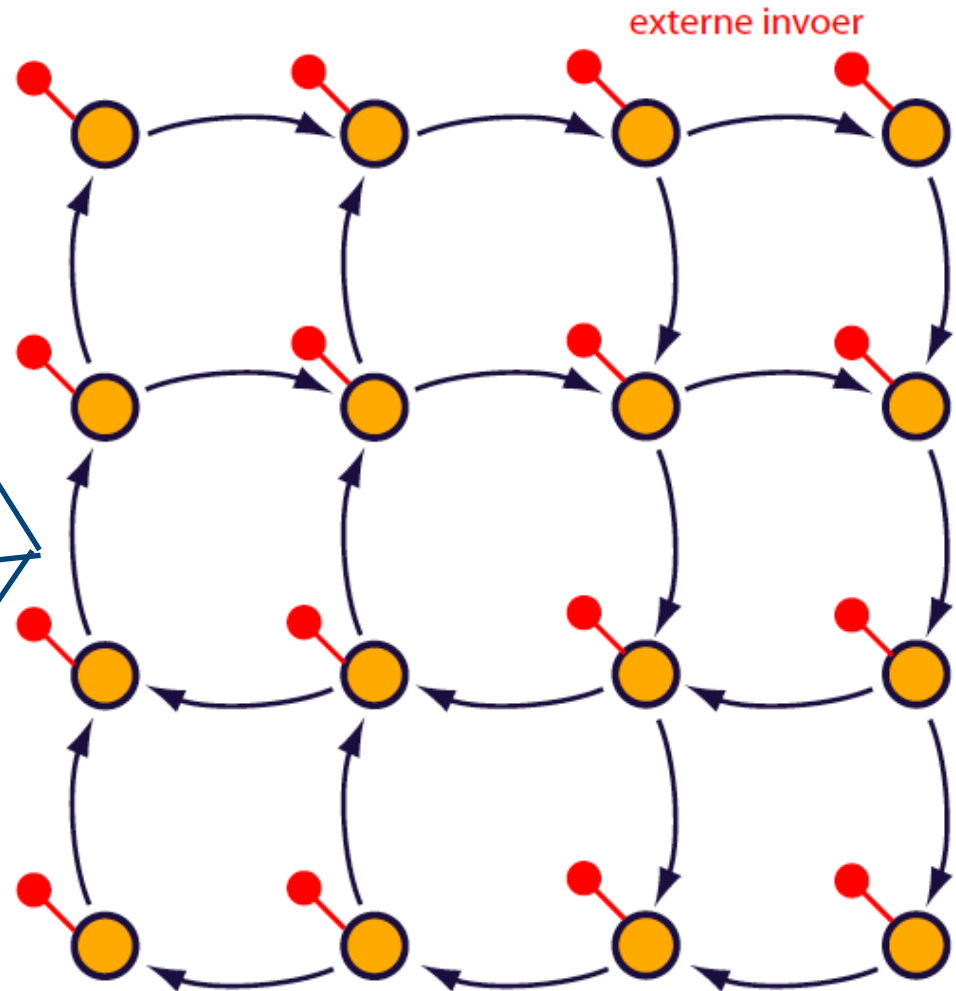


# Het swirl netwerk op een chip

verliezen[dB]

fase  
verschuiving  
 $\exp(i\phi)$

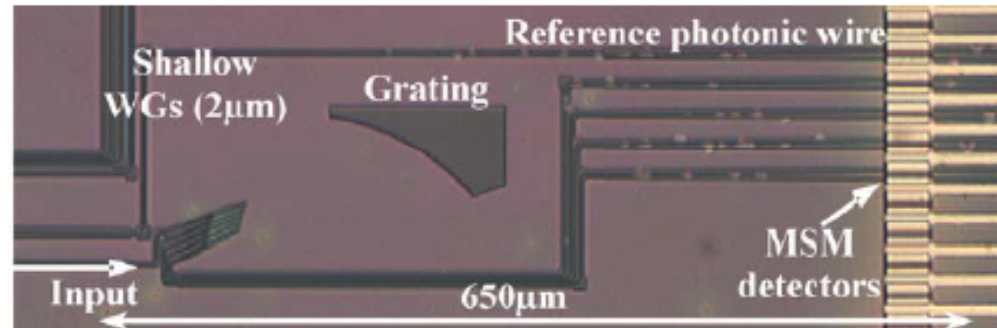
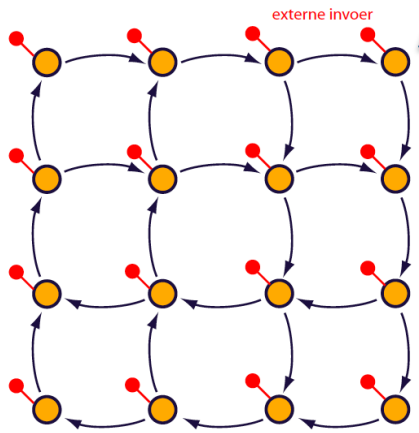
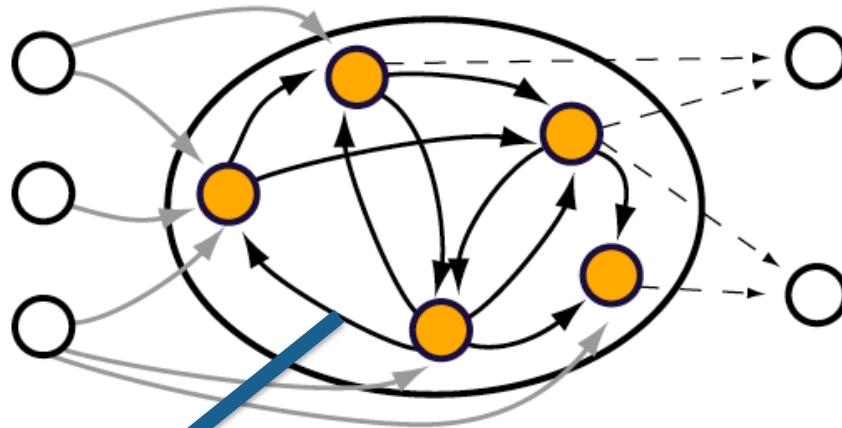
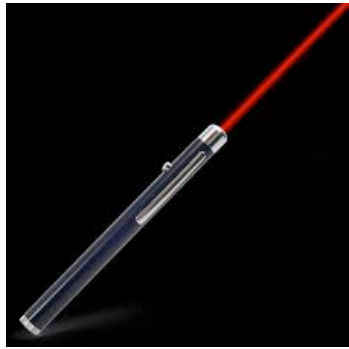
tijdsvertraging  
[ps]



invoer

reservoir

uitvoer



reservoir computing

Fotonica en optische halfgeleiderversterkers

spraakherkenning met licht en reservoir computing

## Spraakherkenning waarbij

*5 vrouwelijke sprekers,*

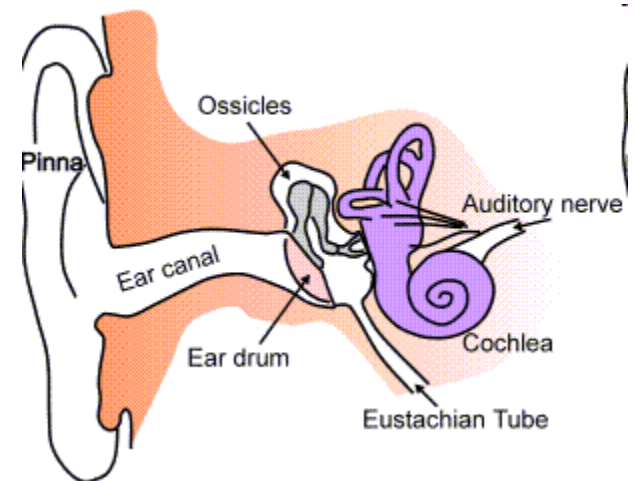
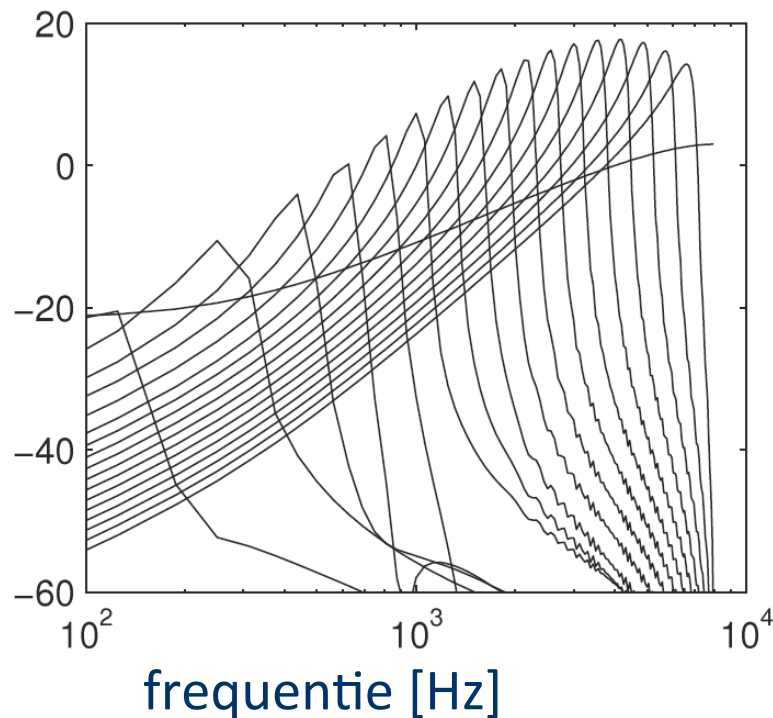
*10 keer dezelfde 10 cijfers uitspreken (nul tot negen),*

*daarbij voegen we achtergrond gebabbel toe met een signaal-  
ruis verhouding van 3dB*

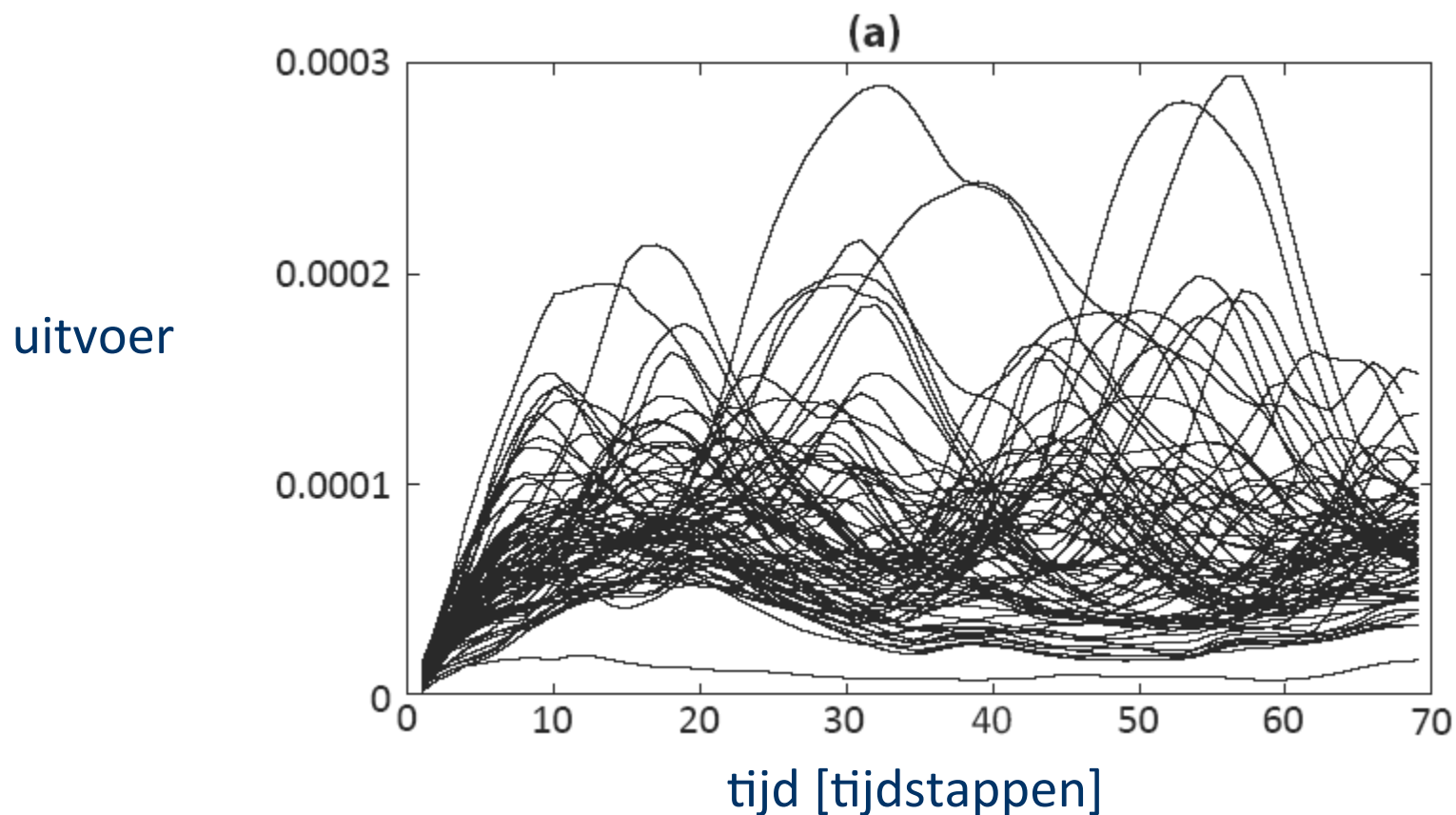


Standaard wordt er bij spraakverwerking een voorverwerking gedaan van het signaal met een model dat gemodelleerd is naar ons gehoororgaan

filter respons  
[dB]



