



# Compacte vlakke- golfgeleiderkoppelingen in silicium-op-isolator

---

**Bert Luyssaert**

**Promotoren: Prof. R. Baets en Prof. P. Bienstman**

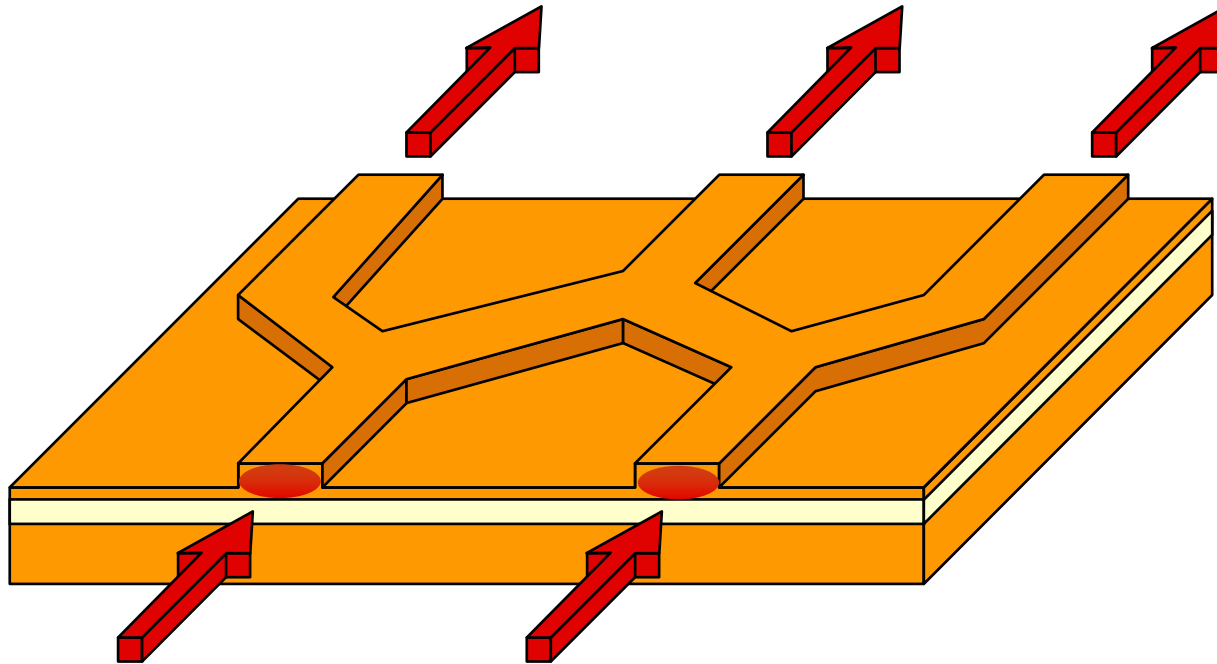
# Inhoudslijst

- **Optische chips**
  - Inleiding
  - Gebruik
  - Golfgeleiders
  - Materialen
- **Golfgeleiderkoppelingen**
  - Gebruik
  - Traditioneel
  - Kern van dit werk

# Inhoudslijst

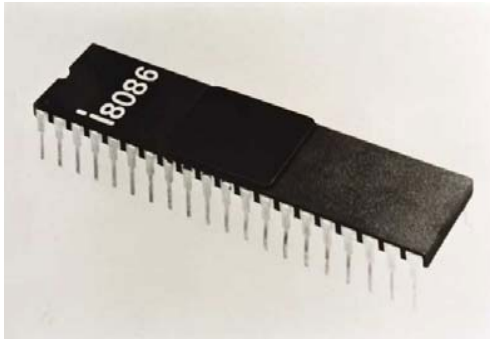
- **Methodes**
  - Simulatietechnieken
- **Simulatieresultaten**
  - Gewijzigde parabool
  - Blokkoppelingen
  - Spline-koppelingen
  - Andere koppelsituaties
- **Interpretatie**
- **Metingen**
- **Conclusies**

# Optische chips

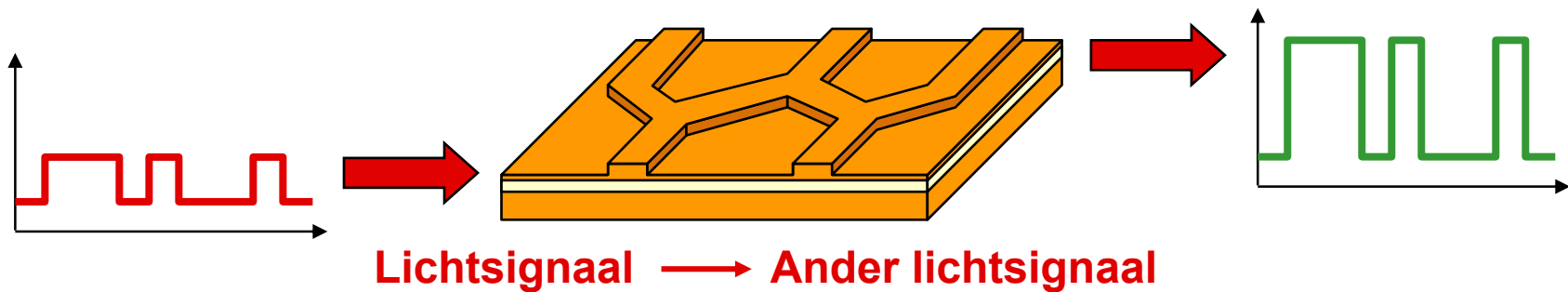
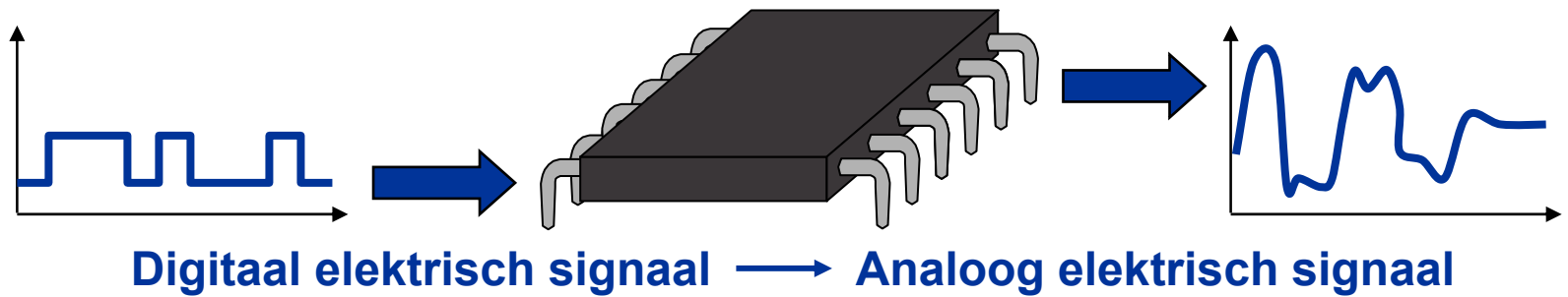


- **Transparant materiaal**
- **Licht wordt in baantjes dichtbij het oppervlak geleid**
- **Optische ingangen en/of uitgangen**
- **Allerlei optische functies in de chip**
- **Typisch ongeveer 1 cm<sup>2</sup>**

# Vergelijking elektrische chips



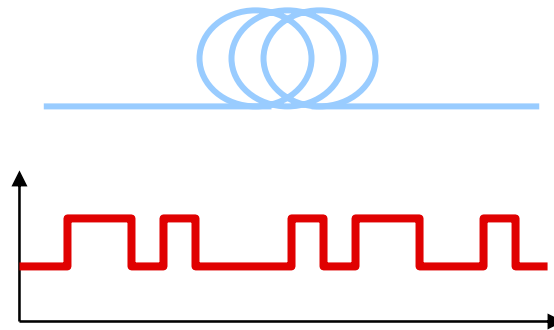
086



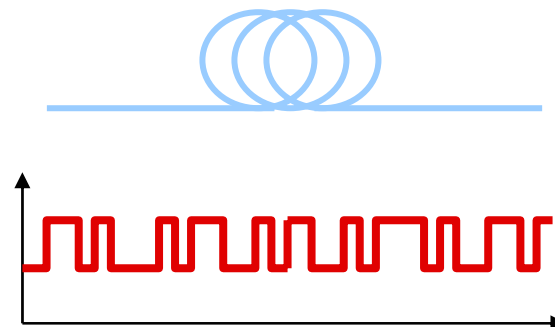
# Optische chips: GEBRUIK

- **Telecommunicatie:**
  - In de complexe apparatuur die nodig is om de bestaande optische glasvezel een hogere capaciteit te geven
- **Breedband:**
  - In Fiber-to-the-home installaties, de opvolger van ADSL en kabel
- **Optische sensor:**
  - In geminiaturiseerde versies van optische sensoren in de chemie en de biologie

# Optische chips: TELECOM

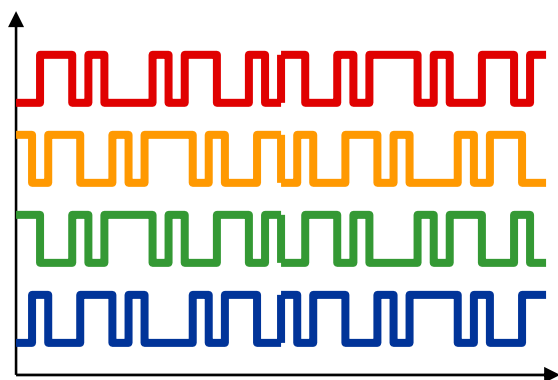
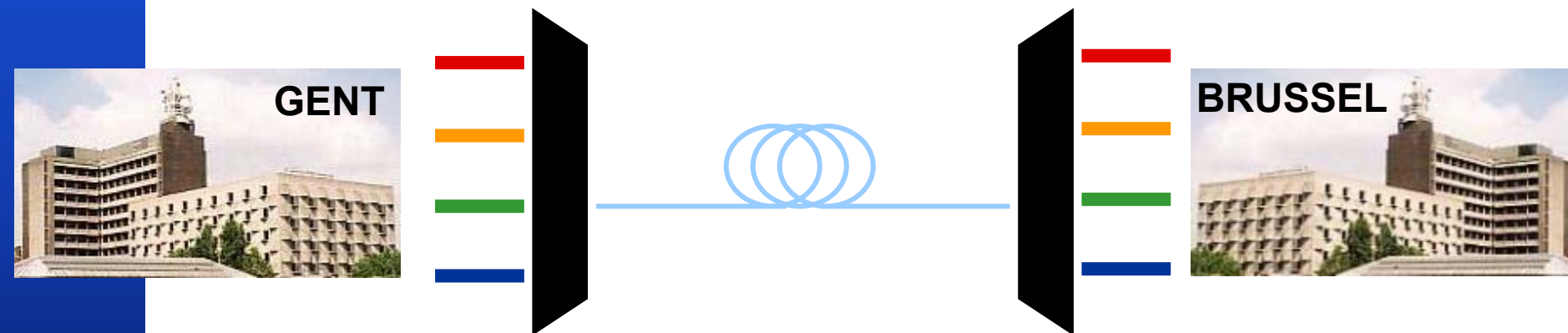


**Upgrade 1:**  
**lichtbron sneller moduleren, d.i. aan- en uitschakelen**



# Optische chips: TELECOM

**Upgrade 2: Meerdere parallelle datastromen elk op hun eigen golflengte door dezelfde vezel sturen**

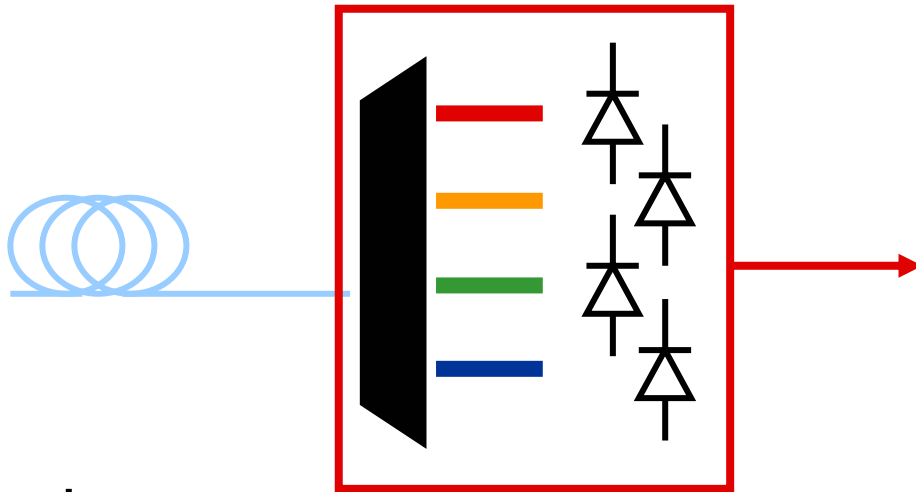


**Techniek = WDM of wavelength division multiplexing**

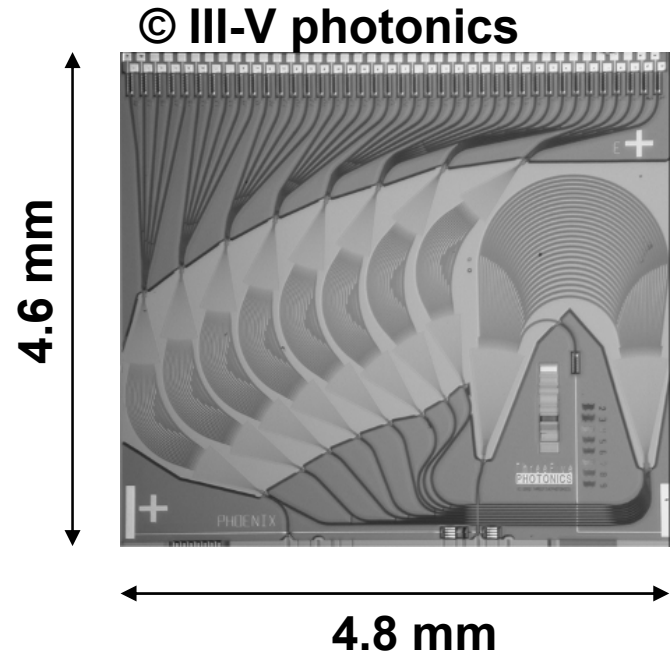
**Vgl. met radio FM-band: verschillende audio-signalen die elk rond hun eigen golflengte gemoduleerd zitten**



