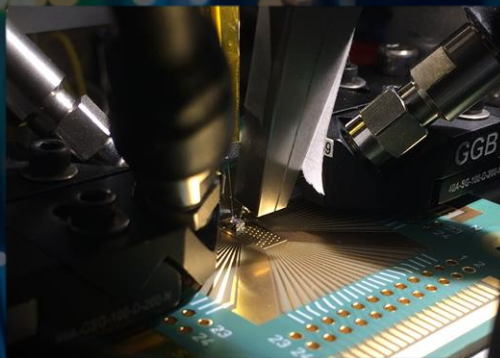
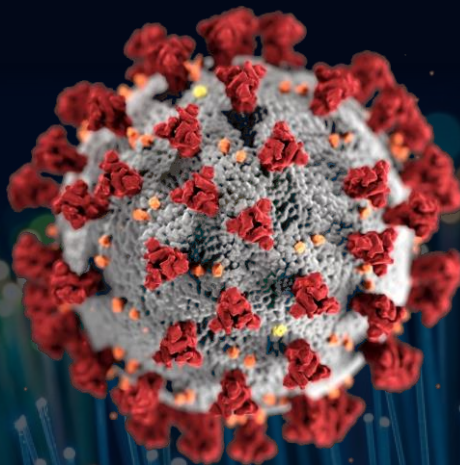


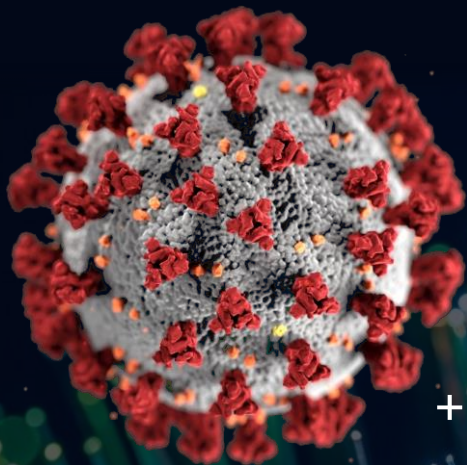
Co-ontwerp van geïntegreerde SiGe-BiCMOS-hogesnelheidsschakelingen en siliciumgebaseerde Mach-Zehnder-modulatoren voor optische verbindingen

Doctoraatsverdediging
Laurens Breyne
4 mei 2021









NYtimes (US data)

+40% toename in internetverkeer
bij grootste EU-knooppunten

Internet, datacenters en optische verbindingen

Gesegmenteerde modulatoren

Niet-Lineaire Drivers

Egalisatie in modulatoren

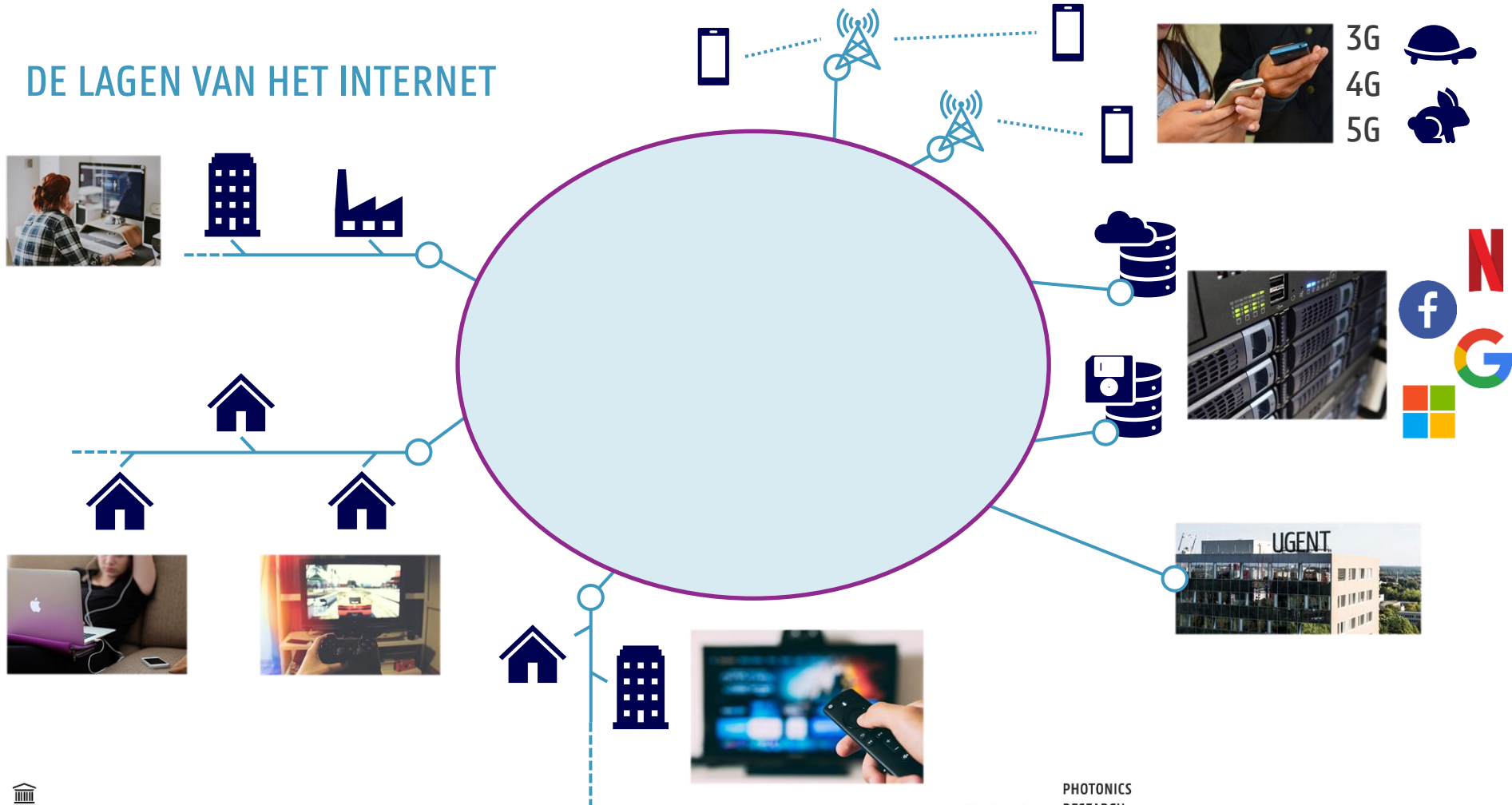
Internet, datacenters en optische verbindingen

Gesegmenteerde modulatoren

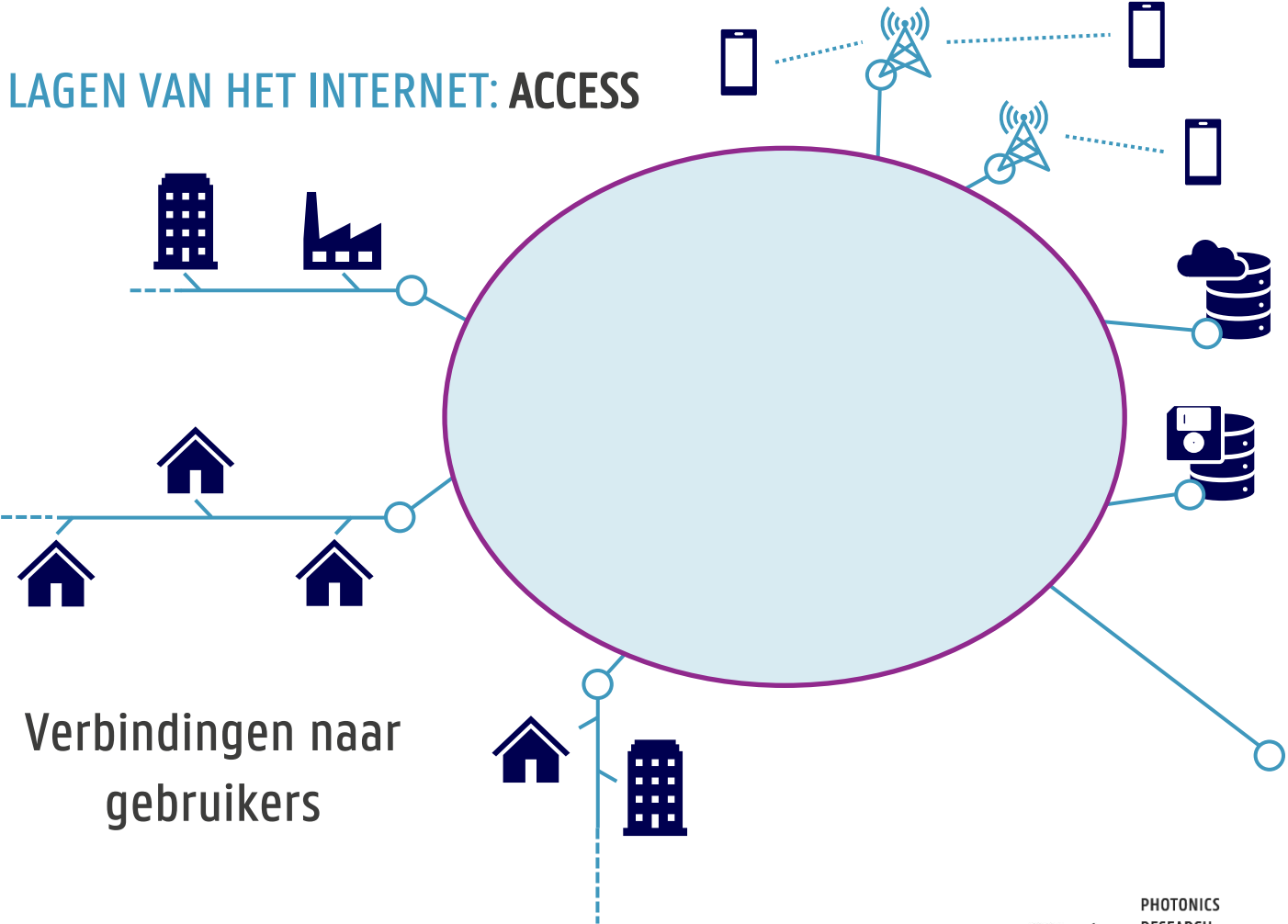
Niet-Lineaire Drivers

Egalisatie in modulatoren

DE LAGEN VAN HET INTERNET

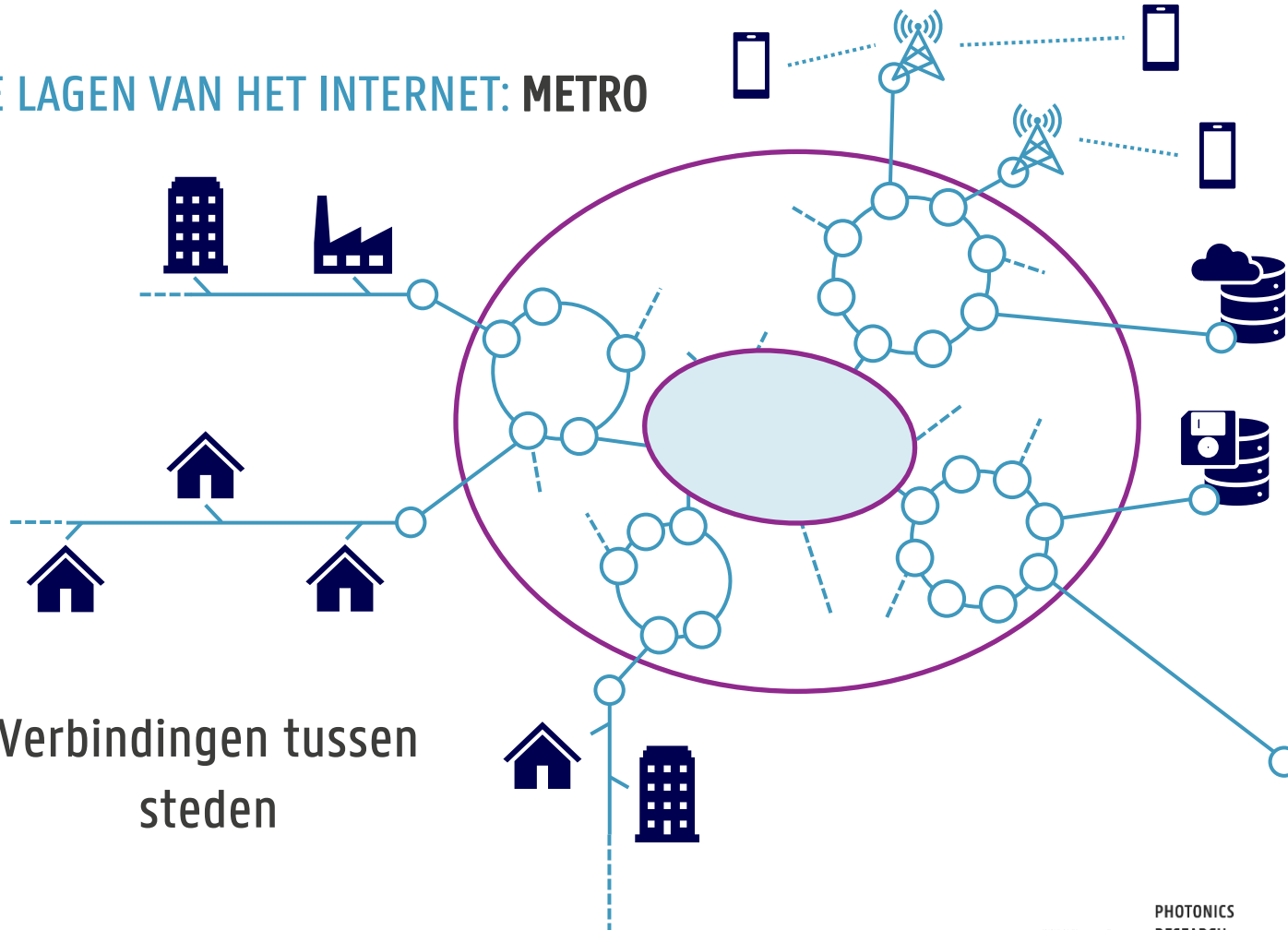


DE LAGEN VAN HET INTERNET: ACCESS

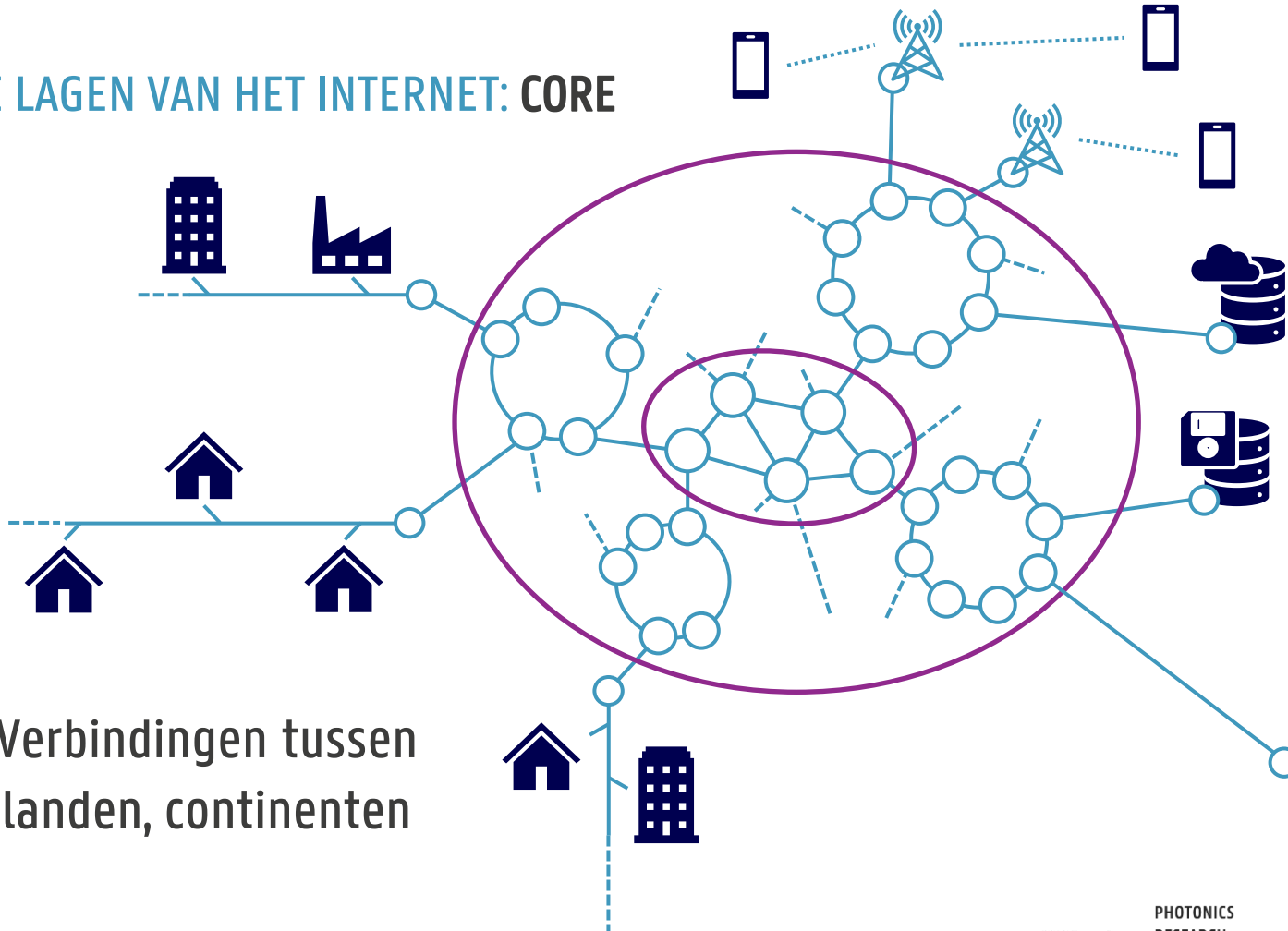


Verbindingen naar gebruikers

DE LAGEN VAN HET INTERNET: METRO



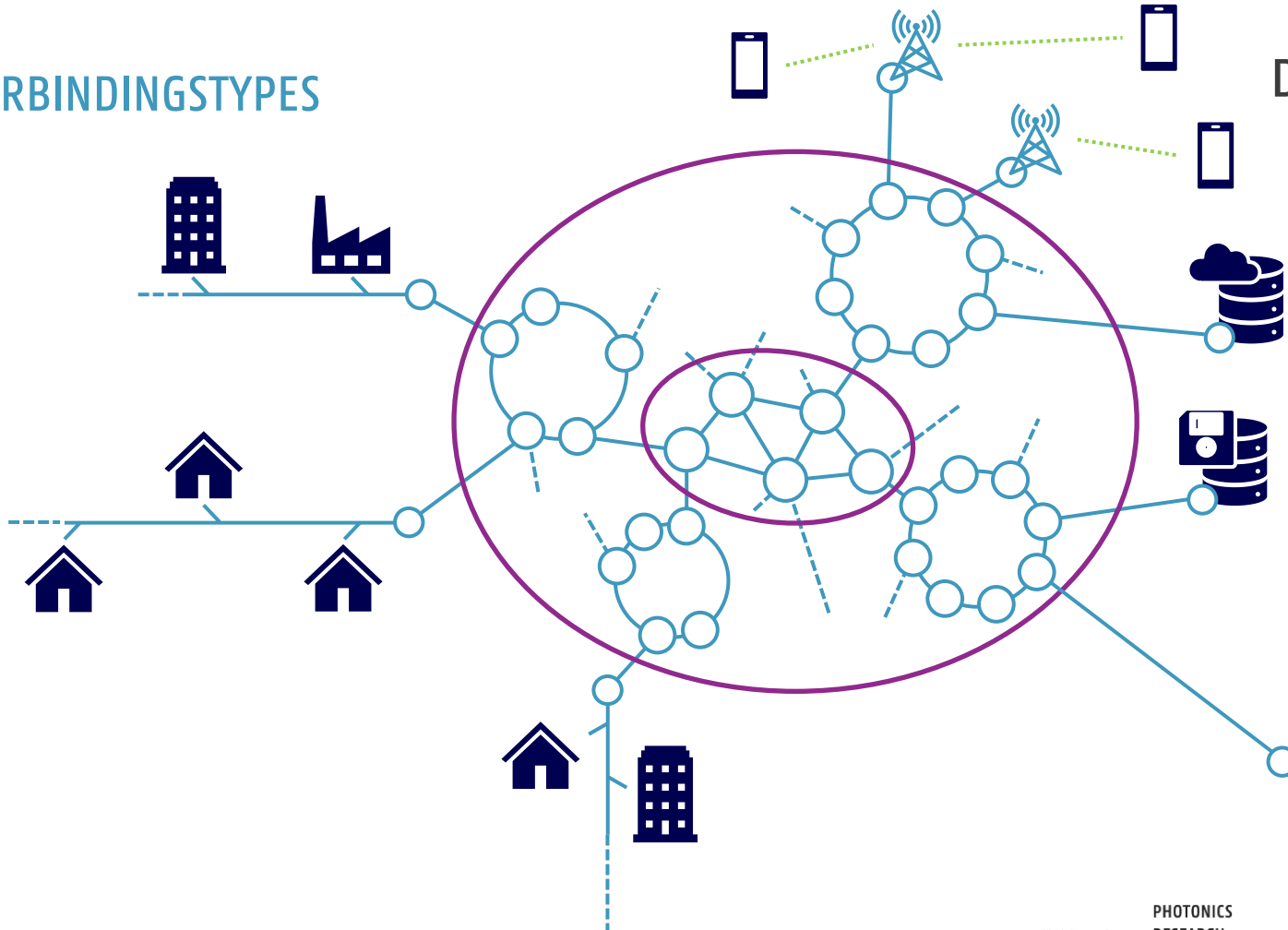
DE LAGEN VAN HET INTERNET: CORE



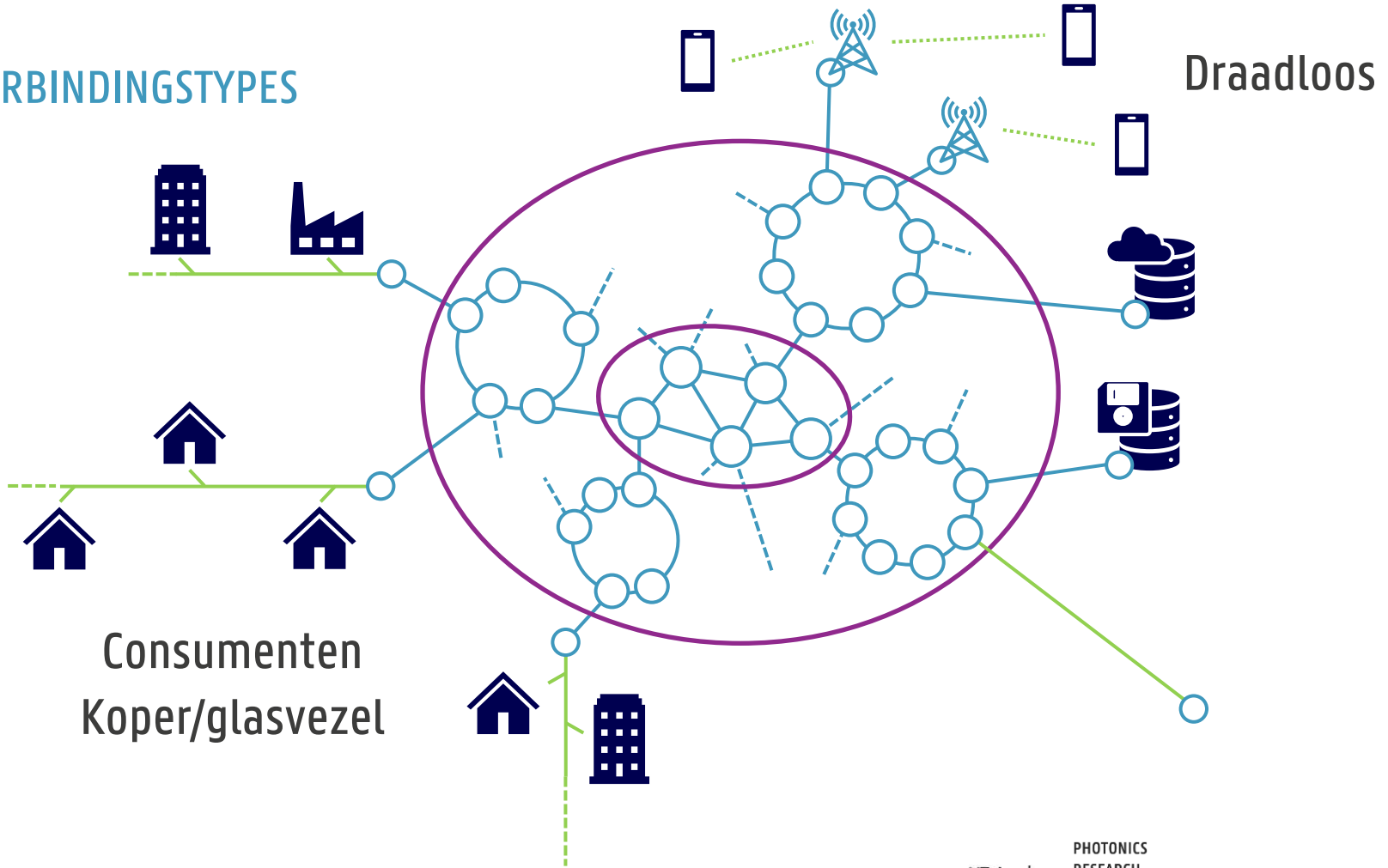
Verbindingen tussen landen, continenten

VERBINDINGSTYPES

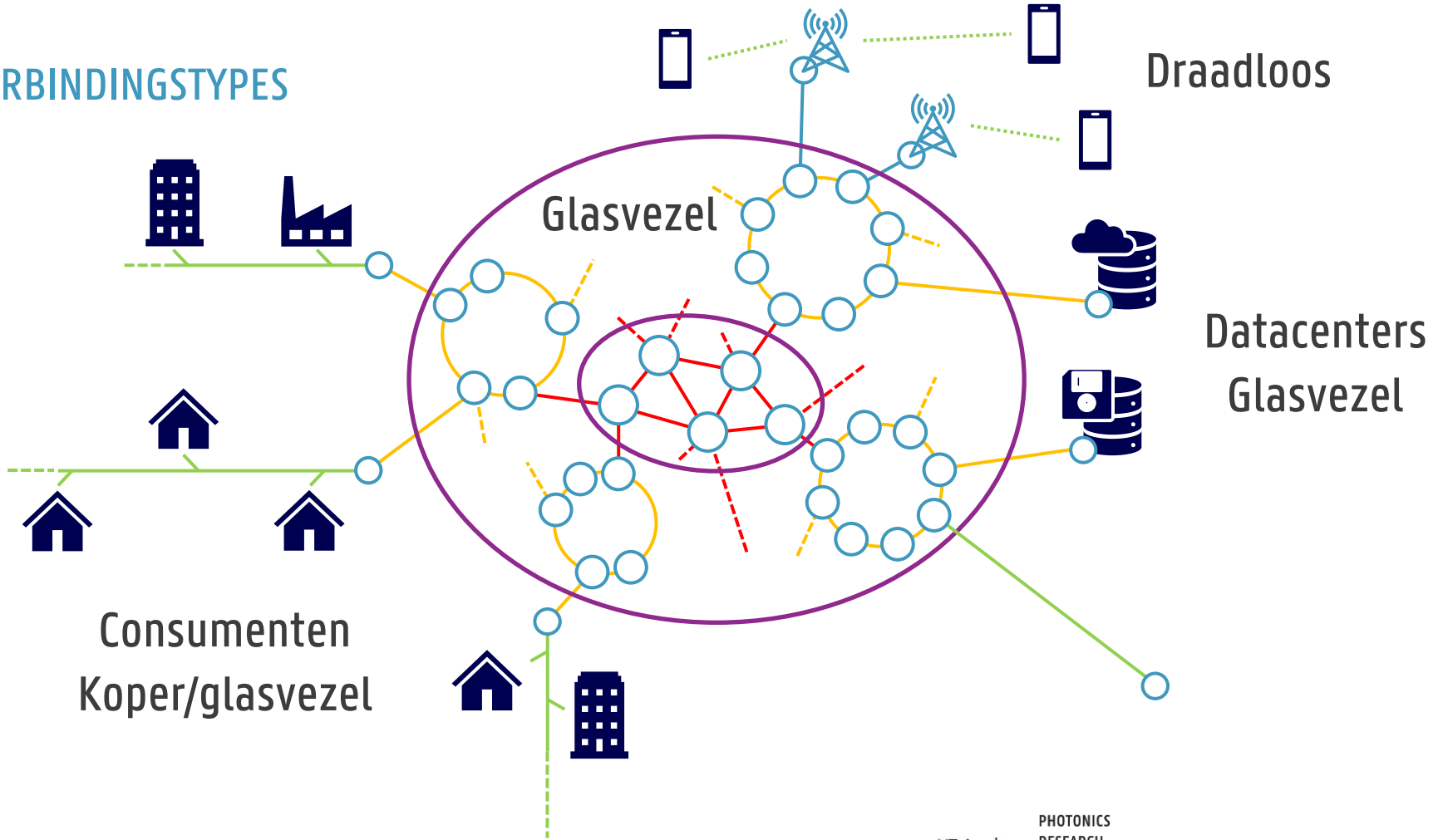
Draadloos



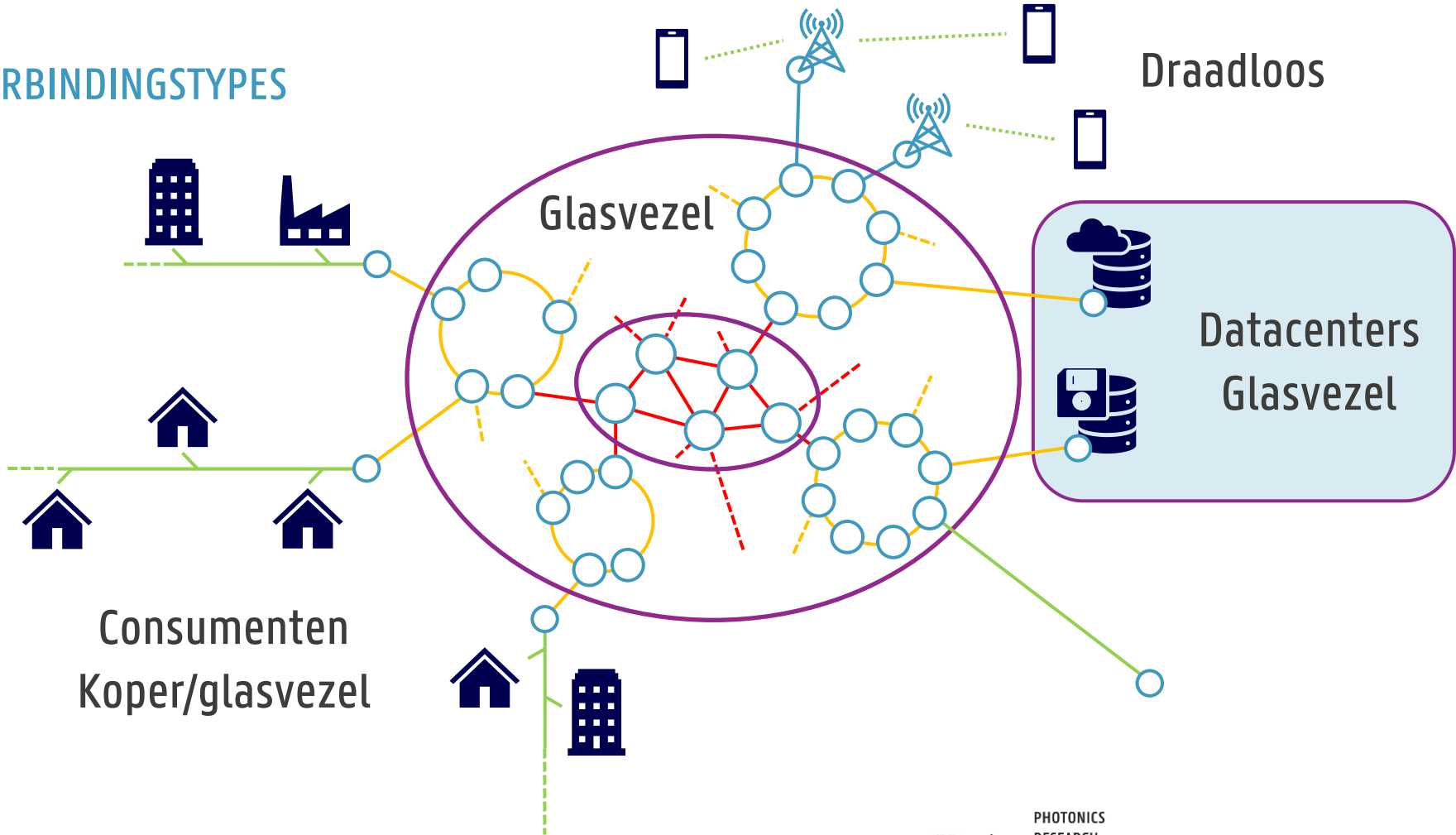
VERBINDINGSTYPES



VERBINDINGSTYPES



VERBINDINGSTYPES



IN HET DATACENTER

- Ondersteunen alle internetapplicaties:

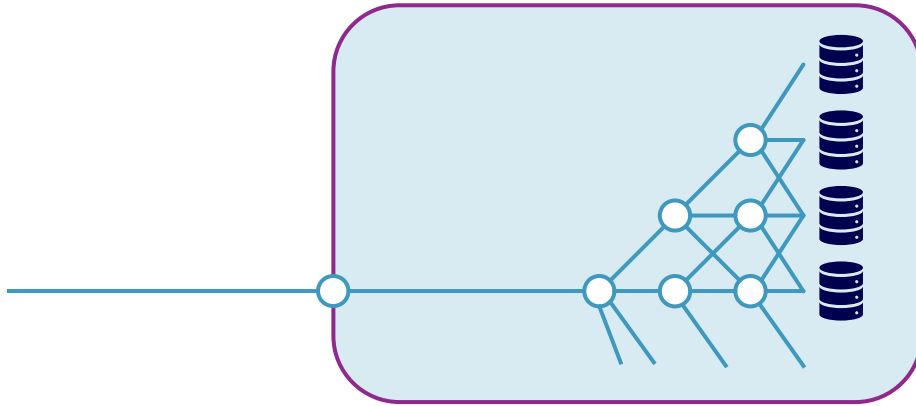


IN HET DATACENTER

- Ondersteunen alle internetapplicaties:



- Via duizenden geïnterconnecteerde servers



Google - St. Ghislain (Henegouwen)
90 ha, 1,6 miljard euro

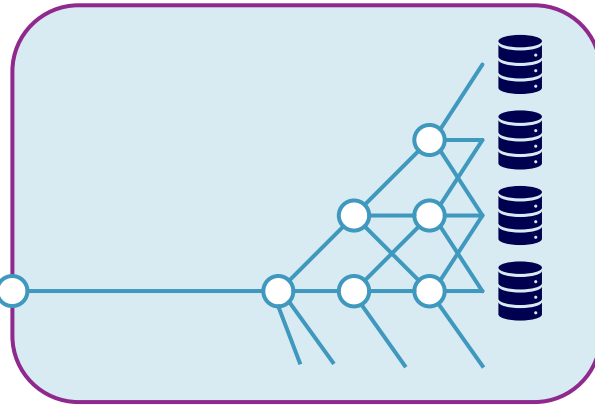


IN HET DATACENTER

- Ondersteunen alle internetapplicaties:



- Via duizenden geïnterconnecteerde servers



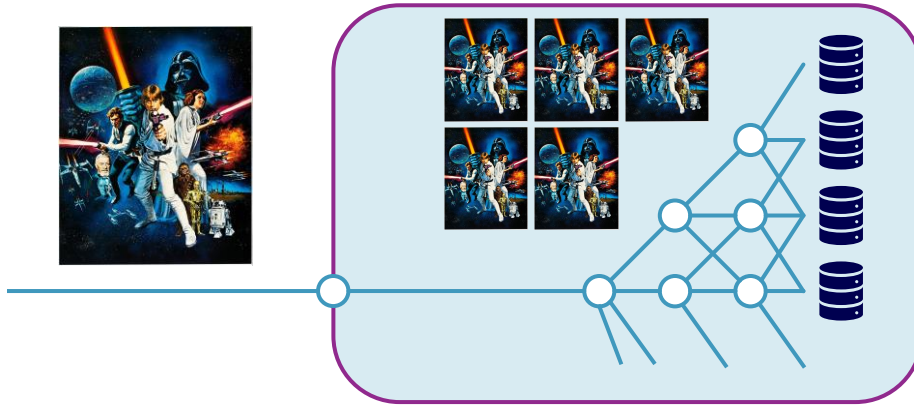
IN HET DATACENTER

- Ondersteunen alle internetapplicaties:



- Via duizenden geïnterconnecteerde servers

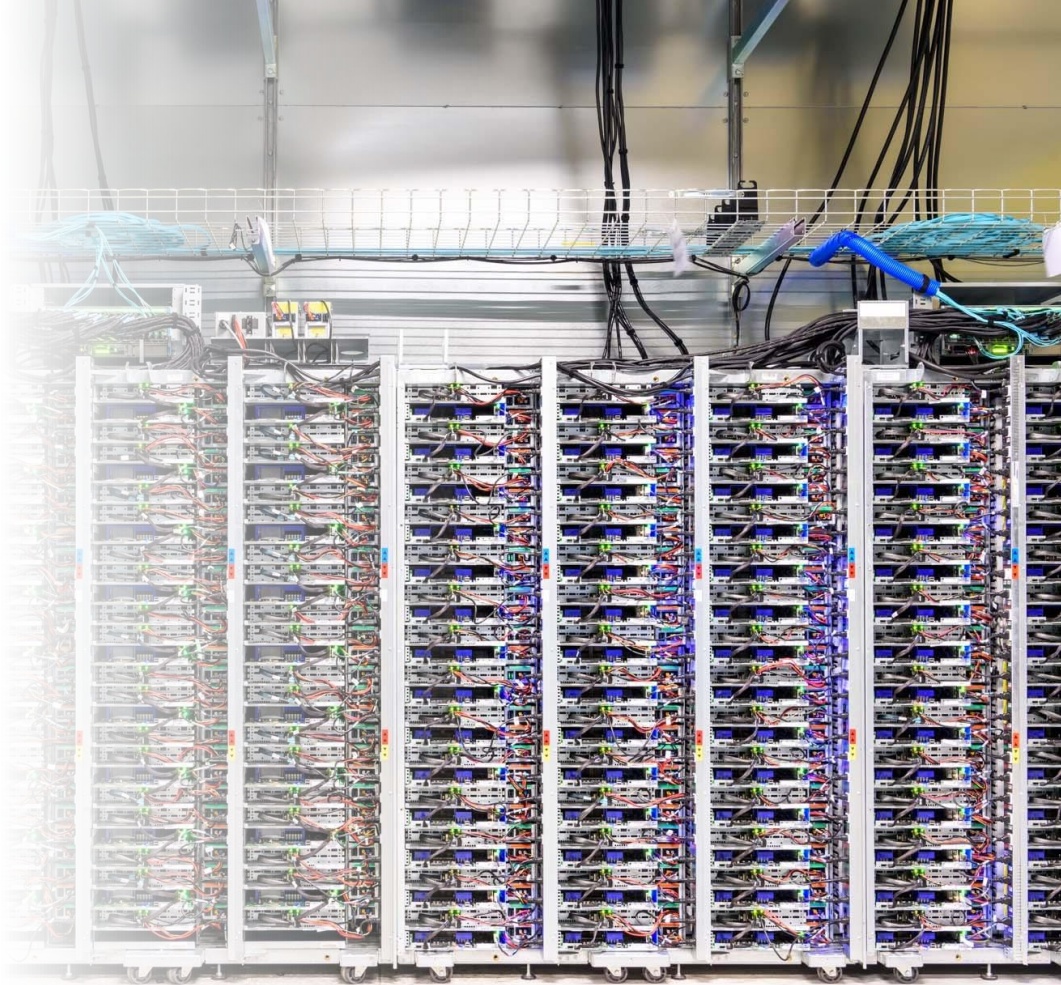
- Gebruikerdata: 5 á 6 keer meer data in het datacenter



Google - St. Ghislain (Henegouwen)
90 ha, 1,6 miljard euro

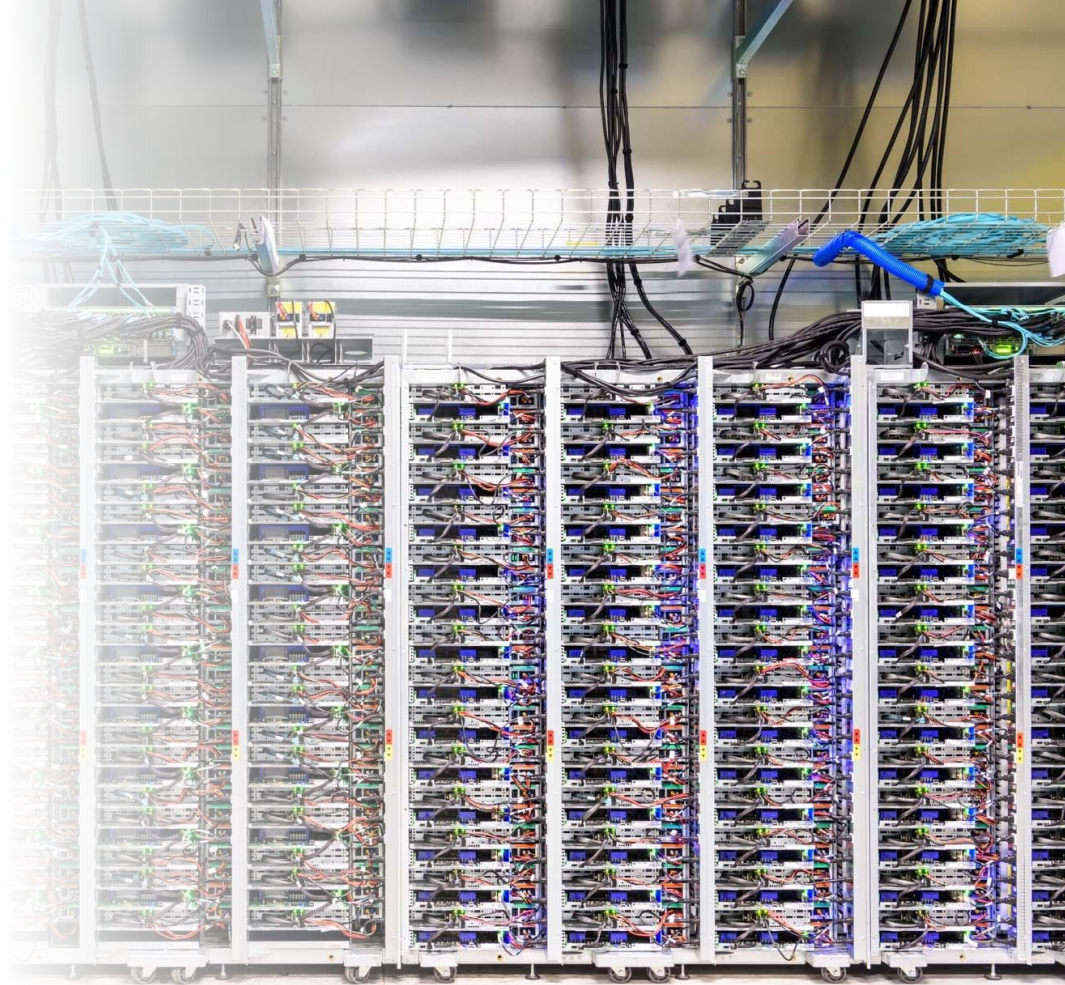


DATACENTER INTERCONNECTS



DATACENTER INTERCONNECTS

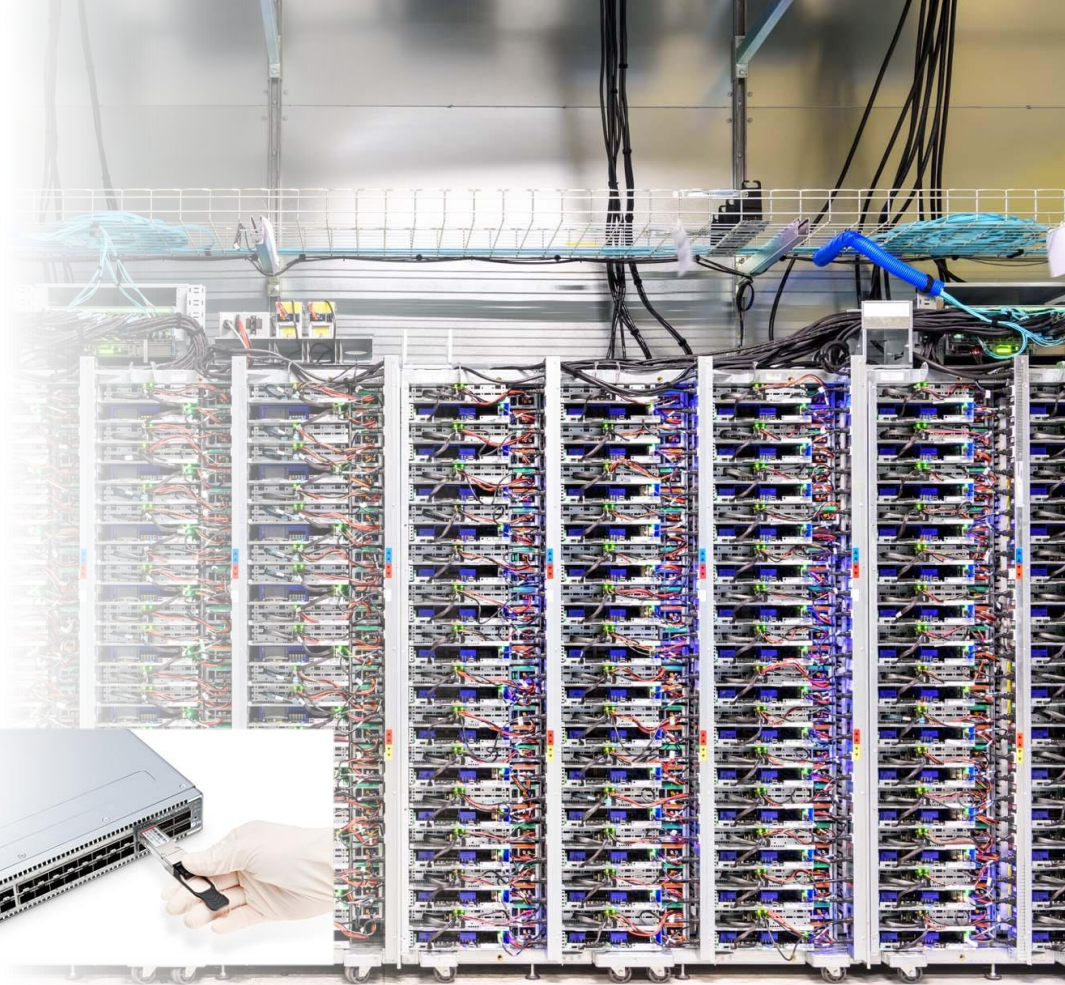
- Vereisten:
 - Zeer hoge snelheden
 - Afstanden tot 2 km
 - Compact
 - Laag energieverbruik



DATACENTER INTERCONNECTS

- Vereisten:
 - Zeer hoge snelheden
 - Afstanden tot 2 km
 - Compact
 - Laag energieverbruik

→ Optische vezel & Pluggable Modules

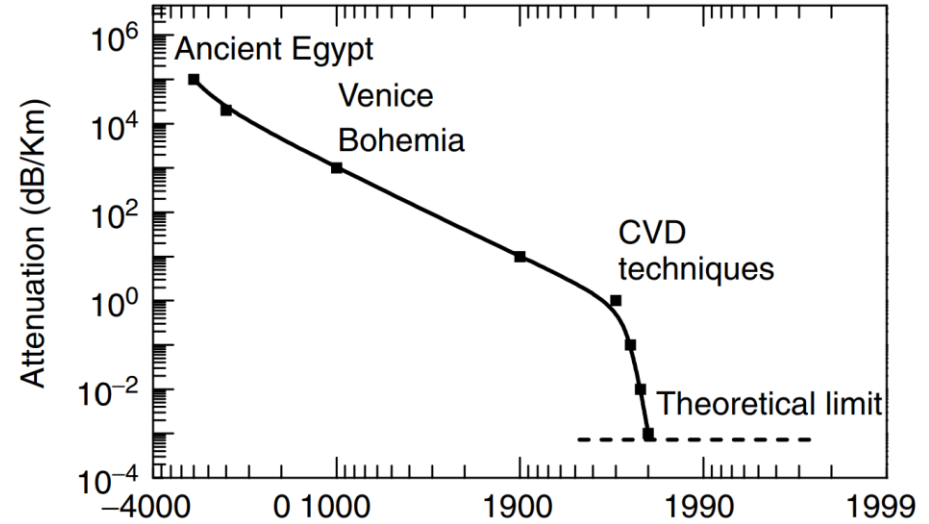


DE HELDERHEID VAN GLAS



Egyptisch glas
(ca. 400 vc)

~cm (visueel)



DE HELDERHEID VAN GLAS



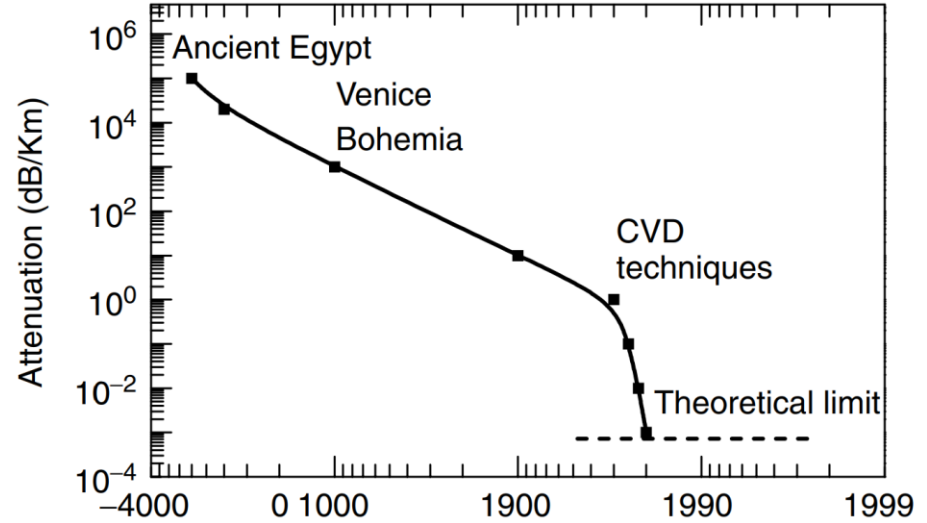
Egyptisch glas
(ca. 400 vc)

~cm (visueel)



Venetiaans glas
(ca. 1600)

~m (visueel)



DE HELDERHEID VAN GLAS



Egyptisch glas
(ca. 400 vc)

~cm (visueel)



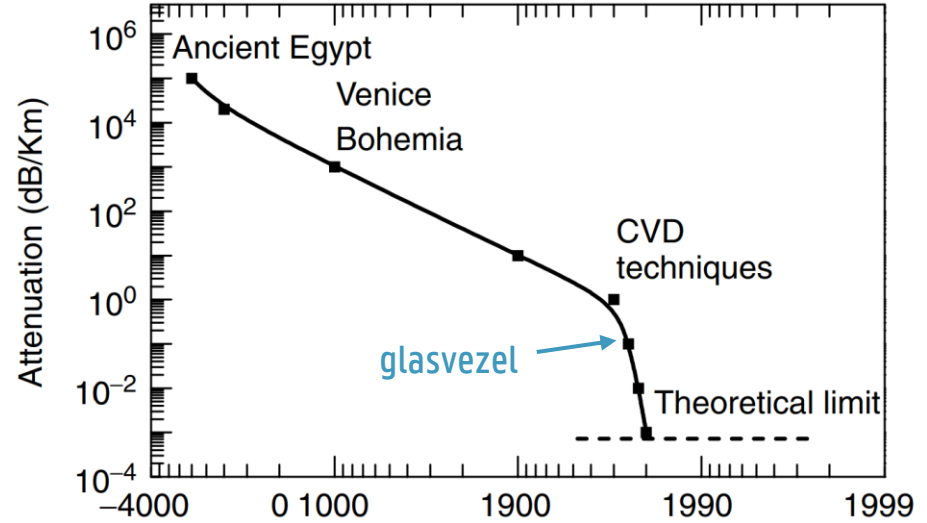
Venetiaans glas
(ca. 1600)

~m (visueel)



Glasvezel
(ca. 1970)

5-15 km
(infrarood)



DE HELDERHEID VAN GLAS



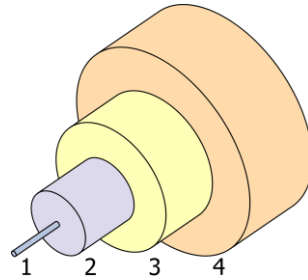
Egyptisch glas
(ca. 400 vc)

~cm (visueel)



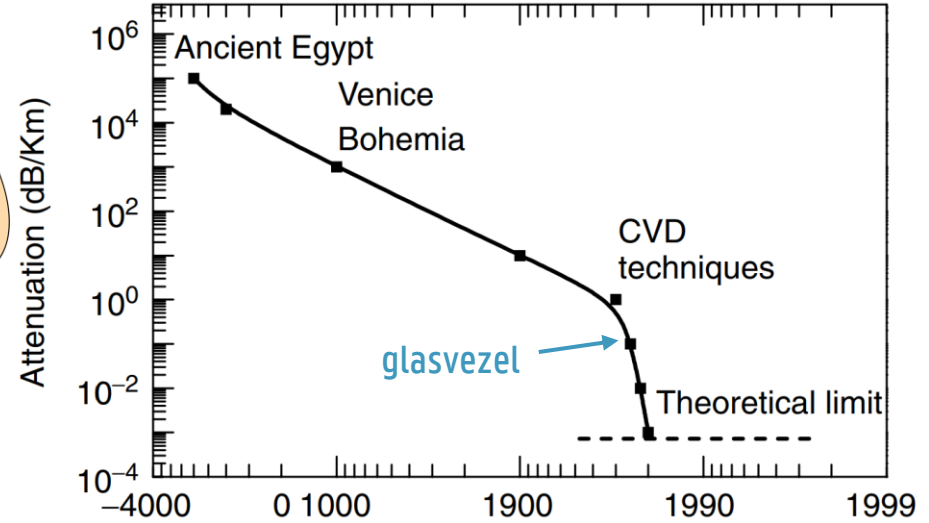
Venetiaans glas
(ca. 1600)

~m (visueel)

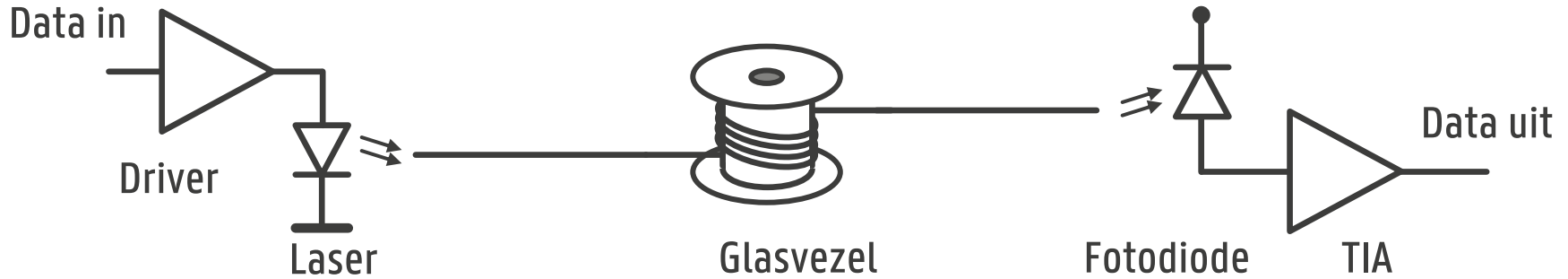
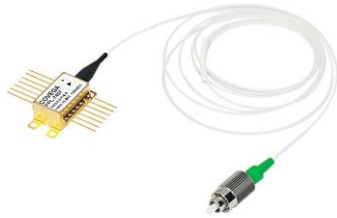
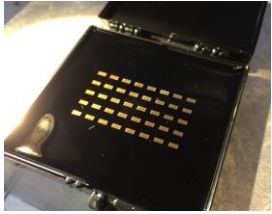


Glasvezel
(ca. 1970)

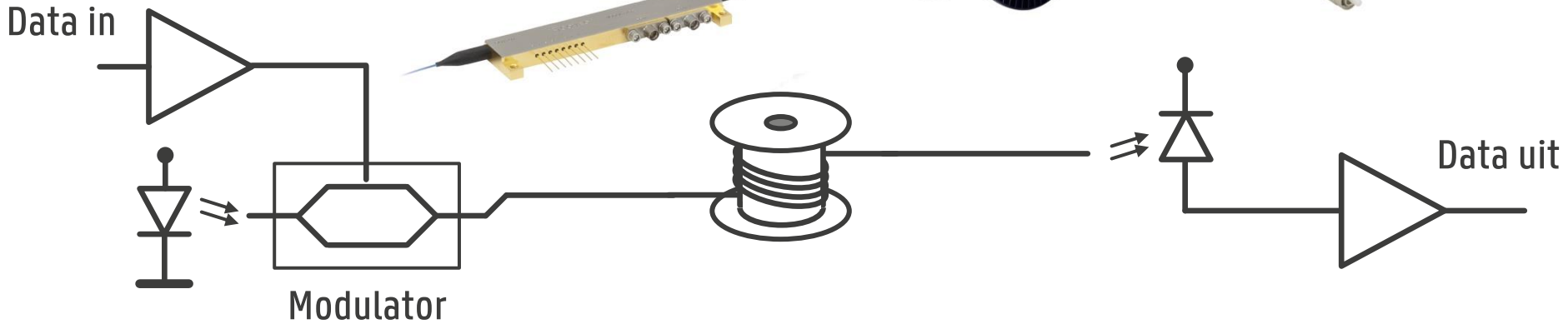
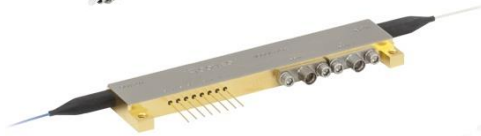
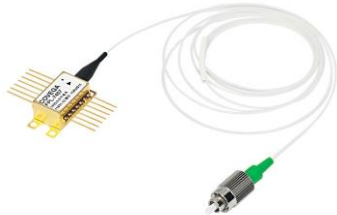
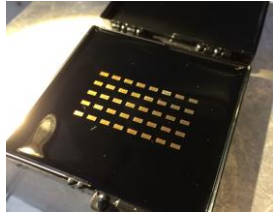
5-15 km
(infrarood)