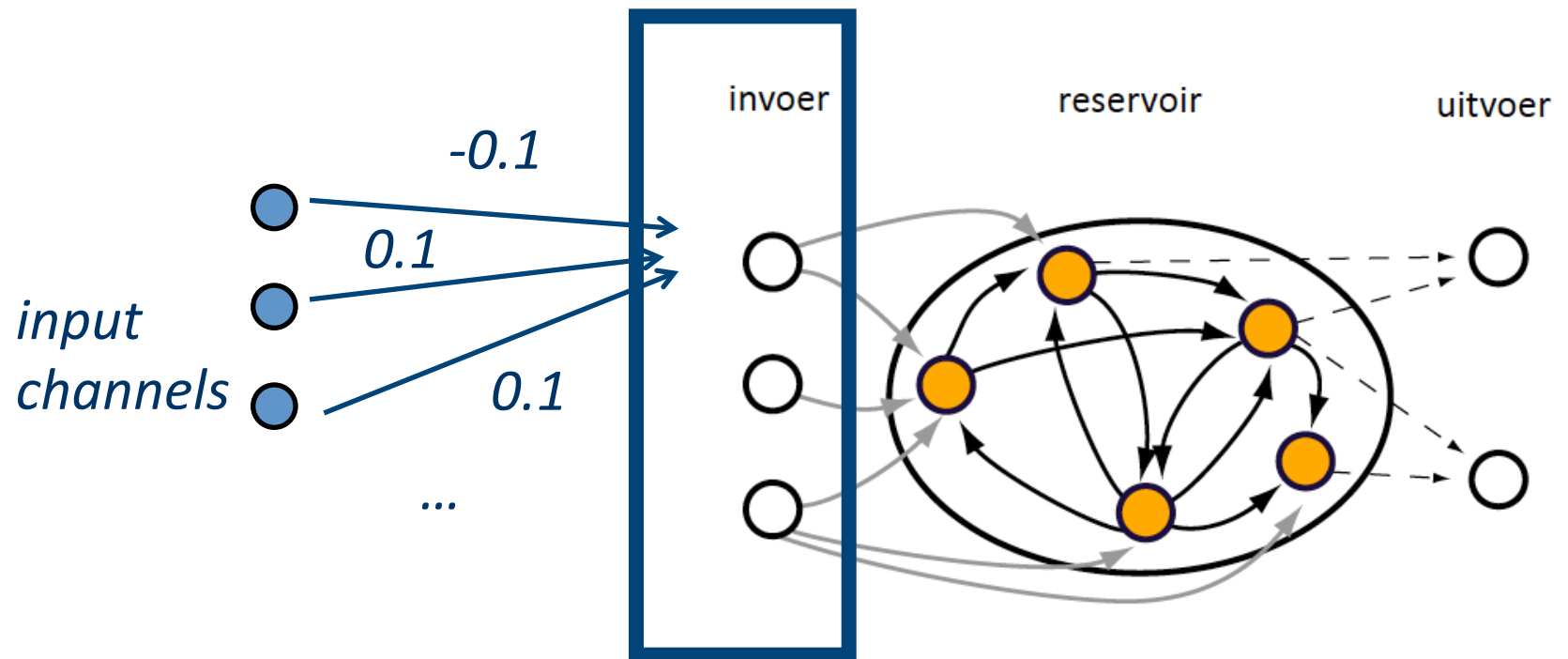
Na de voorverwerking zijn er 77 kanalen van 77 filters die het spraaksignaal voorstellen



Die 77 kanalen worden op een verschillende manier gemixt voor ze naar een knoop worden gestuurd

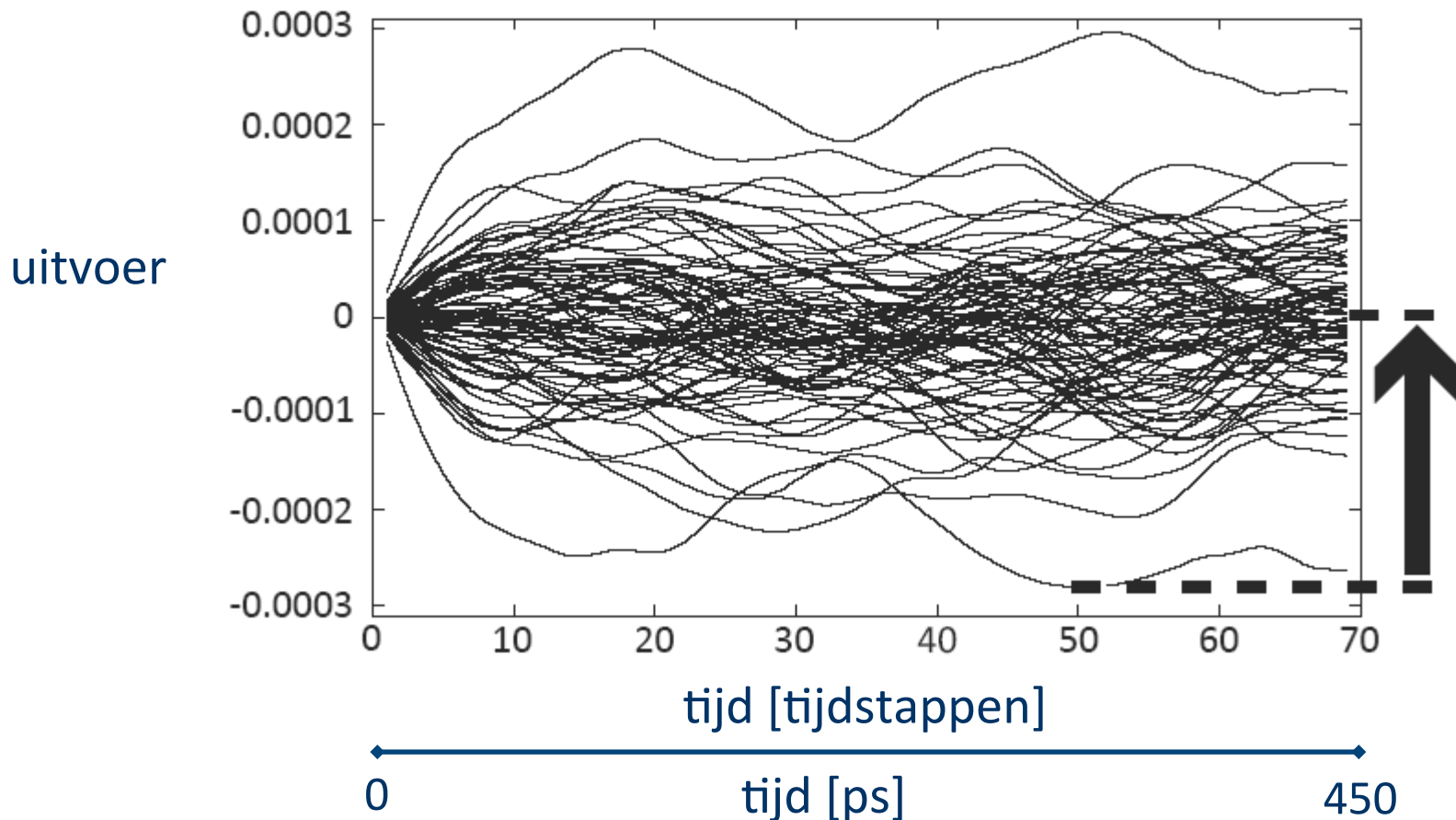


We sturen die gemixte inputs naar alle knopen



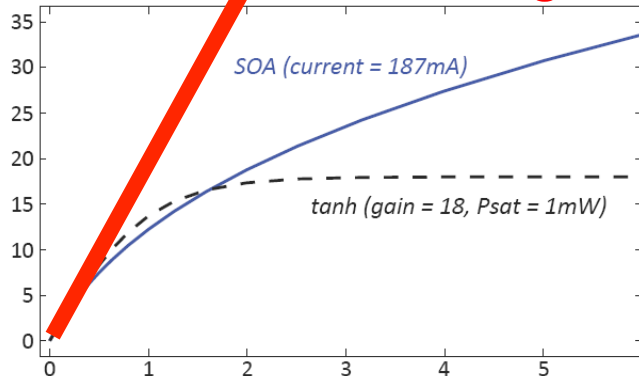


De invoer voor elke knoop wordt dan positief gemaakt.  
Tegelijk wordt het een miljard keer versneld omdat licht zo snel is (0.5s -> 0.5ns).



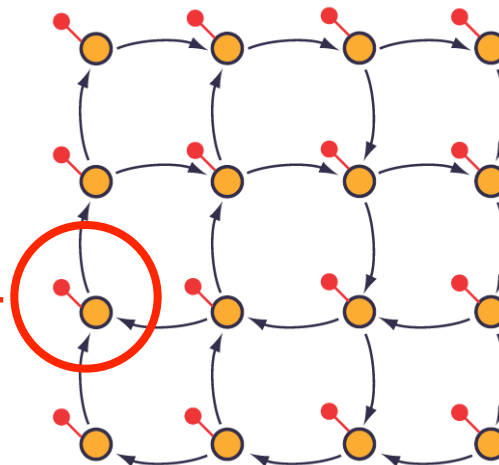
We gebruiken een 9 bij 9 swirl netwerk en een maat voor de stabiliteit is gegeven door de spectrale radius

*maximale versterking*



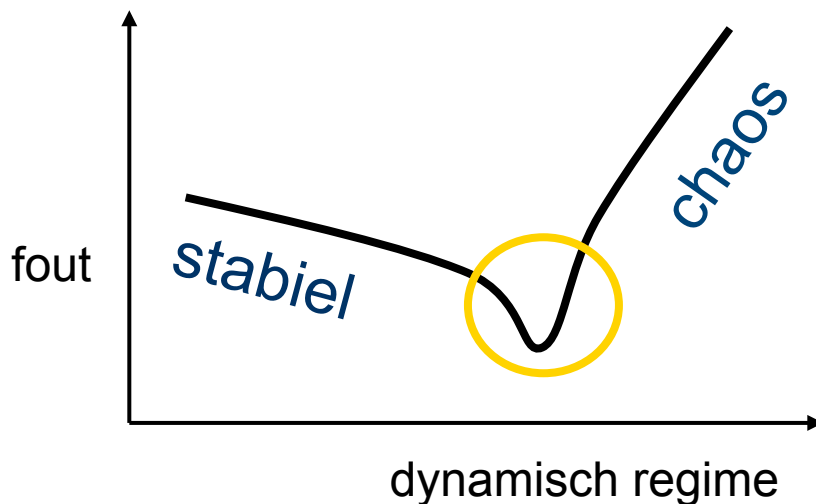
$$SR = \max(| eig(C) |)$$

*connectiematrix*

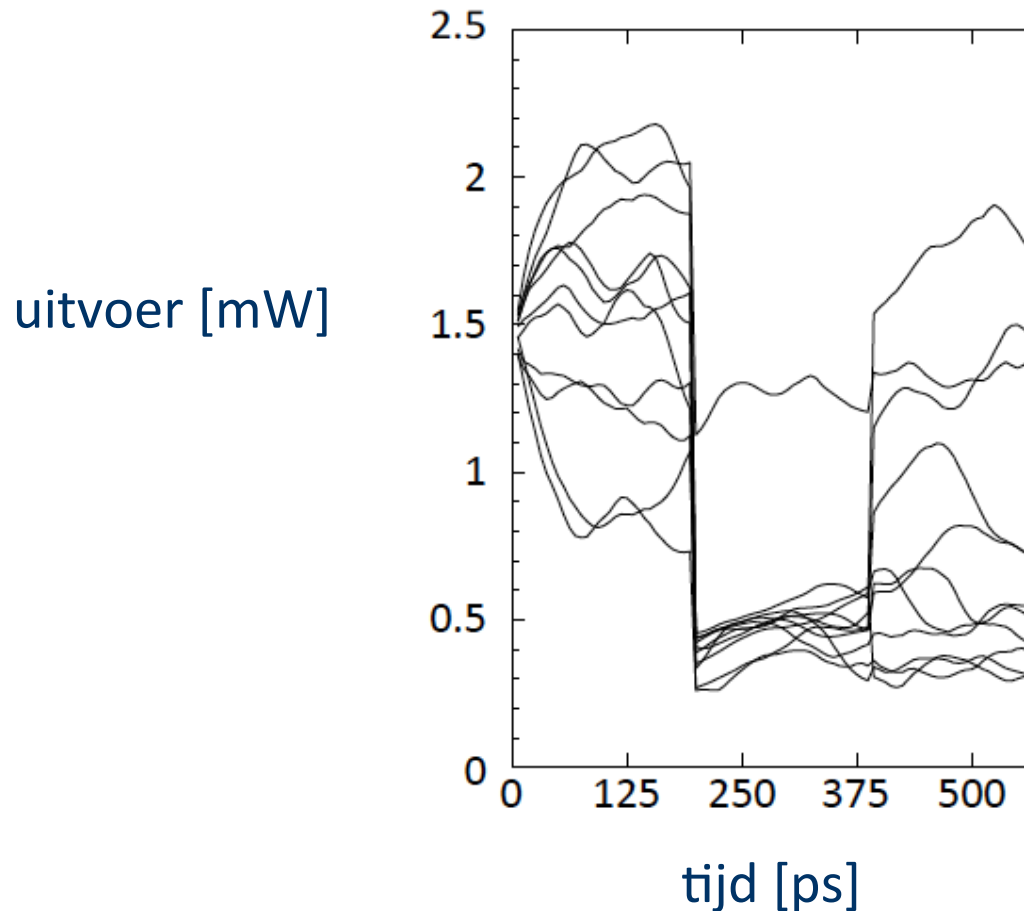


Als de spectrale radius groter is dan 1, is het netwerk onstabiel,  
is het kleiner dan is het stabiel