# Optische chips: TELECOM



 = lichtdetector



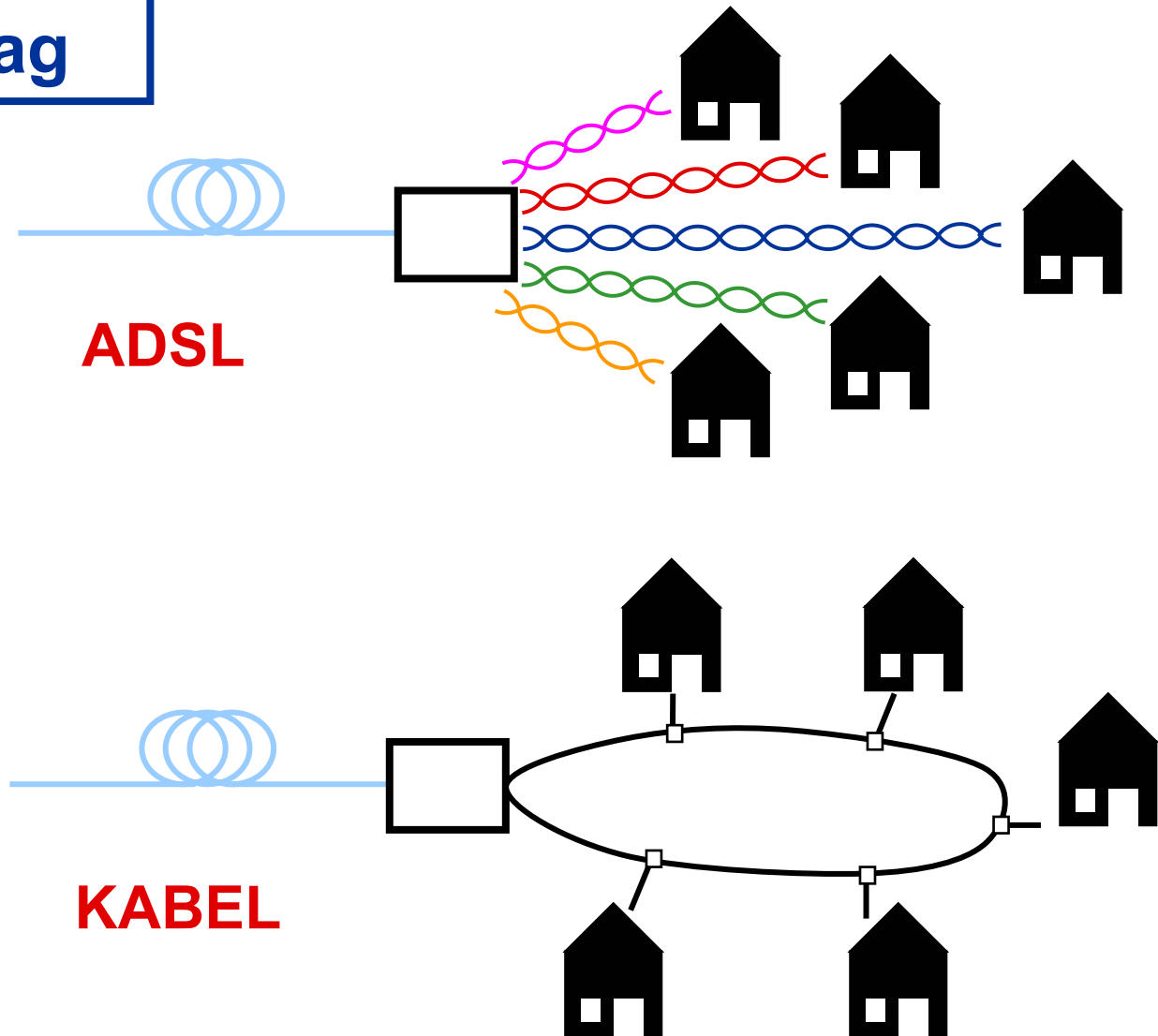
## Optische chip:

- splitst inkomend licht in 40 golflengtes
- leidt elke golflengte naar eigen detector
- zet lichtsignaal om in elektrisch signaal



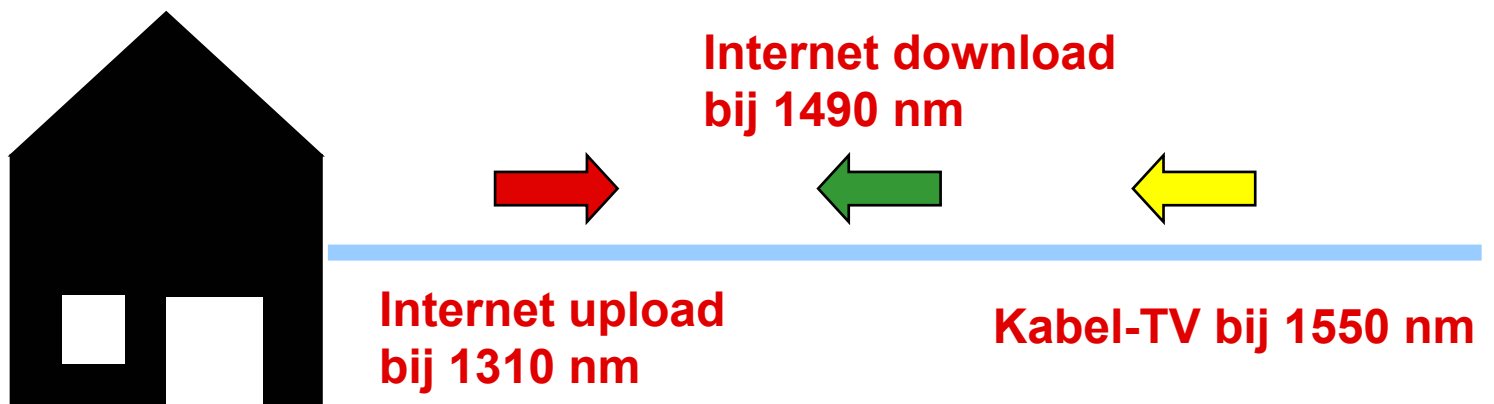
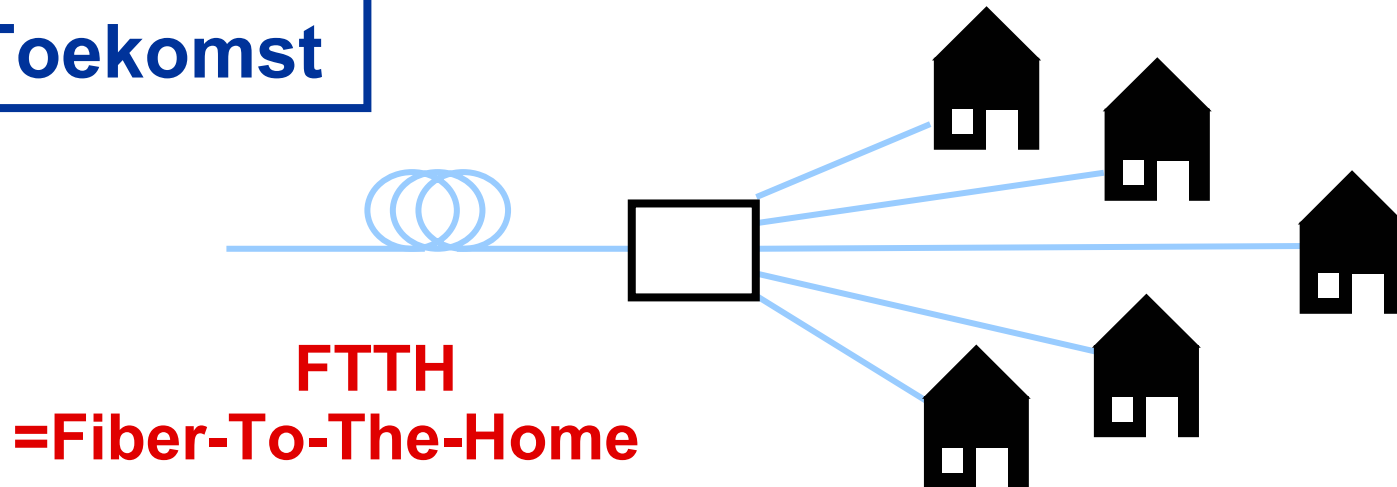
# Optische chips: BREEDBAND

Vandaag



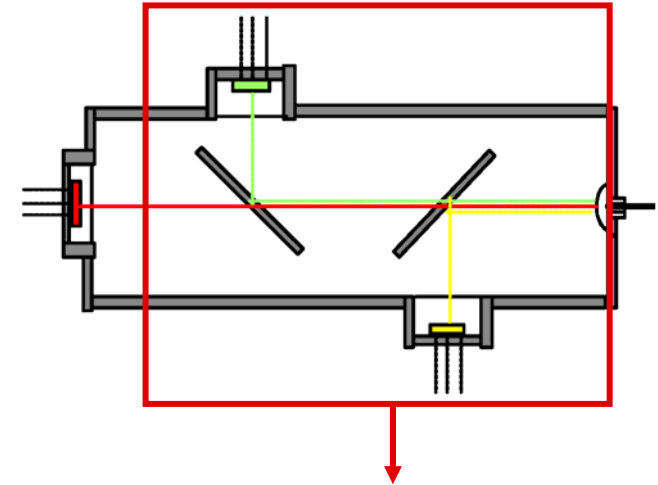
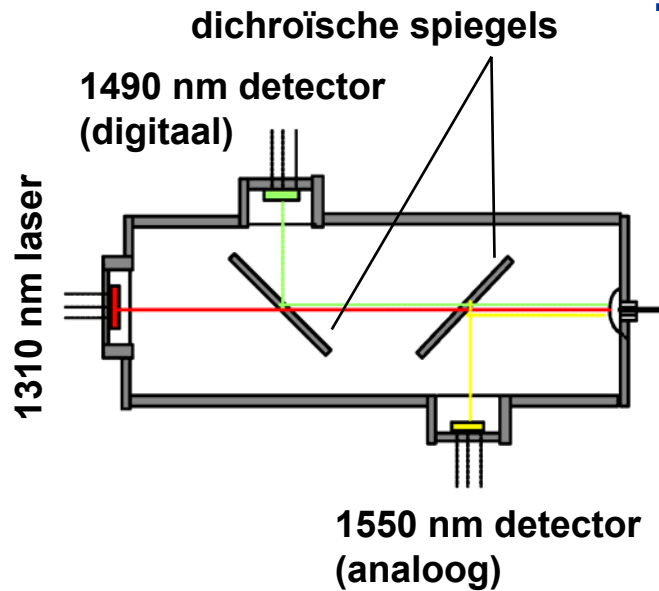
# Optische chips: BREEDBAND

## Toekomst



# Optische chips: BREEDBAND

## TRIPLEXER



box = 20x10x10 mm

**Nadeel: 2½ uur assemblagetijd**

Metrophotronics

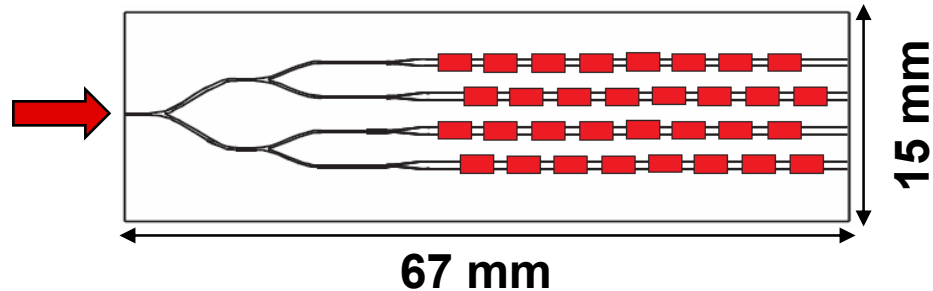


chip = 5.5x1.0 mm

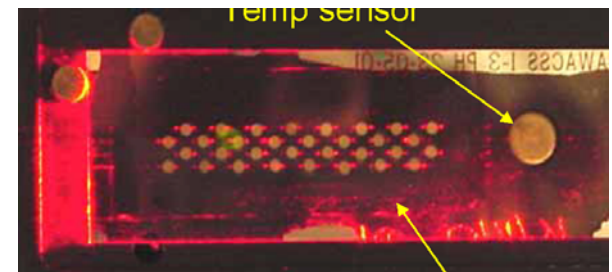
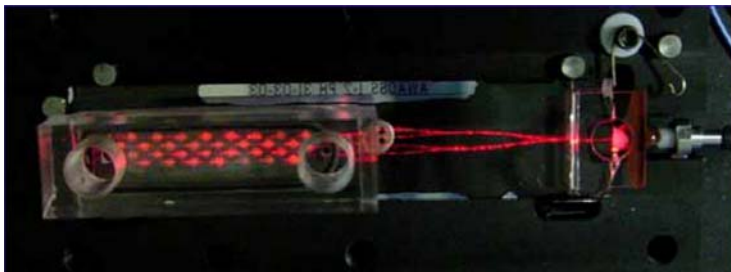
**4 assemblagestappen uitgespaard**

# Optische chips: SENSOR

Kern van een draagbaar toestel om waterpollutie via pesticiden te meten

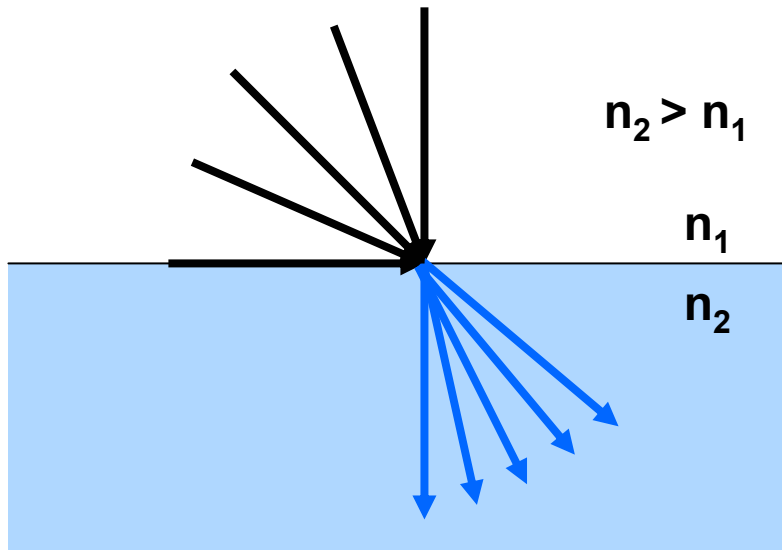


- Inkomend licht verdeeld over 4 brede golfgeleiders
- Per golfgeleider 8 chemische geactiveerde gebieden
- Elk gebied sensitief voor andere pesticide
- Reactie = fluorescentie = andere kleur rood wordt uitgezonden (Cy5)
- Uitlezing via array van plastic vezels boven de chip



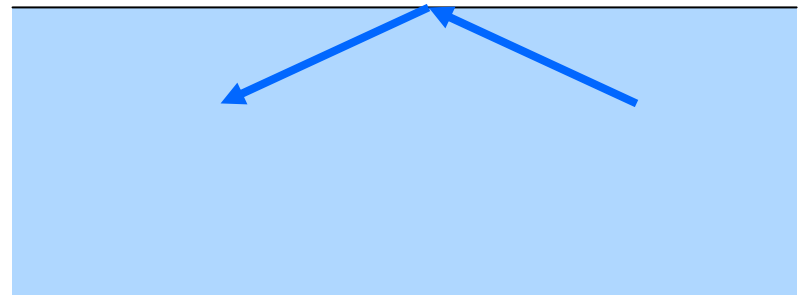
# Golfgeleiders

## Lichtbreking aan de overgang tussen 2 materialen met verschillende brekingsindex



Wet van Snell:  $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$

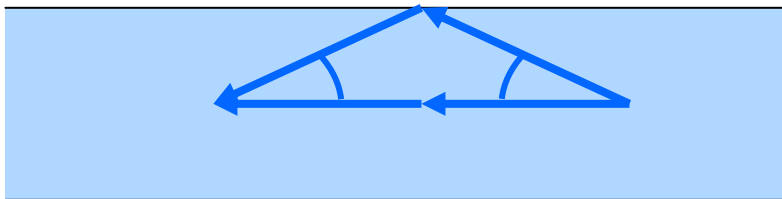
### Totale interne reflectie



$\theta_{\text{TIR}} = \text{bgsin}(n_1/n_2)$

# Golfgeleiders

**Tweede parallelle  
scheidingsooppervlak**



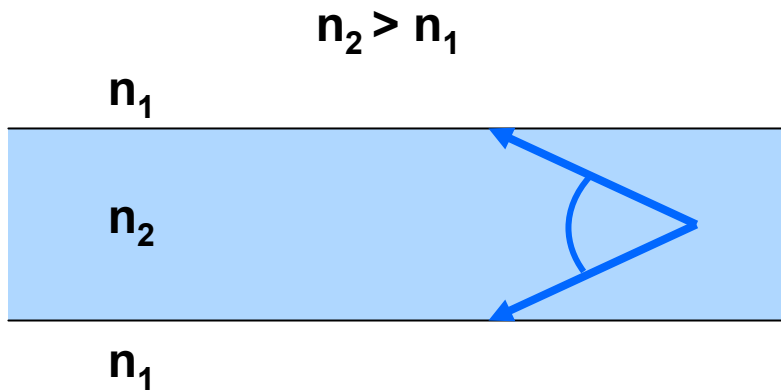
**Lichtgeleider  
of golfgeleider**



**Alle lichtstralen met hoeken  
tussen  $+\theta_{\text{TIR}}$  en  $-\theta_{\text{TIR}}$  worden  
geleid in het middelste medium**