DE EENVOUDIGSTE OPTISCHE LINK

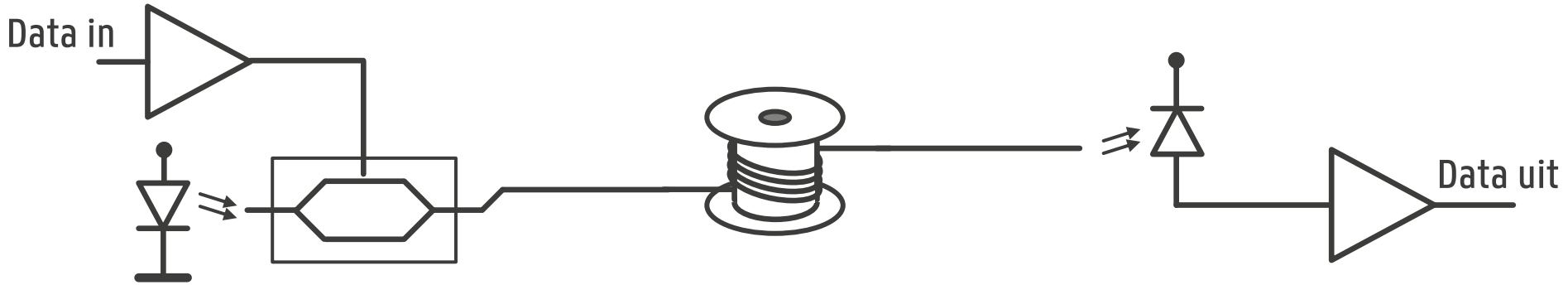


DE EXTERN GEMODULEERDE OPTISCHE LINK

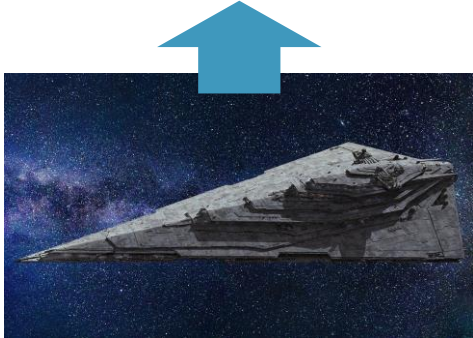
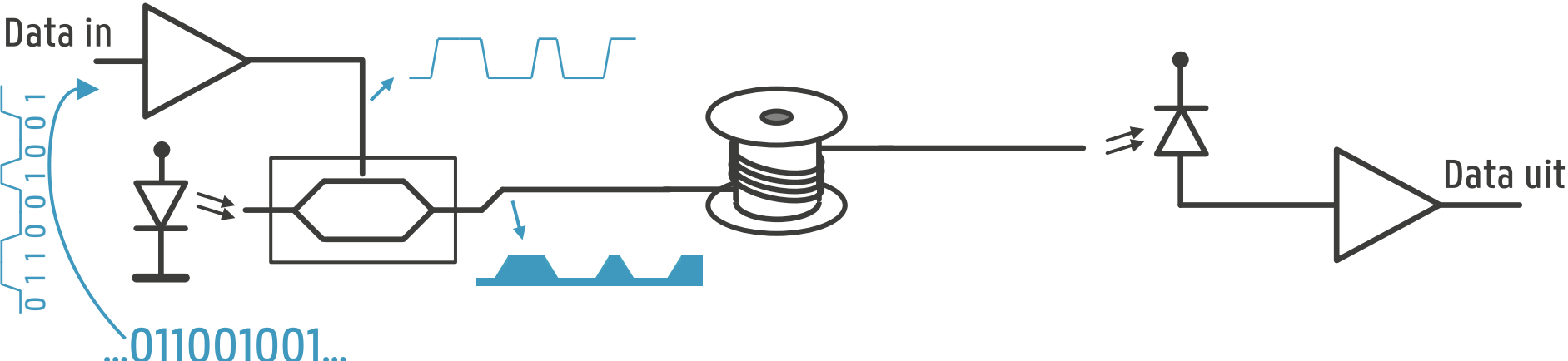


Hogere flexibliteit & signaalkwaliteit

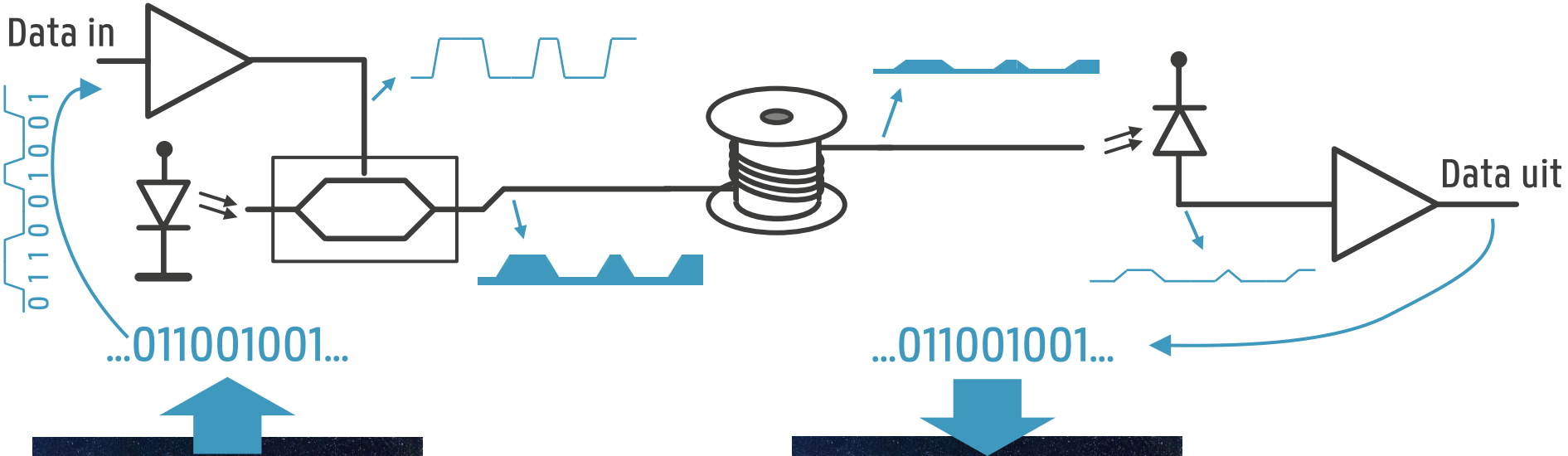
VERSTUREN VAN DATA



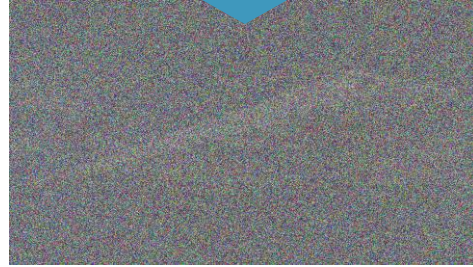
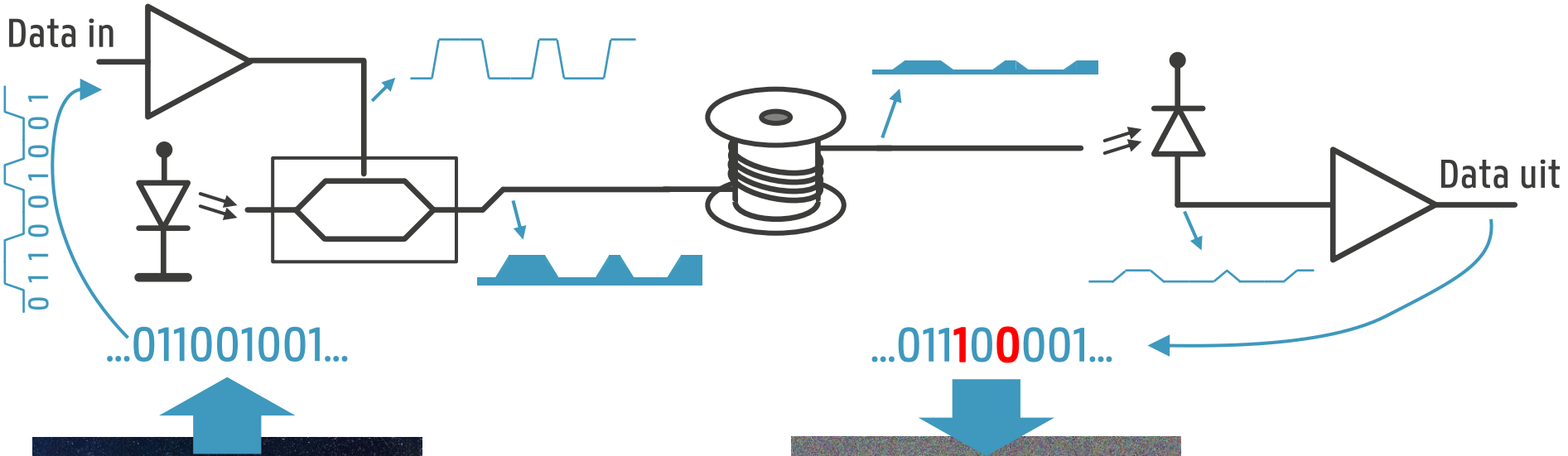
VERSTUREN VAN DATA



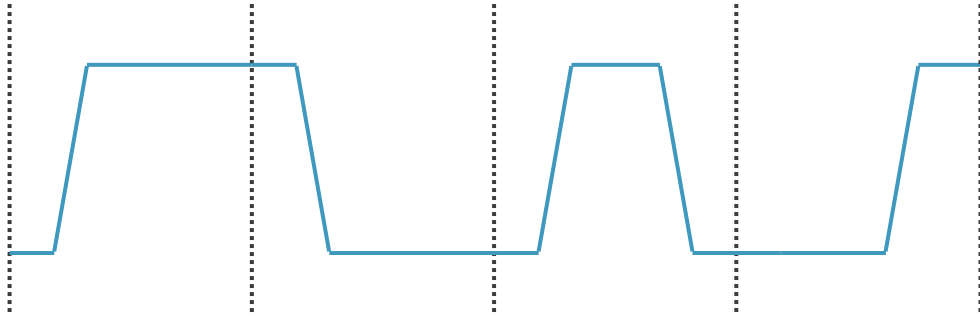
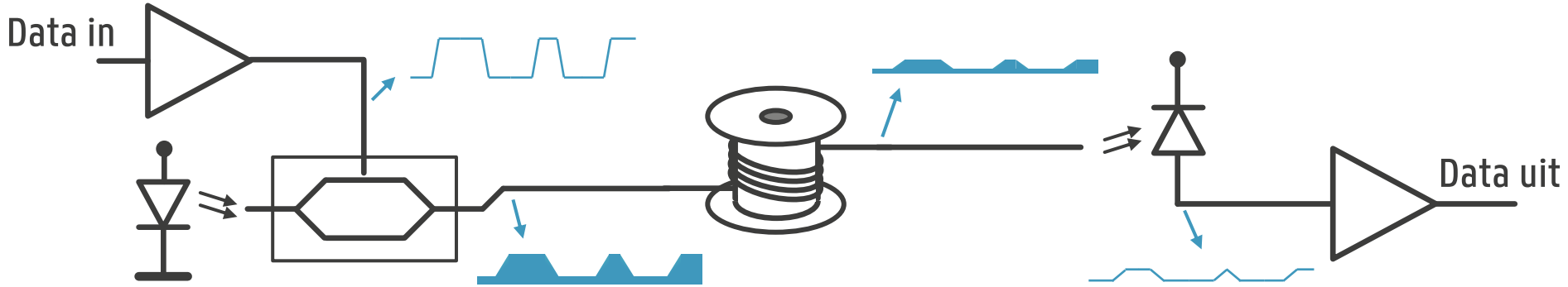
VERSTUREN VAN DATA



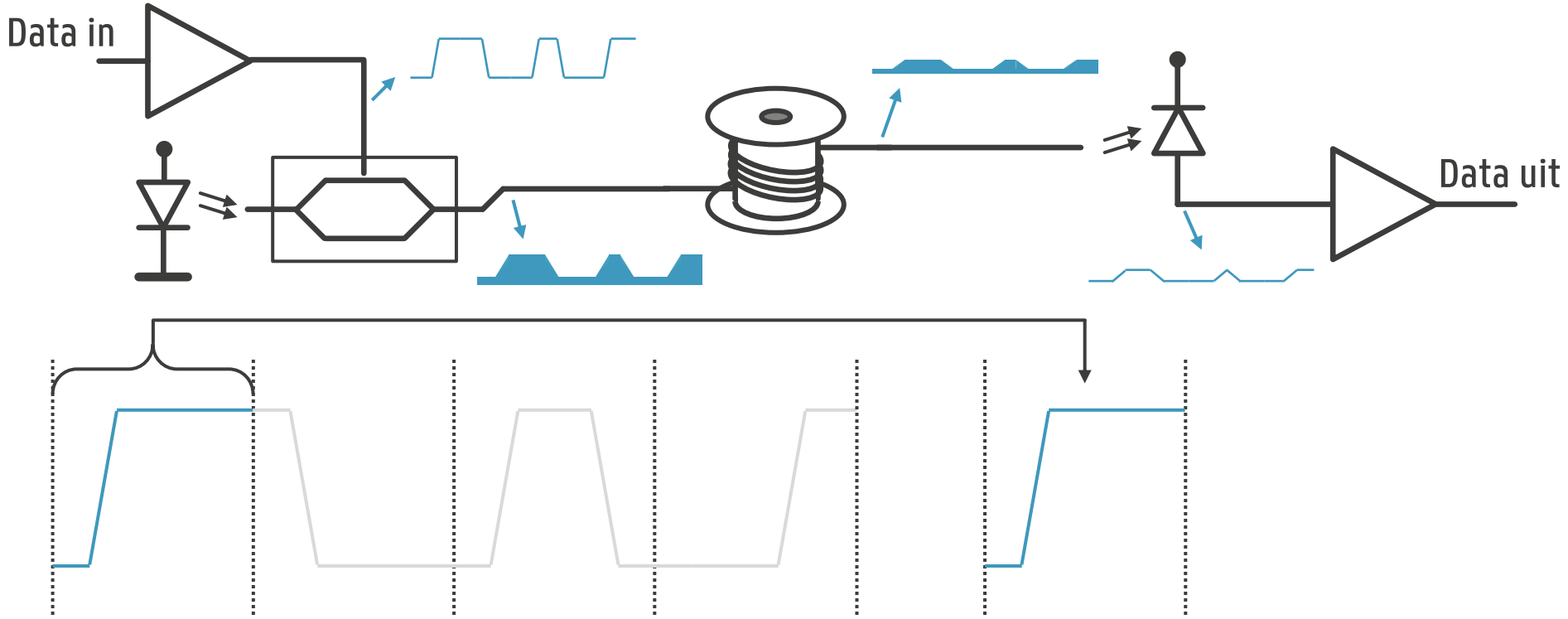
VERSTUREN VAN DATA: BITFOUTEN



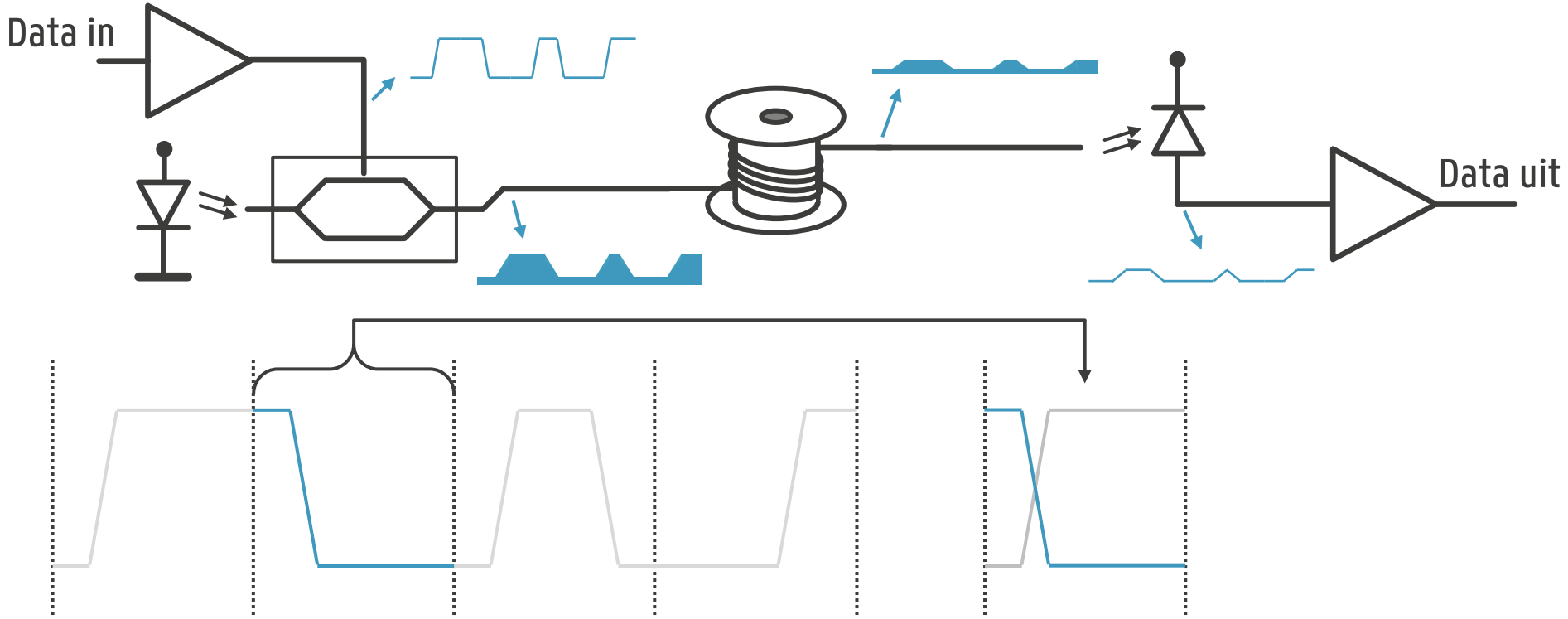
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



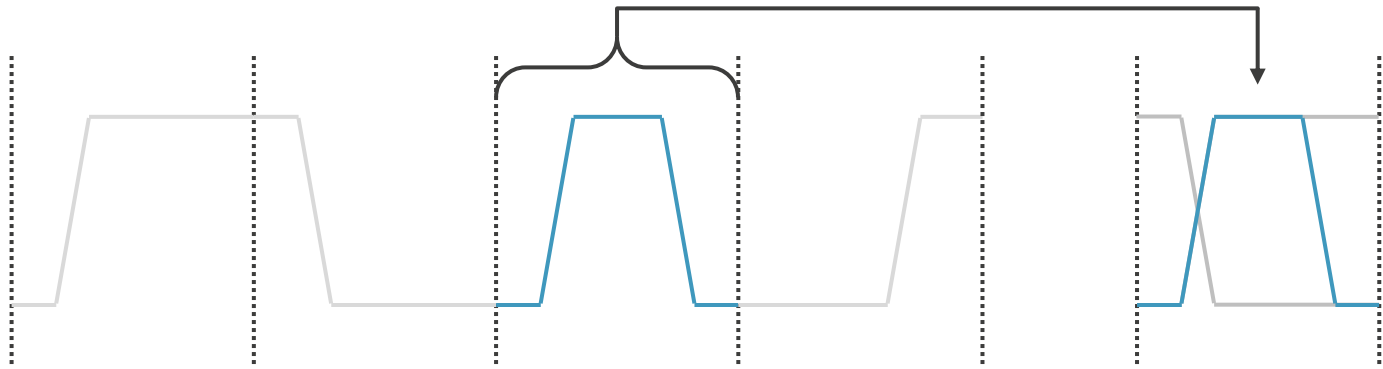
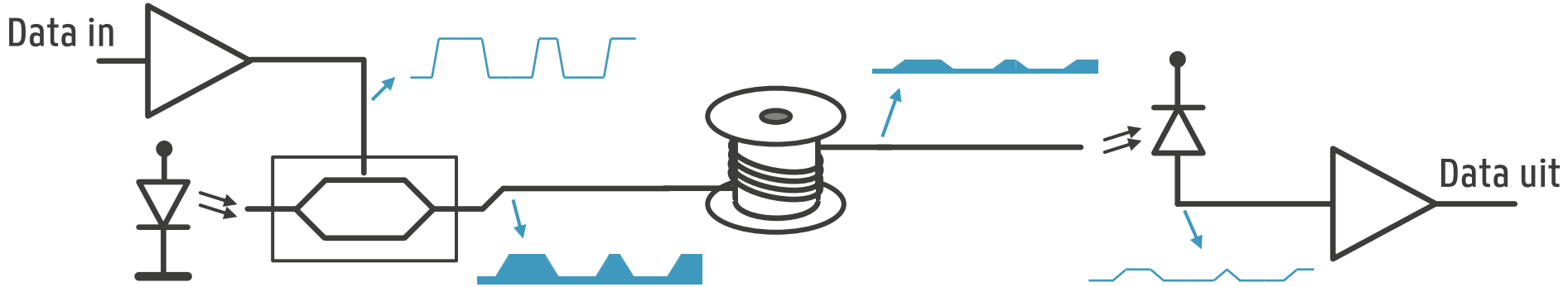
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



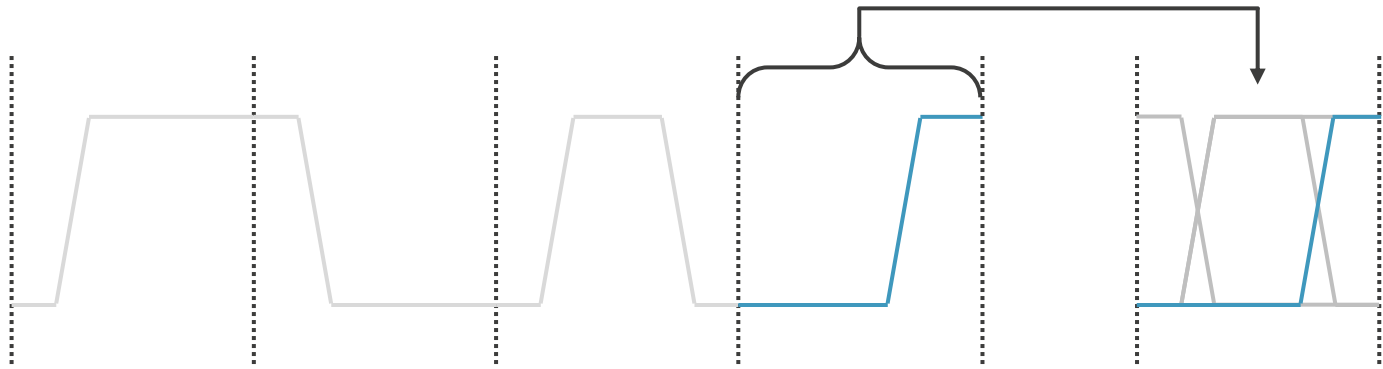
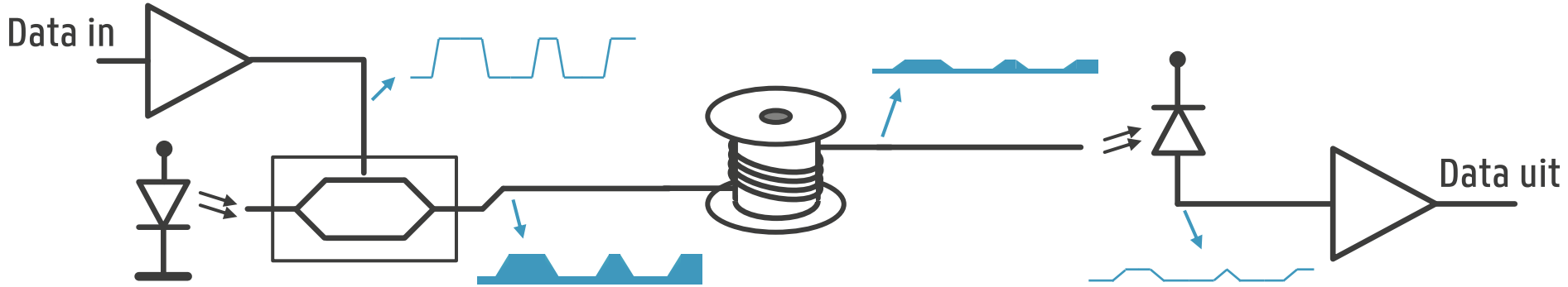
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



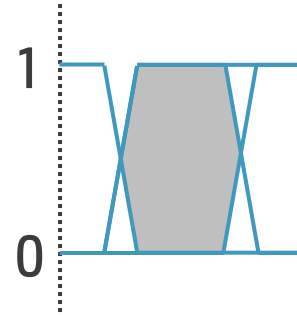
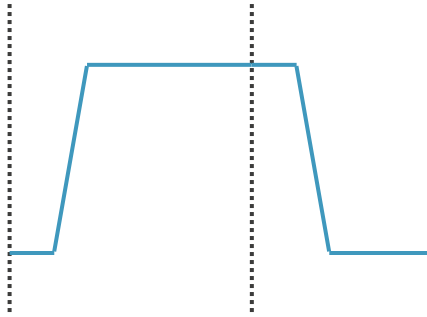
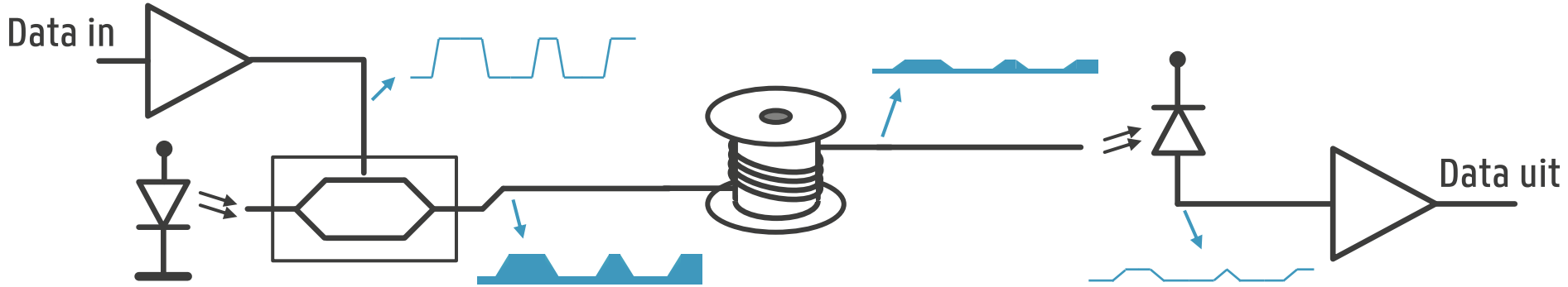
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



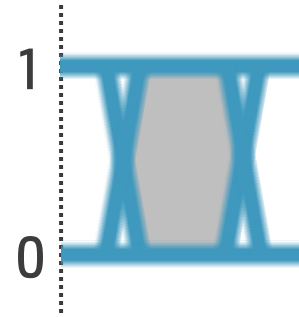
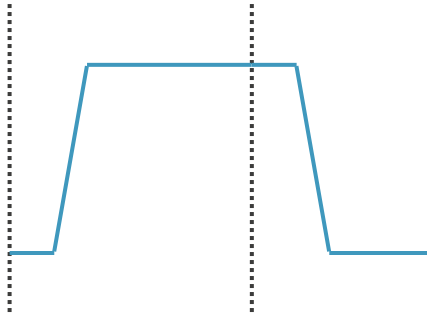
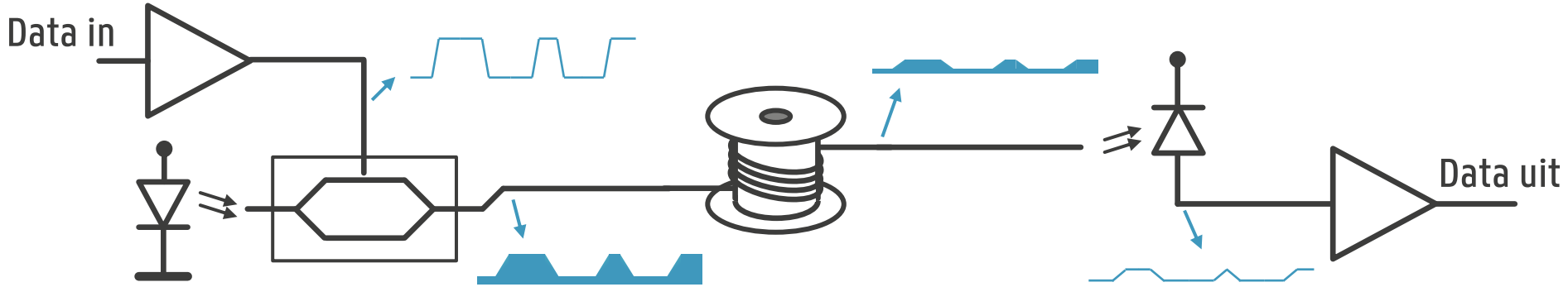
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