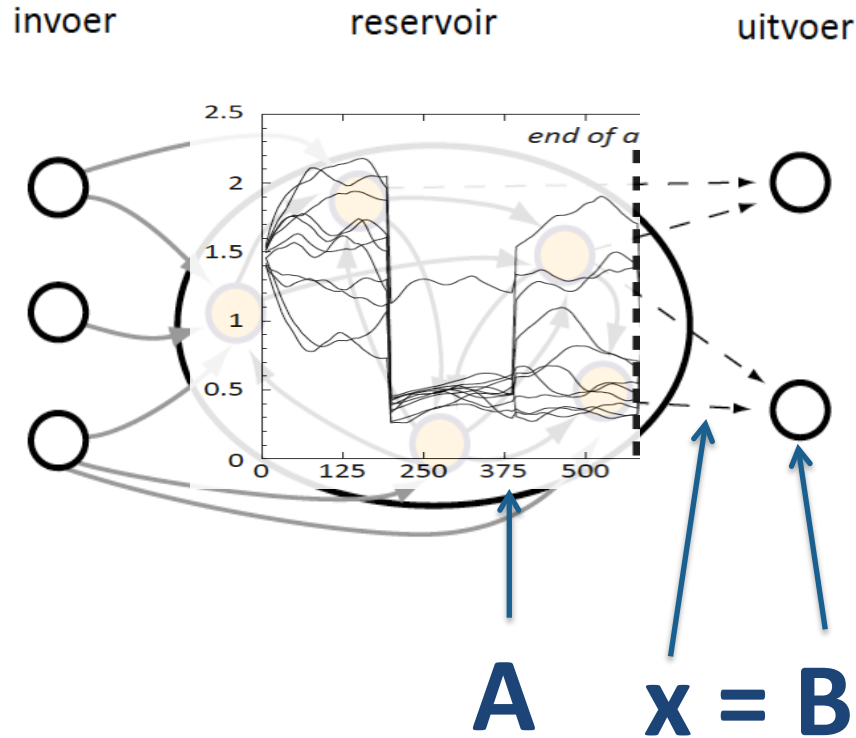
$$SR^{\# \text{tijd stappen}} = \underbrace{SR * SR * SR \dots * SR}_{\# \text{ tijd stappen}}$$



Via een zelfgeschreven programma kan het gedrag van een netwerk van optische versterkers bestudeerd worden

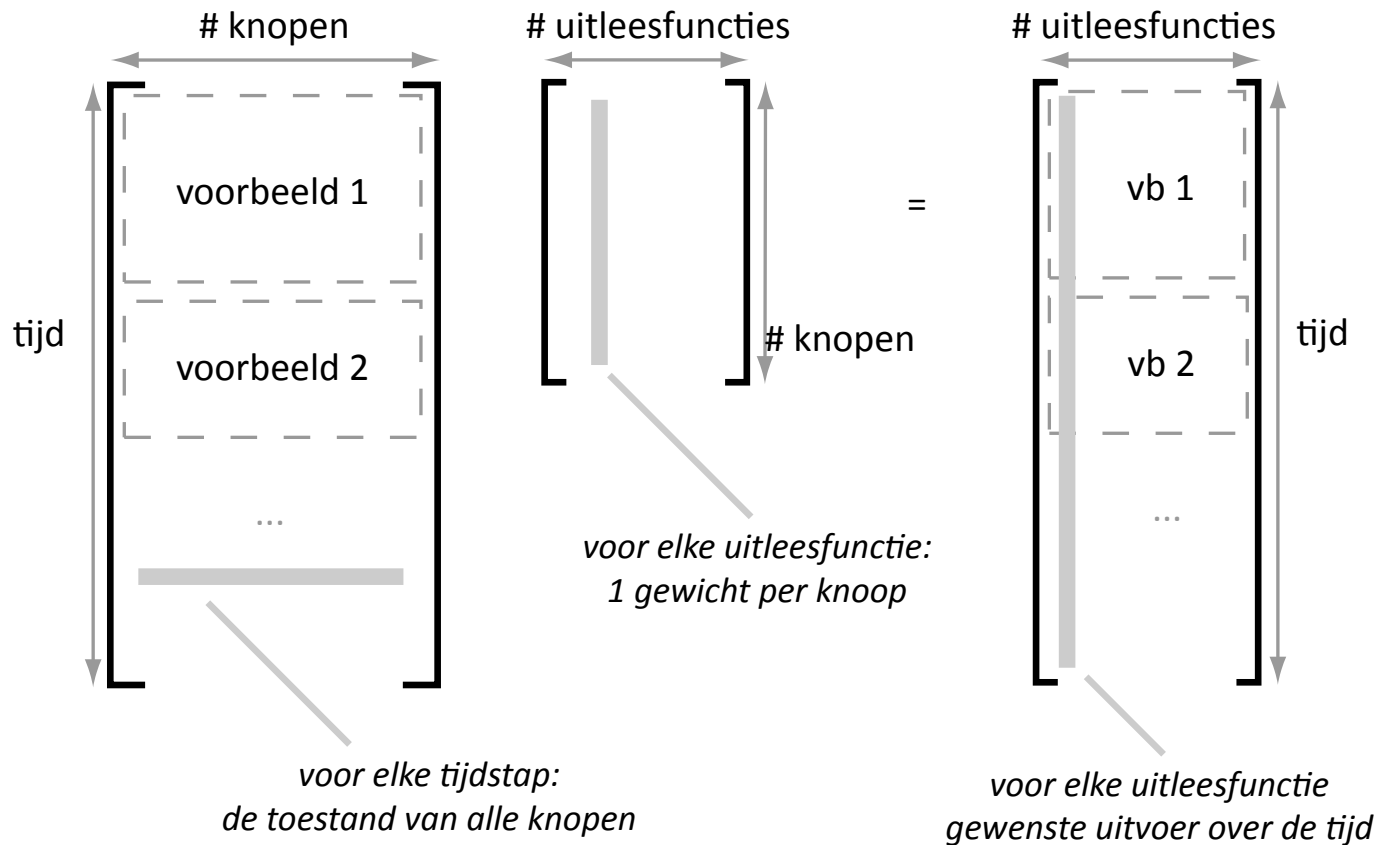


Bij het trainen moeten de gewichten gezocht worden zodat de gewenste uitvoer zo dicht mogelijk benaderd wordt



# training

**A** **X** = **B**  
*reservoir toestanden* *gewichten* *gewenste uitvoer*

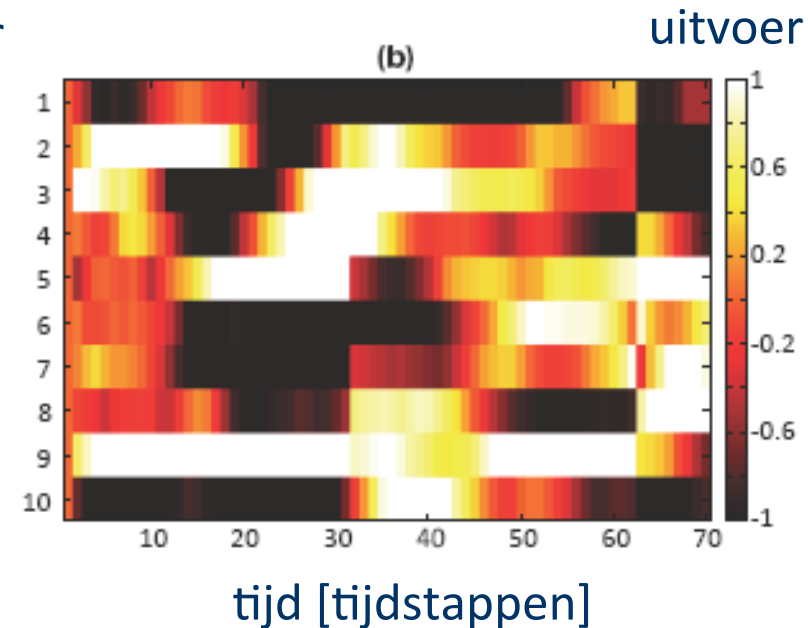
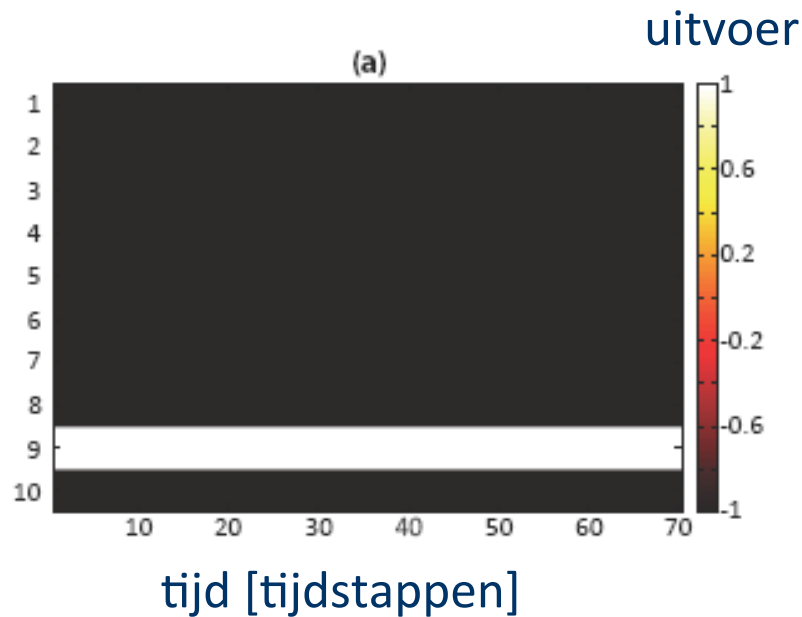


Een concreet voorbeeld waarbij links de gewenste uitvoer is voor het cijfer 9 en rechts de uitvoer na training

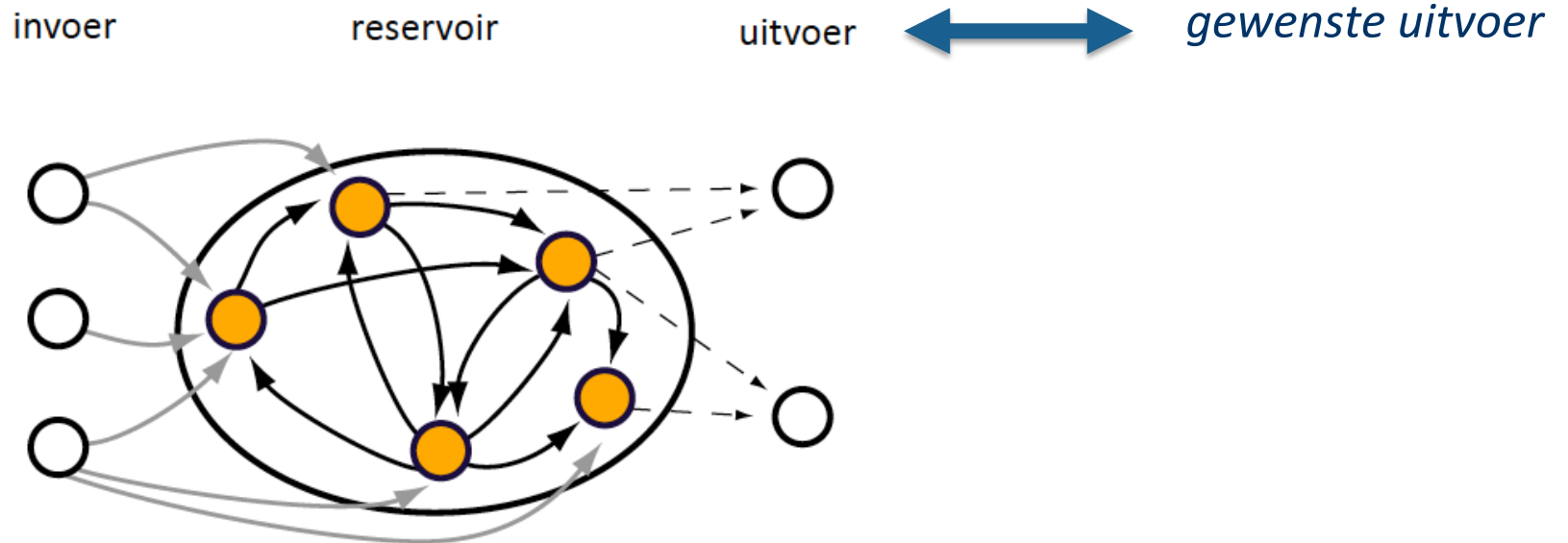
*gewenste uitvoer*

*eigenlijke uitvoer*

uitleesfunctie  
[#]