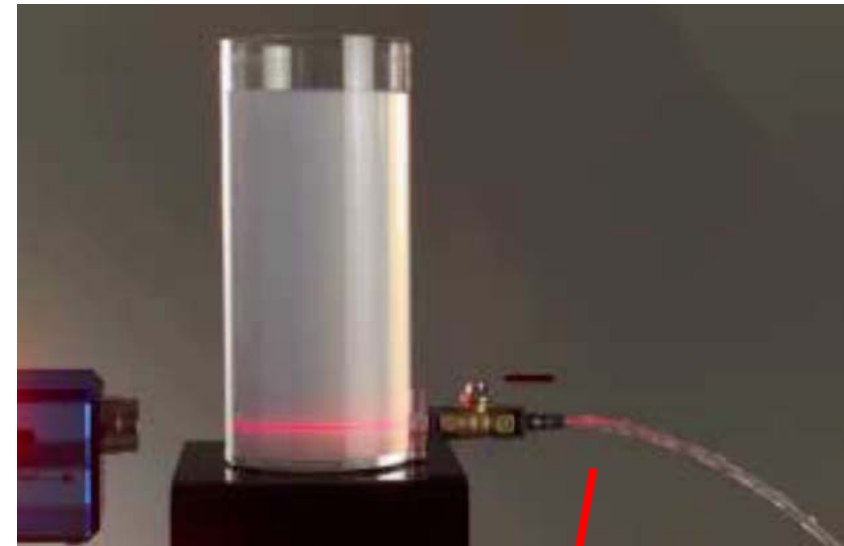
# Golfgeleiders

## Experiment van Tyndall



**golfgeleiding door totale interne reflectie**

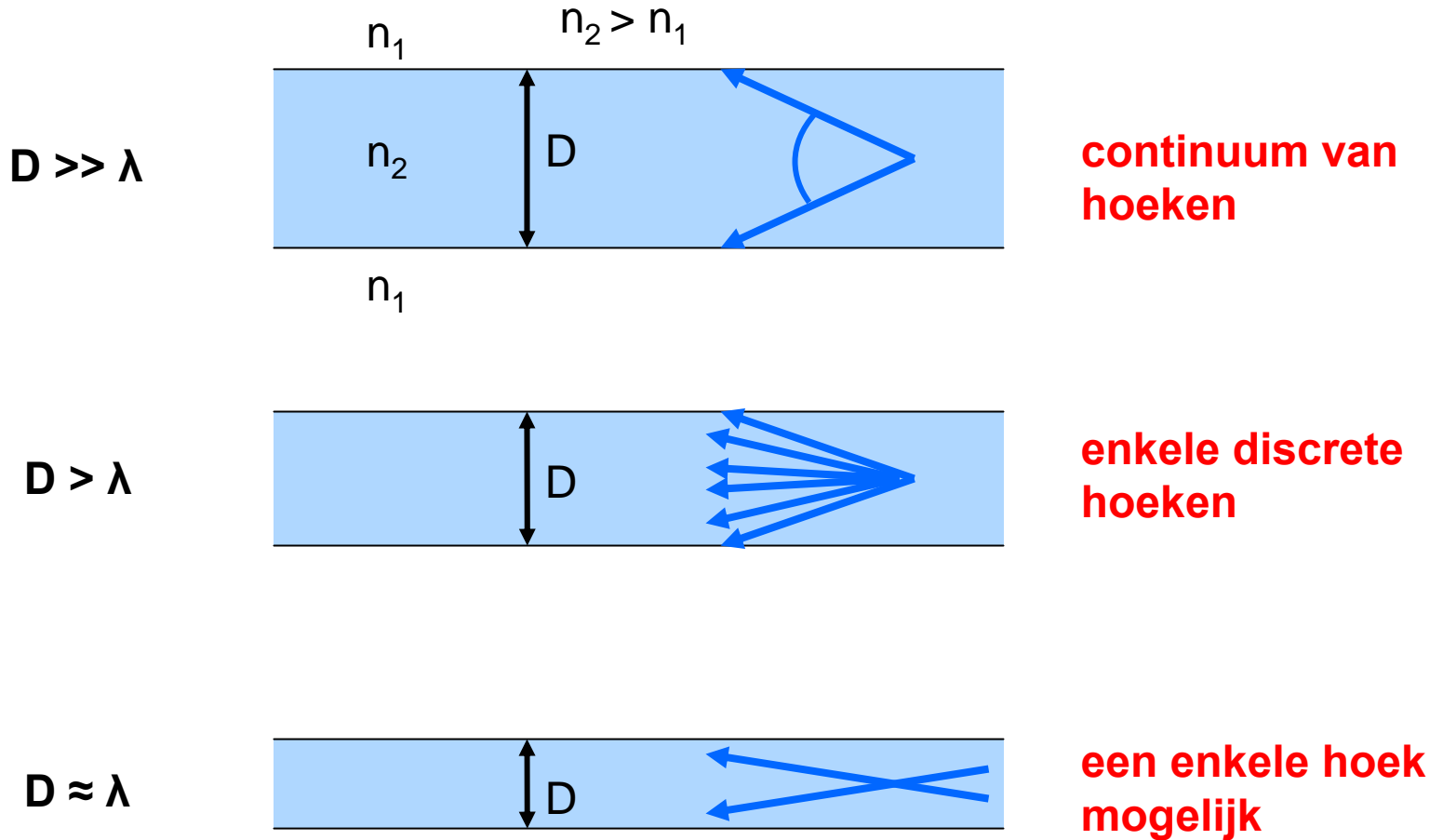
**vb.:  $n_{\text{lucht}} \approx 1.0$  en  $n_{\text{water}} \approx 1.33$**



**licht wordt geleid doorheen de waterstraal**



# Golfgeleiders

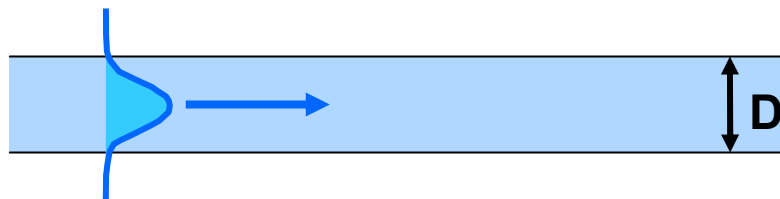


$\lambda$  voor zichtbaar licht  $\approx 500$  nm  $\approx 1/100^{\text{ste}}$  van de  $\emptyset$  van een menselijk haar

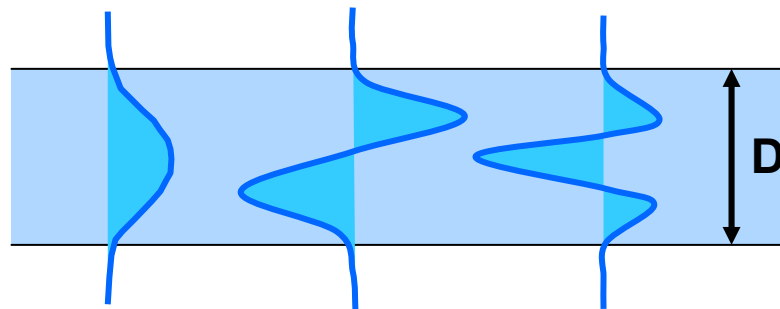
# Golfgeleiders



Op een lengteschaal  $\approx \lambda$  geldt de benadering van licht door een straal echter niet meer



Mode waarop licht door de golfgeleider kan bewegen =  
golfgeleidermode



grondmode

1<sup>e</sup> mode

2<sup>e</sup> mode

# Materialen

## Vereisten:

- Transparant voor de gebruikte golflengten
- Mogelijkheid om tenminste 2 brekingsindices te definiëren

## Verschillen:

- Sommige materialen kunnen enkel licht geleiden  
→ **glas**
- Sommige kunnen eveneens licht detecteren  
→ **silicium (werkpaard van de elektronica)**
- Sommige kunnen geleiden, detecteren en opwekken  
→ **indiumfosfide**

# Vlakke golfgeleiders

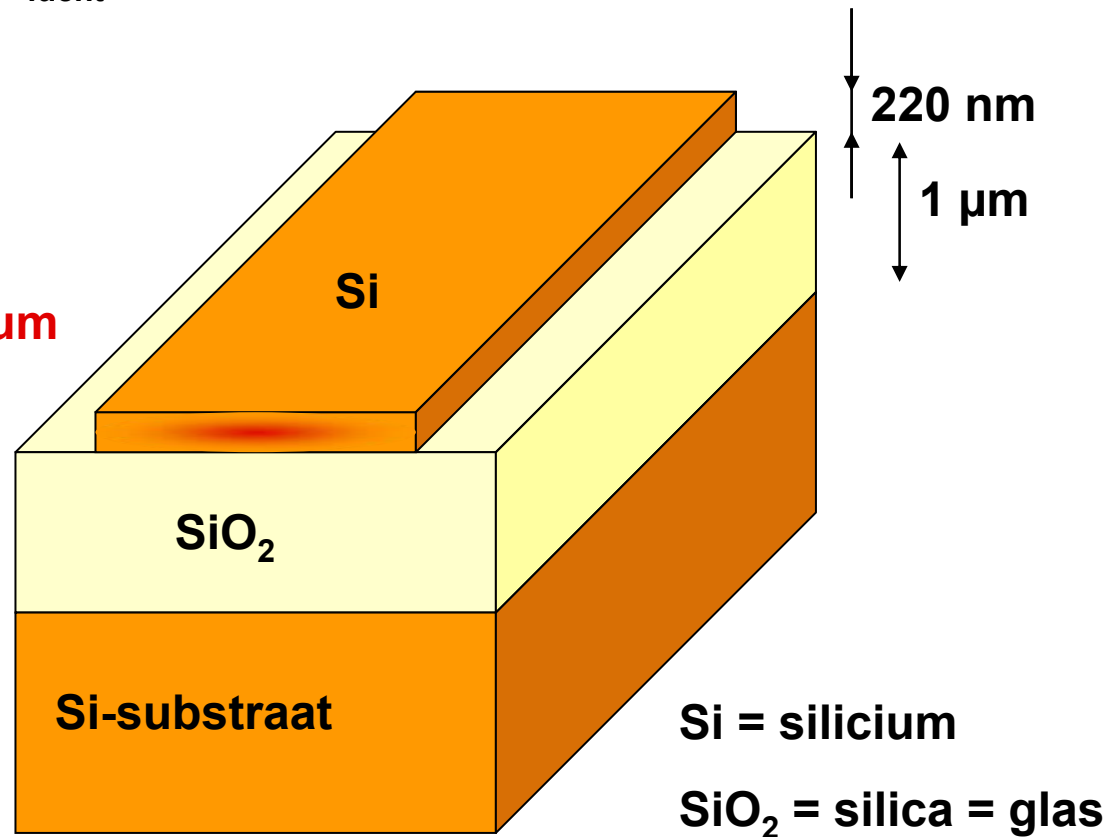
**Eenvoudigste fabricage: stappenproces op schijven  
materiaal**

$$n_{\text{Si}} = 3.47 > n_{\text{SiO}_2} = 1.45 > n_{\text{lucht}} = 1.0$$



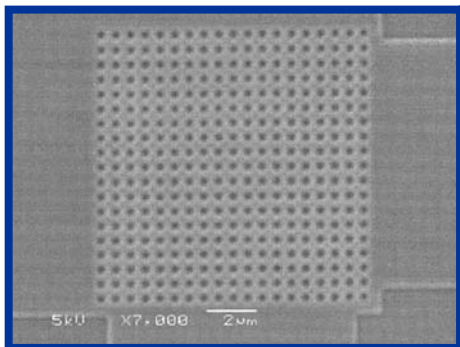
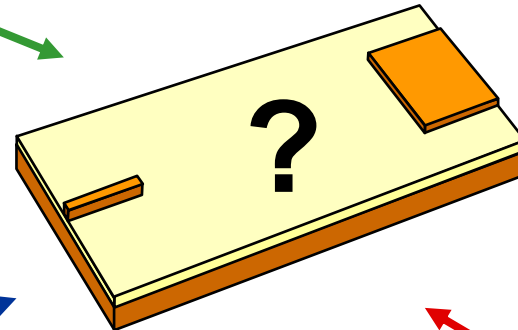
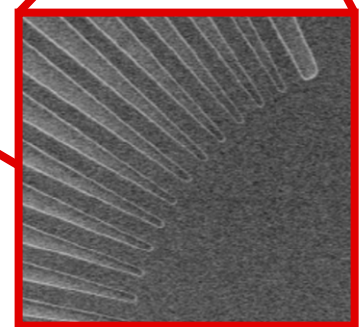
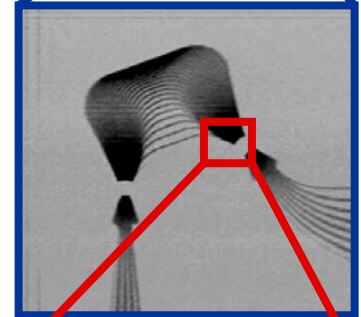
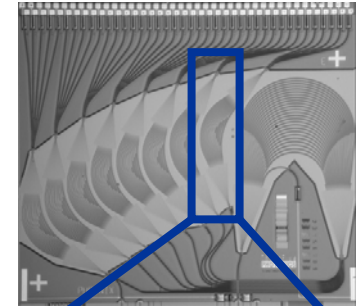
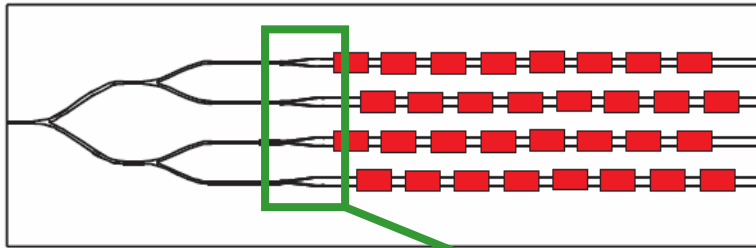
**Licht blijft geleid in de  
bovenste strook Silicium**