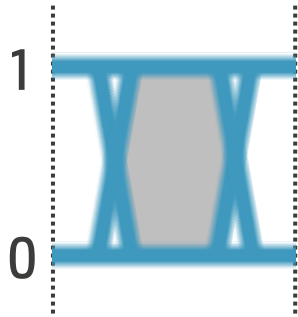
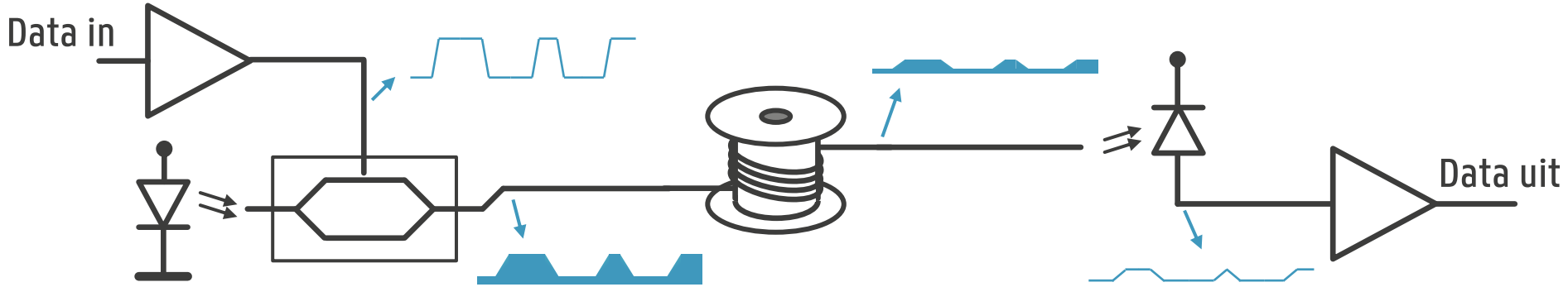
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



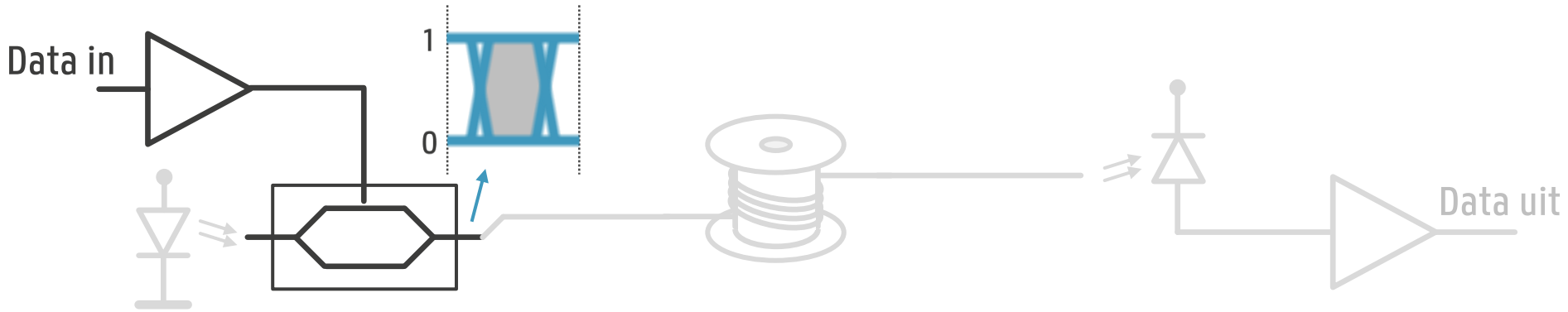
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



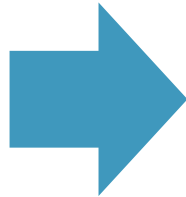
VAN GOLFOFORM NAAR OOGDIAGRAM



DIT ONDERZOEK FOCUST OP DE OPTISCHE ZENDER



- Hoge snelheid
- Compact
- Laag energieverbruik



Zorgvuldig ontwerp van
driver én modulator

Internet, datacenters en optische verbindingen

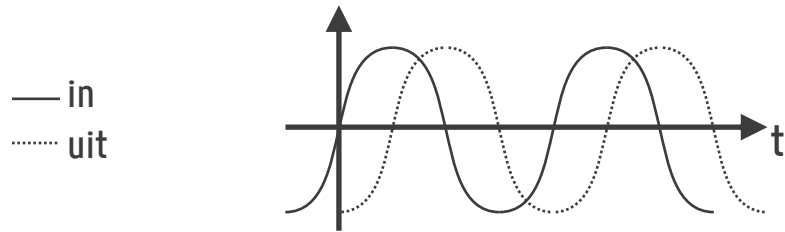
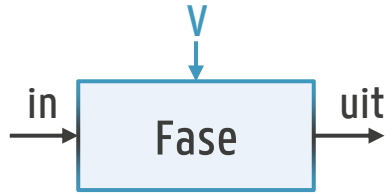
Gesegmenteerde modulatoren

Niet-Lineaire Drivers

Egalisatie in modulatoren

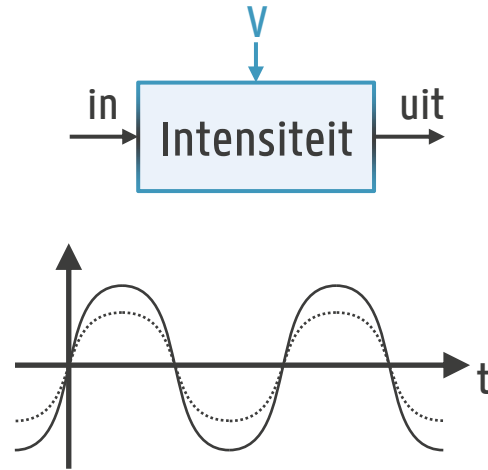
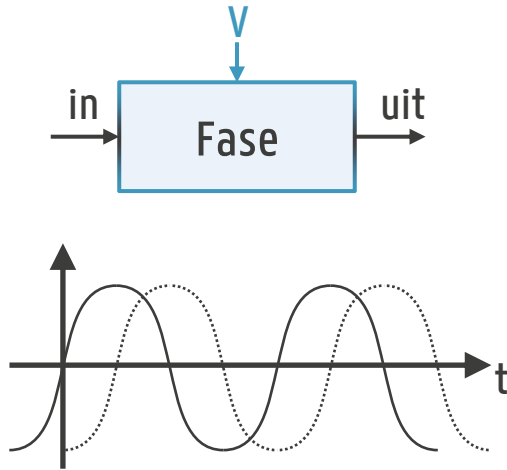
ELEKTRO-OPTISCHE MODULATOREN

- Twee basisblokken:



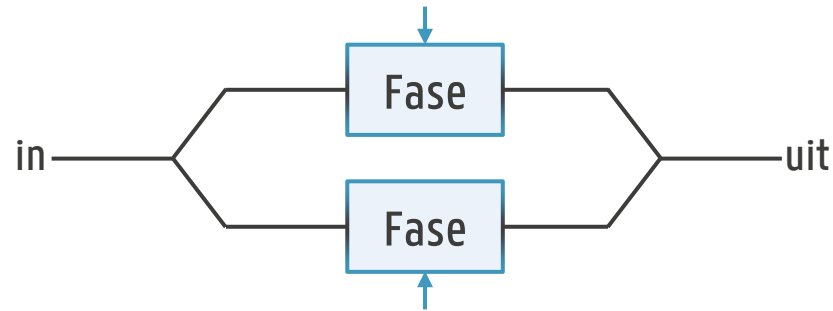
ELEKTRO-OPTISCHE MODULATOREN

- Twee basisblokken:



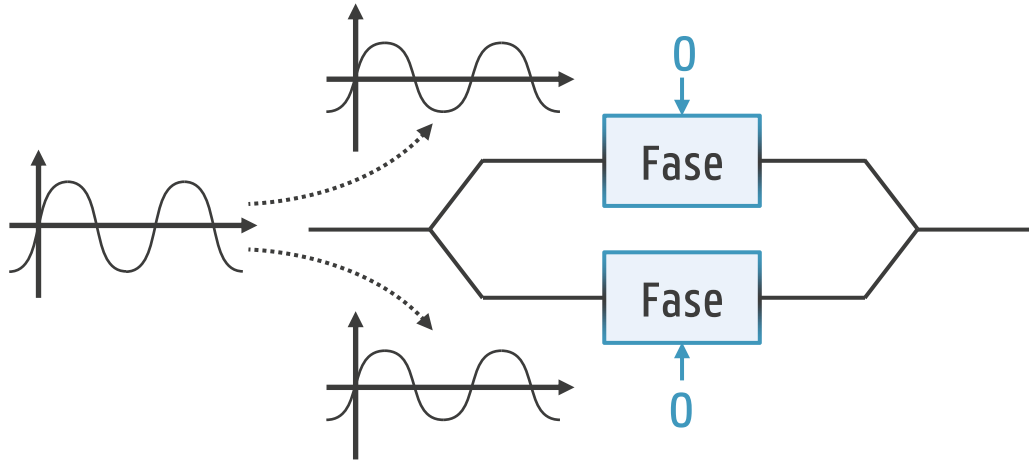
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- De Mach-Zehnder modulator



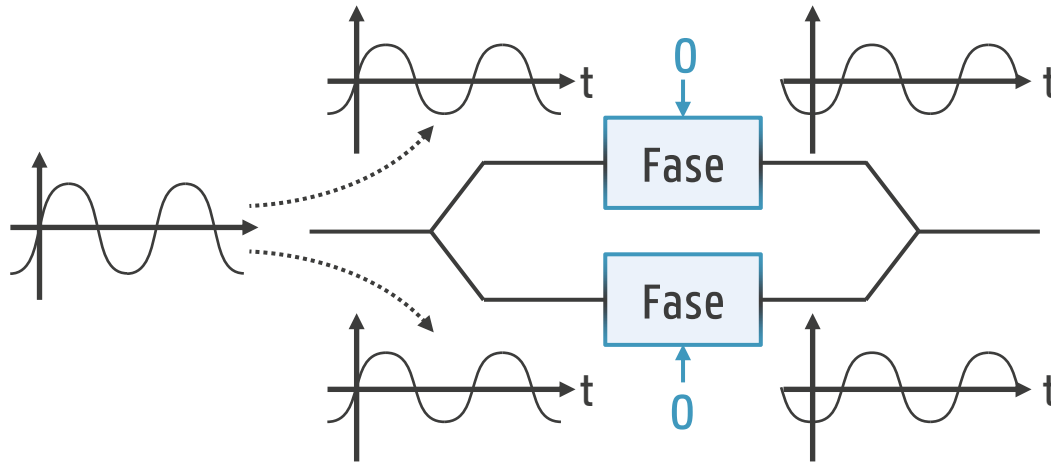
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- De Mach-Zehnder modulator: **constructieve interferentie**



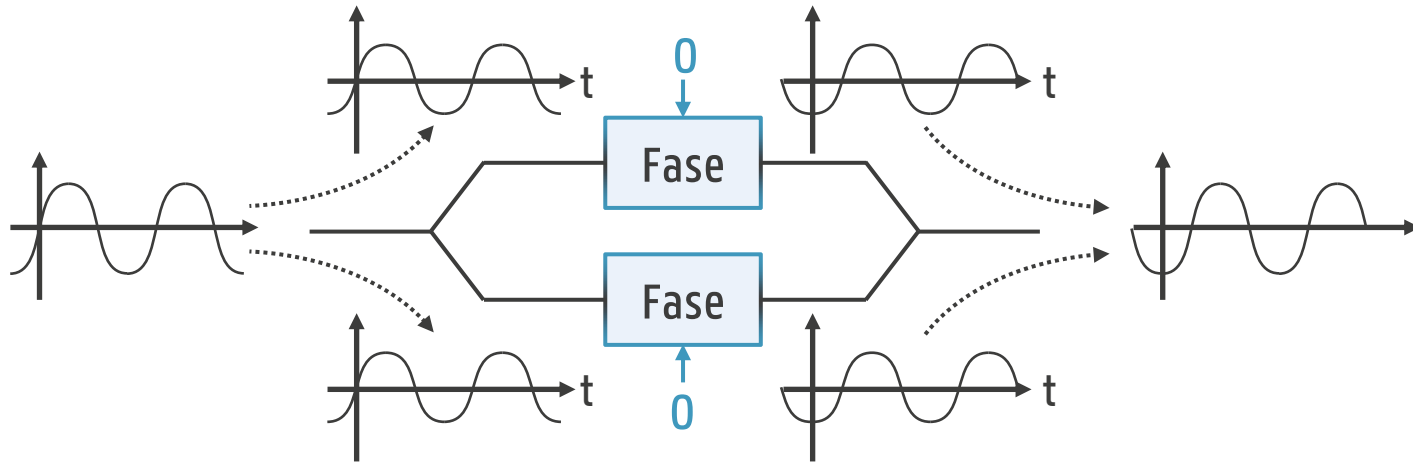
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- De Mach-Zehnder modulator: **constructieve interferentie**



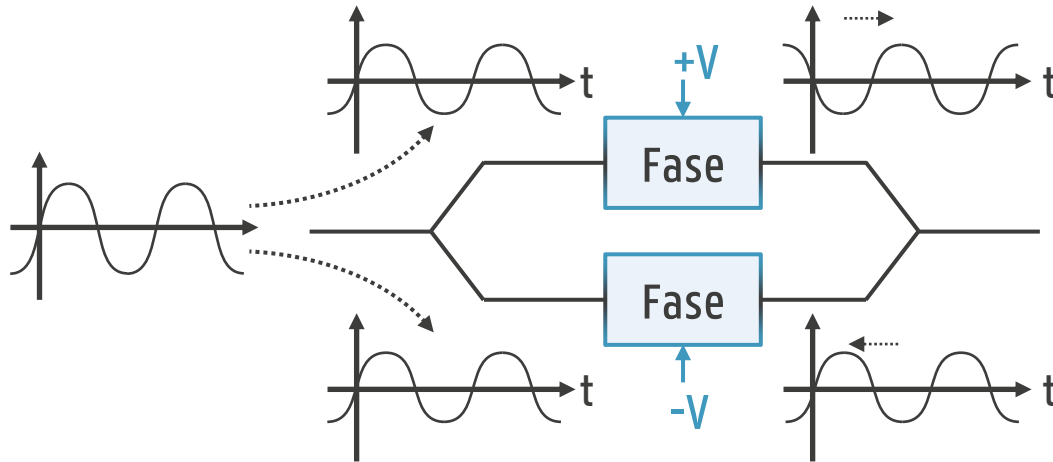
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- De Mach-Zehnder modulator: **constructieve interferentie**



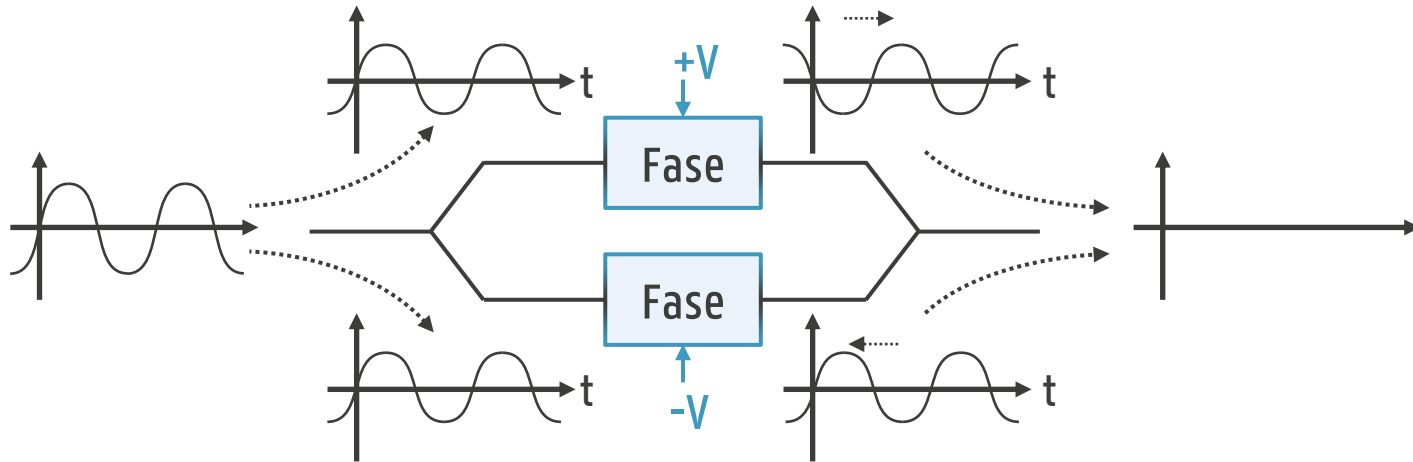
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- De Mach-Zehnder modulator: **destructieve interferentie**



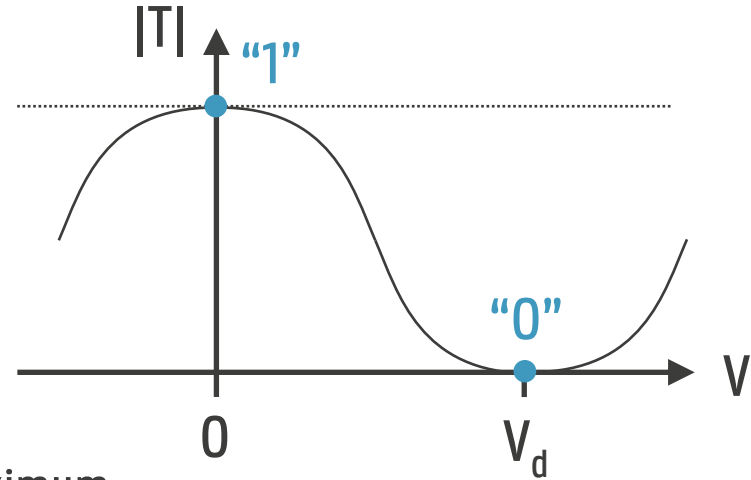
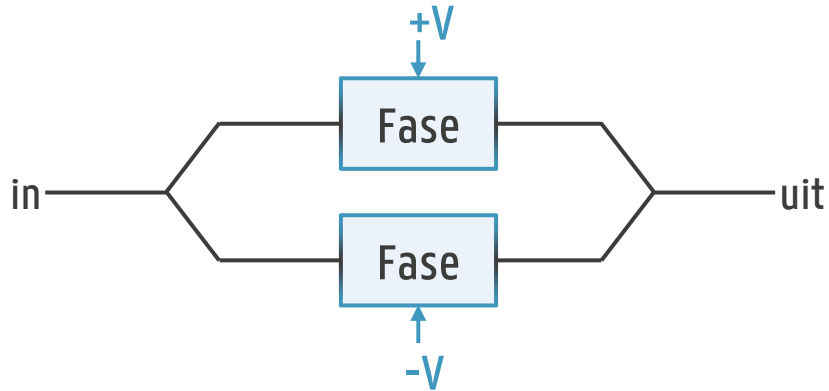
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- De Mach-Zehnder modulator: **destructieve interferentie**



FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

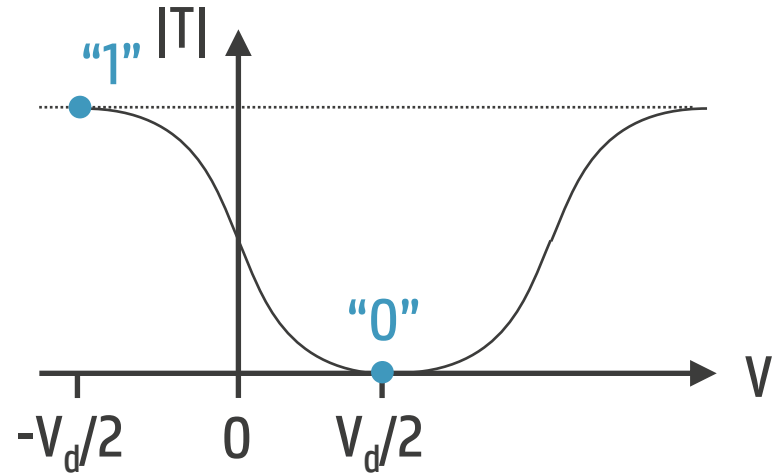
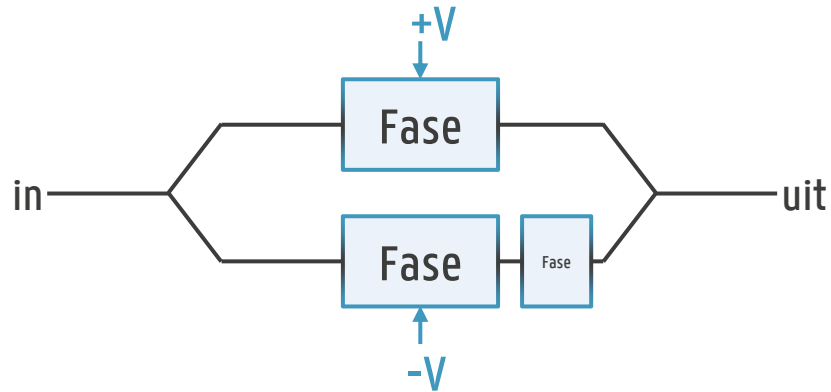
■ Ingangs-uitgangskarakteristiek



Als $V=0$: $|T|$ maximum
Als $V=V_d$: $|T|$ minimum

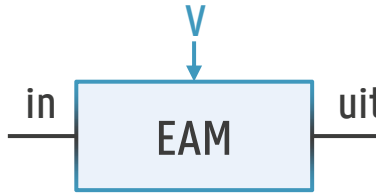
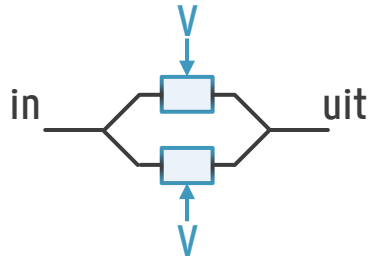
FASEMODULATOR ALS INTENSITEITSMODULATOR

- Ingangs-uitgangskarakteristiek: quadratuur



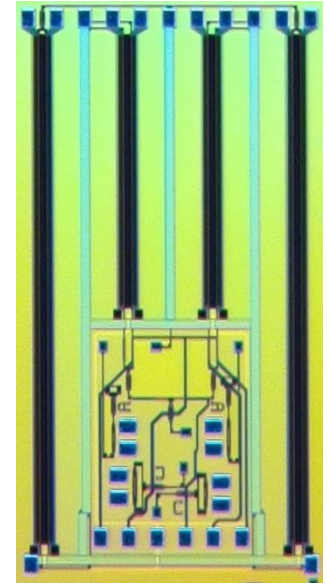
QP beter voor oogkwaliteit

WELKE MODULATOR KIEZEN WE NU?



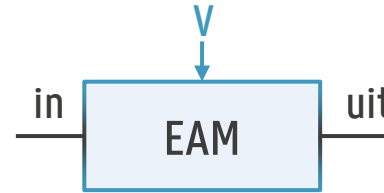
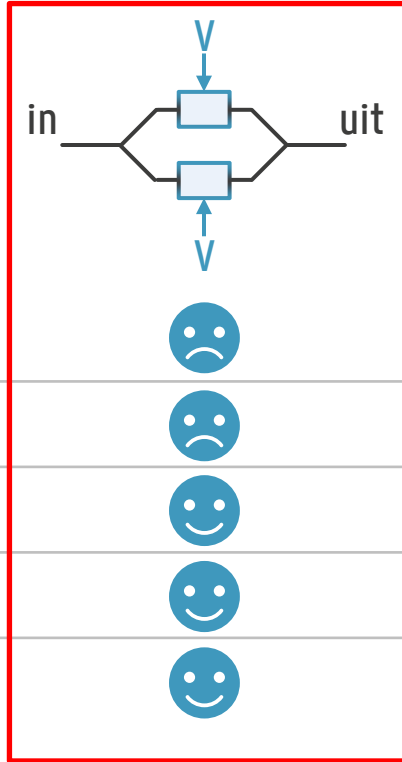
Grootte		
Energieverbruik		
Fabricage (Si)		
Signaalkwaliteit		
Golflengte-gevoeligheid		

MZM



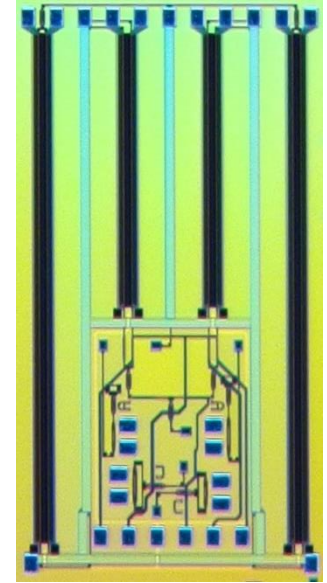
EAM

WELKE MODULATOR KIEZEN WE NU?



Grootte		
Energieverbruik		
Fabricage (Si)		
Signaalkwaliteit		
Golflengte-gevoeligheid		

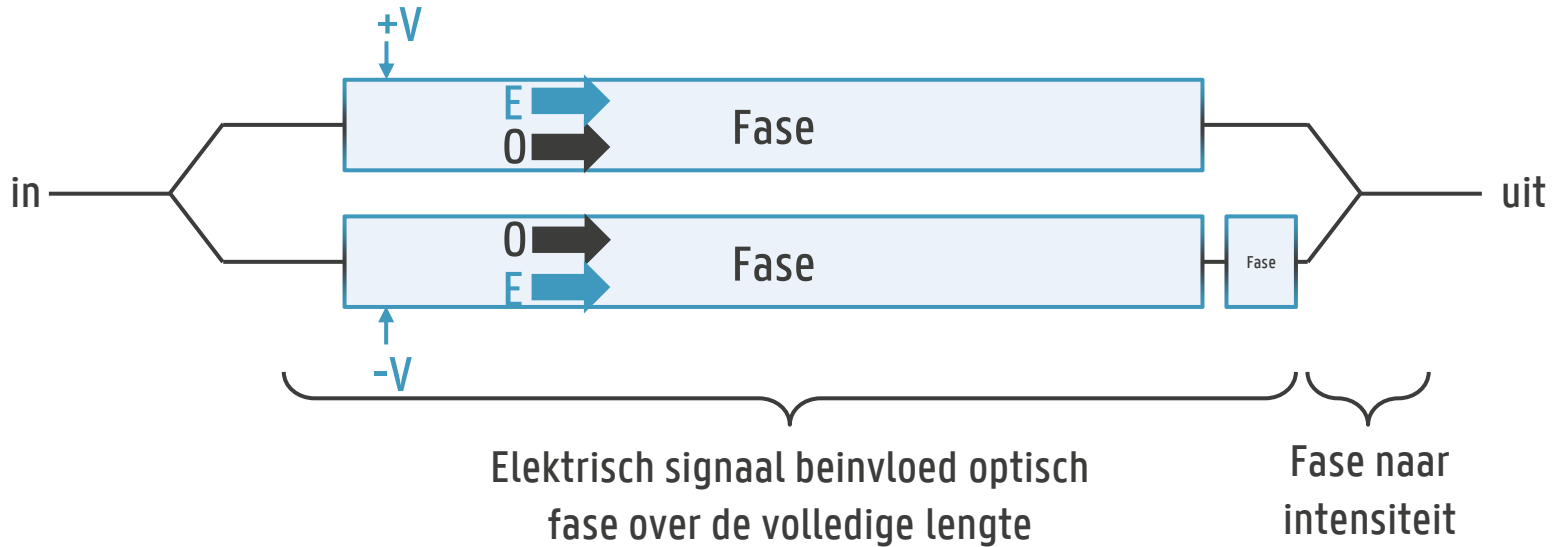
MZM



EAM

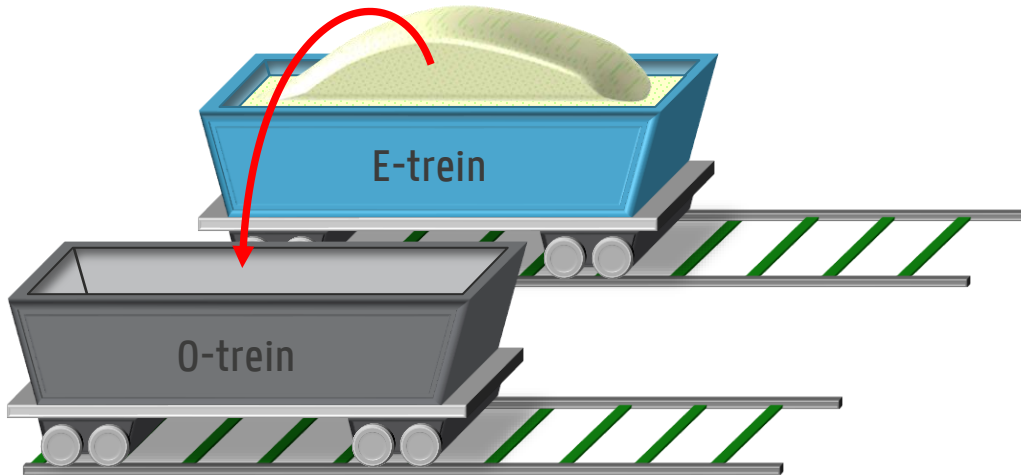
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Elektrische en optische signalen naast elkaar