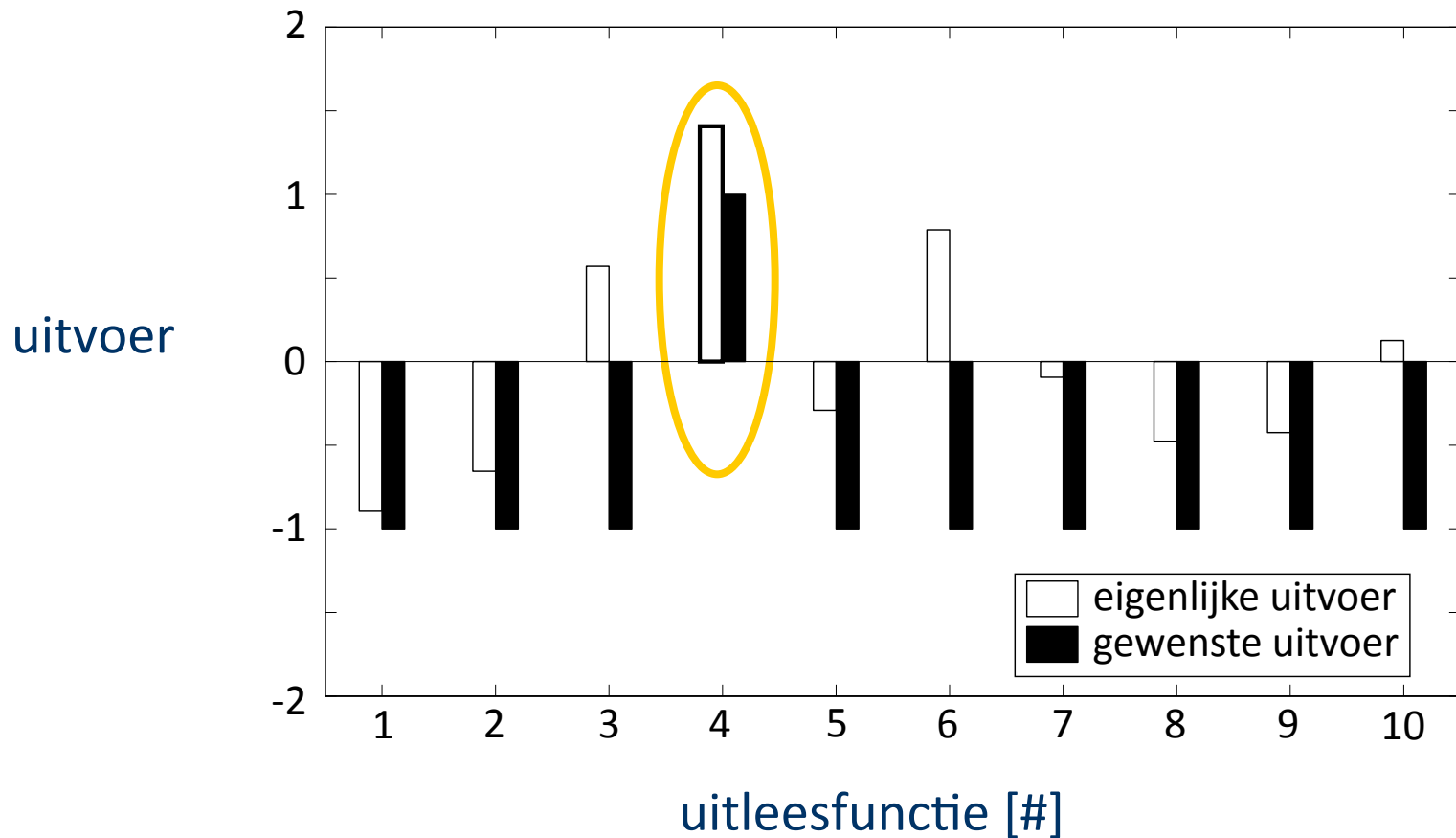


# testen





Tijdens het testen 'wint' de uitleesfunctie met de grootste respons over de tijd heen (winner-take-all).



De prestatie van het systeem wordt gemeten aan de hand van het aantal fout geïnterpreteerde uitspraken (WER)

het aantal fout voorspelde cijfers

---

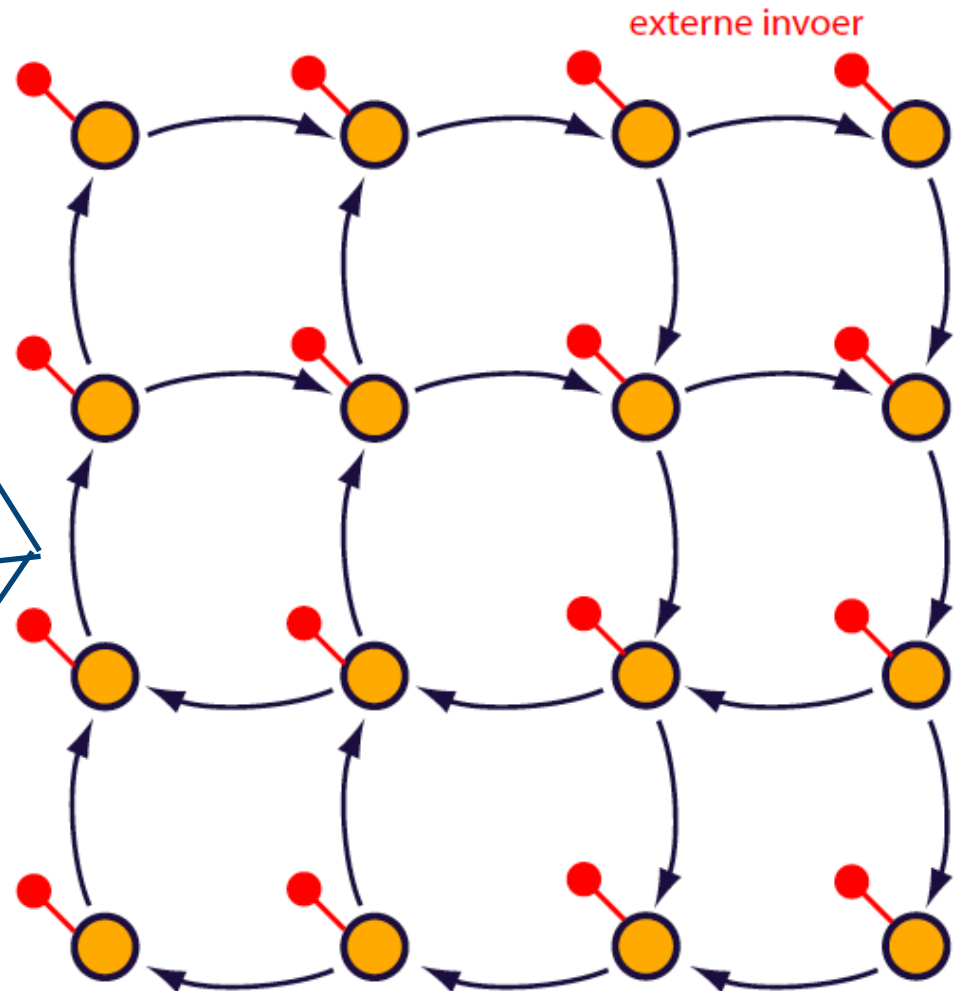
totaal aantal uitgesproken cijfers

Bij elke simulatie worden er twee verbindingsparameters  
gevarieerd

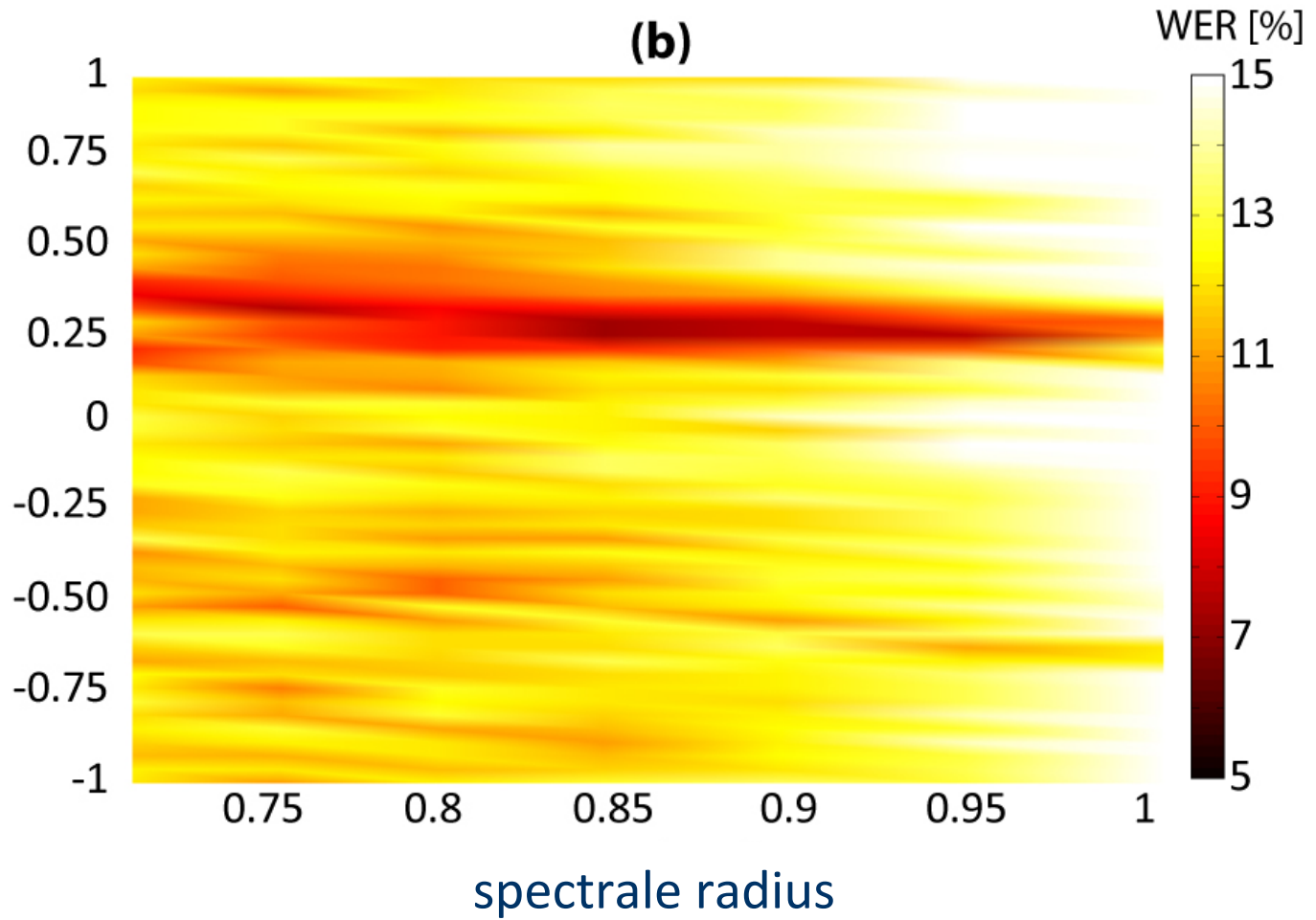
verliezen[dB]

fase  
verschuiving  
 $\exp(i\phi)$

tijdsvertraging  
[ps]



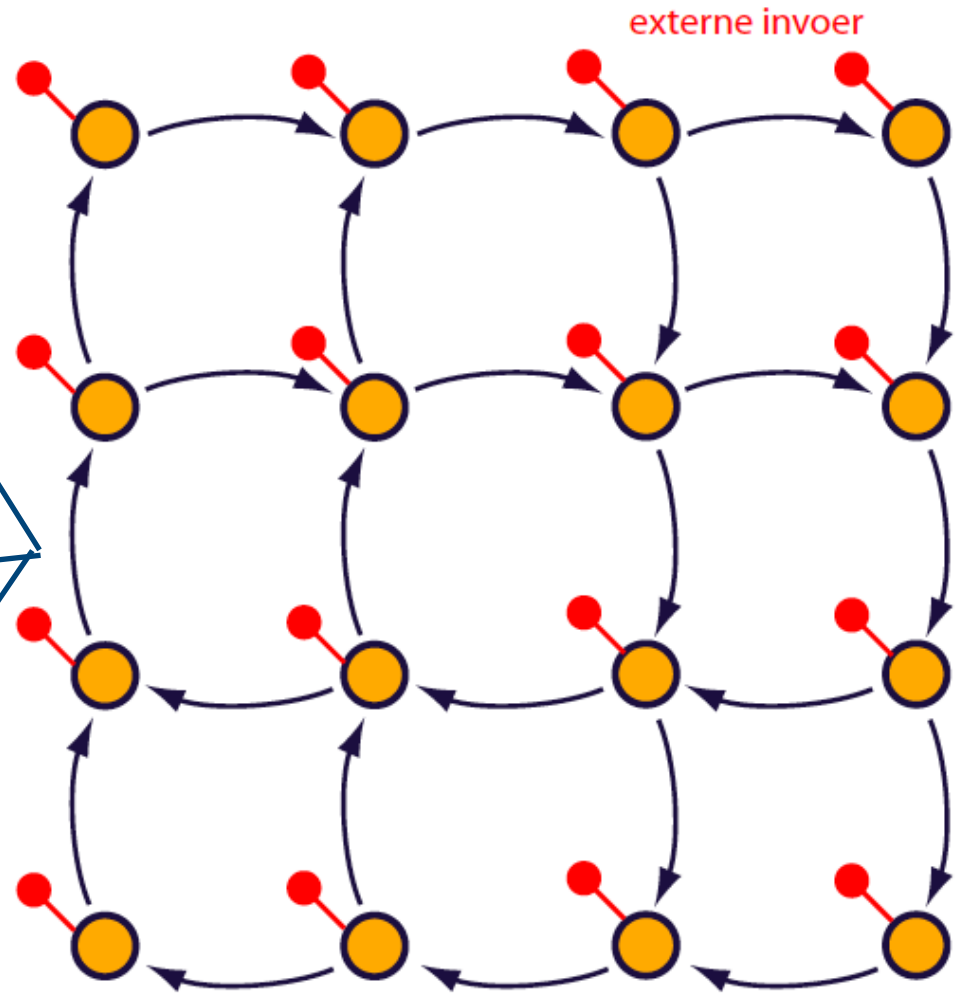
fase [ $\pi$ ]