**Dit noemen we een  
vlakke golfgeleider**



# Golfgeleiderkoppelingen

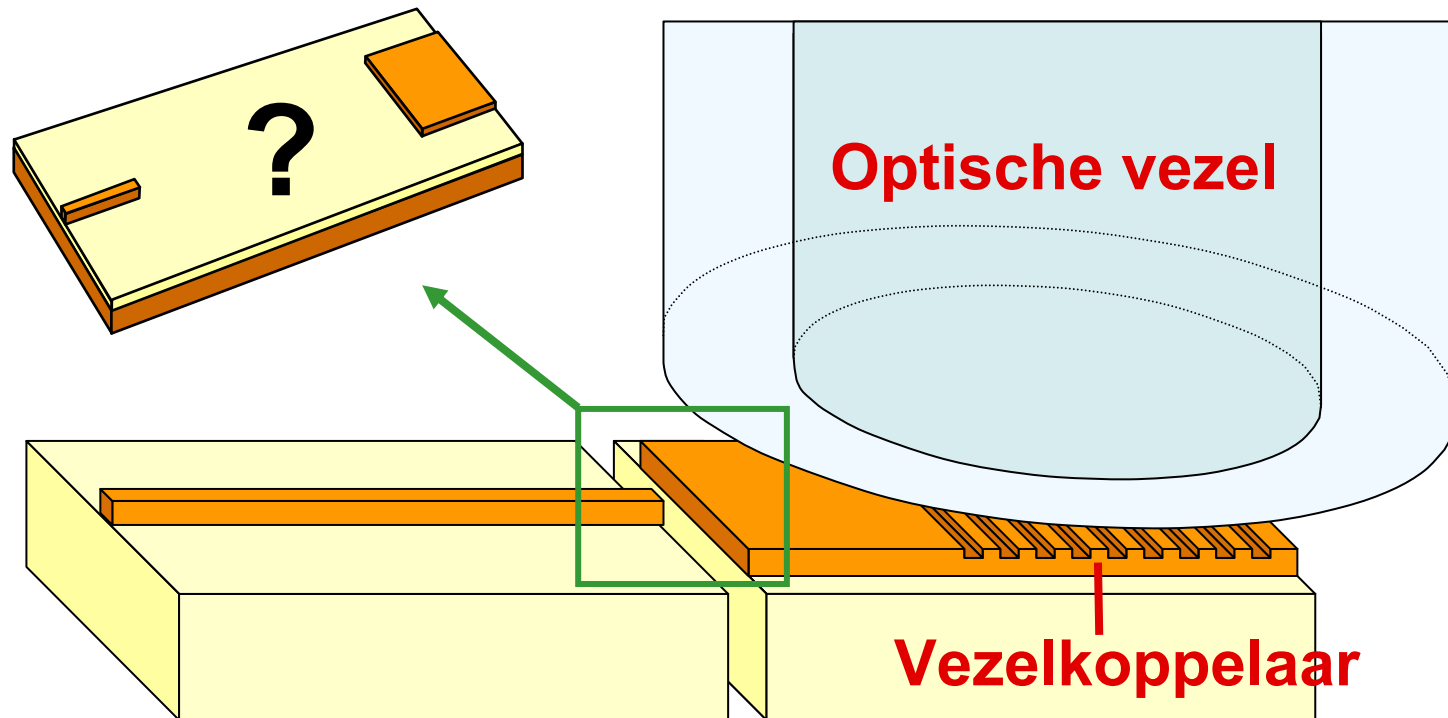
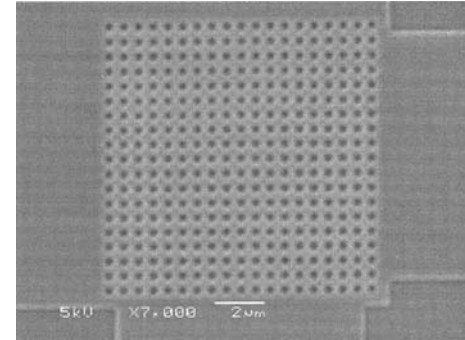
Binnen een optische chip: overgangen tussen golfgeleiders met verschillende breedte



# Golfgeleiderkoppelingen

## Vezel-chipkoppeling: 2 mogelijkheden

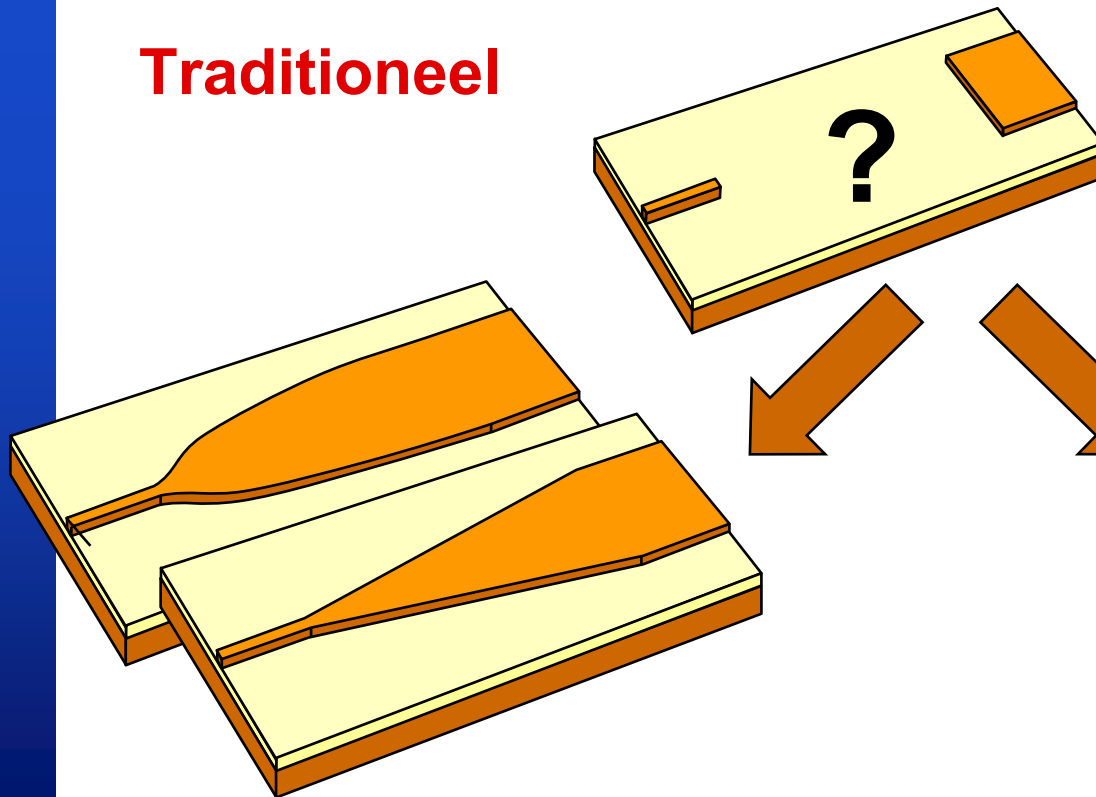
- aan de zijkant van de chip
- vertikaal bovenop de chip



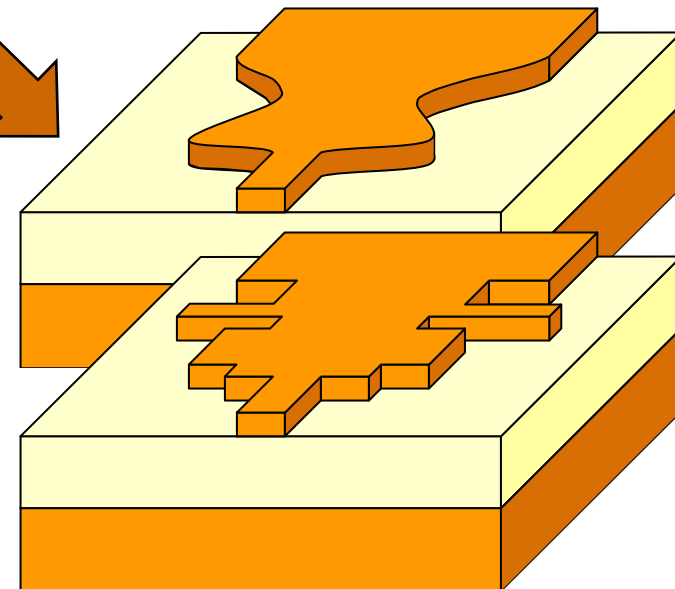
PhD Dirk Taillaert

# Golfgeleiderkoppelingen

**Traditioneel**



**Dit werk**



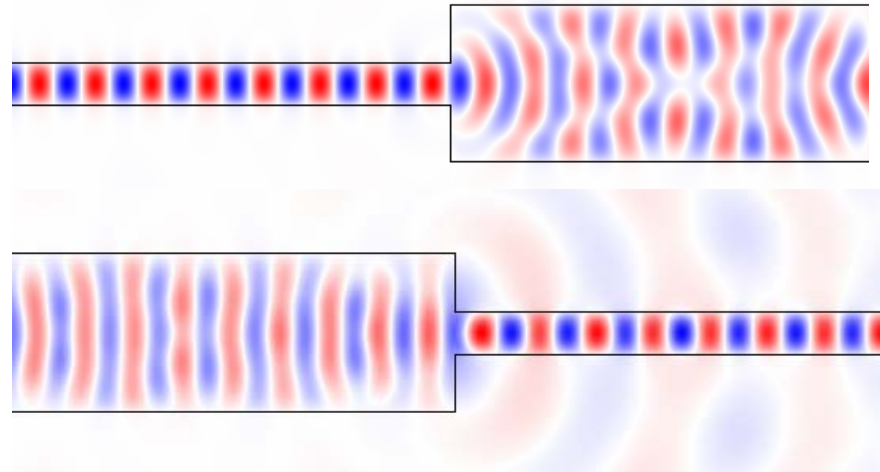
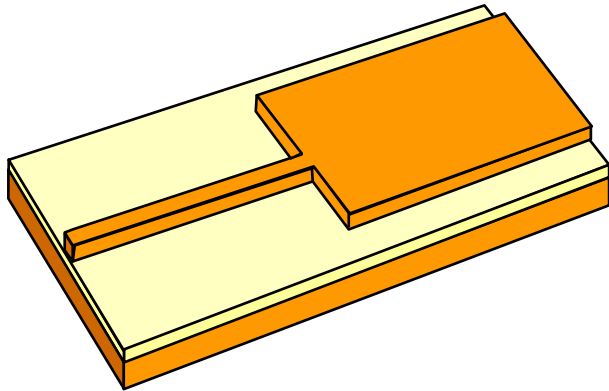
**Lineair of parabolisch**

- Goede koppeling
- Breed golflengtegebied
- Maar zeer lang (plaatsrovend)

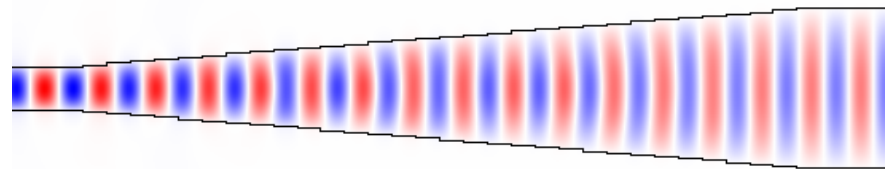
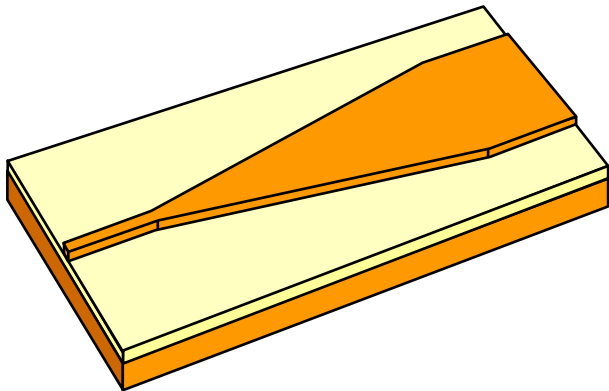
**Onze doelstelling:**

**KORTER**

# Te korte koppelingen

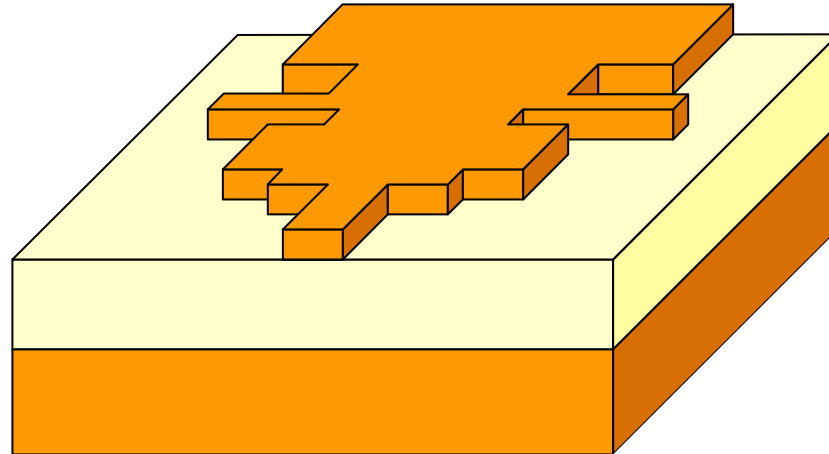


**Excitatie van verschillende modes in de brede golfgeleider of afstraling uit de vlakke golfgeleiders**



**Grondmode propageert “ongehinderd” doorheen de structuur: adiabatische koppeling**



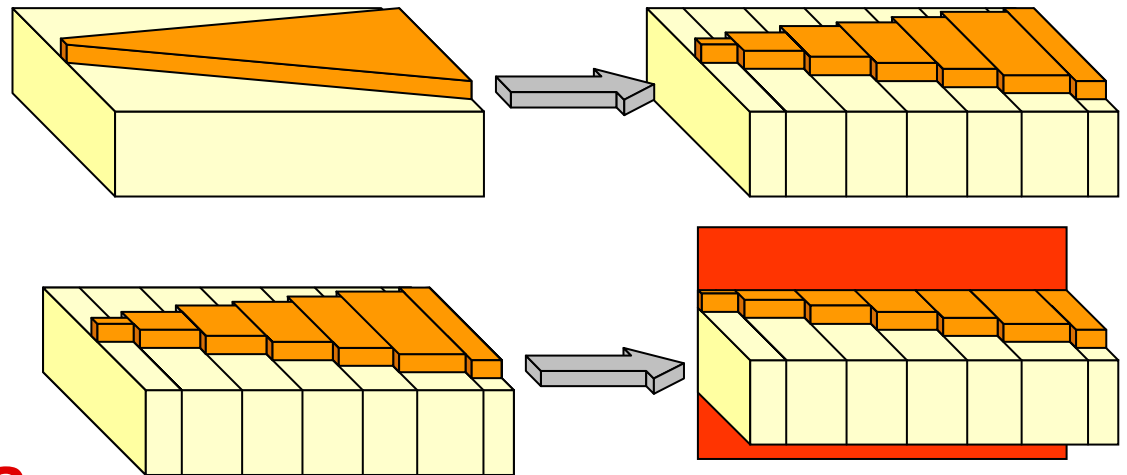


## Werkwijze:

- in plaats van theoretisch te bepalen wat de beste vorm is voor de koppeling
- willekeurige structuren tussen de 2 golfgeleiders plaatsen en deze aanpassen tot ze een goede koppeling opleveren

## Elektromagnetische simulaties

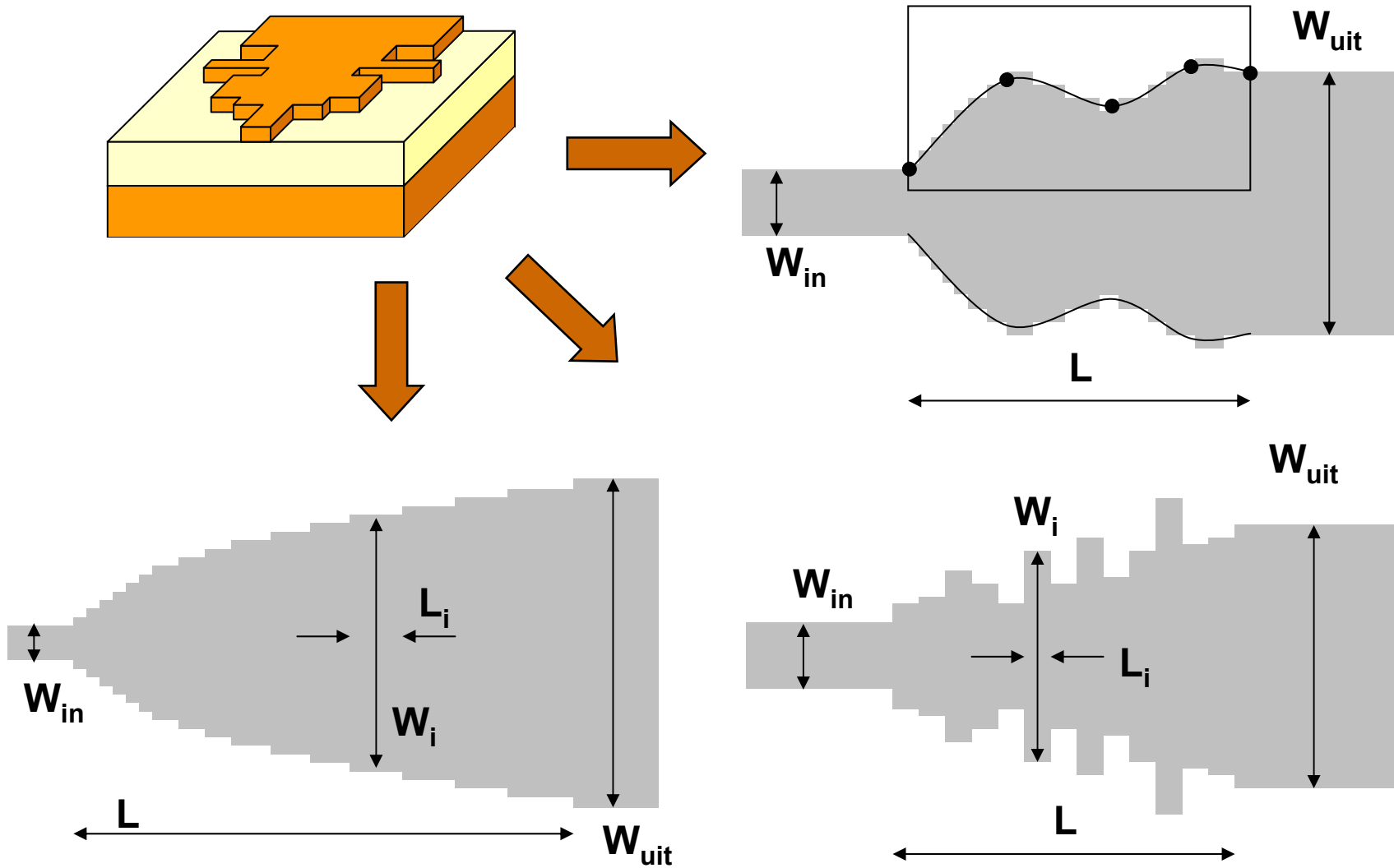
- effectieve index methode: 3D  $\rightarrow$  2D
- eigenmode-expansie (CAMFR en FIMMWAVE)
- symmetrie