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

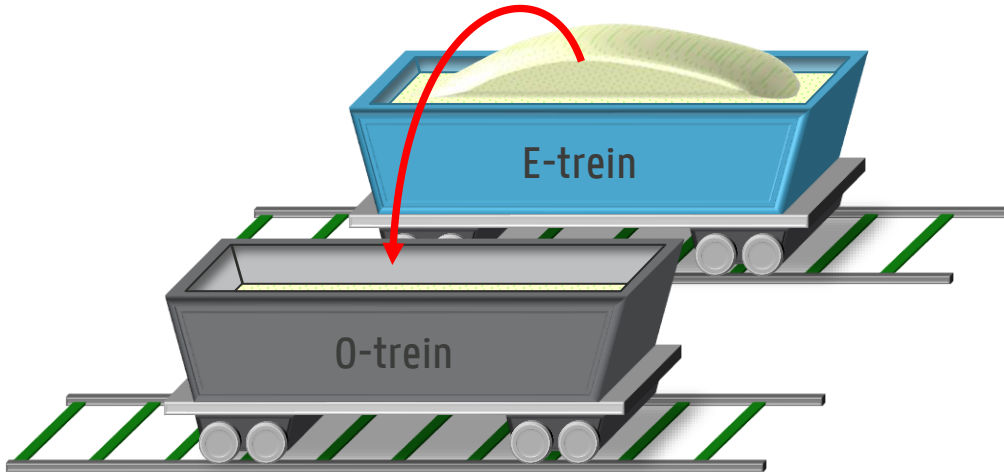
- Elektrische en optische treinen



Elektrisch signaal “laadt” fase
over naar optisch signaal

DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

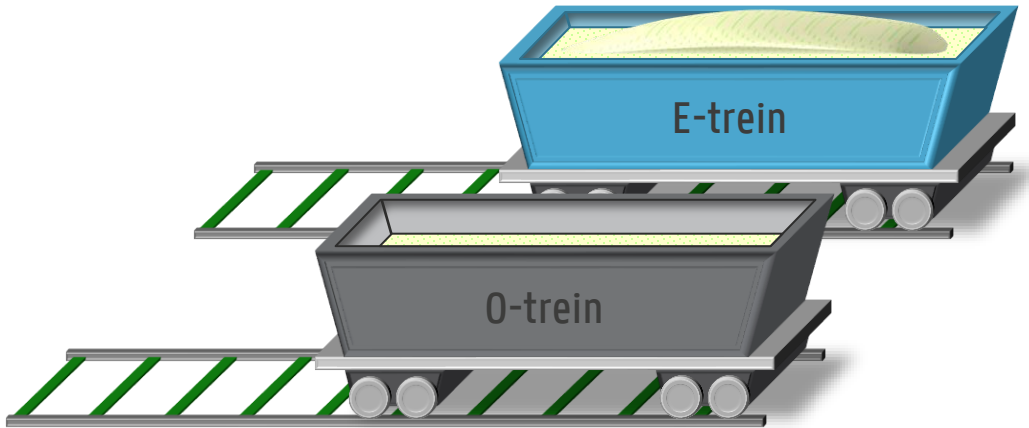
- Elektrische en optische treinen



Fase van optisch signaal bouwt op

DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Elektrische en optische treinen



Einde van de sporen:
Geen verder fase-opbouw



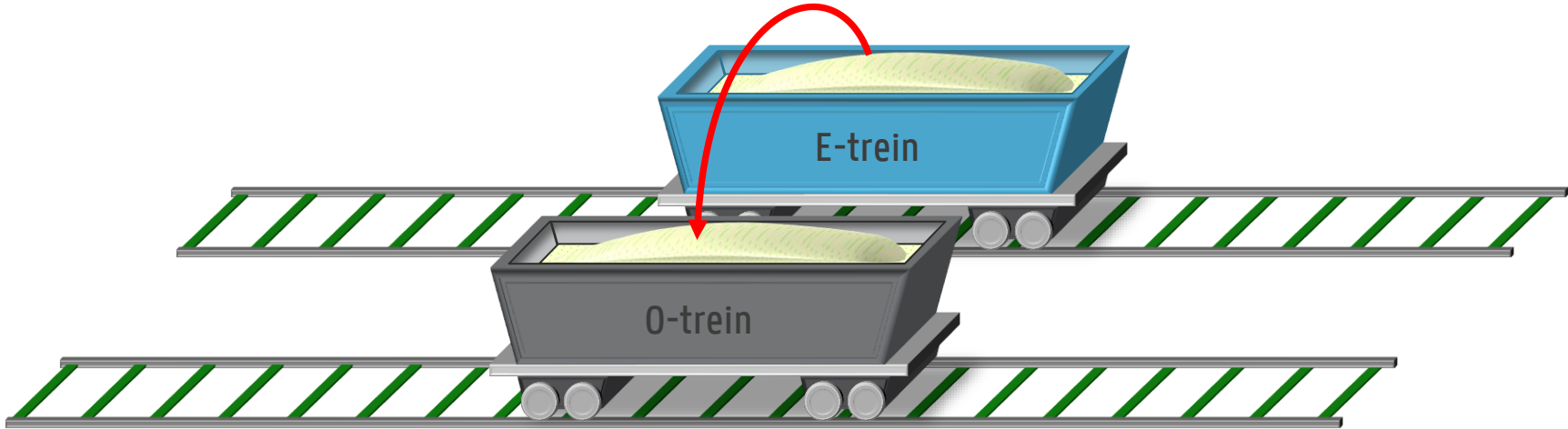
Fase-intensiteit omzetting in MZM



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Elektrische en optische treinen

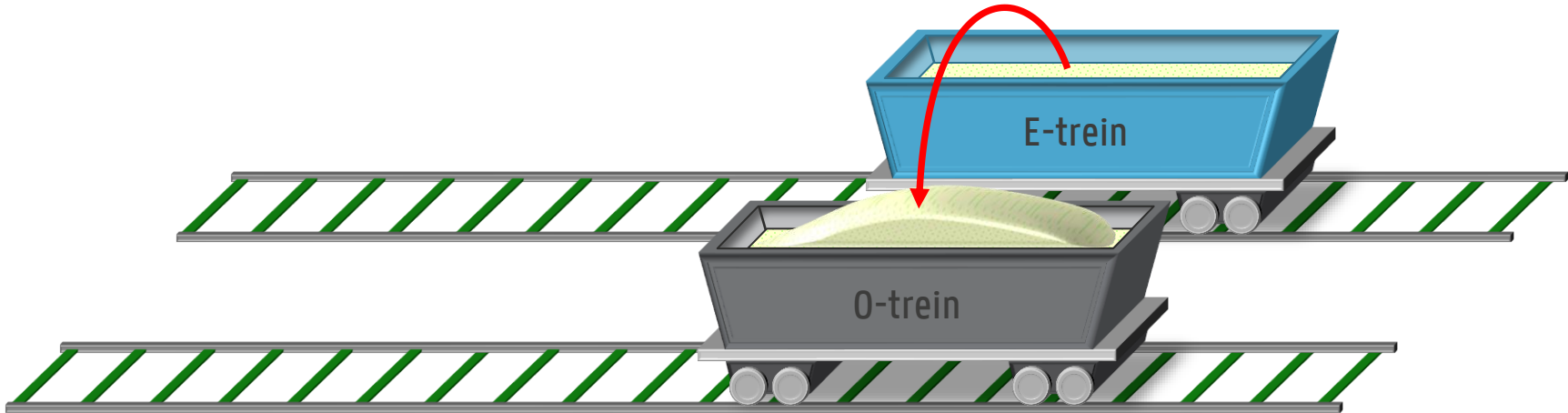
Langere modulator: meer fase



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Elektrische en optische treinen

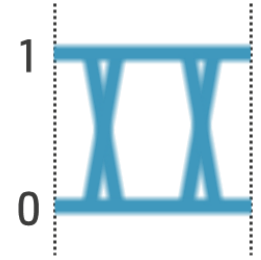
Langere modulator: meer fase



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

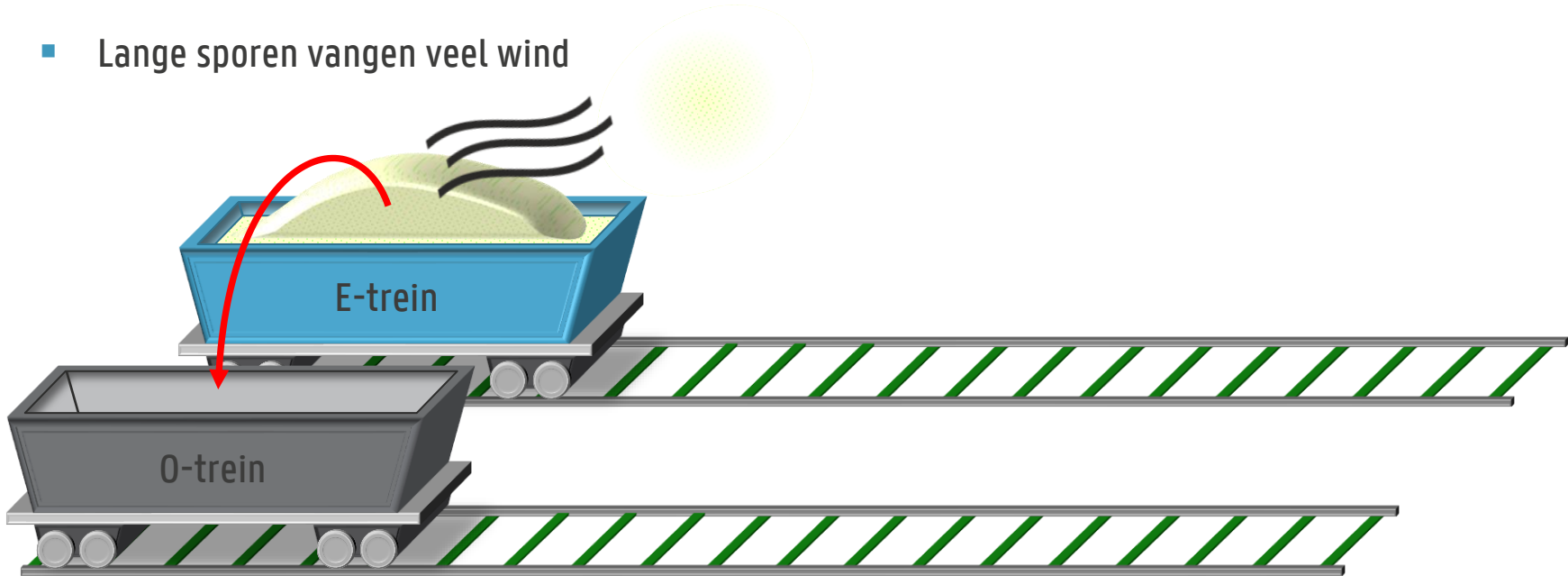
- Elektrische en optische treinen

Langere modulator: meer fase
Grotere ogen



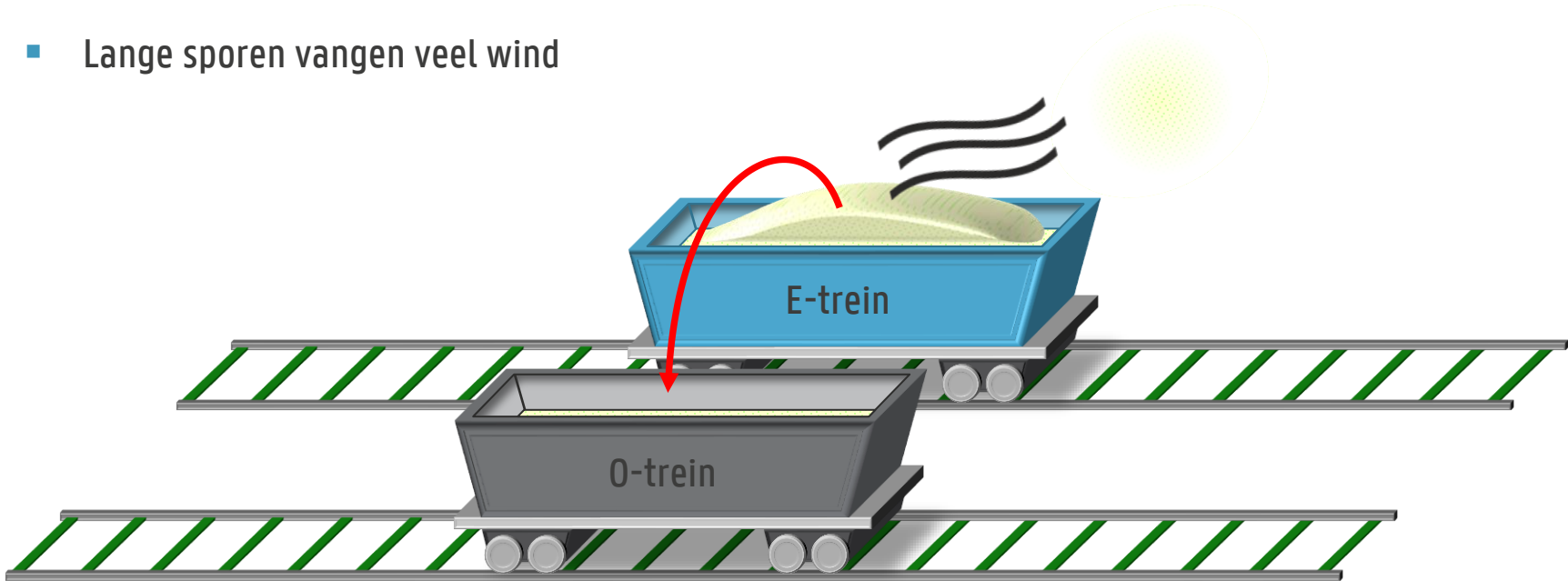
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Lange sporen vangen veel wind



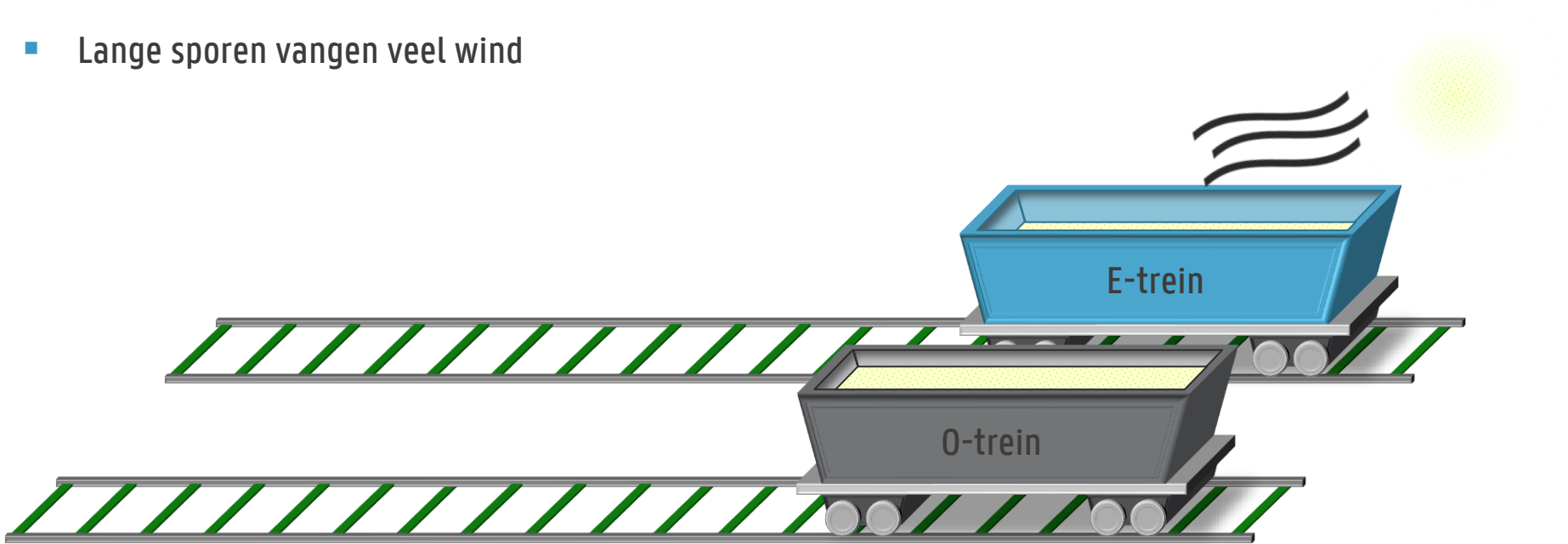
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Lange sporen vangen veel wind



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

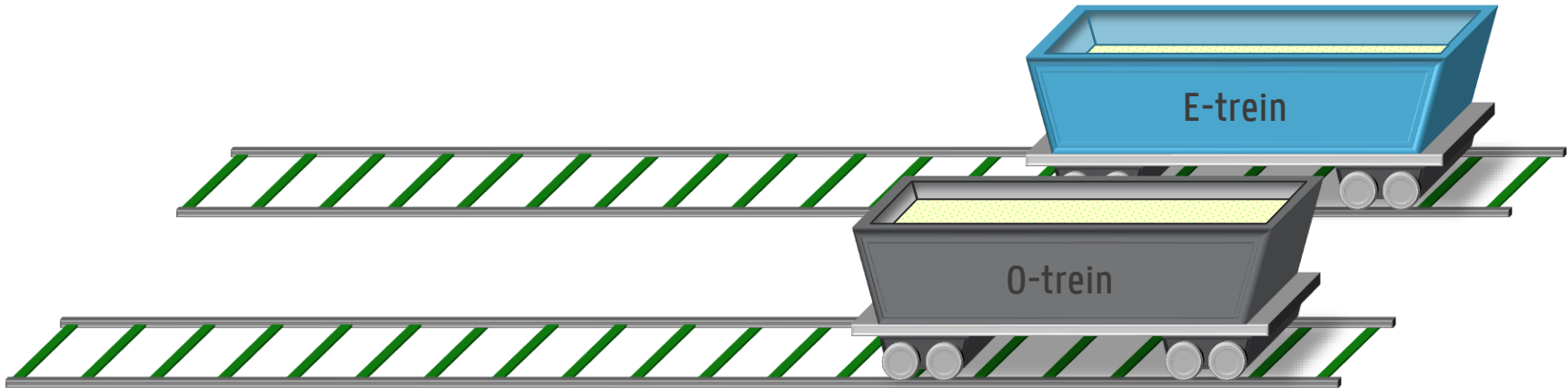
- Lange sporen vangen veel wind



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

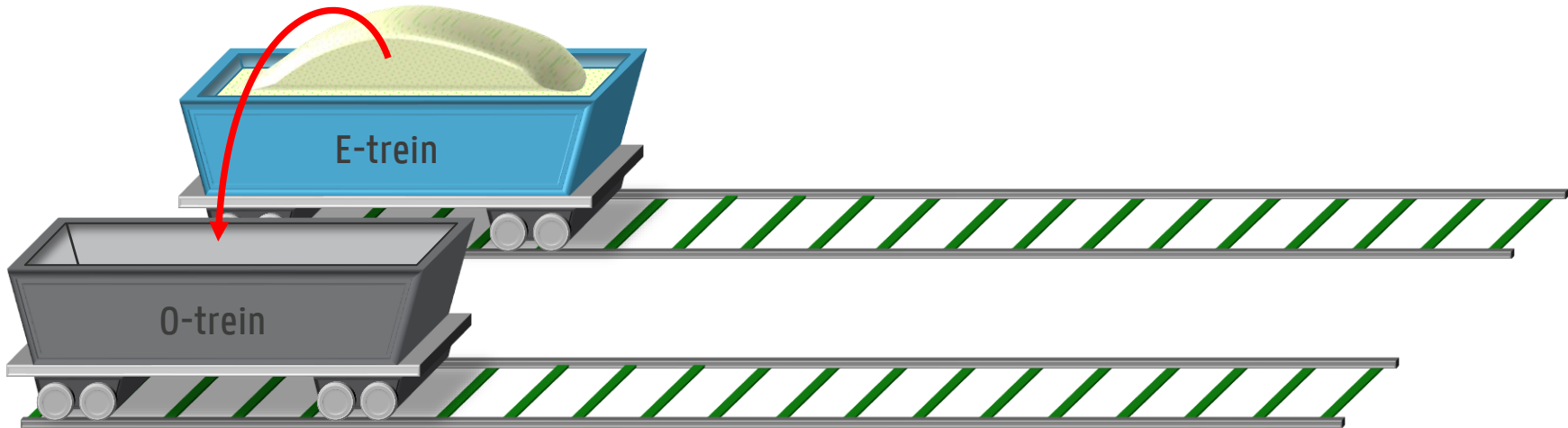
- Lange sporen vangen veel wind

Elektrisch signaal deels verloren
Minder fase, **kleine ogen**



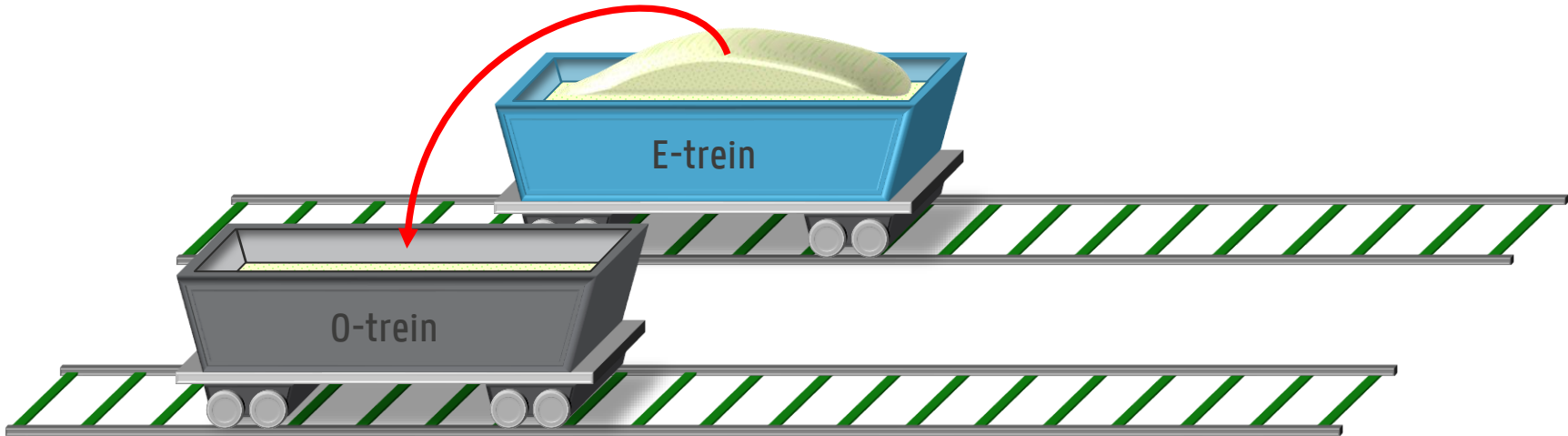
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Trein met verschillende snelheden



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

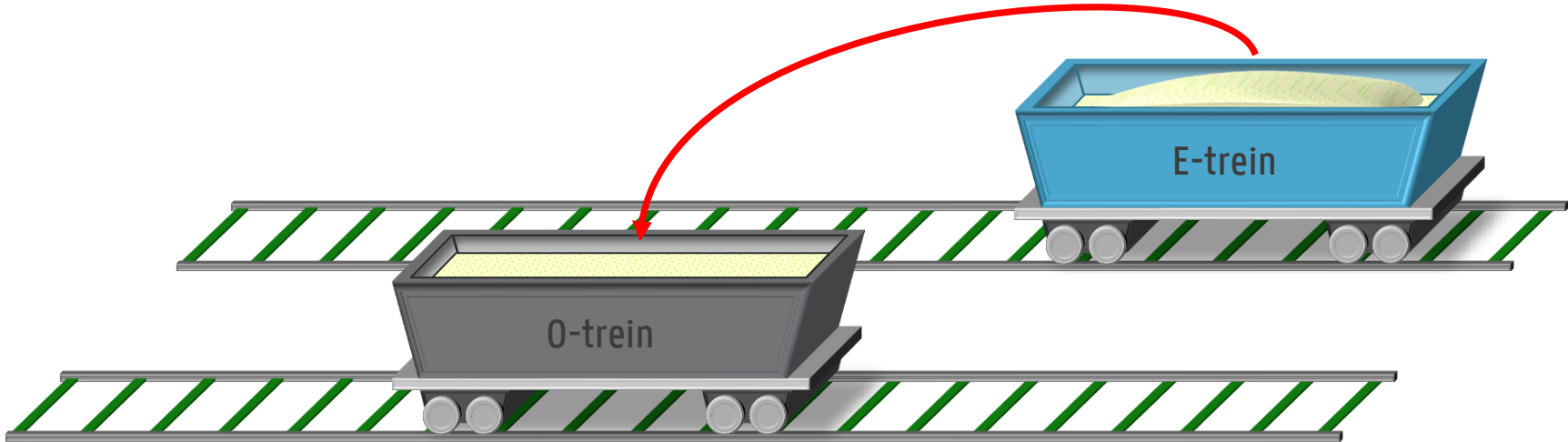
- Trein met verschillende snelheden



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Trein met verschillende snelheden

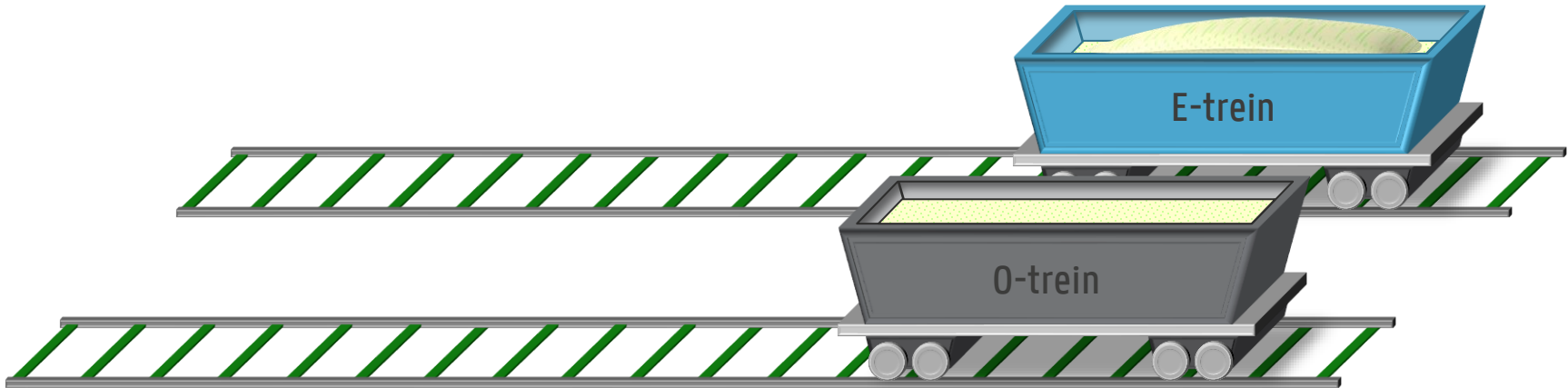
E-trein op eindstop: overladen stopt



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

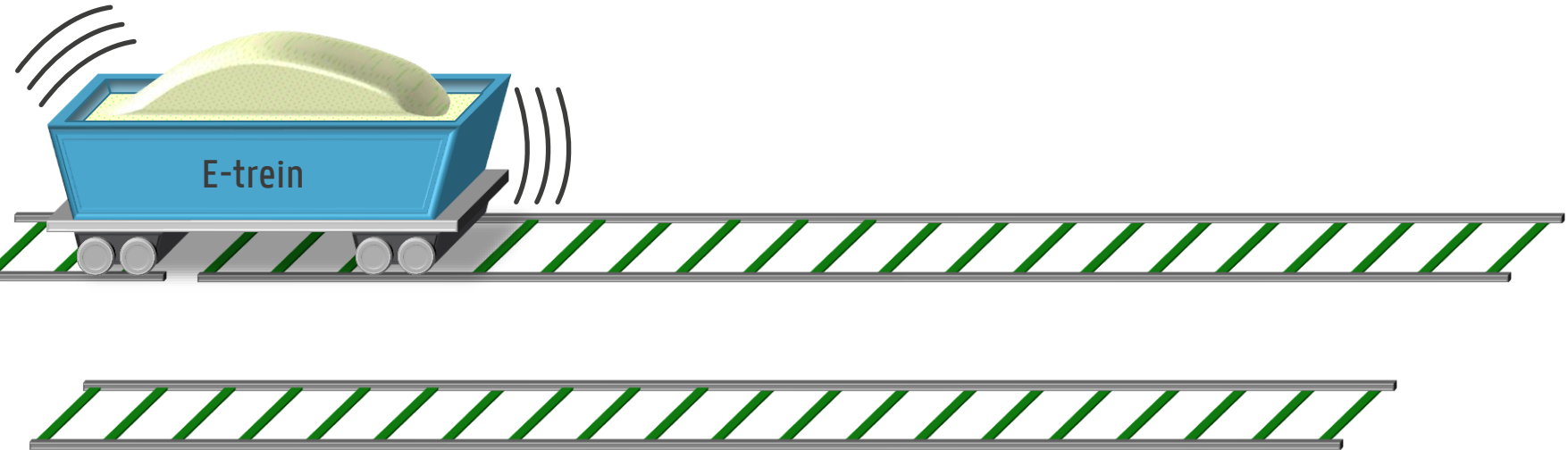
- Trein met verschillende snelheden

Overladen lukt maar deels
Minder fase, **kleine ogen**



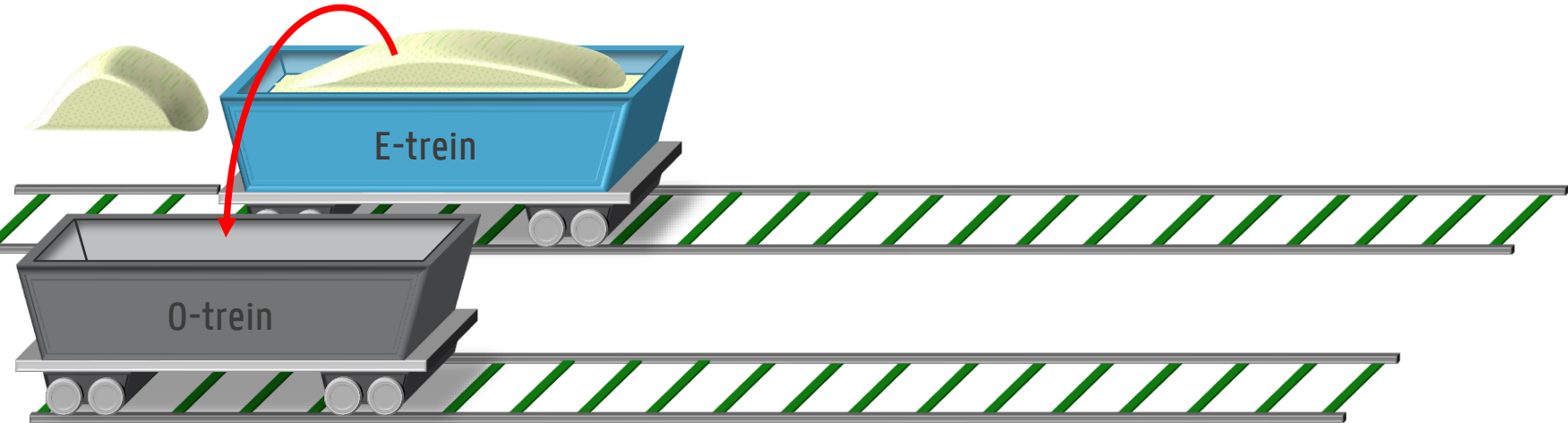
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Spoorovergangen moeten goed aansluiten