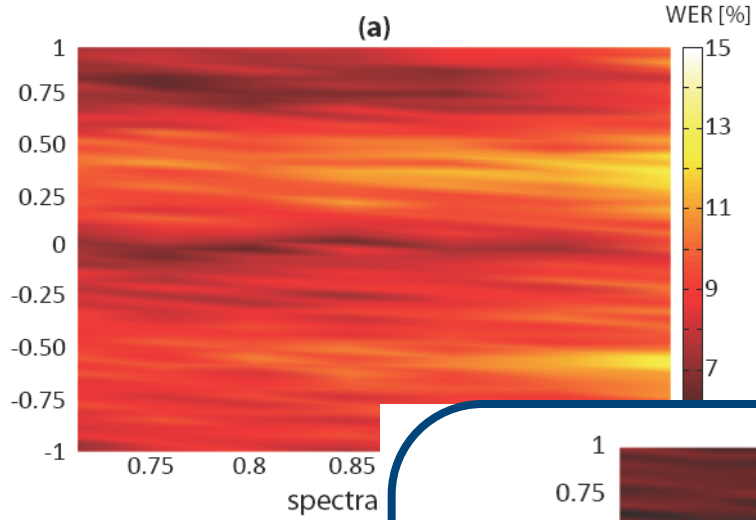
verliezen[dB]

fase  
verschuiving  
 $\exp(i\phi)$

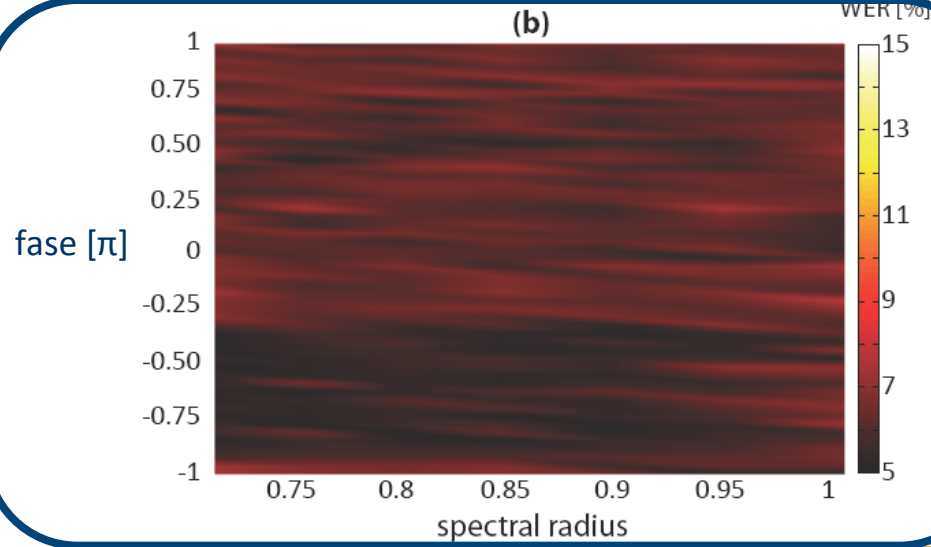
tijdsvertraging  
[ps]



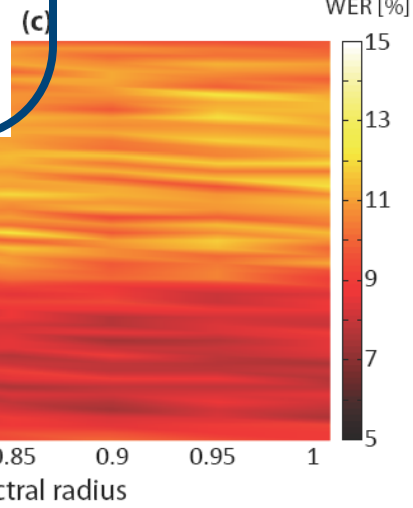
fase [ $\pi$ ]



187.5 ps



312.5 ps



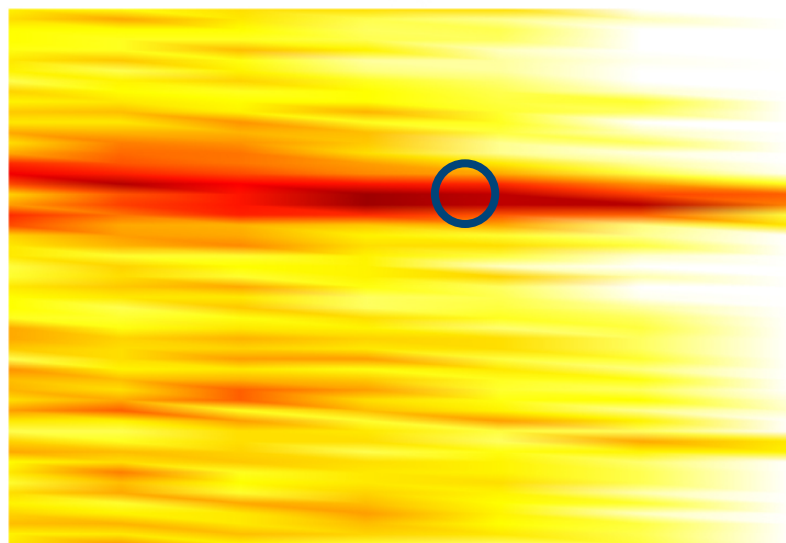
optimale vertragen



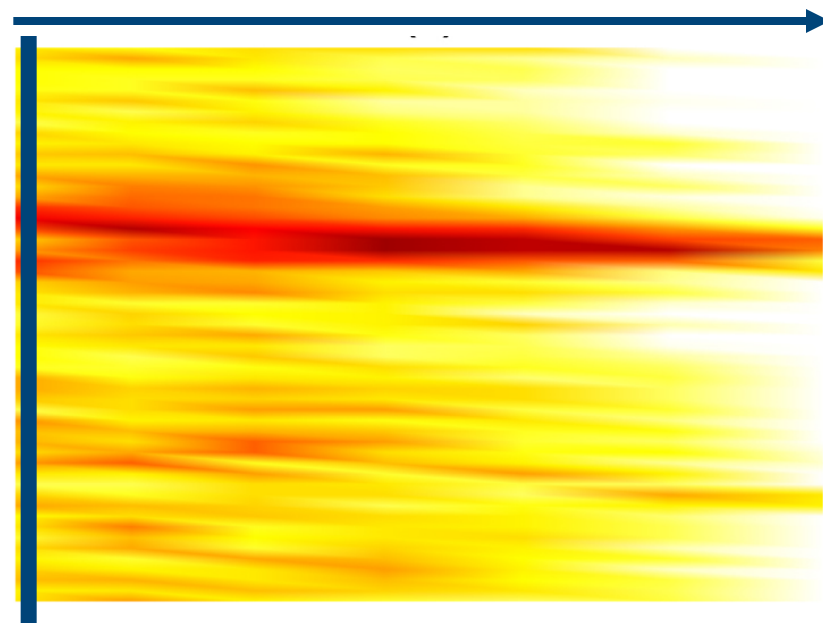
absolute minimum  
(fase gecontroleerd)

Mimumum 2  
(fase uitgemiddeld)