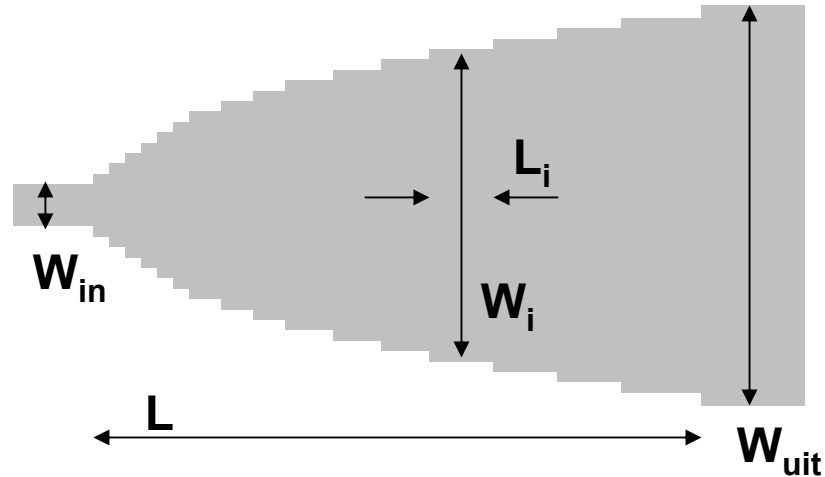
## Optimalisaties

- genetische algoritme
- derivative descent optimalisatie

# Simulaties

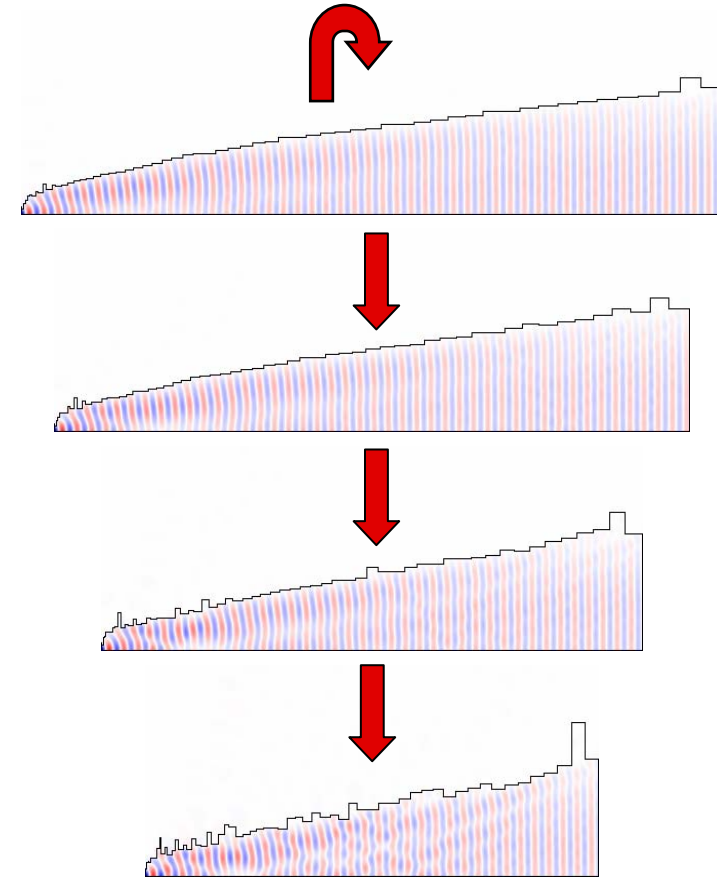
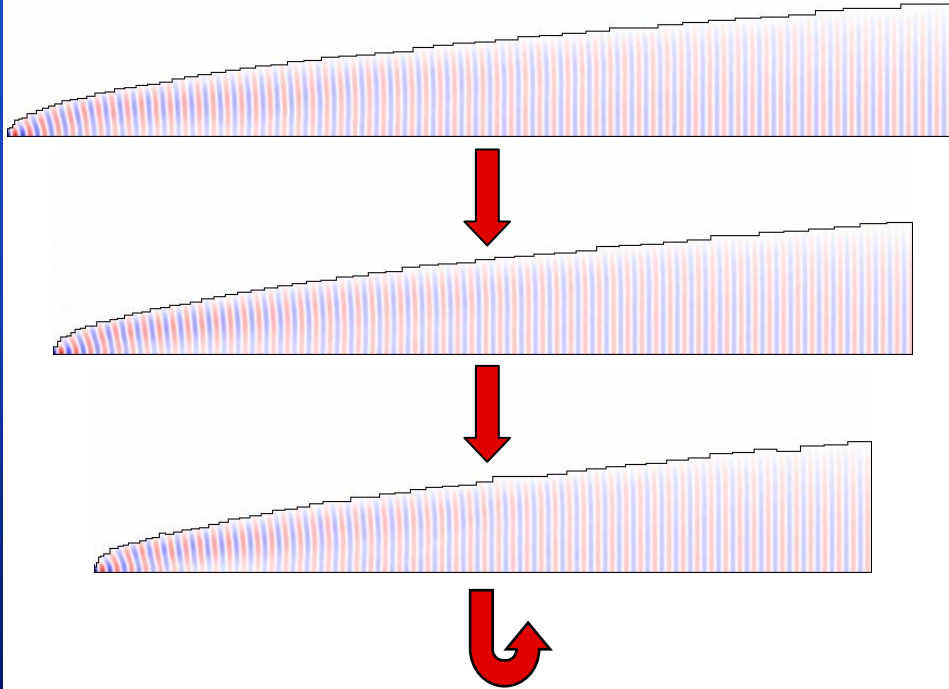


# Gewijzigde parabool



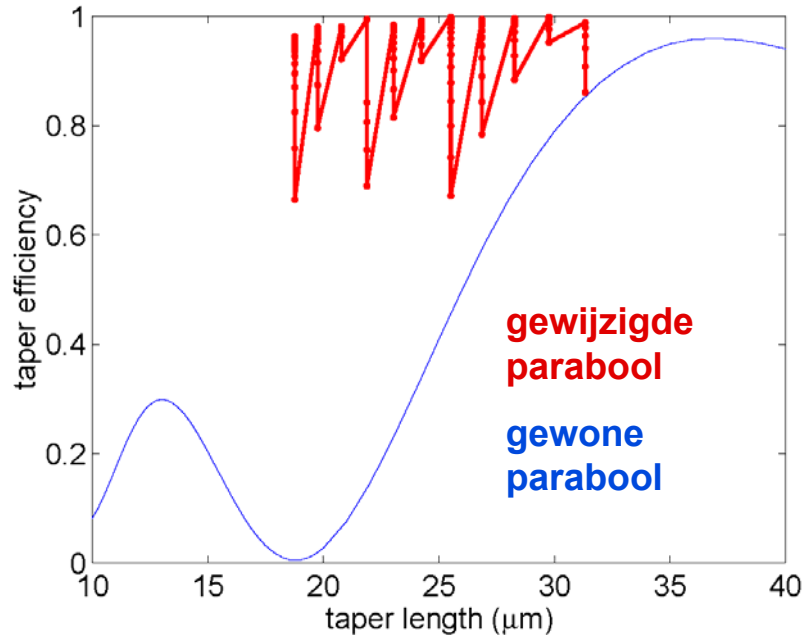
1. Vertrek van een parabool die goed koppelt
2. Verklein alle lengtes  $L_i$  met een gelijke hoeveelheid
3. Links naar rechts: zoek voor alle breedtes  $W_i$  een betere waarde
4. Herhaal stap 3 enkele malen
5. Herhaal stappen 2,3 en 4 enkele malen
6. Tot een zekere stopvoorwaarde

# Gewijzigde parabool

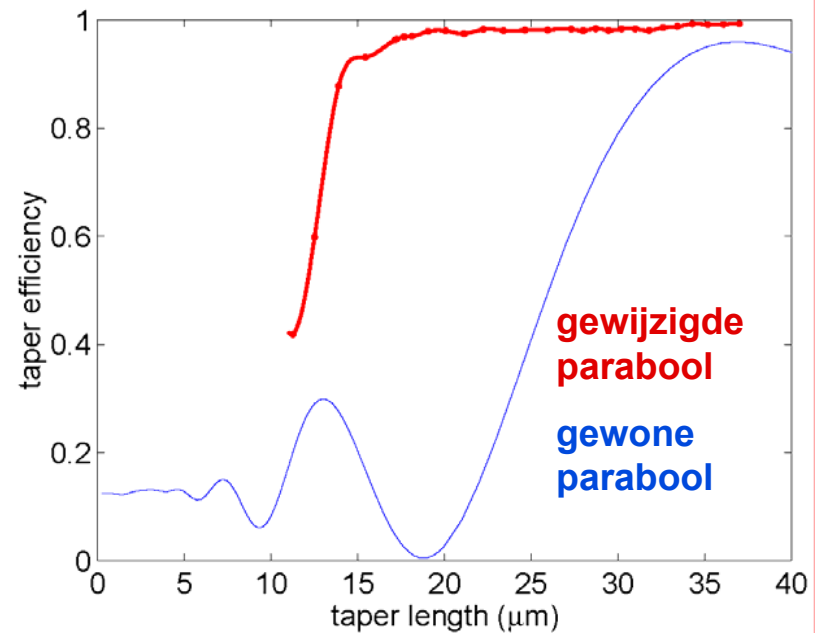


- Goede koppeling in kortere structuren
- Grilligere vormen van koppelingcomponent
- Grilliger veldpatroon

# Gewijzigde parabool



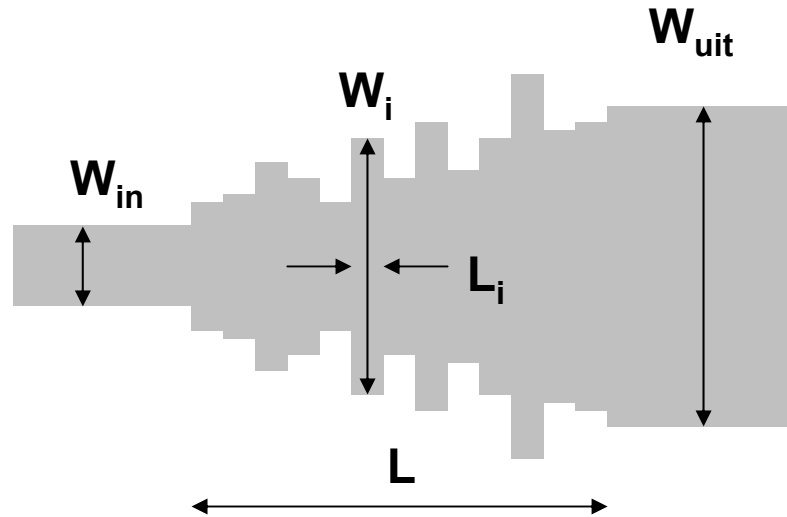
**1x de optimalisatie doorlopen**



**alle beste structuren samen**

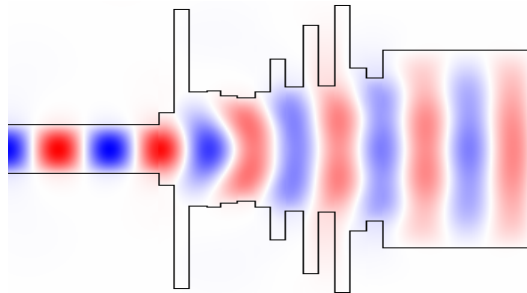
- Koppeling tussen SOI-golfgeleiders met breedtes van 0.56 en 10.0  $\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
- Behaalde koppel efficiënties hoger dan de normale parabool
- Rond lengte van 20  $\mu\text{m}$  extreem verschil

# Blokkoppeling

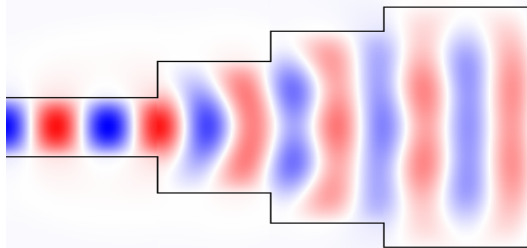


1. Bepaal de lengte  $L$  van de koppeling
2. Plaats  $N$  stukken golfgeleider met lengte  $L_i = L/N$  en een willekeurige breedte  $W_i$  tussen de 2 golfgeleiders
3. Optimaliseer nu alle breedtes  $W_i$
4. Vele parameters om te optimaliseren + geen gekend beginpunt  
 → genetisch algoritme is een goede keuze