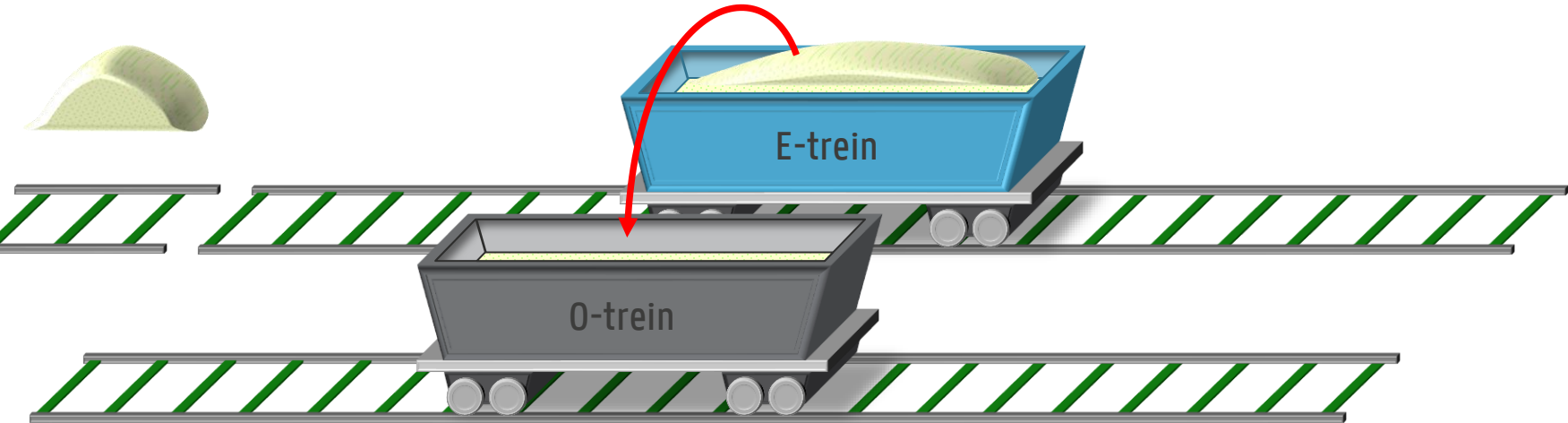
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

- Spoorovergangen moeten goed aansluiten



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

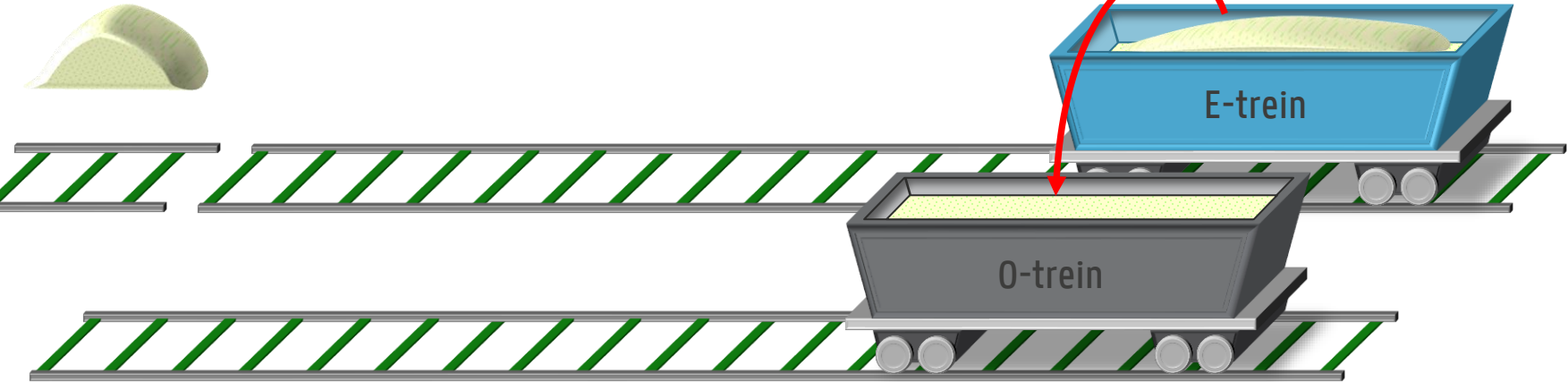
- Spoorovergangen moeten goed aansluiten



DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

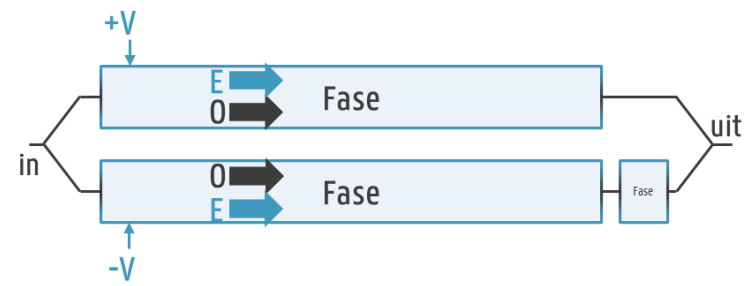
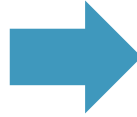
- Spoorovergangen moeten goed aansluiten

Elektrisch signaal verloren aan overgang
Minder fase, kleinere ogen



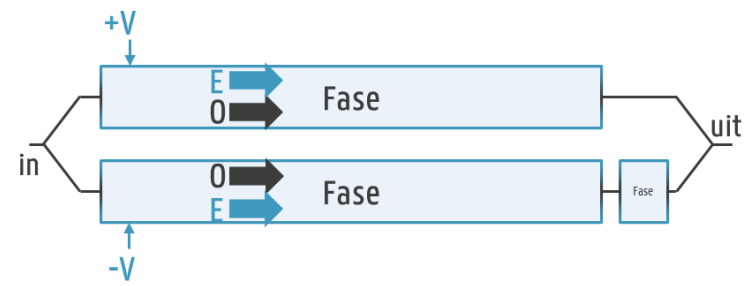
DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

Zandverlies door
wind beperken

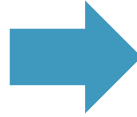


Verzwakking van
elektrisch signaal beperken

DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

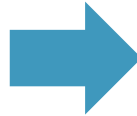


Zandverlies door
wind beperken



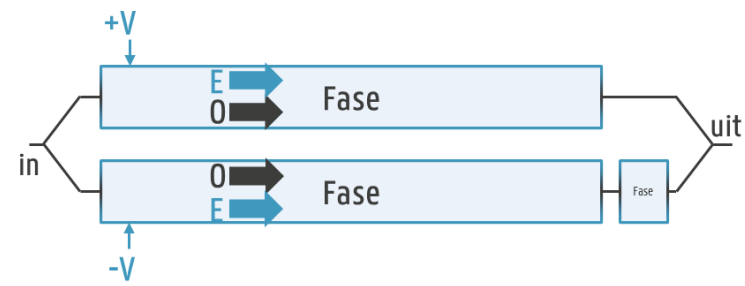
Verzwakking van
elektrisch signaal beperken

Overladen optimaal
voor gelijke snelheden

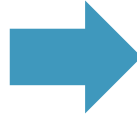


Elektrisch en optische
golfsnelheid afstemmen

DE LOPENDE-GOLF MACH-ZEHNDER MODULATOR

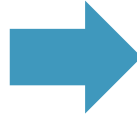


Zandverlies door
wind beperken



Verzwakking van
elektrisch signaal beperken

Overladen optimaal
voor gelijke snelheden



Elektrisch en optische
golfsnelheid afstemmen

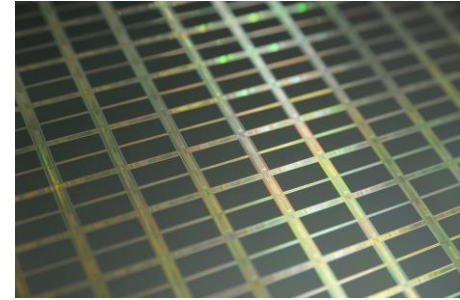
Zandverlies door spoor-
overgang beperken



Driver-modulator
overgang optimalizeren

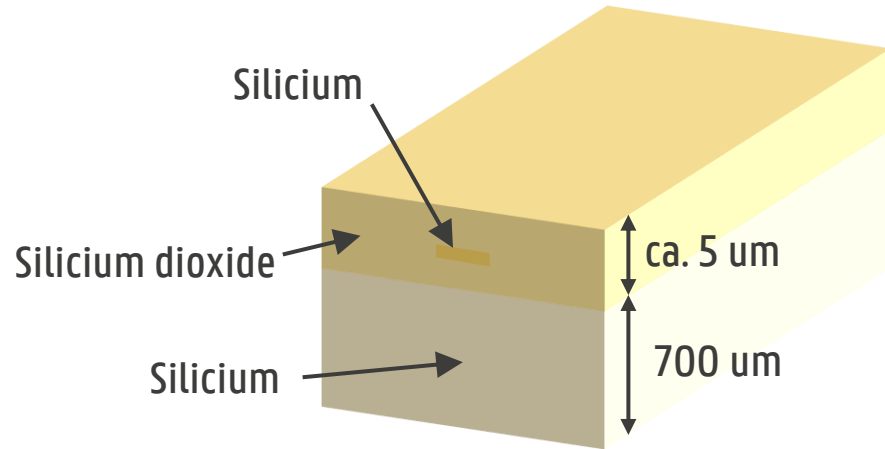
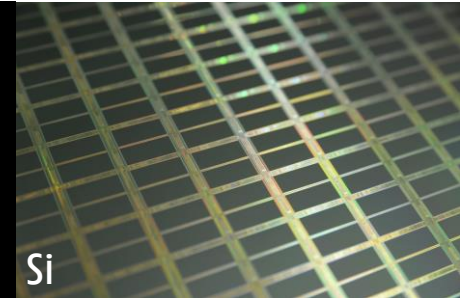
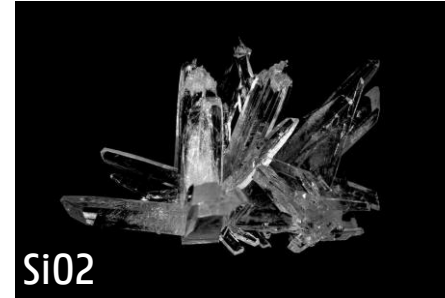
LOPENDE-GOLF MODULATOREN IN SILICIUM FOTONICA

- Silicium fotonica?
 - Herbruik elektrisch-chip process
 - “Optisch vezel” op een chip



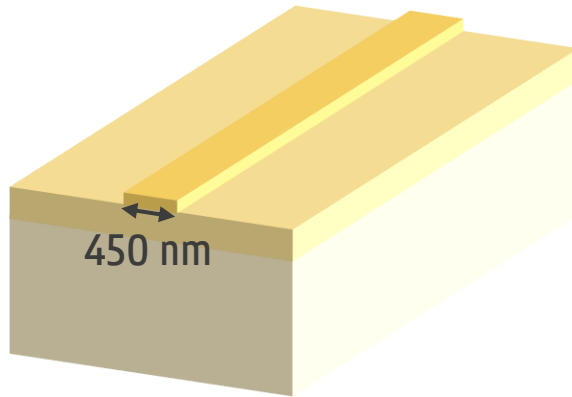
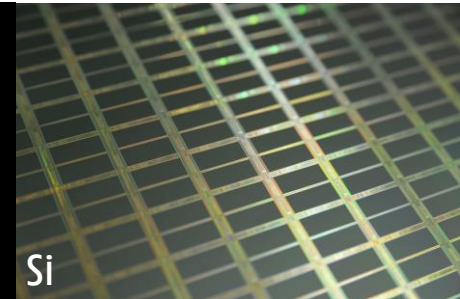
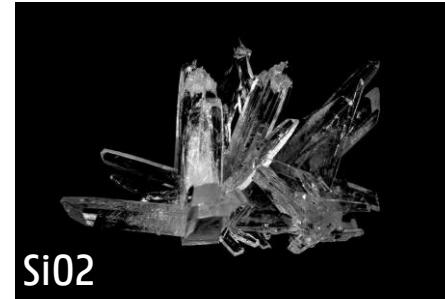
LOPENDE-GOLF MODULATOREN IN SILICIUM FOTONICA

- Silicium fotonica?
 - Herbruik elektrisch-chip process
 - “Optisch vezel” op een chip



LOPENDE-GOLF MODULATOREN IN SILICIUM FOTONICA

- Silicium fotonica?
 - Herbruik elektrisch-chip process
 - “Optisch vezel” op een chip

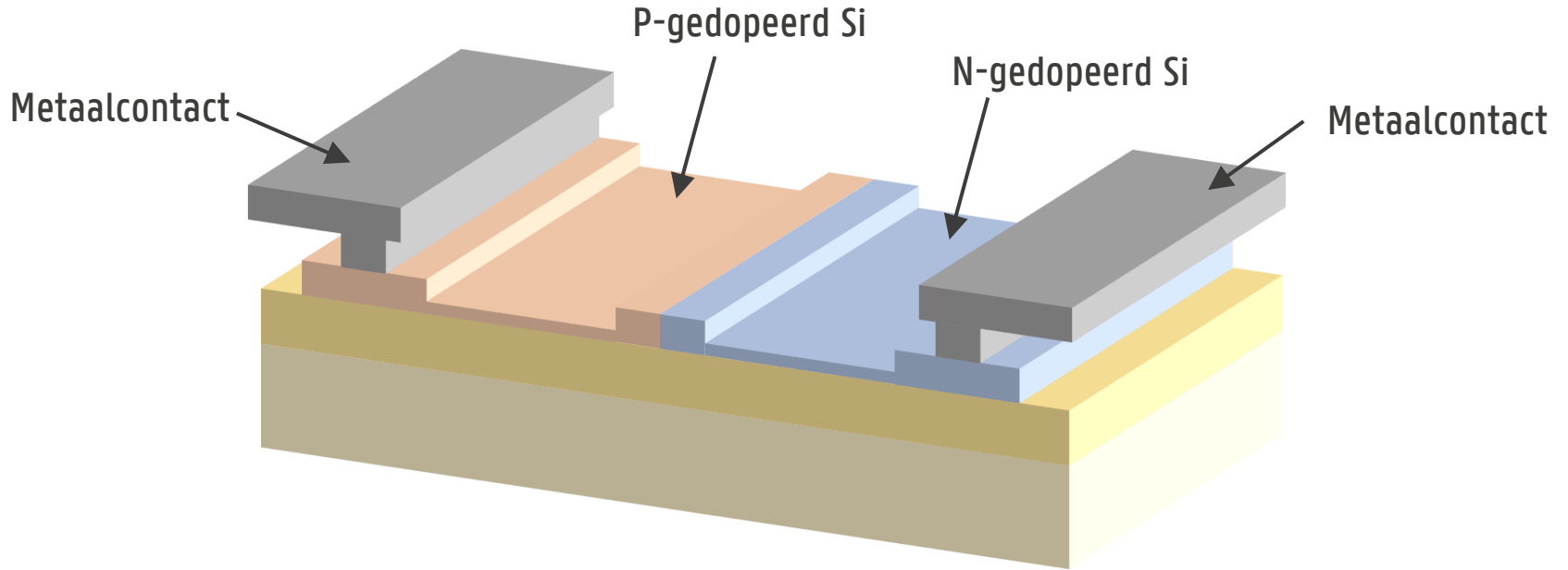


Licht “gevangen” in Si-SiO₂ golfgeleider

Spoor voor de 0-trein

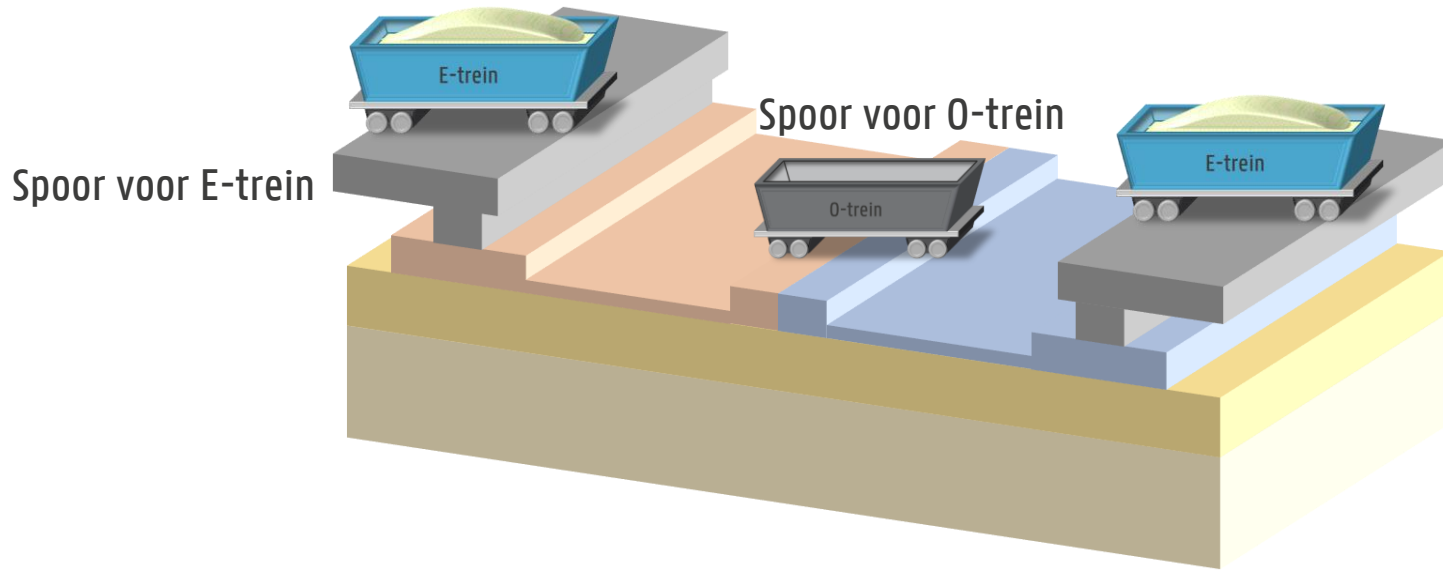
LOPENDE-GOLF MODULATOREN IN SILICIUM FOTONICA

- PN-junctie als fasemodulator



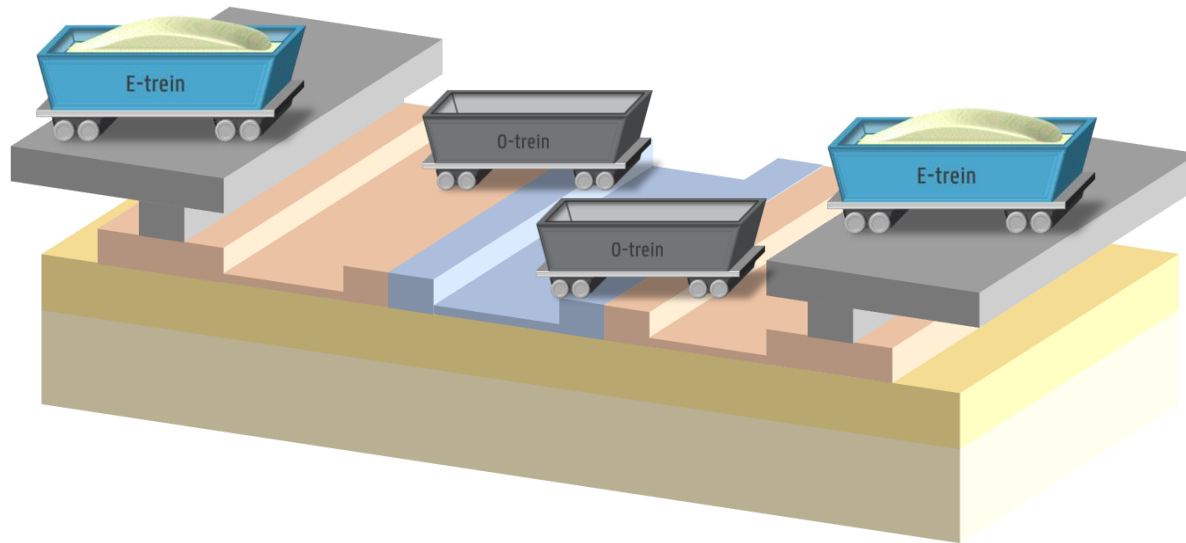
LOPENDE-GOLF MODULATOREN IN SILICIUM FOTONICA

- PN-junctie als fasemodulator

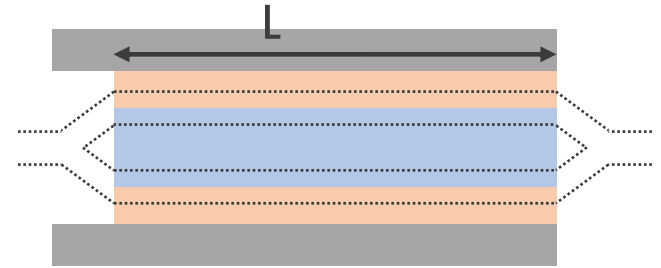
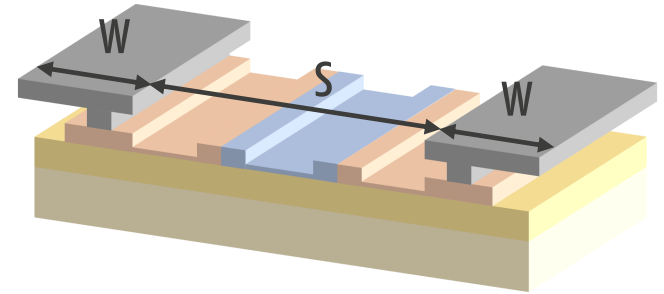


LOPENDE-GOLF MODULATOREN IN SILICIUM FOTONICA

- Uitbreiding naar een volledige MZM:



VERTALING NAAR ONTWERPPARAMETERS



VERTALING NAAR ONTWERPPARAMETERS

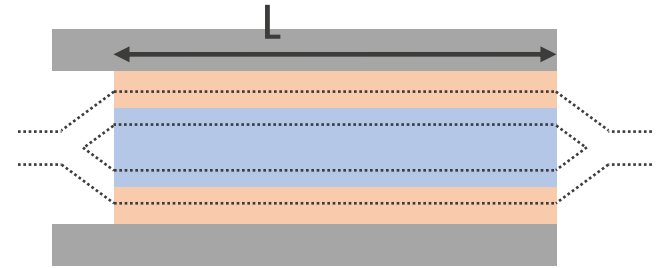
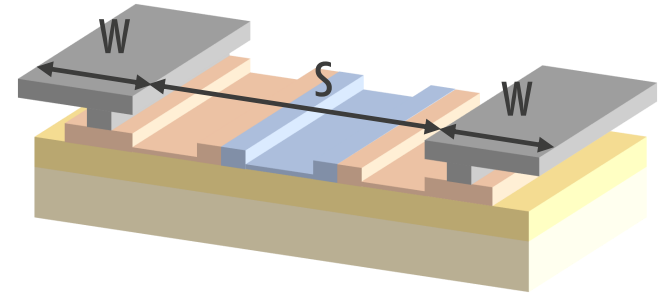
Zandverlies door wind beperken



Minimale verzwakking van elektrisch signaal

Optimale W, S

Minimale L



VERTALING NAAR ONTWERPPARAMETERS

Zandverlies door wind beperken



Minimale verzwakking van elektrisch signaal

Optimale W, S

Minimale L

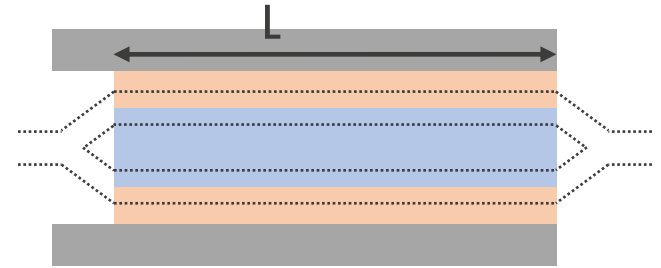
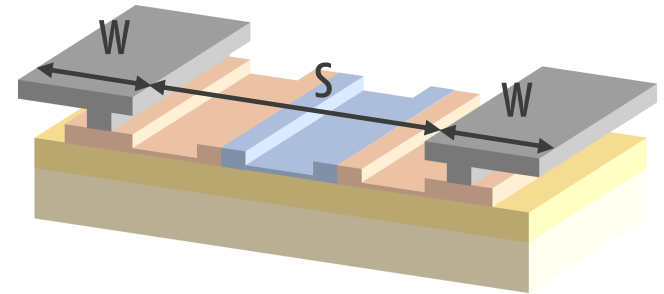
Overladen vereist correcte snelheden



Elektrische & optische snelheid afstemmen

Optimale W, S

Minimale L



VERTALING NAAR ONTWERPPARAMETERS

Zandverlies door wind beperken



Minimale verzwakking van elektrisch signaal

Optimale W, S

Minimale L

Overladen vereist correcte snelheden



Elektrische & optische snelheid afstemmen

Optimale W, S

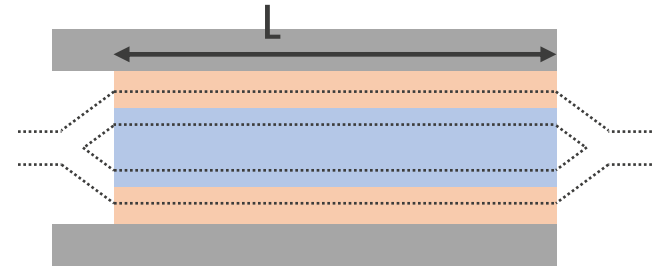
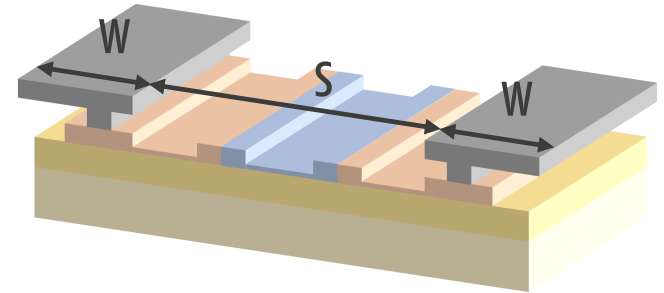
Minimale L

Zandverlies aan overgang beperken



Driver-modulator overgang optimalizeren

Optimale W, S



VERTALING NAAR ONTWERPPARAMETERS

Zandverlies door wind beperken



Minimale verzwakking van elektrisch signaal

Optimale W, S

Minimale L

Overladen vereist correcte snelheden



Elektrische & optische snelheid afstemmen

Optimale W, S

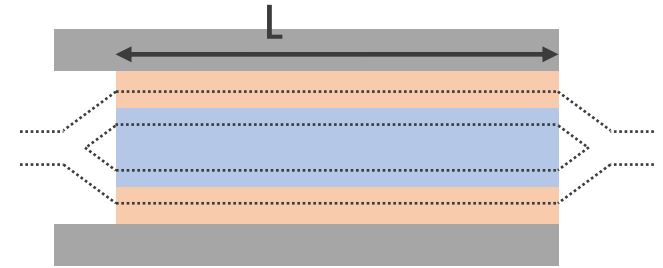
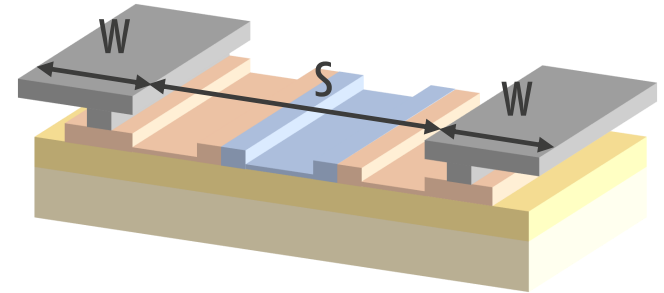
Minimale L