fase

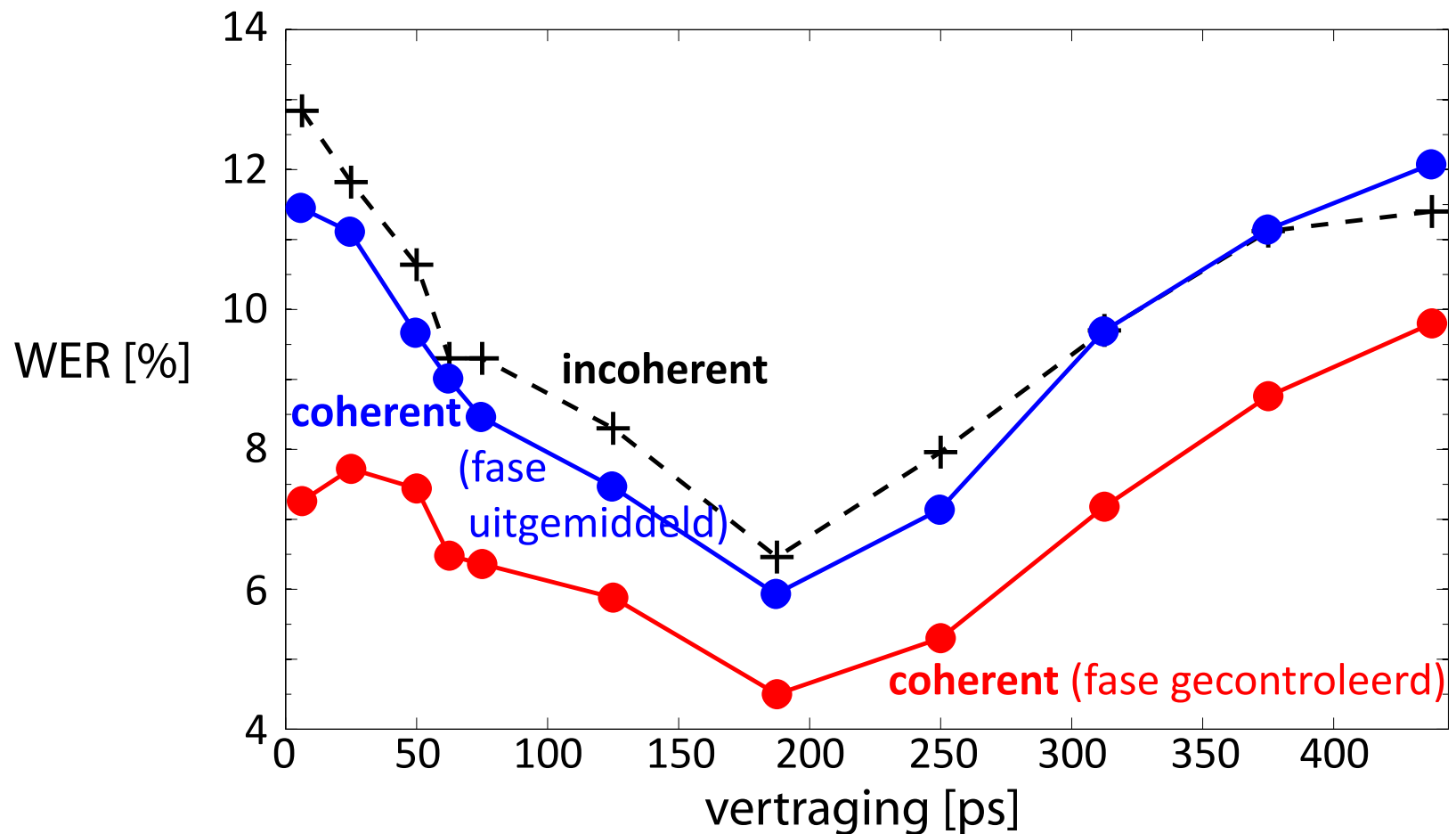


spectrale radius



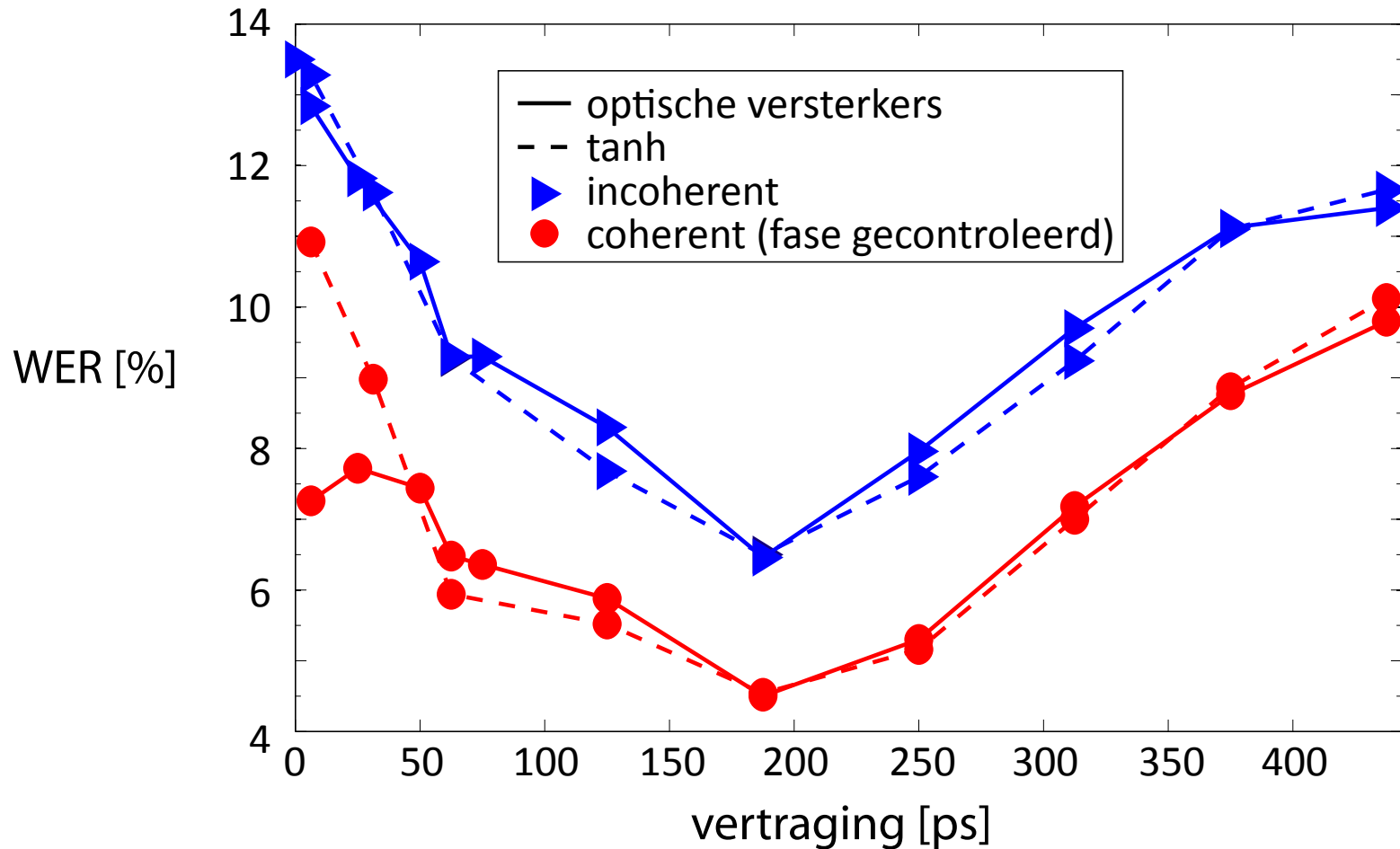
spectrale radius

Als je de fase kan controleren is het resultaat beter

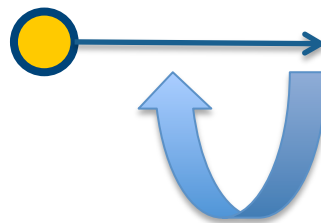




## Reservoirs met tanh of met optische versterkers halen gelijkaardige prestaties

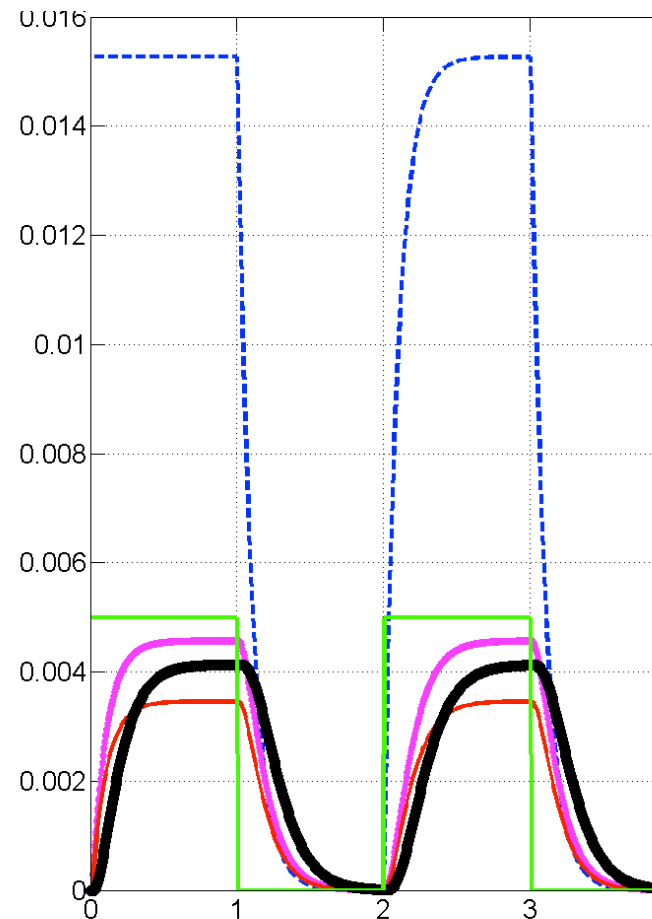
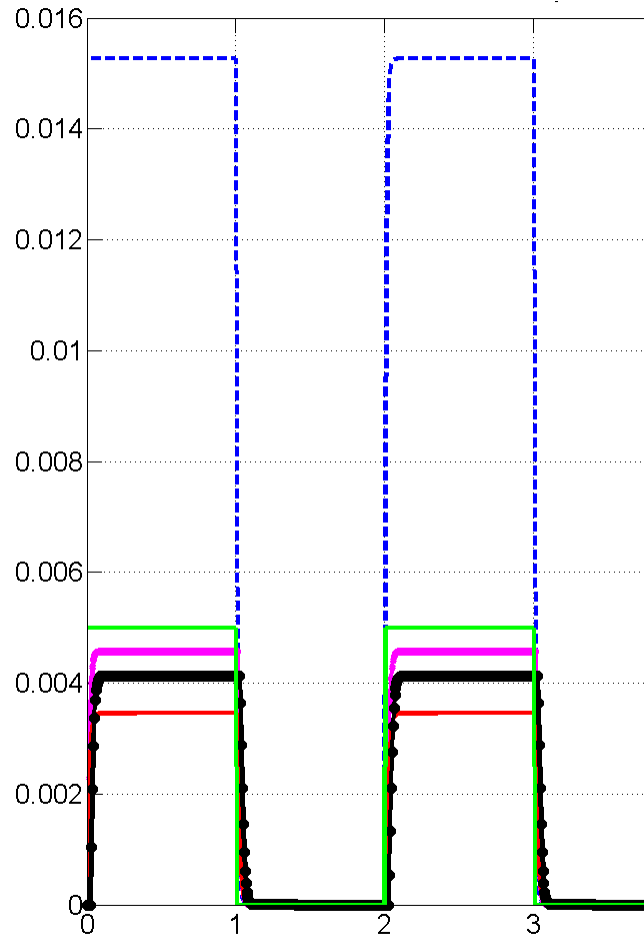


De beste klassieke tanh netwerken gebruiken een filter om de respons van de knopen de vertragen ('leak')

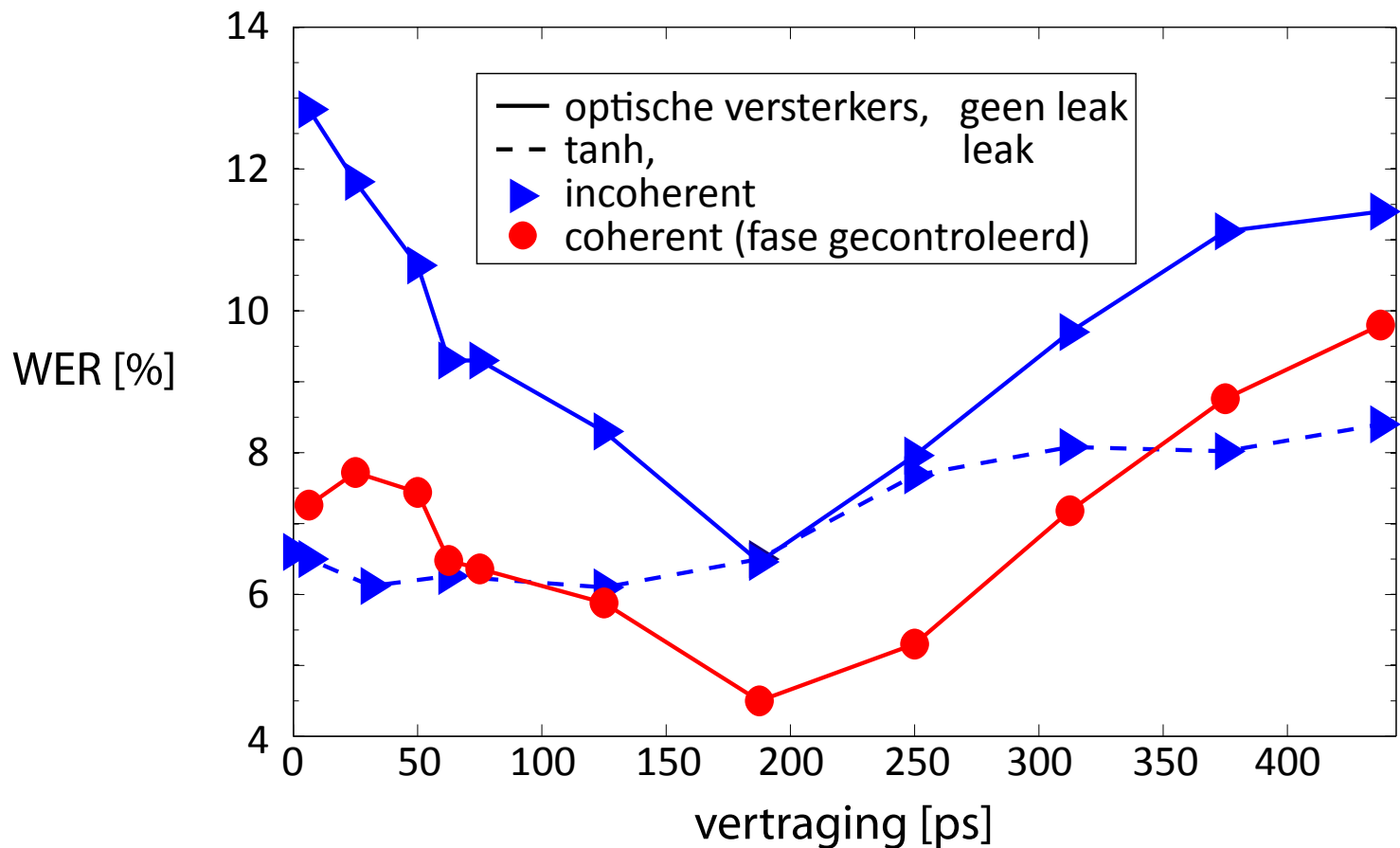


verzwakt en vertraagd

De beste klassieke tanh netwerken gebruiken een filter om de respons van de knopen de vertragen ('leak')



# Coherente optische versterker netwerken doen het bij optimale fase en delay nog steeds beter dan de beste klassieke netwerken



Dit wil zeggen dat de belangrijkste verschillen tussen klassieke netwerken en optische netwerken

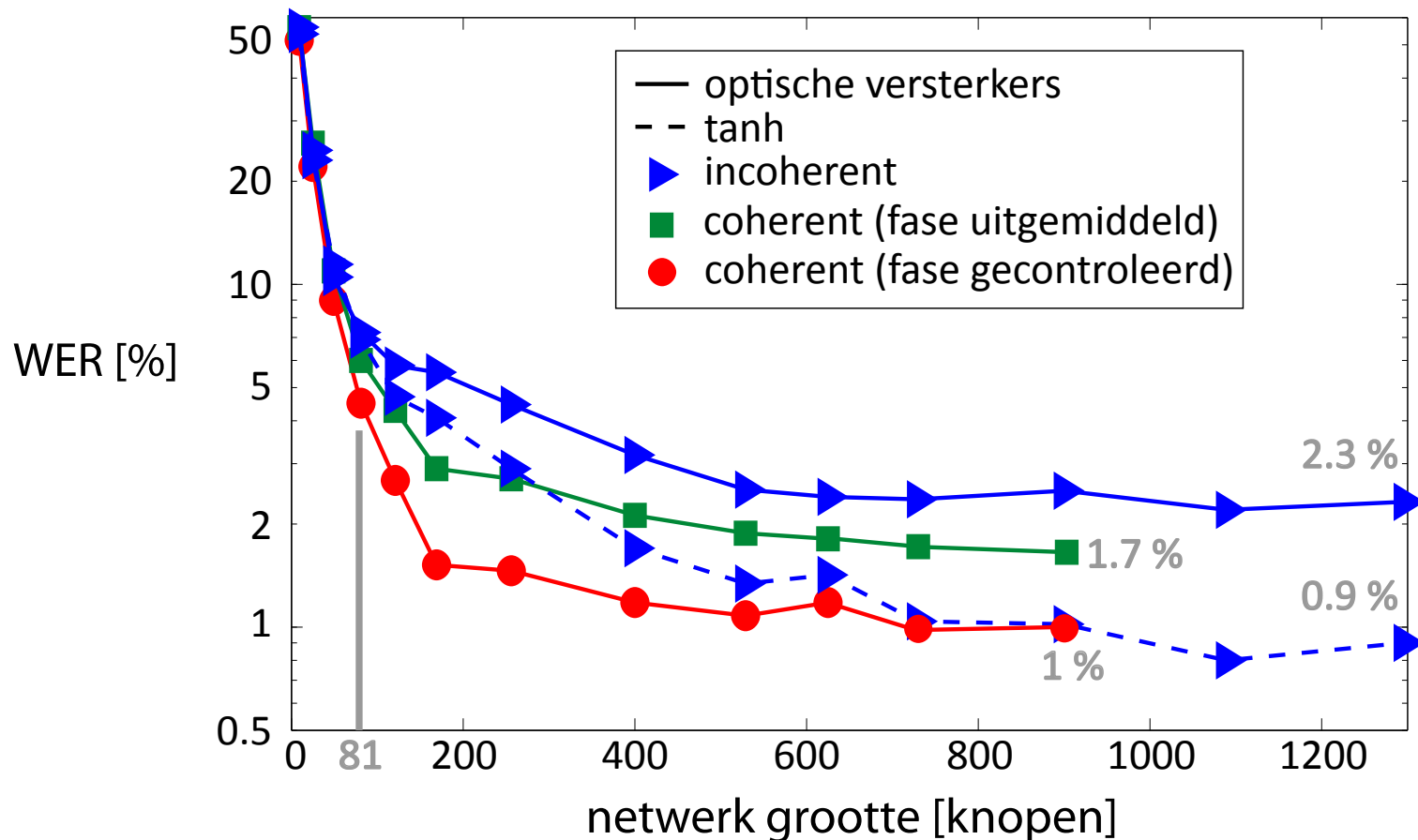
fase (coherentie)

beperktere netwerkstructuur

vertragingen

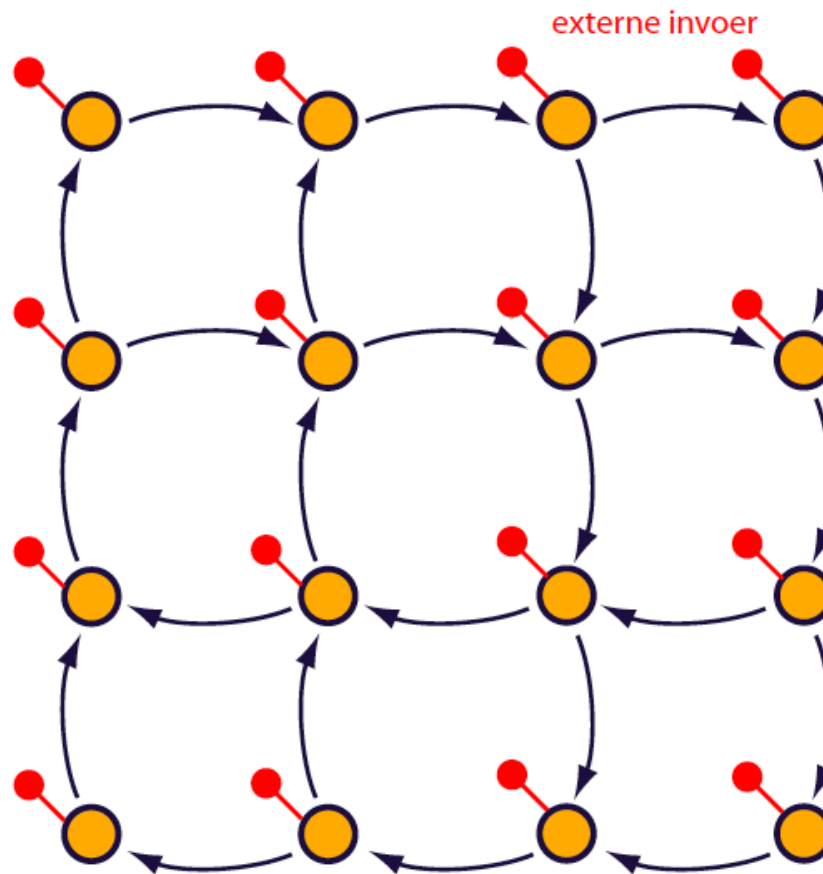
zelfs voor betere prestaties zorgen als ze goed ontworpen zijn