**0.5 naar 2.0  $\mu\text{m}$**

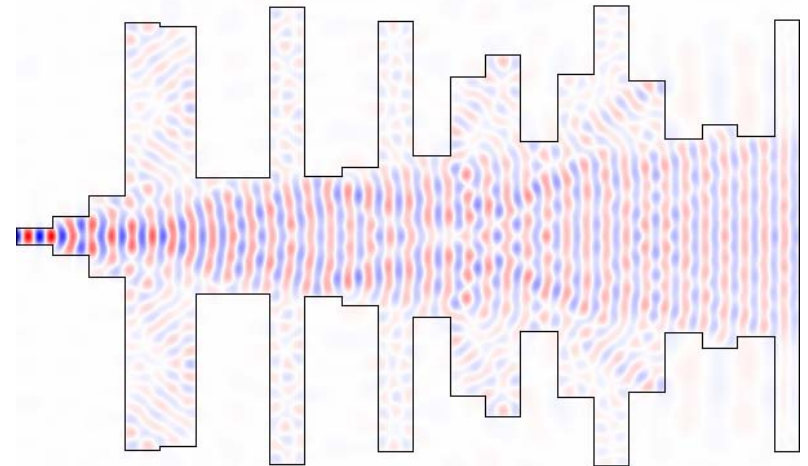


**$N = 14$ ,  $L = 1.5 \mu\text{m}$ ,  $T = 0.99$**



**$N = 2$ ,  $L = 1.5 \mu\text{m}$ ,  $T = 0.97$**

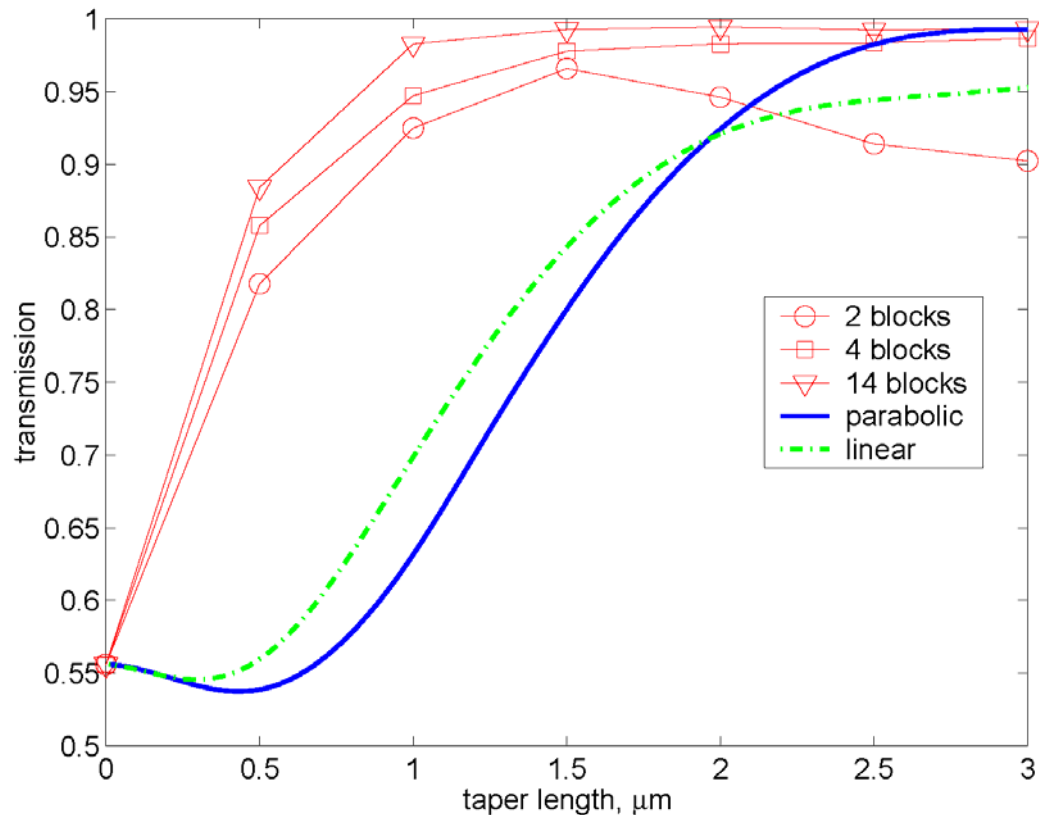
**0.5 naar 12.0  $\mu\text{m}$**



**$N = 20$ ,  $L = 20 \mu\text{m}$ ,  $T = 0.88$**

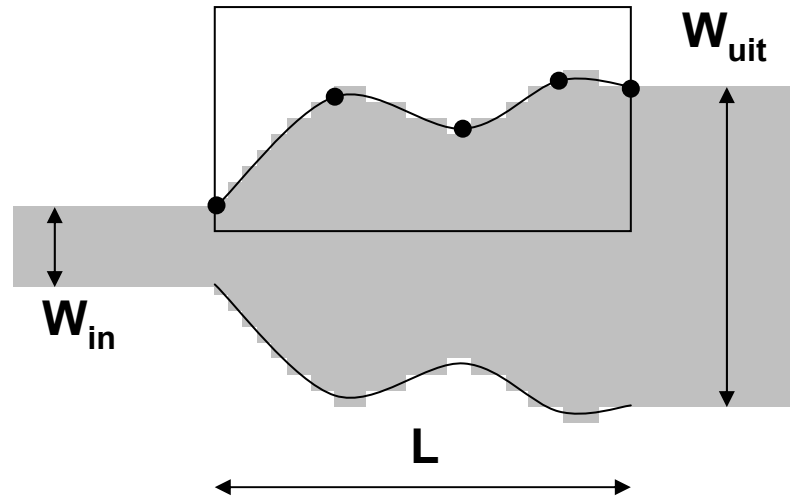


# Blokkoppeling



- Koppeling tussen SOI-golfgeleiders met breedtes van 0.5 en 2.0  $\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
- Hoe meer secties hoe hoger de koppellefficiëntie
- Genoeg secties: beter dan parabool of lineair

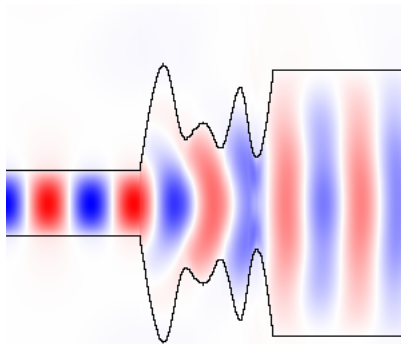
# Spline-koppeling



1. Bepaal een lengte  $L$  voor de koppeling en een “toegelaten rechthoek” tussen de twee golfgeleiders
2. Plaats  $N$  willekeurige punten binnen deze rechthoek
3. Een stuksgewijze polynoom doorheen de punten (de natuurlijke kubische spline) bepaalt de vorm van de koppeling
4. Optimaliseer de basispunten a.d.h.v. een genetisch algoritme
5. Tot een zekere stopvoorwaarde

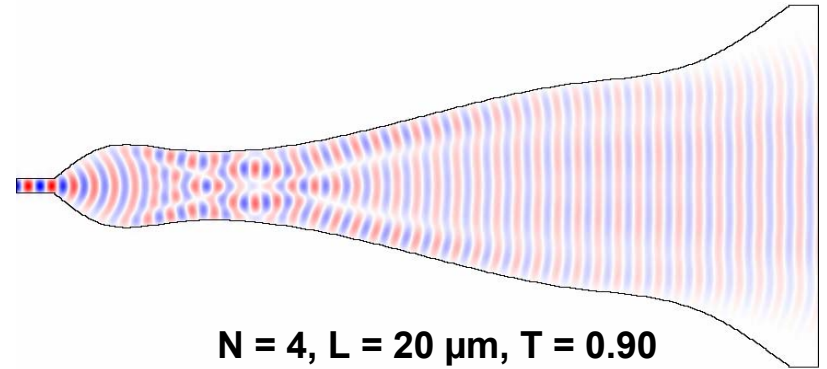
# Spline-koppeling

**0.5 naar 2.0  $\mu\text{m}$**

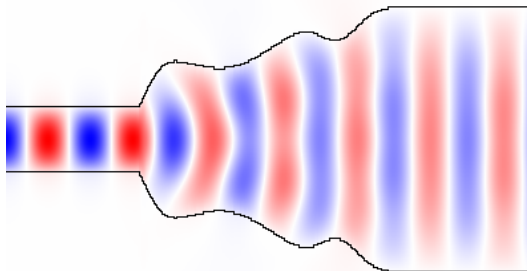


**$N = 7, L = 1.0 \mu\text{m}, T = 0.97$**

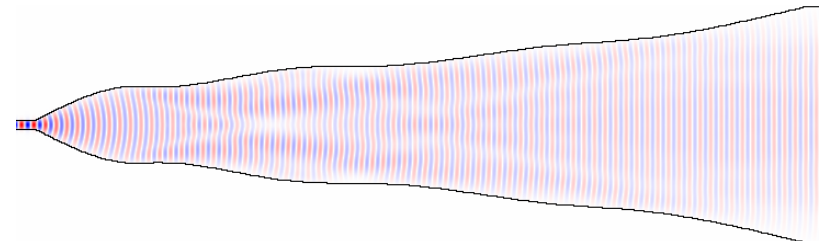
**0.5 naar 12.0  $\mu\text{m}$**



**$N = 4, L = 20 \mu\text{m}, T = 0.90$**

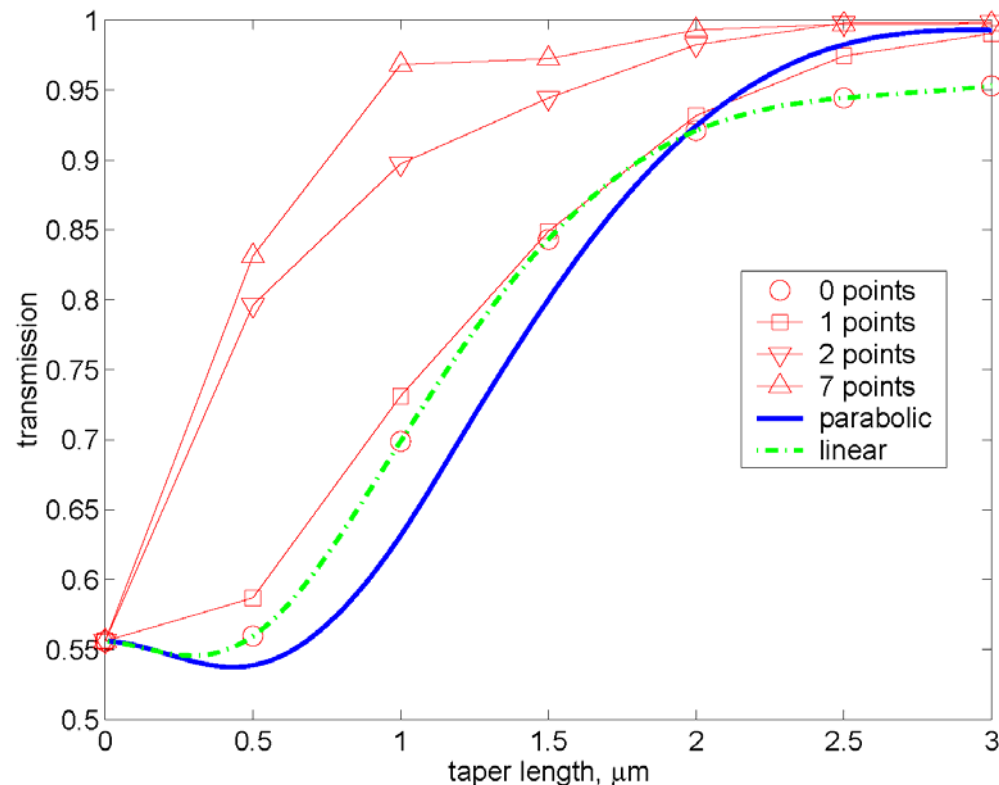


**$N = 7, L = 2.0 \mu\text{m}, T = 0.99$**



**$N = 6, L = 40 \mu\text{m}, T = 0.99$**

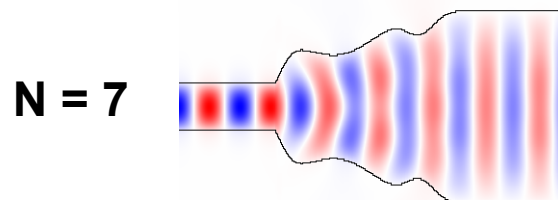
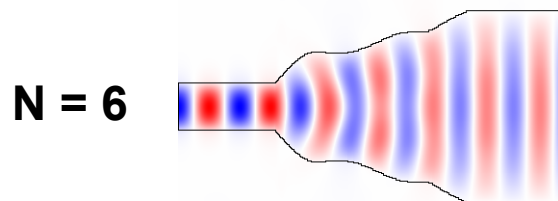
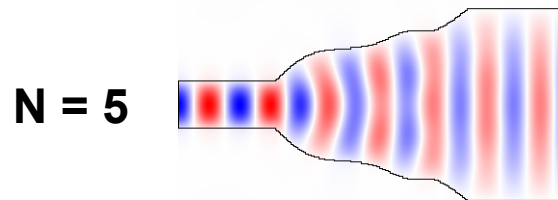
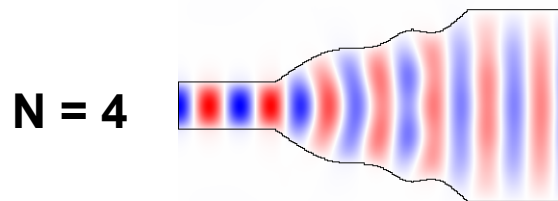
# Spline-koppeling



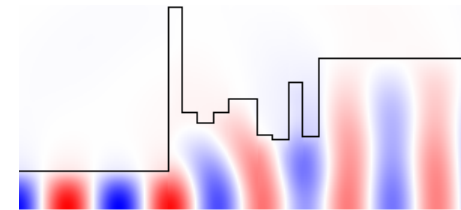
- Koppeling tussen SOI-golfgeleiders met breedtes van 0.5 en 2.0  $\mu\text{m}$ ,  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$
- Hoe meer spline-basispunten hoe hoger de koppellefficiëntie
- Beter dan parabool vanaf 2 spline-basispunten

# Convergentie

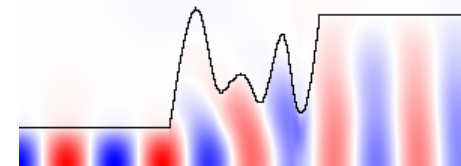
## Aantal vrijheidsgraden



## Blok versus spline

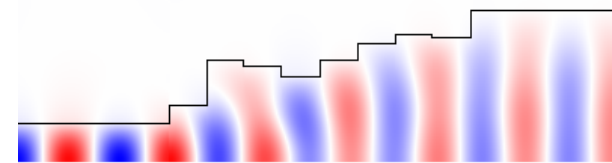


**N = 10**

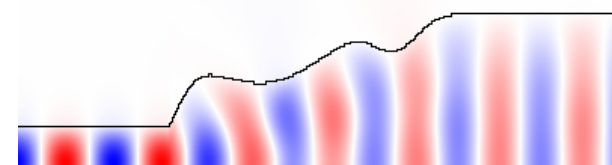


**N = 7**

**L = 1  $\mu\text{m}$**



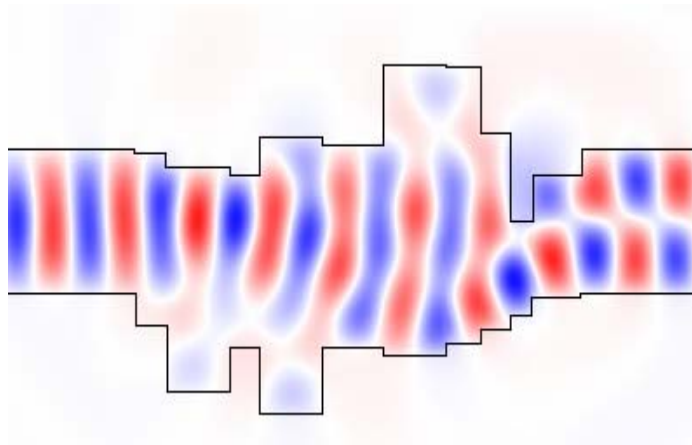
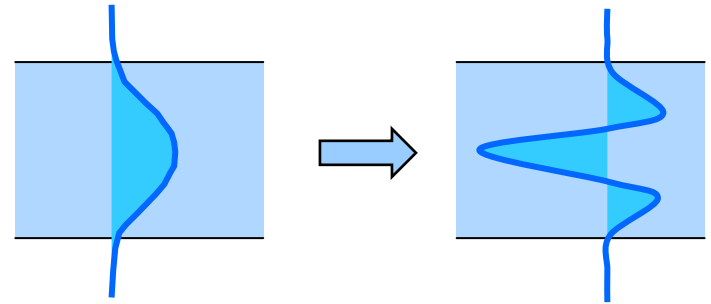
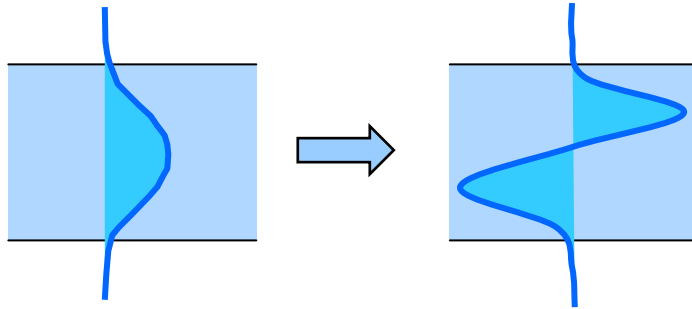
**N = 8**