Zandverlies aan overgang beperken



Driver-modulator overgang optimalizeren

Optimale W, S



GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- Minimale L
 - Optimale overdracht van bits
 - Maar minder fase
- } Tegenstrijdige eis in huidig ontwerp

GESEGMENTEERDE MODULATOREN

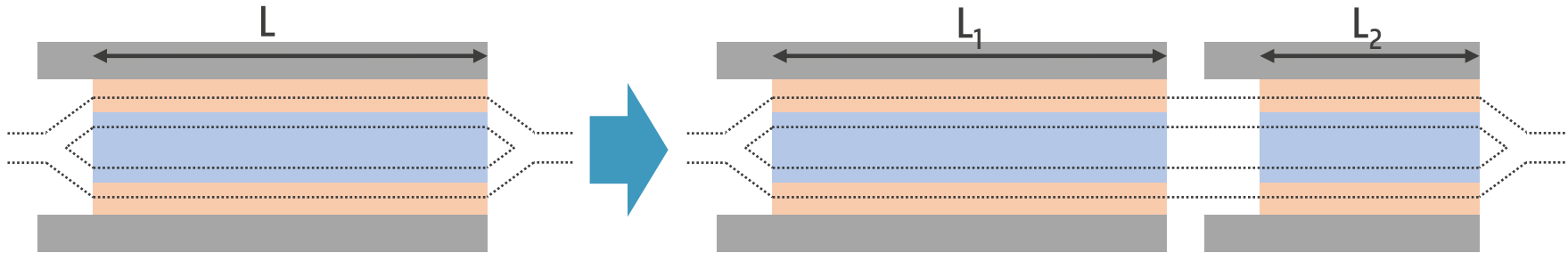
- Minimale L

- Optimale overdracht van bits
- Maar minder fase



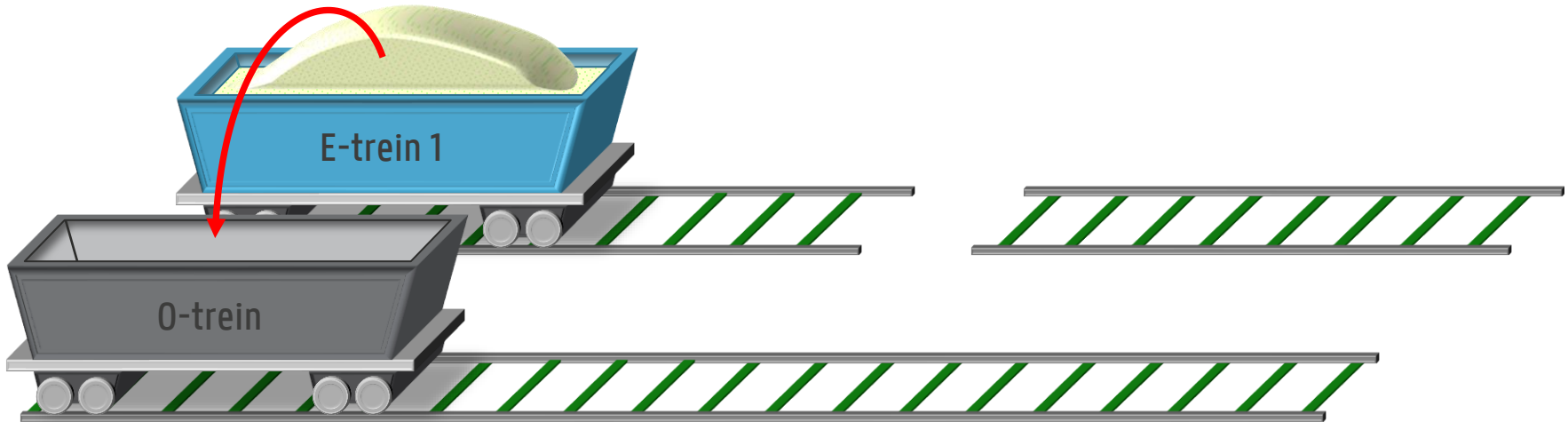
Tegenstrijdige eis in huidig ontwerp

Segmentering: Minder zandverlies én grote ogen



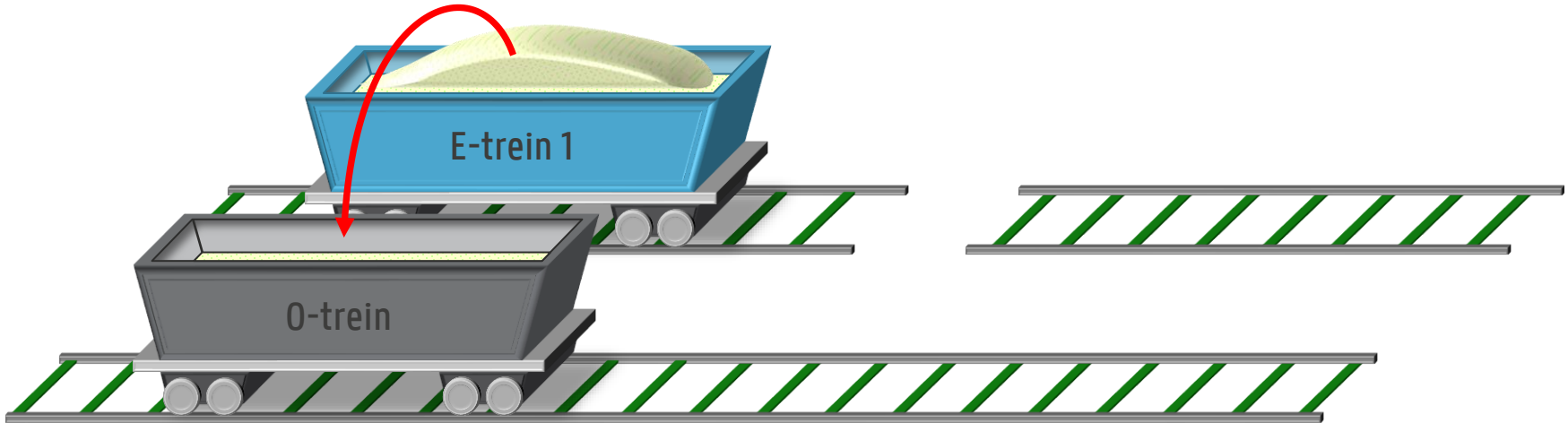
GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- Twee E-treinen op 2 stukken spoor



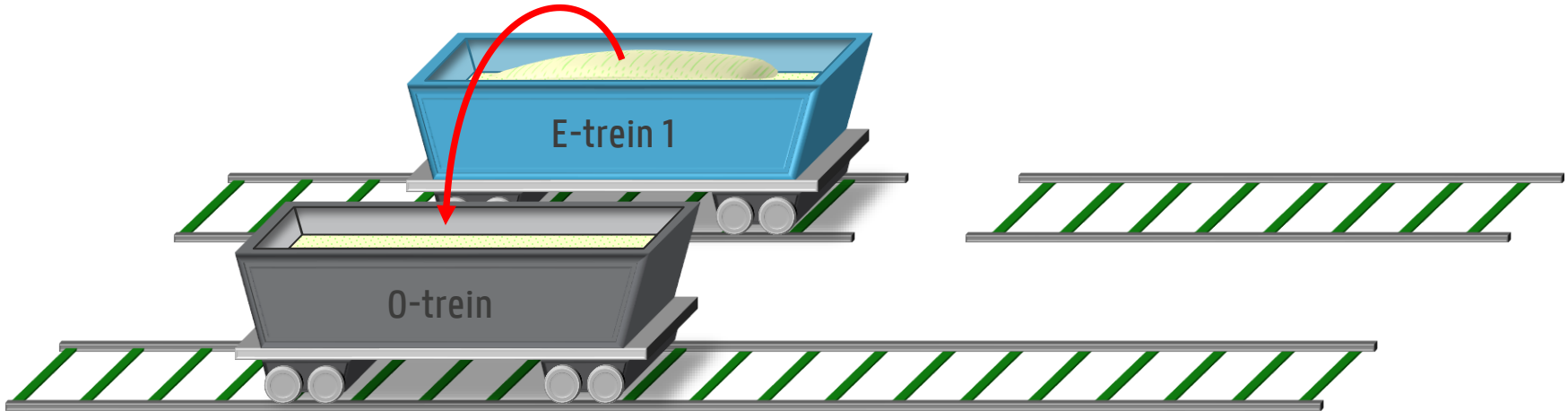
GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- Twee E-treinen op 2 stukken spoor



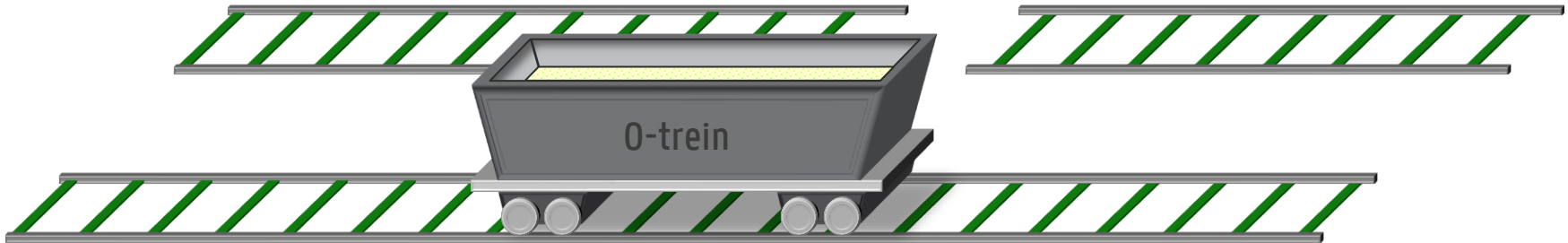
GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- Twee E-treinen op 2 stukken spoor



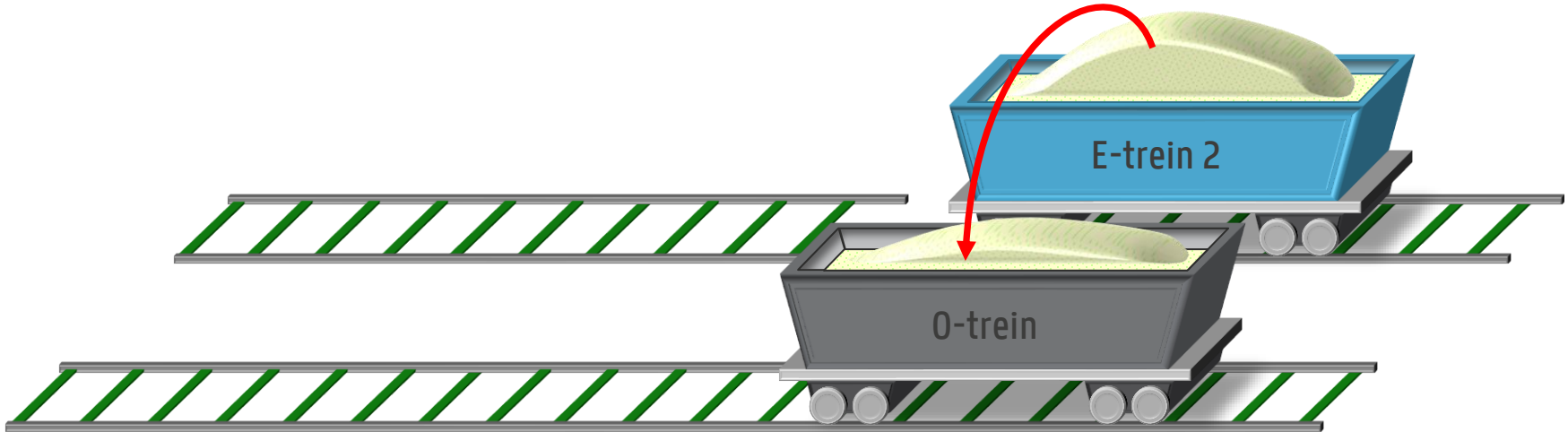
GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- Twee E-treinen op 2 stukken spoor



GESEGMENTEERDE MODULATOREN

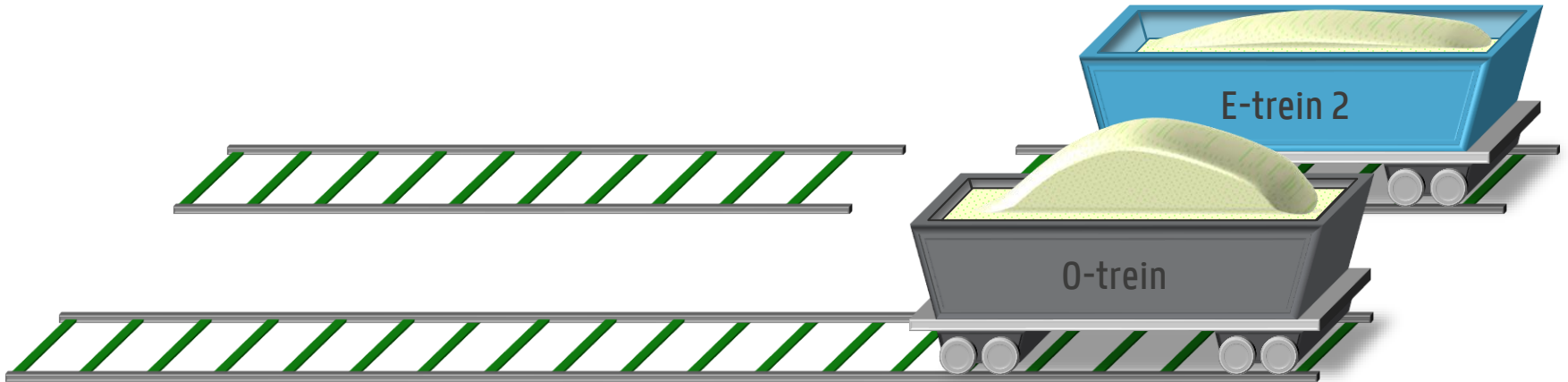
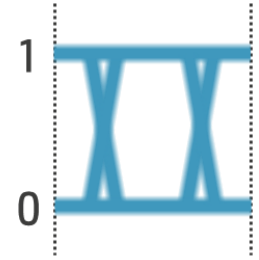
- Twee E-treinen op 2 stukken spoor



GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- Twee E-treinen op 2 stukken spoor

E-treinen ondervinden minder verlies
Grotere ogen

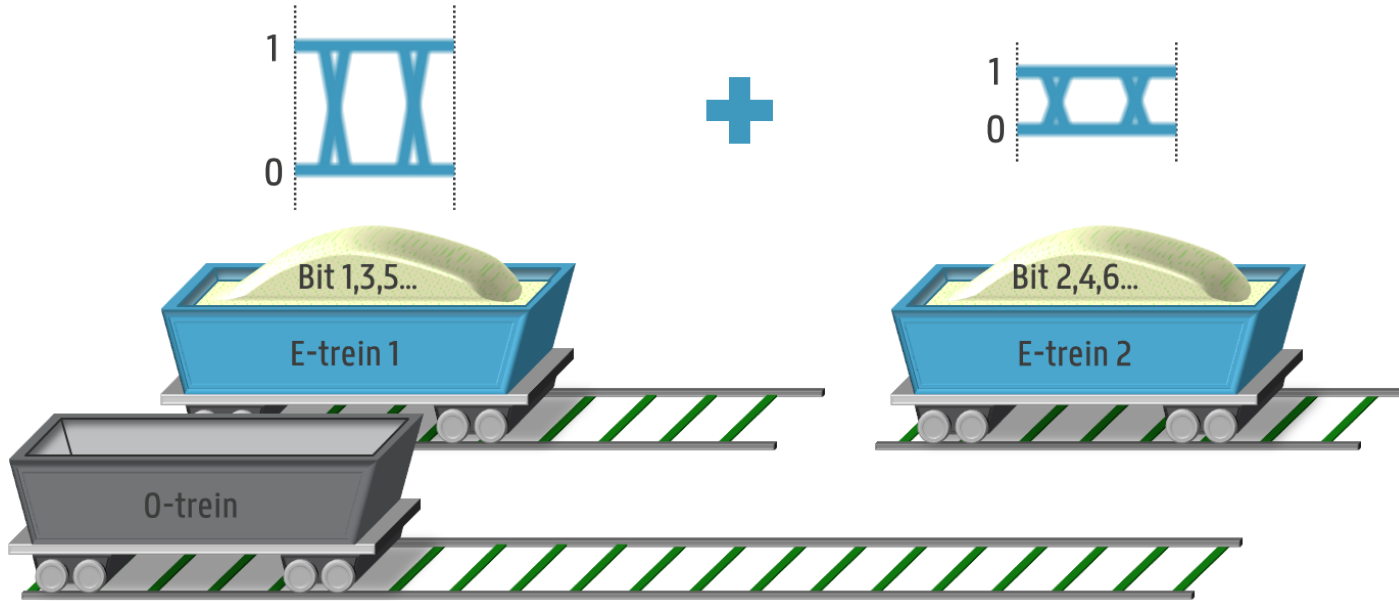


GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- E-treinen kunnen verschillende data dragen
- E-treinsporen mogen andere lengtes hebben

GESEGMENTEERDE MODULATOREN

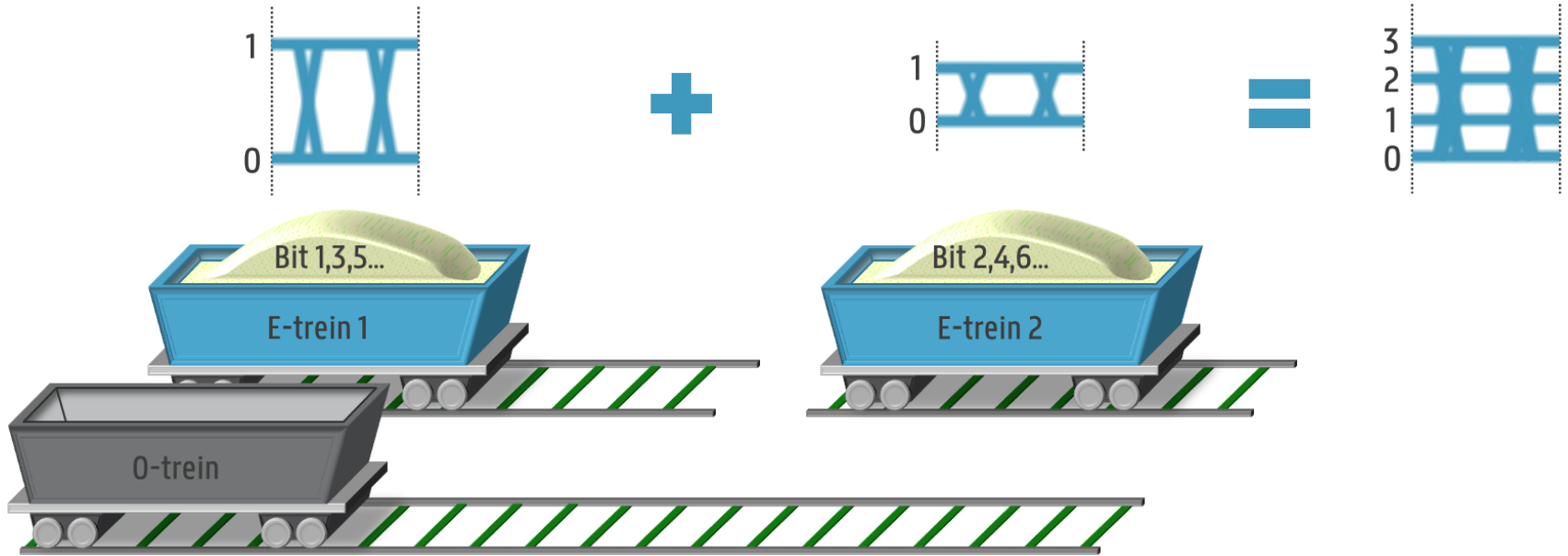
- E-treinen kunnen verschillende data dragen
- E-treinsporen mogen andere lengtes hebben



GESEGMENTEERDE MODULATOREN

- E-treinen kunnen verschillende data dragen
- E-treinsporen mogen andere lengtes hebben

2 keer meer data



IMPLEMENTATIE IN SILICIUM

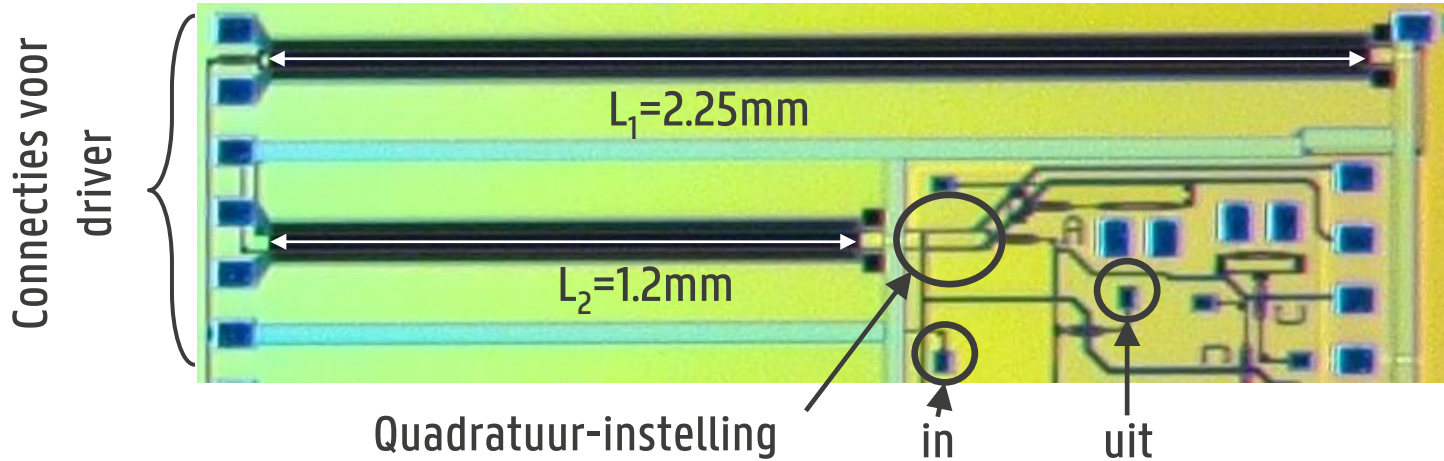
- Optimalizatie van afmetingen $W=10\mu\text{m}$, $S=40\mu\text{m}$
- Optimalizatie van lengtes $L_1=2.25\text{mm}$ $L_2=1.2\text{mm}$



Bepaald via uitgebreide simulaties & berekeningen

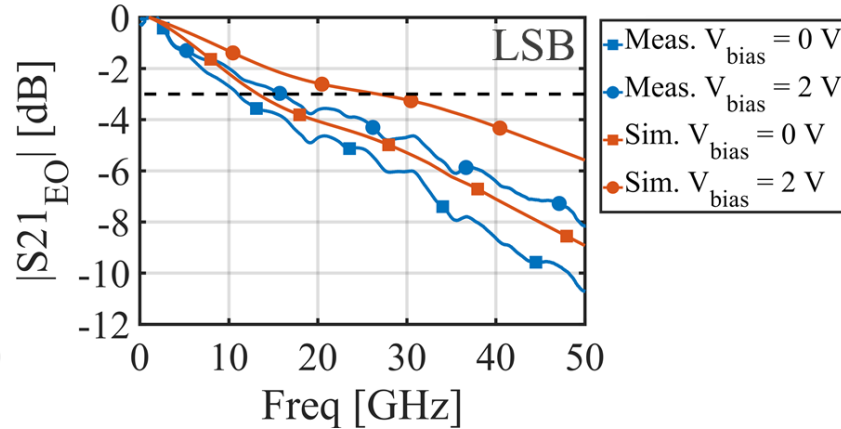
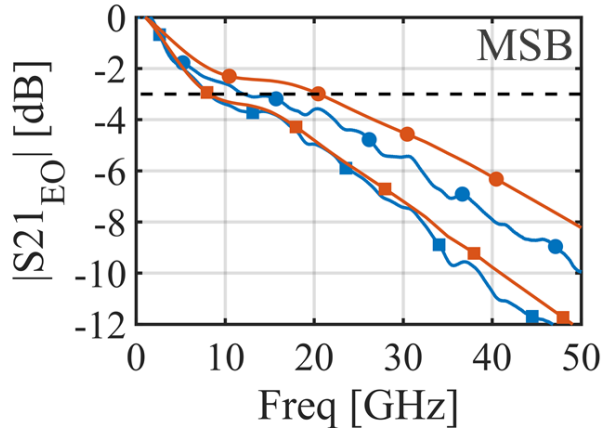
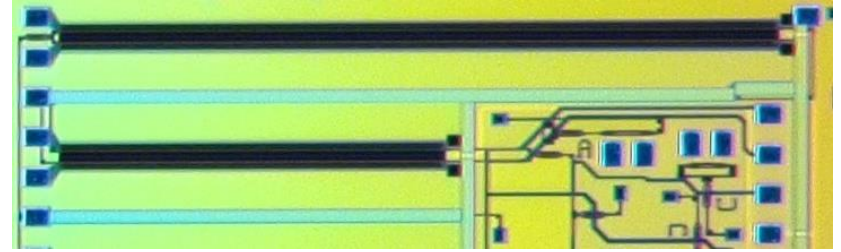
IMPLEMENTATIE IN SILICIUM

- Optimalizatie van afmetingen $W=10\mu\text{m}$, $S=40\mu\text{m}$
 - Optimalizatie van lengtes $L_1=2.25\text{mm}$ $L_2=1.2\text{mm}$
- Bepaald via uitgebreide simulaties & berekeningen



RESULTATEN VAN GEFABRICEERDE MODULATOREN

- MSB: $V_{\pi} = 9.8 \text{ V}$, IL= 2.7 dB
- LSB: $V_{\pi} = 18.4 \text{ V}$, IL= 2.0 dB
- Total: $V_{\pi} = 6.4 \text{ V}$, IL= 5.8 dB



Internet, datacenters en optische verbindingen

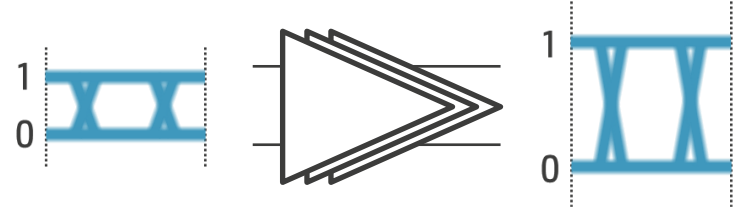
Gesegmenteerde modulatoren

Niet-Lineaire Drivers

Egalisatie in modulatoren

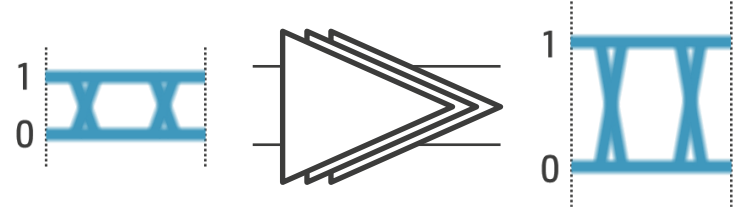
DRIVER VOOR GESEGMENTEERDE MODULATOR

- Versterken van signaal voor modulator
 - Hoge snelheid
 - Hoge zwaai
 - Laag energieverbruik
- } Tegenstrijdige eisen



DRIVER VOOR GESEGMENTEERDE MODULATOR

- Versterken van signaal voor modulator
 - Hoge snelheid
 - Hoge zwaai
 - Laag energieverbruik
- Tegenstrijdige eisen

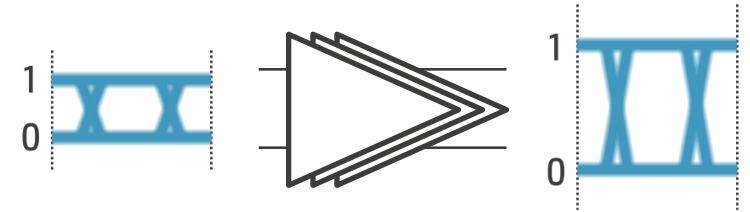


Audio buis-versterker

Versterking zonder vervorming

DRIVER VOOR GESEGMENTEERDE MODULATOR

- Versterken van signaal voor modulator
 - Hoge snelheid
 - Hoge zwaai
 - Laag energieverbruik
- Tegenstrijdige eisen