# Grotere netwerken zorgen voor een verbetering in prestatie en vlugger als fase informatie gebruikt wordt



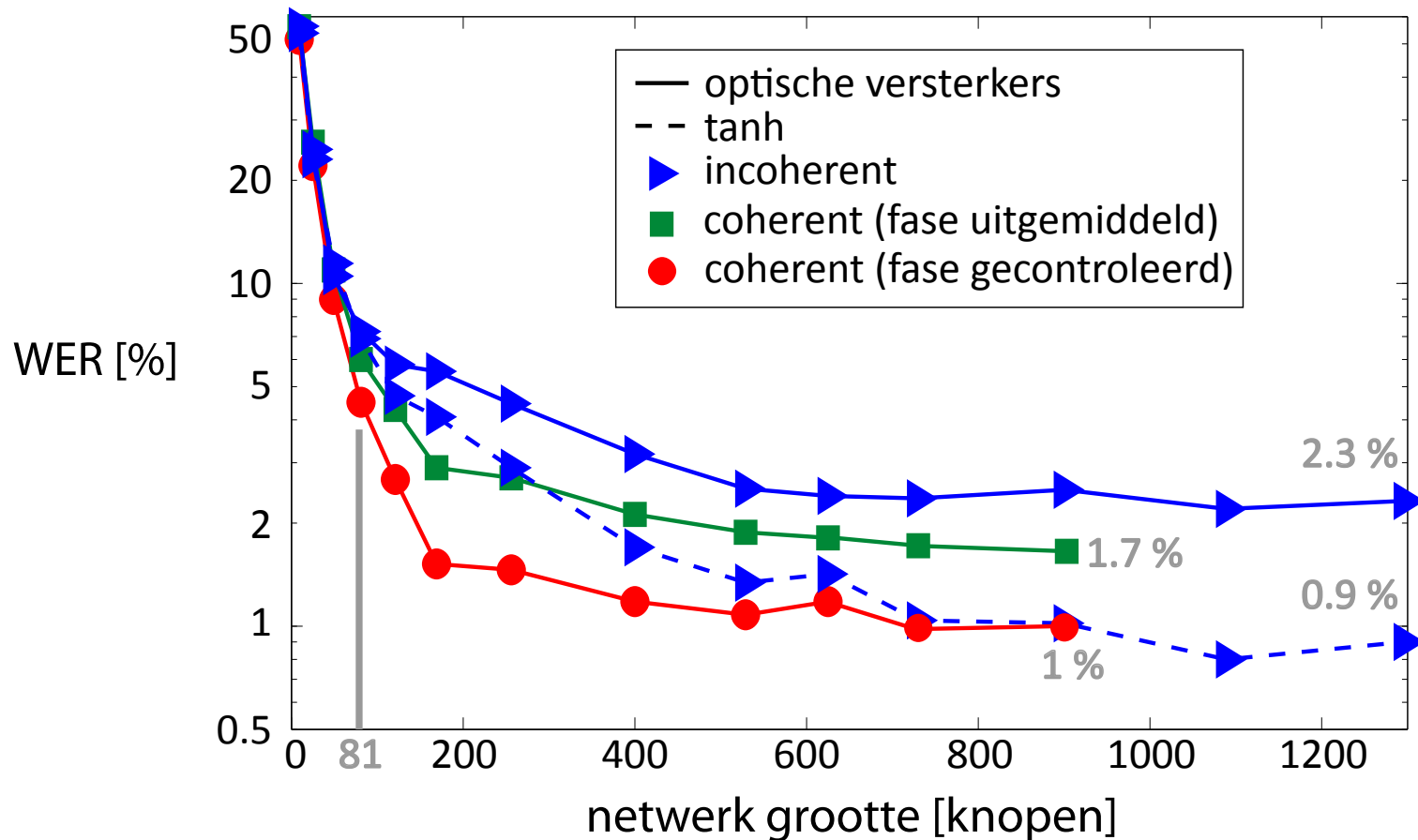
# Het fotonica kookboek: deel 1

Men neme: 1. de swirl topologie



# Het fotonica kookboek: deel 1

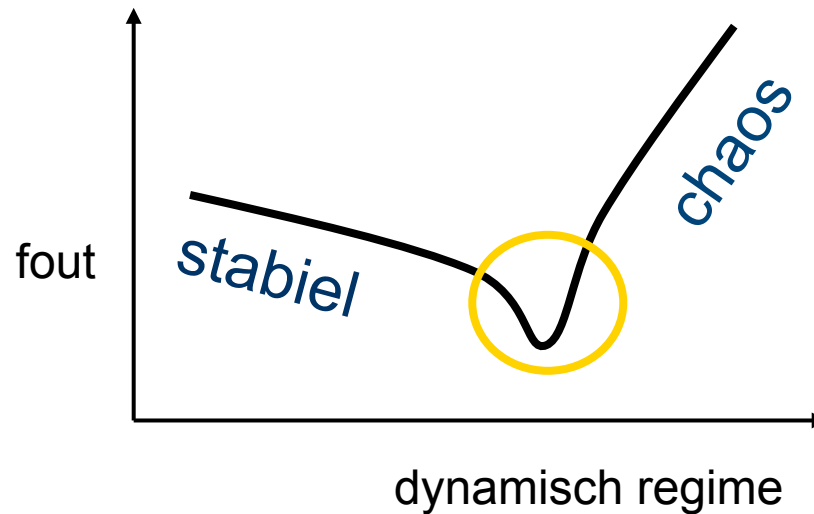
Men neme: 2. een voldoende groot netwerk





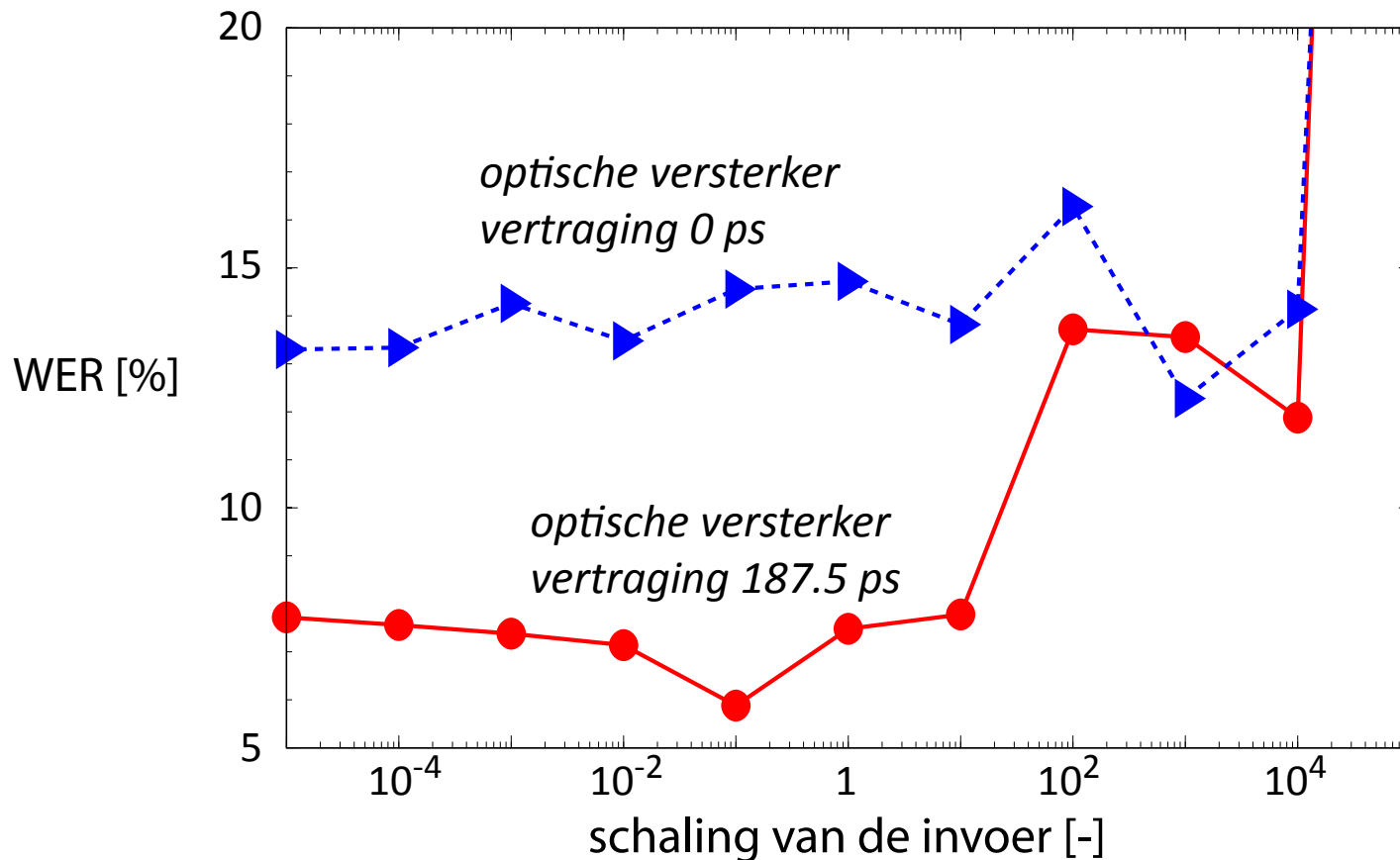
# Het fotonica kookboek: deel 1

Men neme: 3. voldoende stroom in de versterkers zodat het netwerk in het goede dymasche regime zit



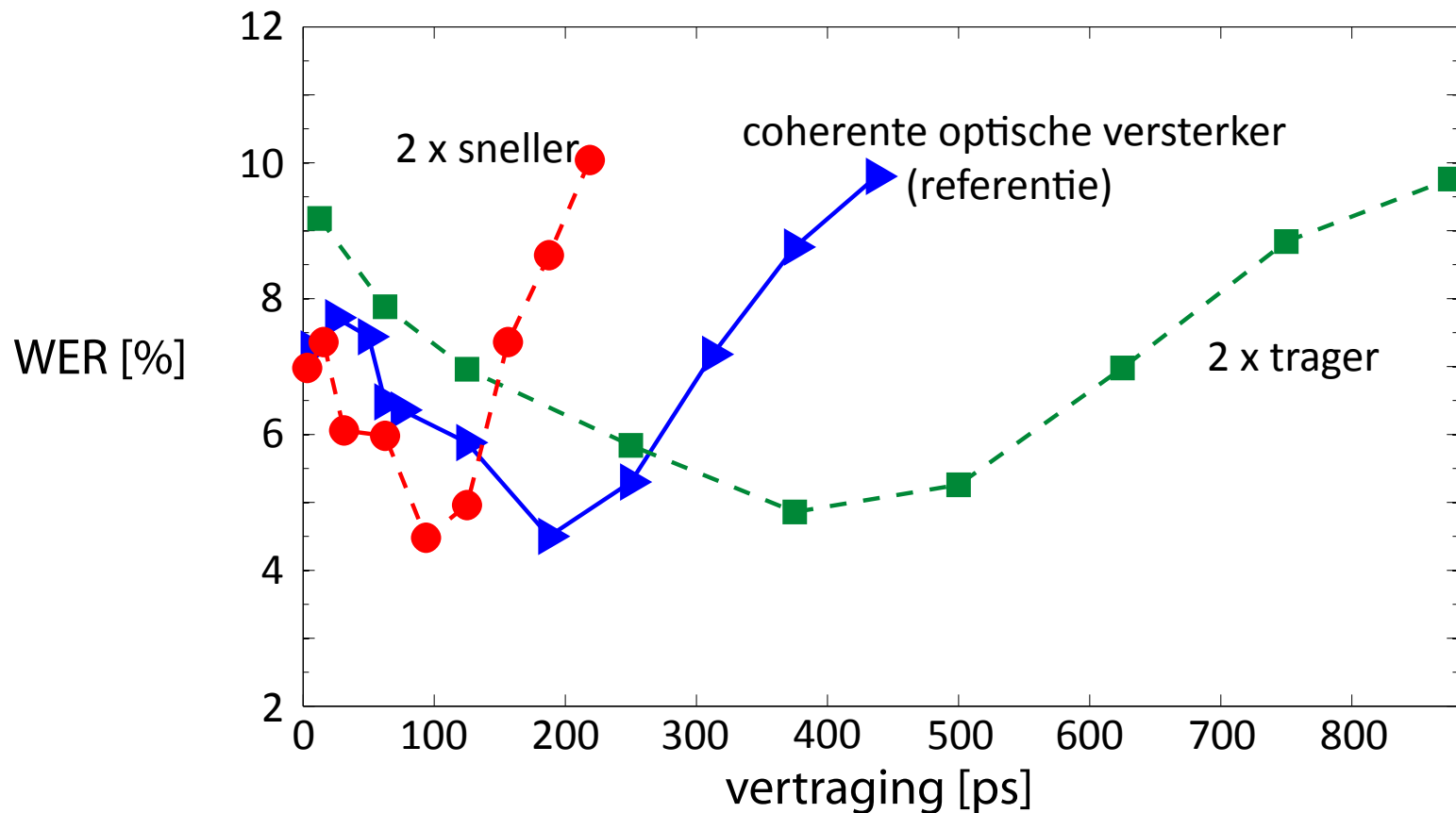
# Het fotonica kookboek: deel 1

Men neme: 4. schaal de invoer zodat je in het lineair regime zit van de versterkers (kleine invoer)