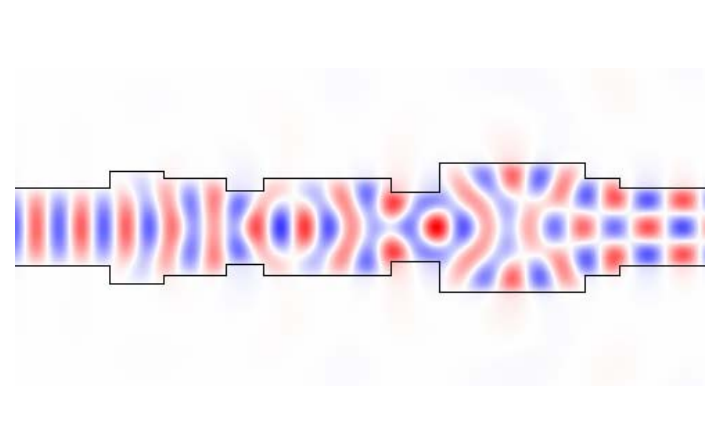
**N = 7**

**L = 2  $\mu\text{m}$**

# Andere koppelsituaties



**grondmode naar eerste mode**

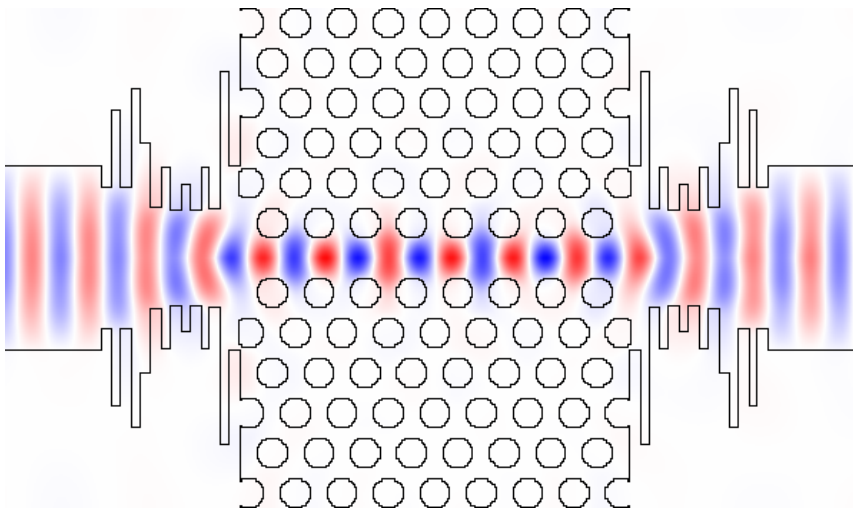


**grondmode naar tweede mode**

# Andere koppelsituaties

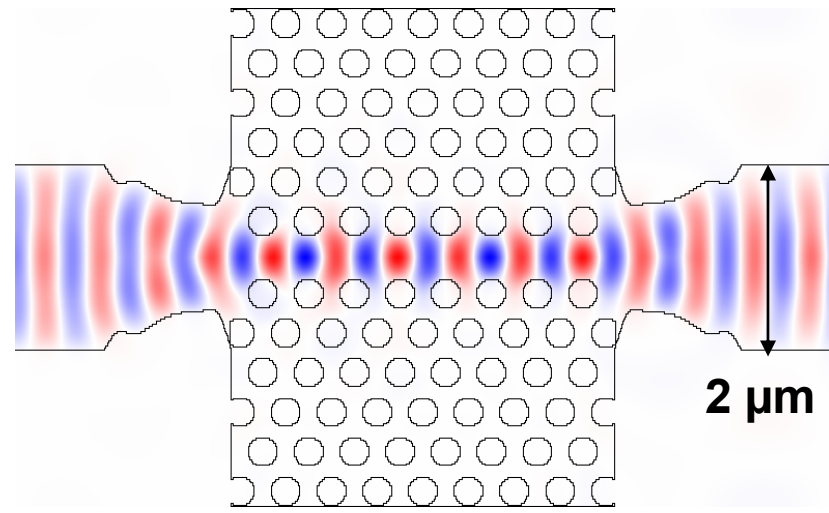
## Golfgeleider > fotonisch kristal > golfgeleider

$T = 0.98$



Adhv blokkoppeling

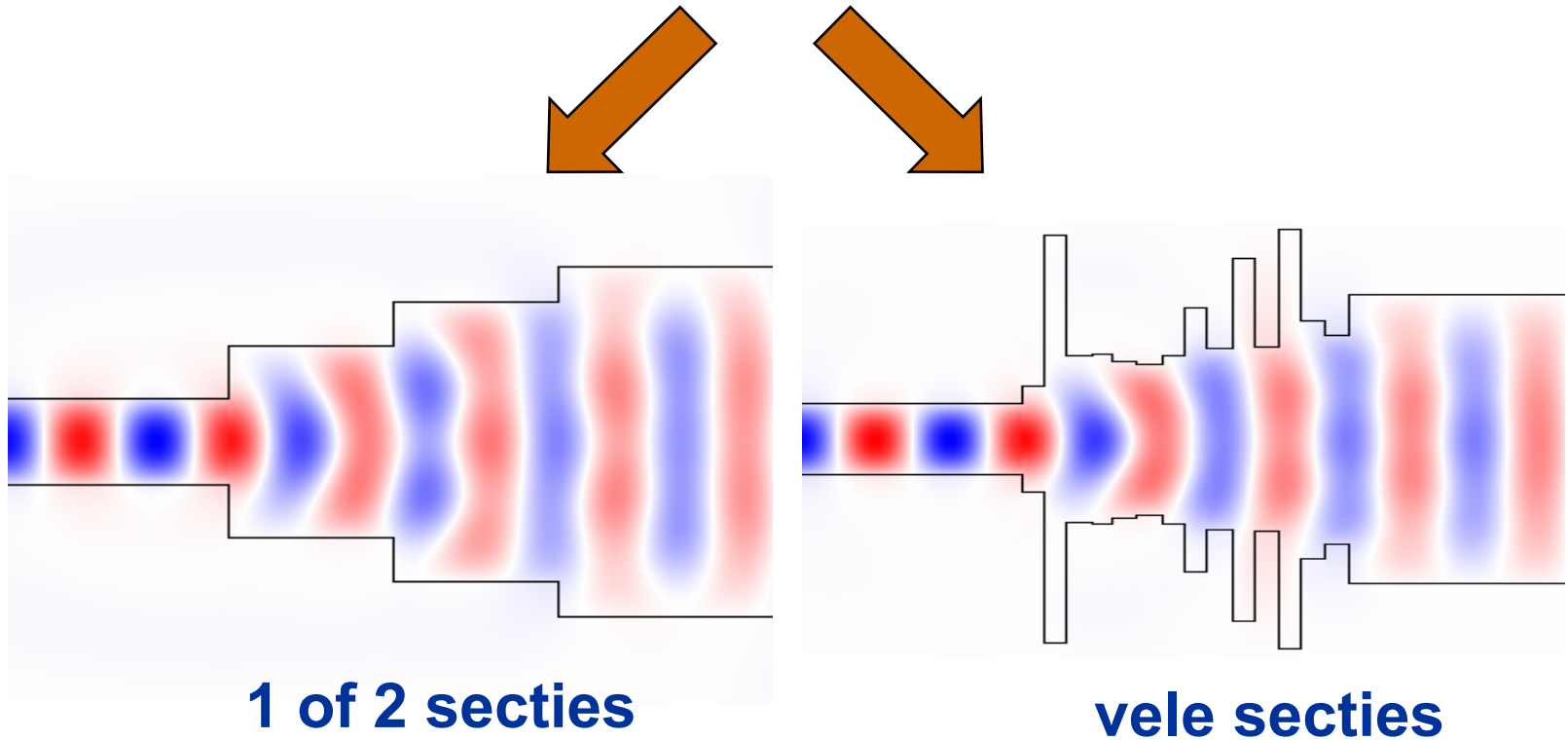
$T = 0.98$



Adhv spline- koppeling

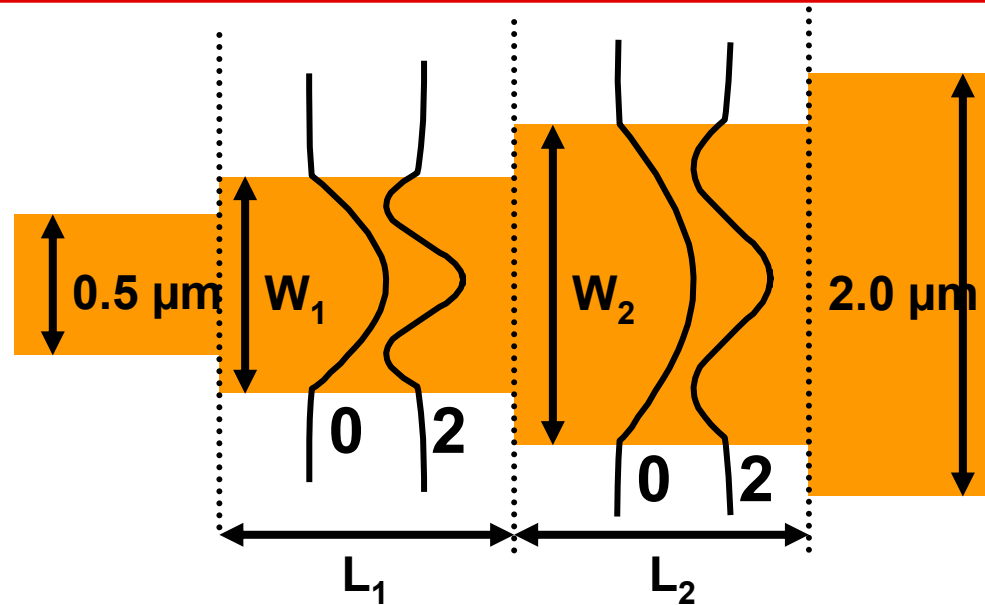
# Interpretatie:

Hoe werken de structuren die uit de optimalisatie volgen ?





# Interpretatie: 2 secties

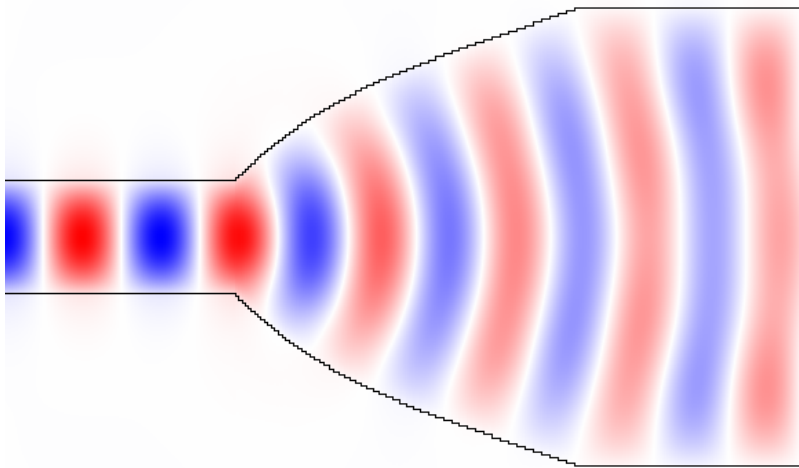


**Koppelefficiëntie te achterhalen door model met:**

- mode beating (interferentie)
- enkel voorwaartse modes (geen reflectie)
- enkel grondmode en tweede mode

# Interpretatie: vele secties

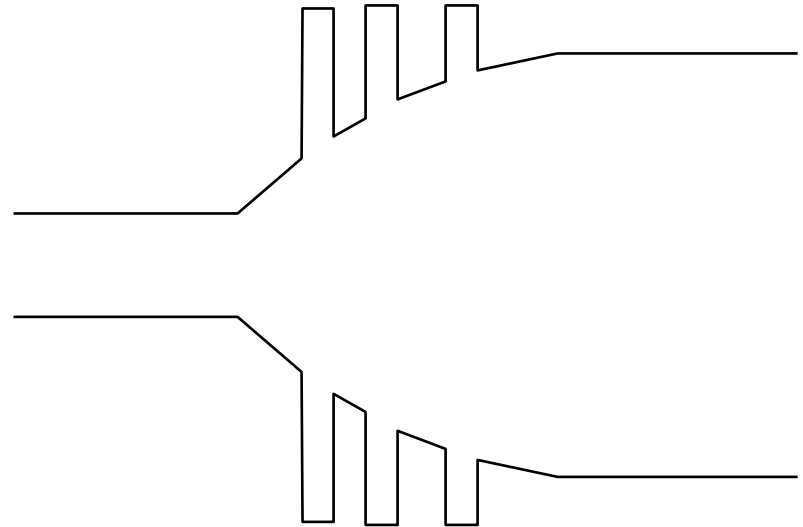
## Te korte parabool



$T = 0.82$

oorzaak van mindere koppeling is het gebogen fasefront op einde van de koppeling

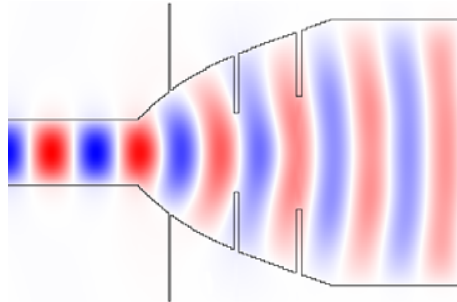
## Studie



- benader de parabool door een aantal rechthoekige secties
- kies een aantal secties uit
- optimaliseer de breedtes van deze secties

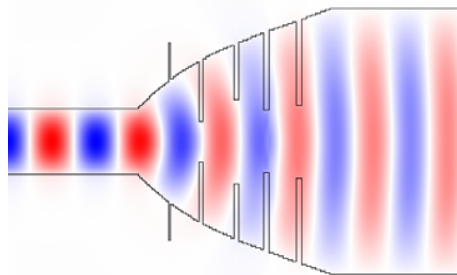
# Interpretatie: vele secties

**N = 3**



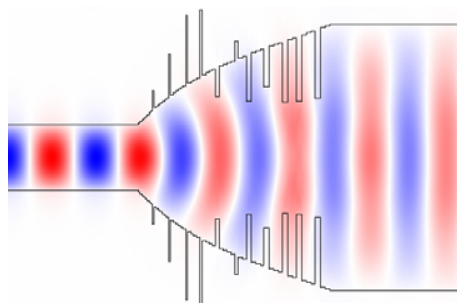
**T = 0.93**

**N = 5**



**T = 0.98**

**N = 11**



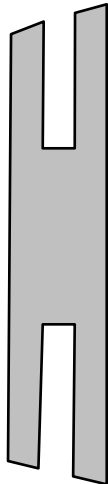
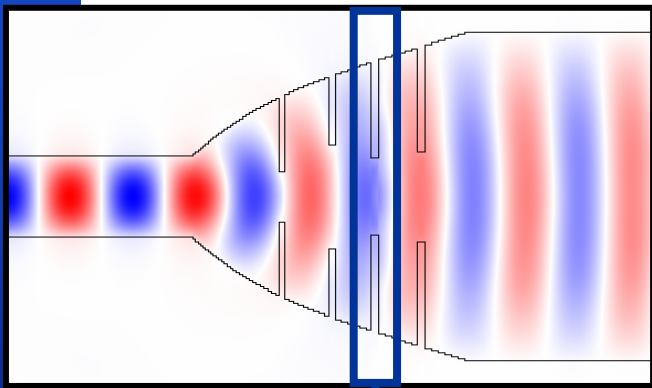
**T = 0.995**



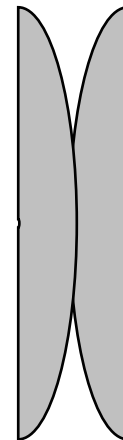
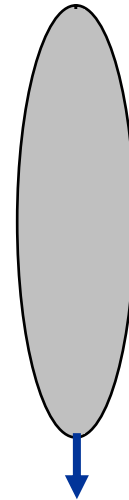
**fasefront aan uitgang steeds rechter**