# Het fotonica kookboek: deel 1

Men neme: 5. pas de tijdschalen aan van de invoer naar de grootteorde van fotonica tijdschalen



# Het fotonica kookboek: deel 1

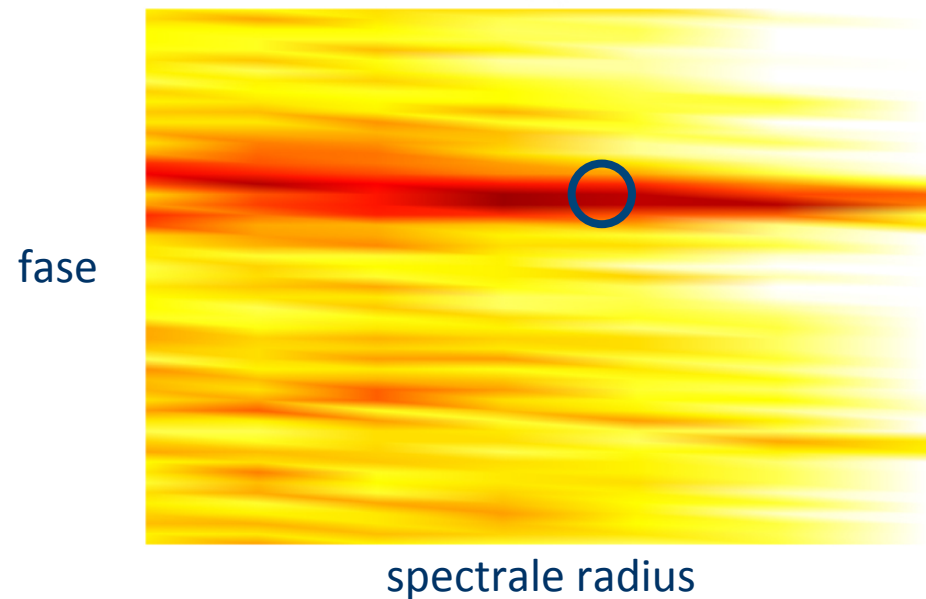
Men neme:

1. de swirl topologie
2. een voldoende groot netwerk
3. voldoende stroom in de versterkers
4. herschaal de invoer
5. versnel / vertraag de invoer

# Het fotonica kookboek: deel 2

zoek de optimale parameters via parameter variaties:

1. de vertragingen
2. de invoer sterkte

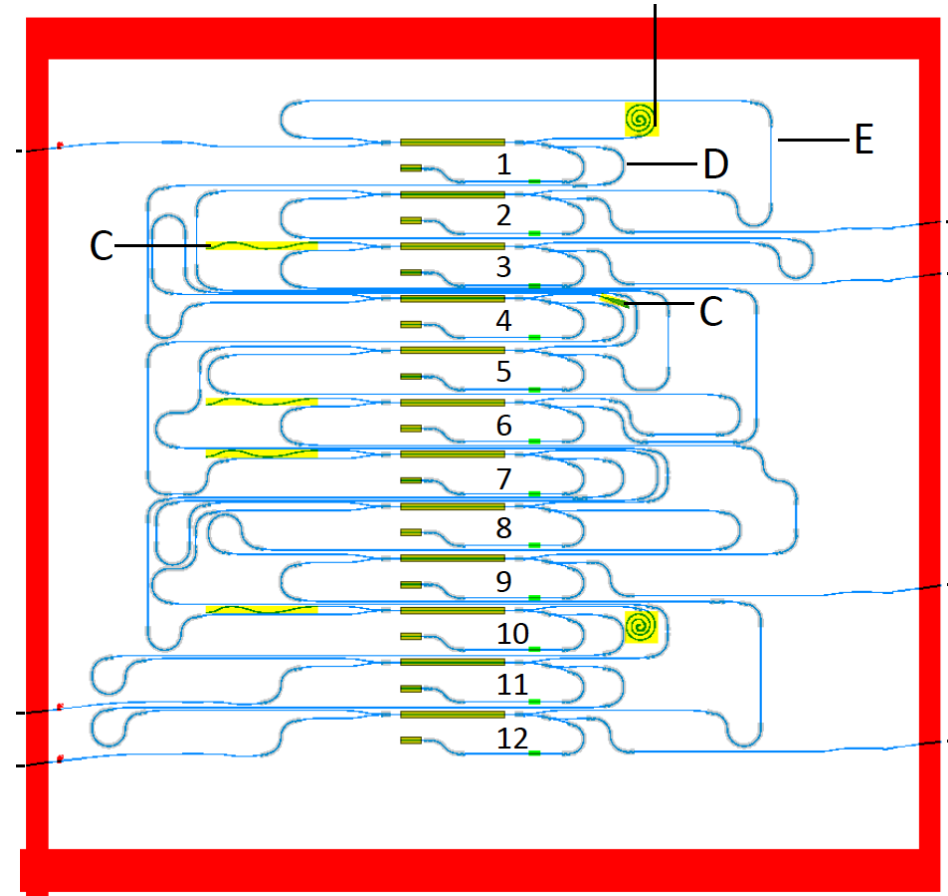


# Het fotonica kookboek: deel 3

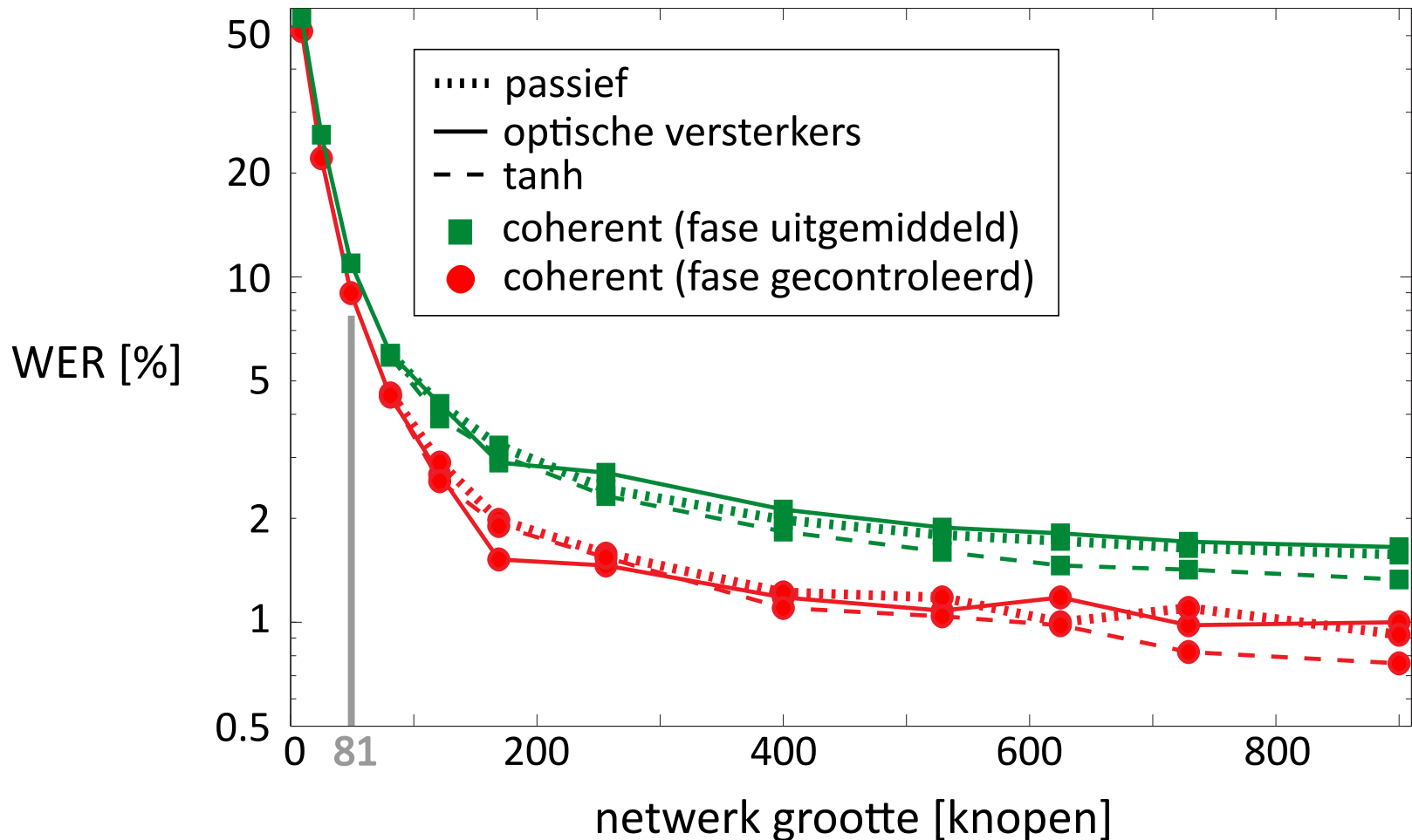
vergroot het netwerk tot de gewenste prestatie bereikt is

# toekomst

Een chip uitmeten die gemaakt werd in Eindhoven met 12 optische versterkers



## Passieve optische netwerken met faseinformatie blijken ook nuttig te zijn voor reservoir computing





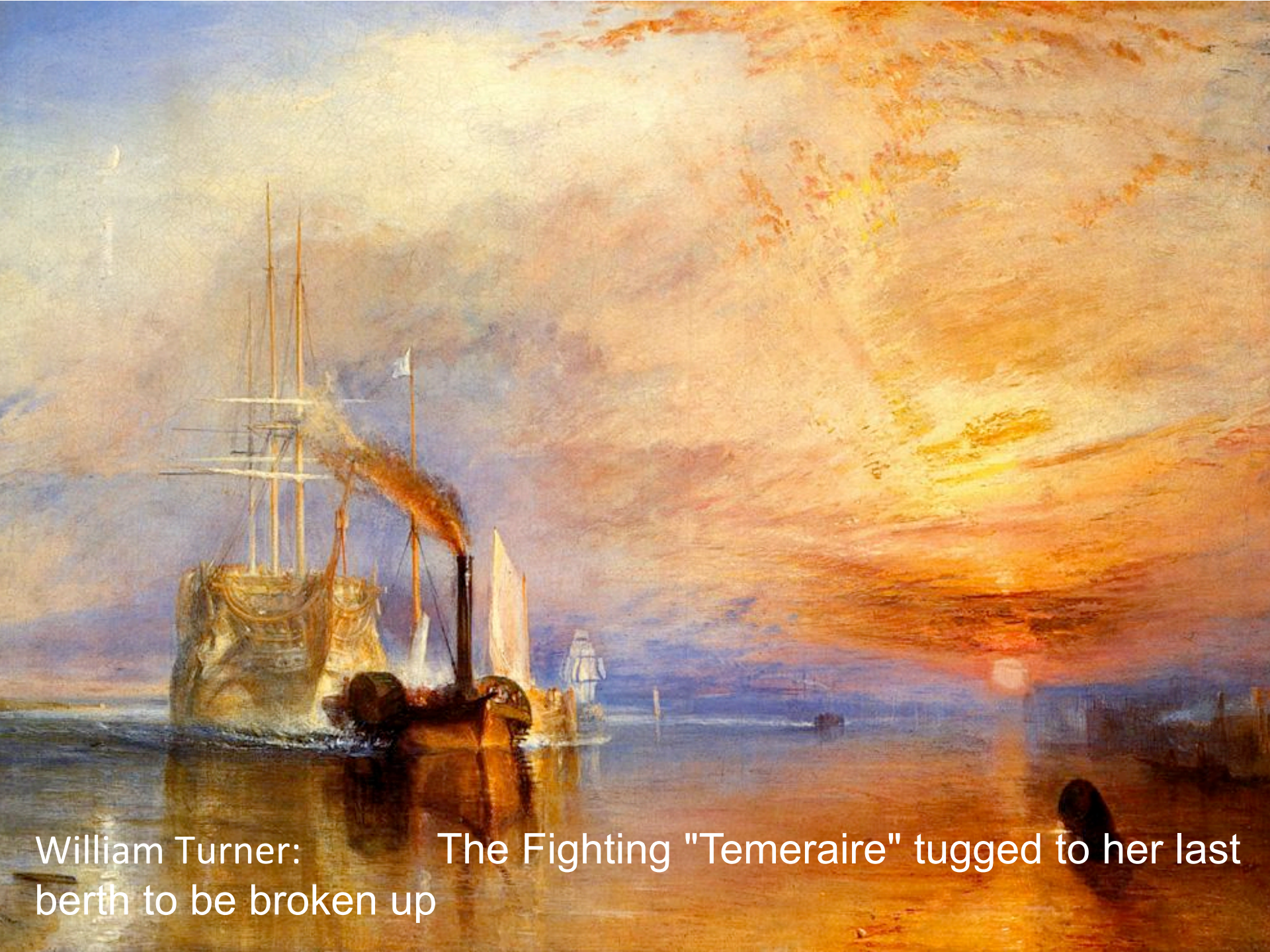
reservoir computing

Fotonica en optische halfgeleiderversterkers

spraakherkenning met licht en reservoir computing

In dit doctoraat werd aangetoond dat fotonica een interessant platform is om reservoirs mee te bouwen

En als typisch fotonische eigenschappen (fase, vertragingen) uitgebuit worden zijn prestaties mogelijk beter dan met klassieke netwerken



William Turner:  
berth to be broken up

The Fighting "Temeraire" tugged to her last