# Interpretatie: vele secties

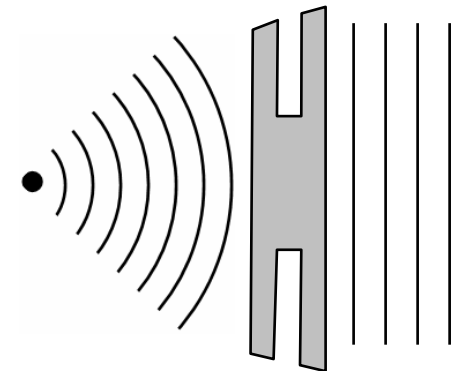
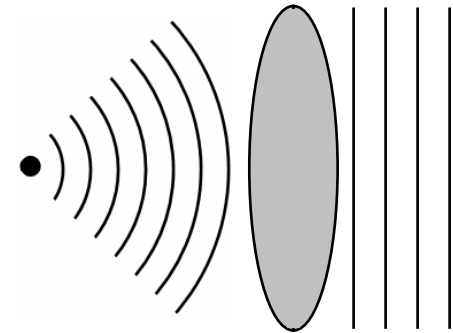
**Gewijzigde sectie**



**Convexe lens**

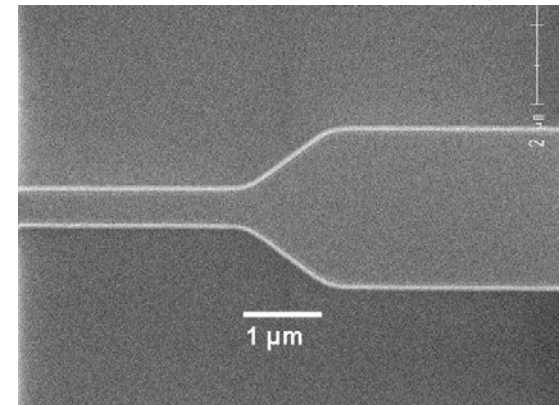
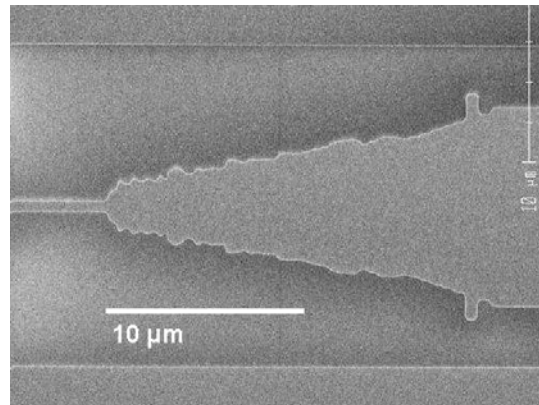
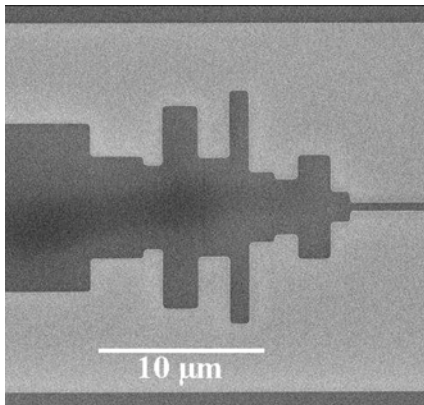


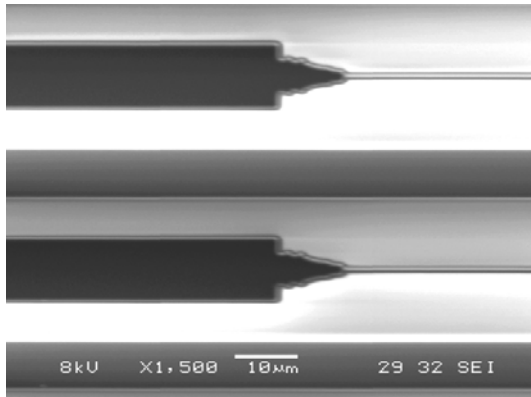
**Rechttrekken  
fasefront**



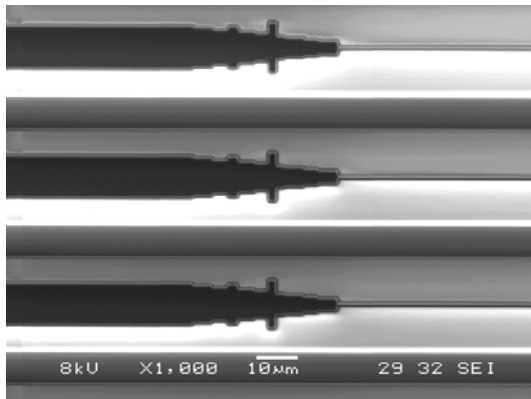
# Realisatie

- door middel van processen voor CMOS-technologie
- faciliteiten IMEC Leuven
- standaard processing in elektronica (Pentium 4, Flash-geheugen)
- op 20 cm schijven SOI (Silicium-op-isolator)
- zie PhD Wim Bogaerts

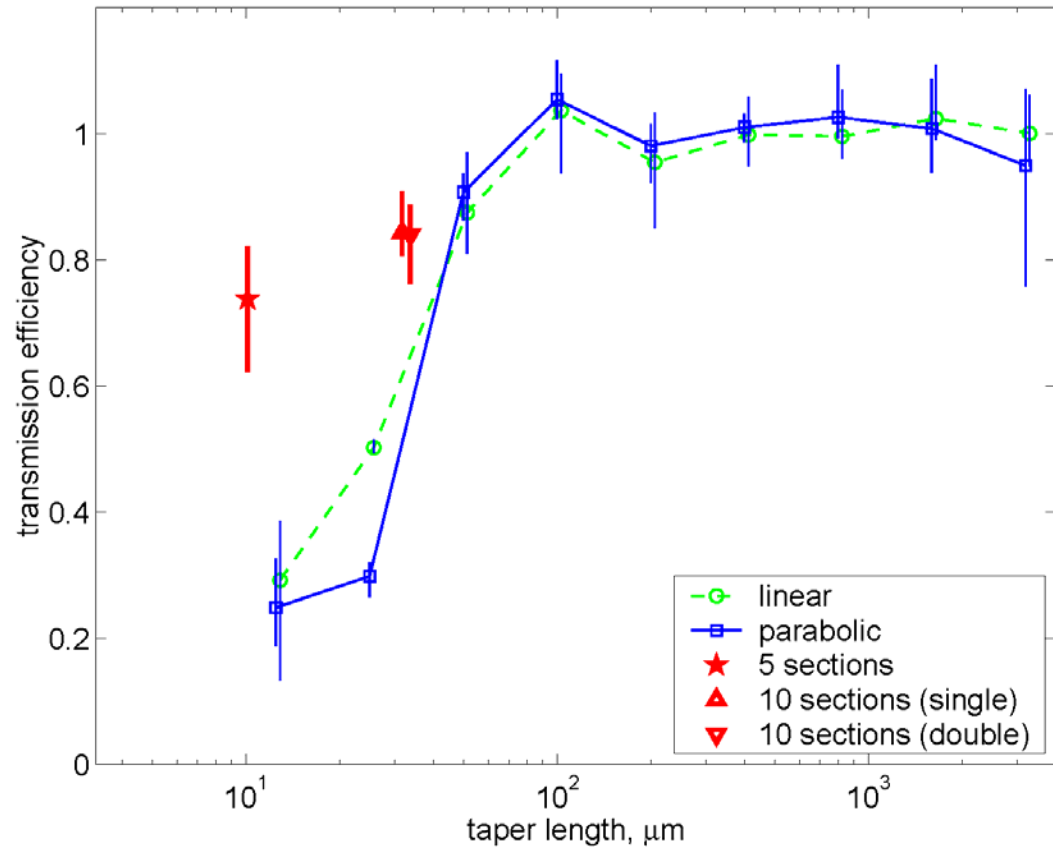




**5 secties**

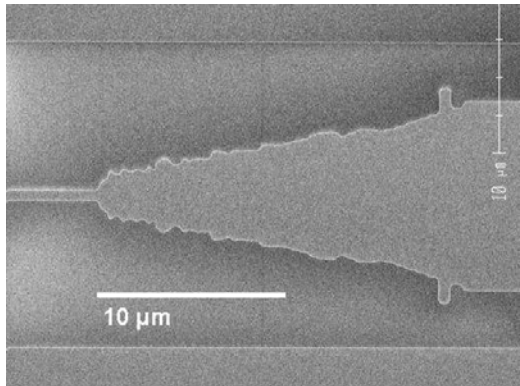


**10 secties**

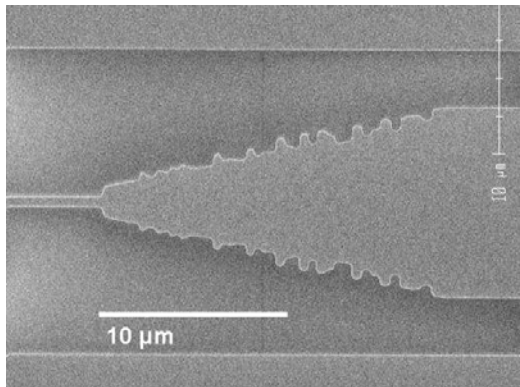


- hogere efficiënties dan lineair en parabolische van gelijke lengte

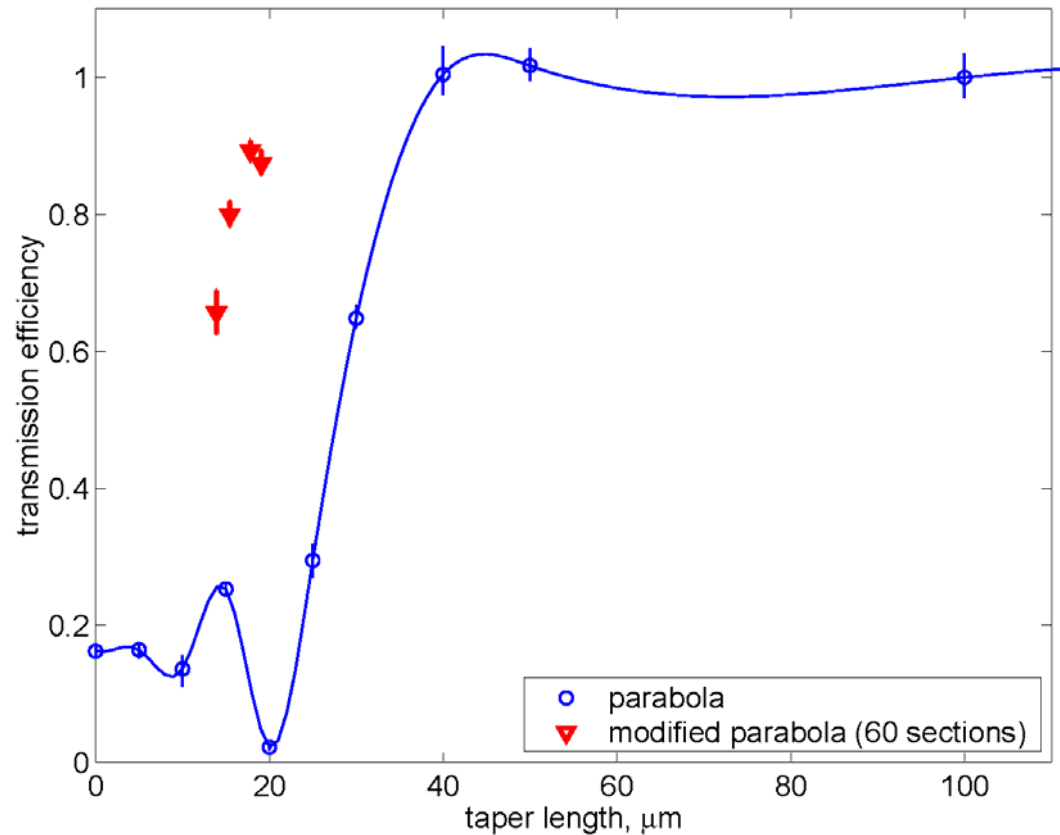
- maximaal 85%



lengte = 19.1  $\mu\text{m}$



lengte = 17.8  $\mu\text{m}$



- hogere efficiënties dan ongewijzigde parabolen van gelijke lengte
- maximaal ~90%

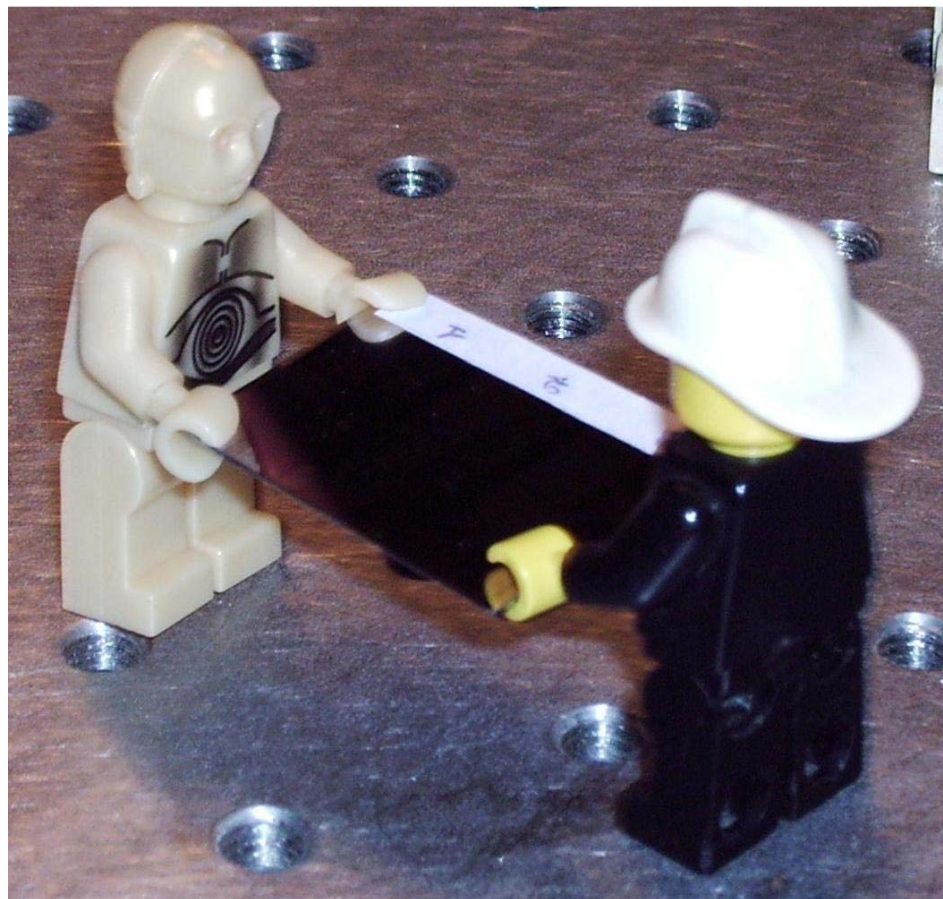
# Conclusies

- Optische chips hebben een grote toekomst
- Koppelingen in een chip zijn vandaag lang en plaatsrovend
- 3 manieren om kortere koppelingen te maken bestudeerd (gewijzigde parabool, blokkoppeling, splinekoppeling)
- Alle 3 presteren bij bepaalde lengtes beter dan de traditionele koppelingen
- Rudimentair inzicht verworven in sommige geoptimaliseerde structuren
- Structuren gerealiseerd in Silicium-op-isolator met commerciële processen
- Metingen bevestigen betere werking dan traditionele koppelingen
- Efficiëntie nog niet hoog genoeg voor commercialisatie



# Beknopte conclusie

**Door een koppeling tussen twee vlakke golfgeleiders een complexere vorm te geven, kan de minimale lengte waarbij een aanvaardbare efficiëntie behaald wordt, aanzienlijk verkleind worden.**



## Sfeerbeeld uit de meetkamer



**SMAKELIJK**