Audio buis-versterker

~~Versterking zonder vervorming~~

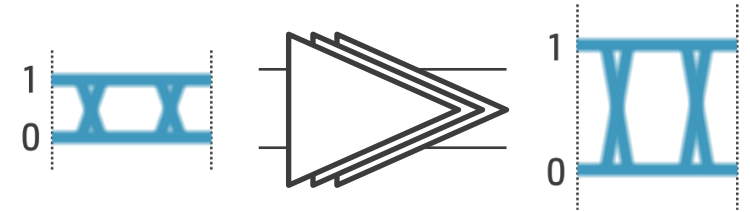
↓

Niet-lineaire versterker
Energieverbruik ↘

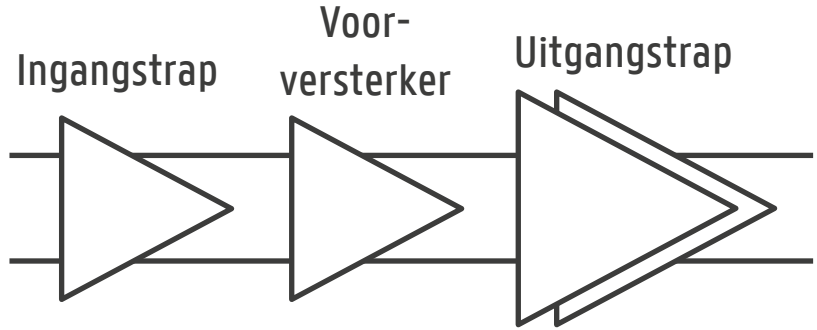
DRIVER VOOR GESEGMENTEERDE MODULATOR

- Versterken van signaal voor modulator
 - Hoge snelheid
 - Hoge zwaai
 - Laag energieverbruik

} Tegenstrijdige eisen



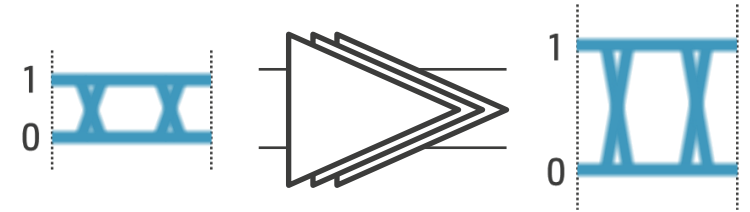
- Architectuur:



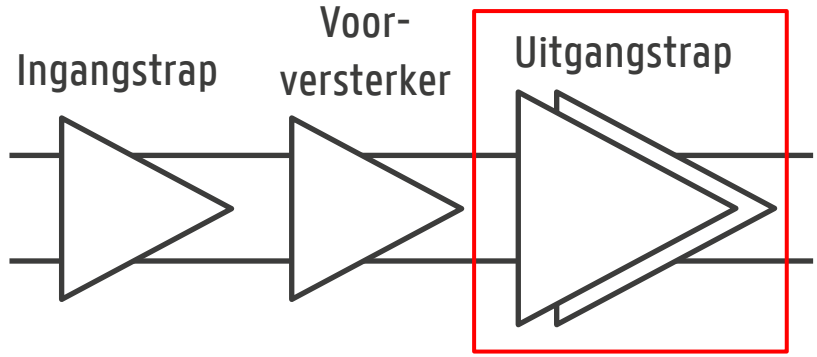
DRIVER VOOR GESEGMENTEERDE MODULATOR

- Versterken van signaal voor modulator
 - Hoge snelheid
 - Hoge zwaai
 - Laag energieverbruik

} Tegenstrijdige eisen

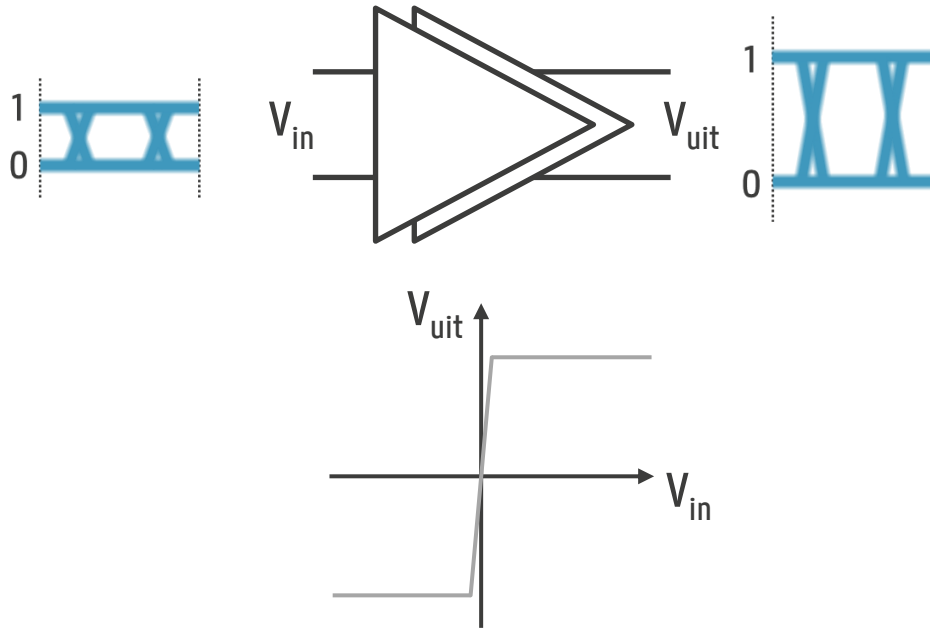


- Architectuur:



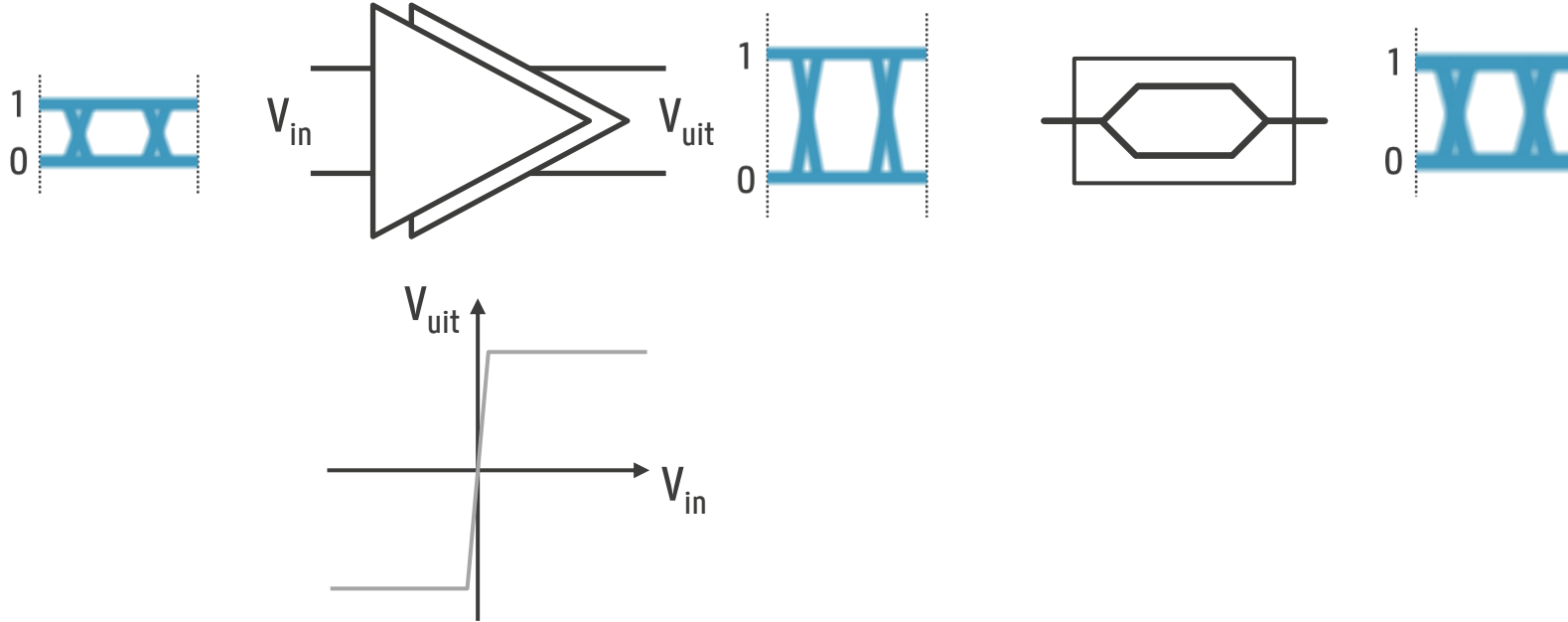
ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Ingangs-uitgangskarakteristiek uitgangstrap



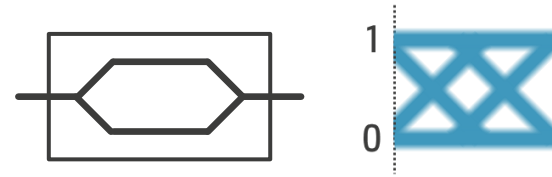
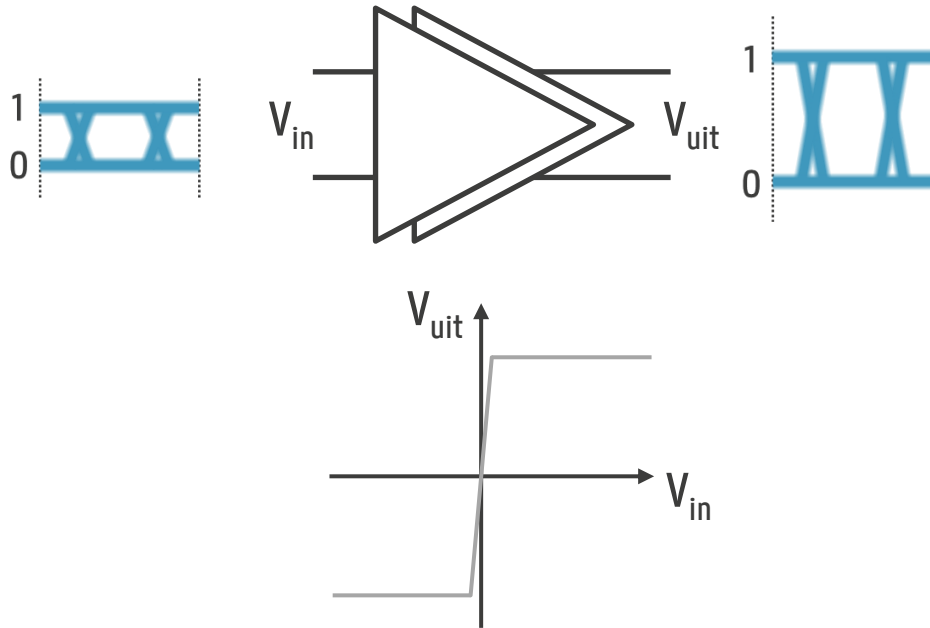
ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Ingangs-uitgangskarakteristiek uitgangstrap



ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

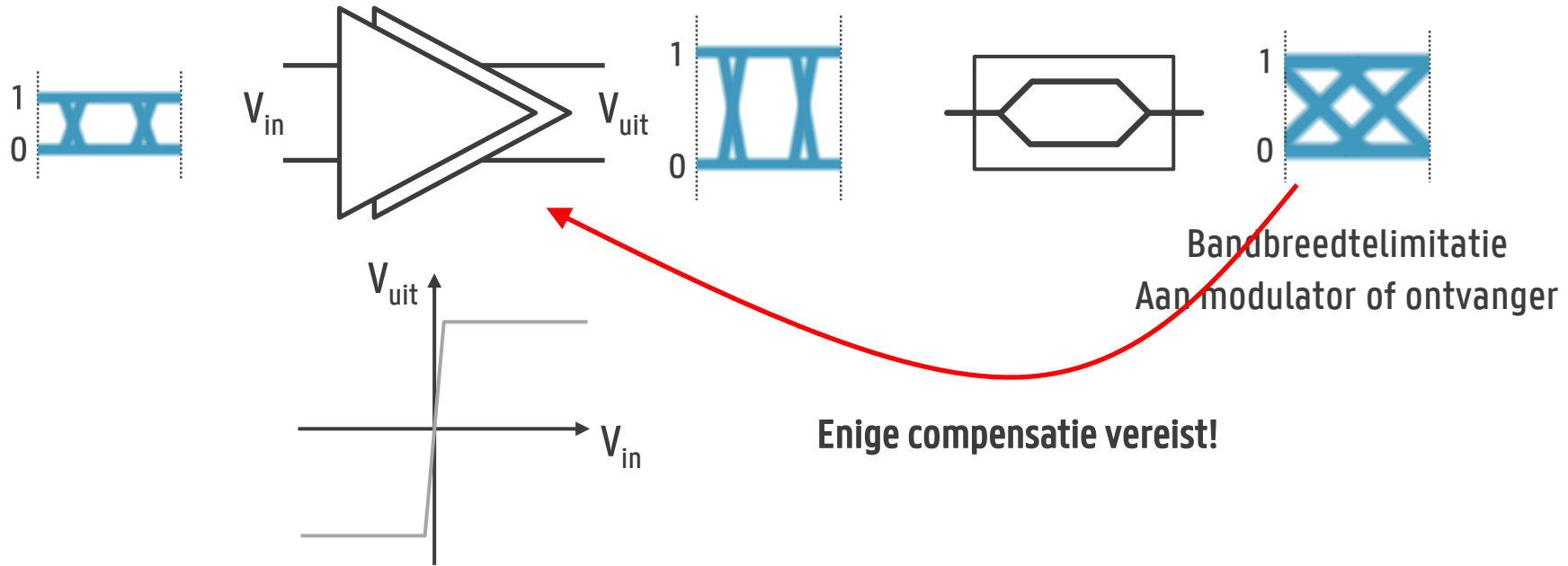
- Ingangs-uitgangskarakteristiek uitgangstrap



Bandbreedtelimitatie
Aan modulator of ontvanger

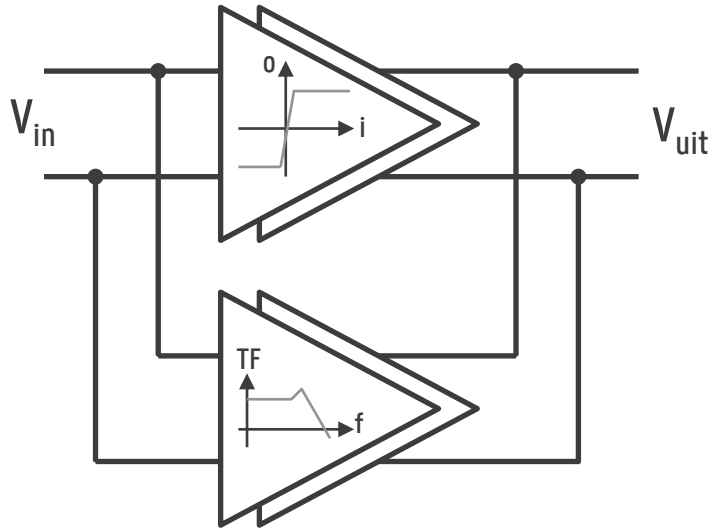
ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Ingangs-uitgangskarakteristiek uitgangstrap



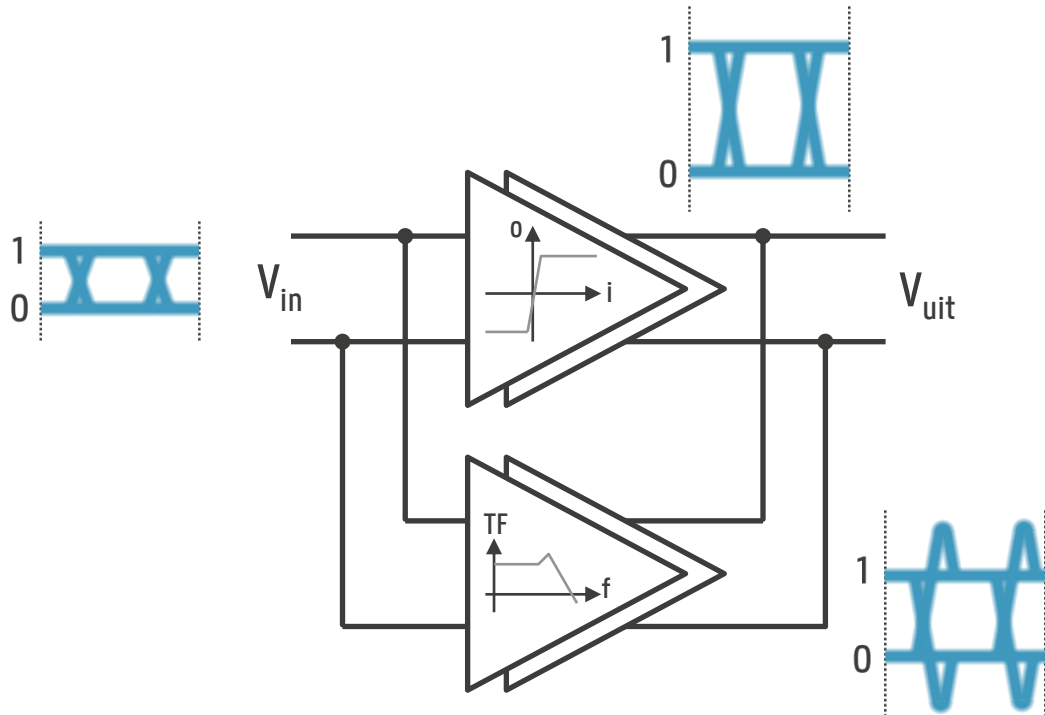
ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Uitgangstrap splitsen: hoge zwaai/benadrukte flank



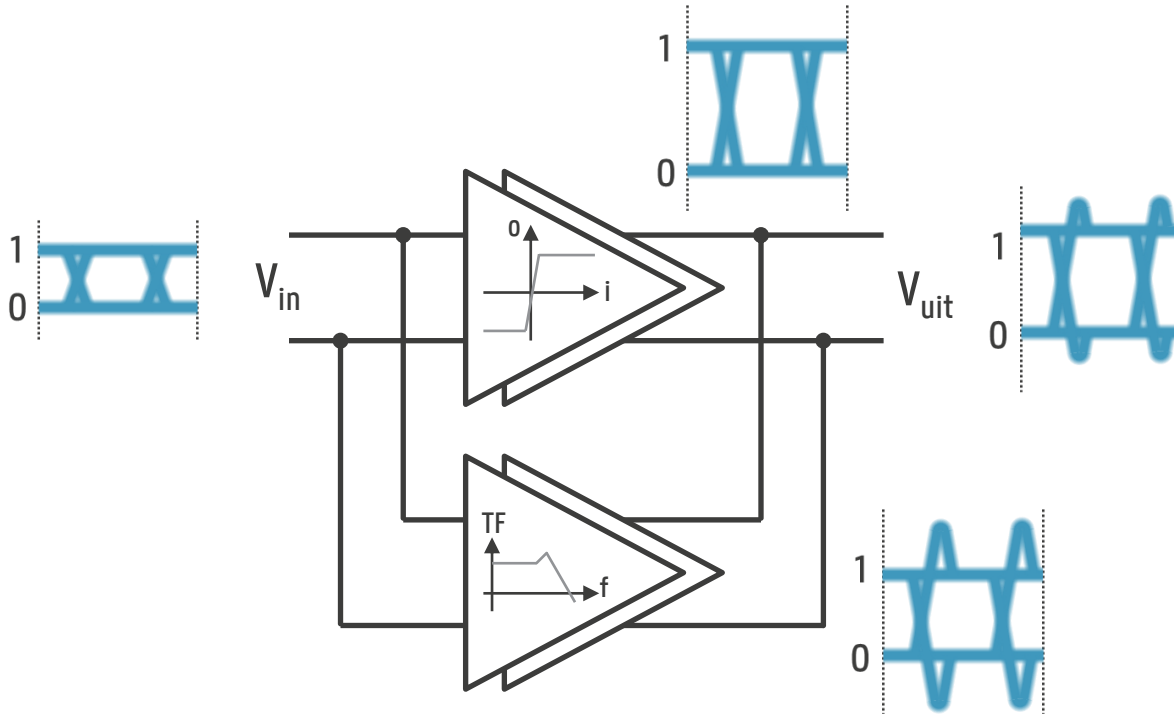
ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Uitgangstrap splitsen: hoge zwaai/benadrukte flank



ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Uitgangstrap splitsen: hoge zwaai/benadrukte flank



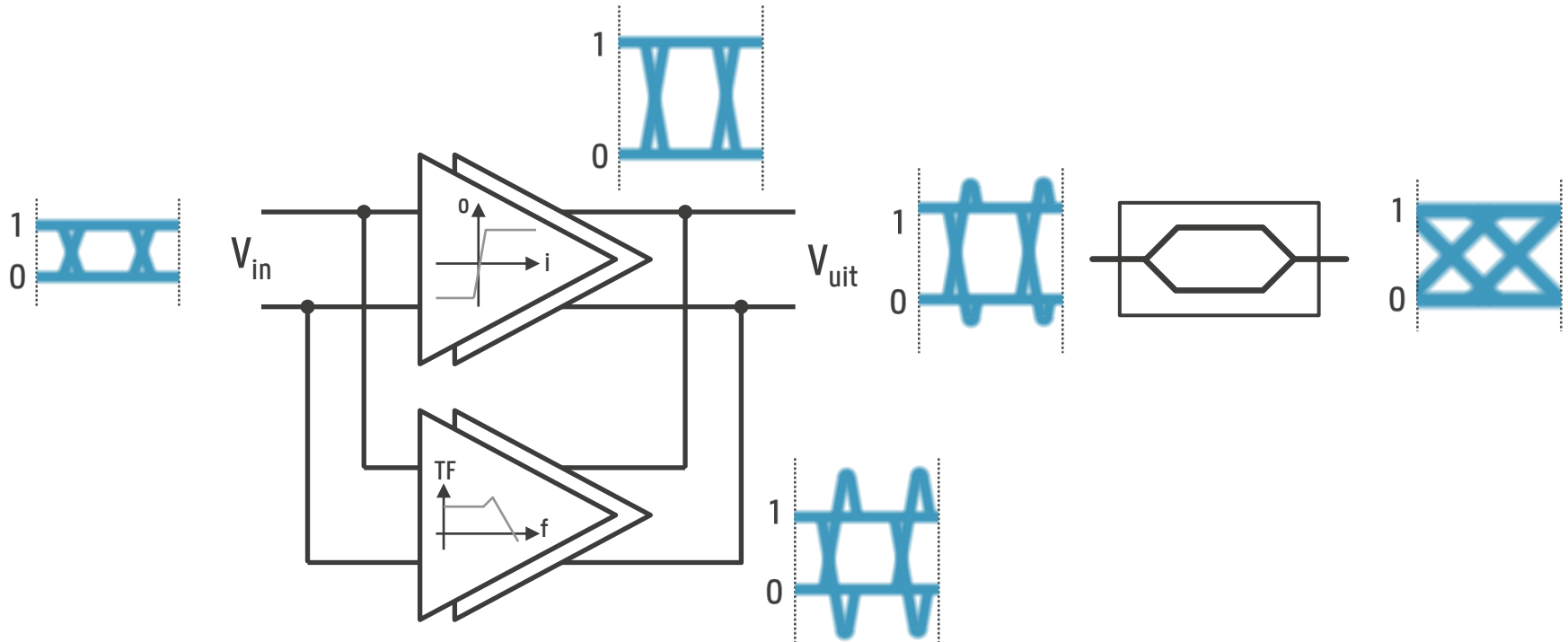
Relatieve bijdrage
aparte trappen regelbaar



Regelbare peaking

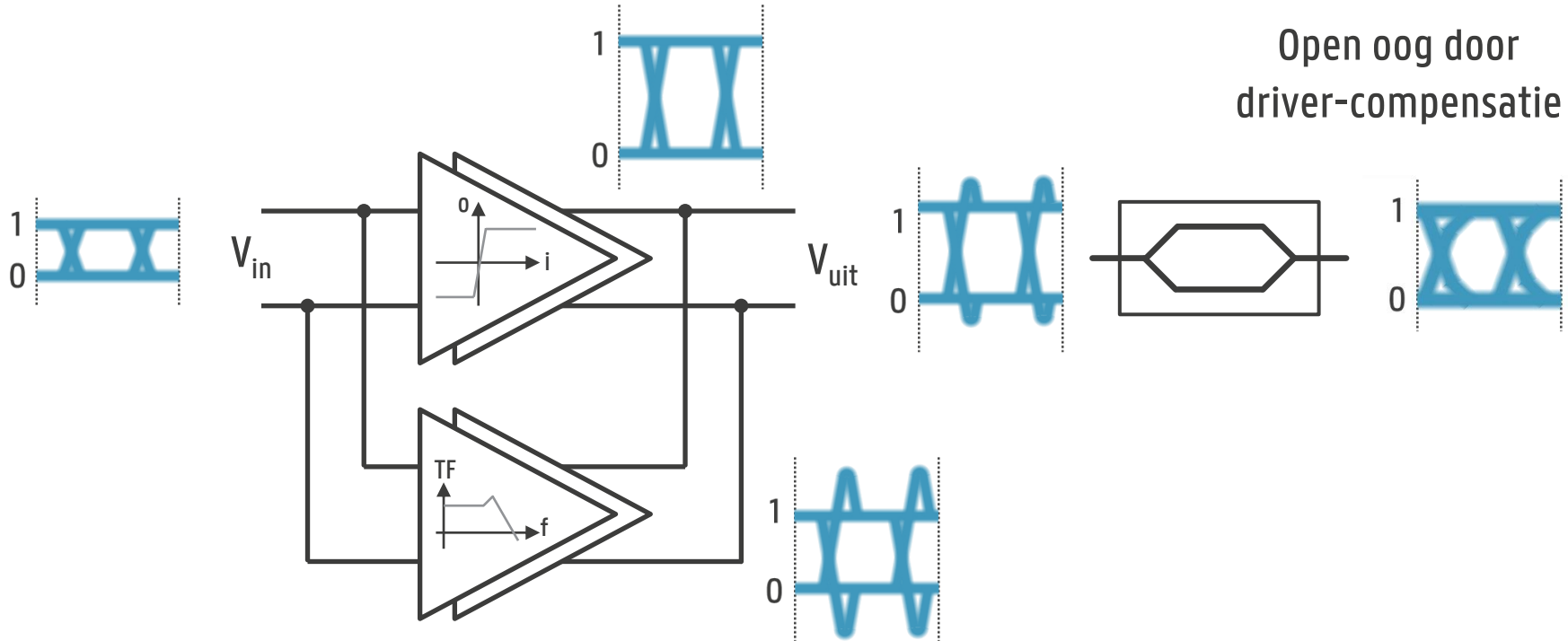
ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

- Uitgangstrap splitsen: hoge zwaai/benadrukte flank

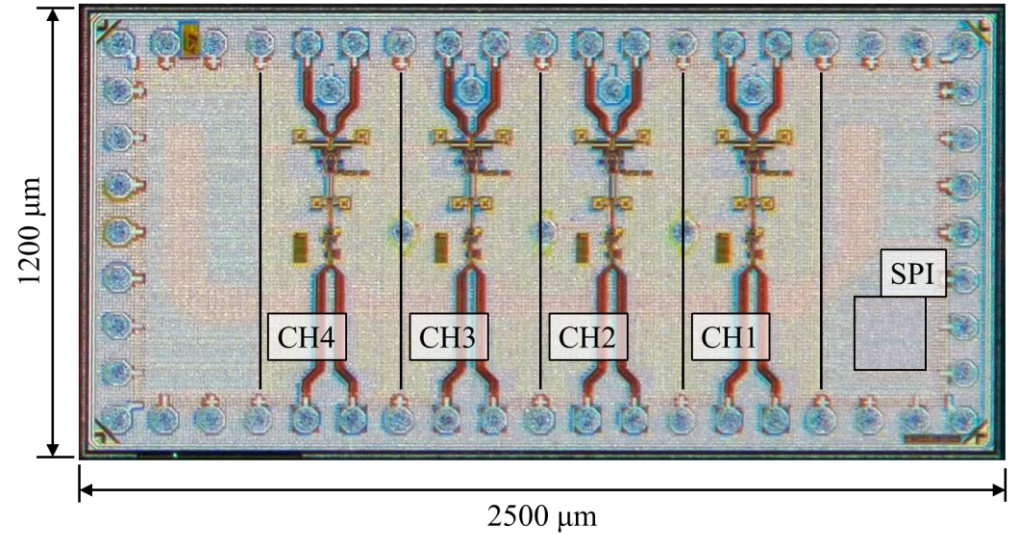
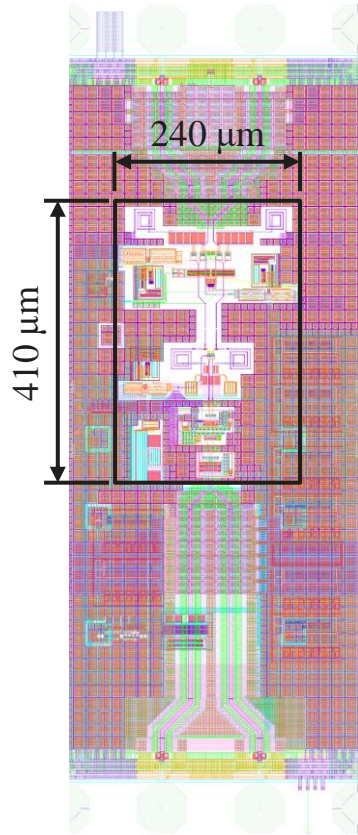


ONTWERP VAN DE UITGANGSTRAP

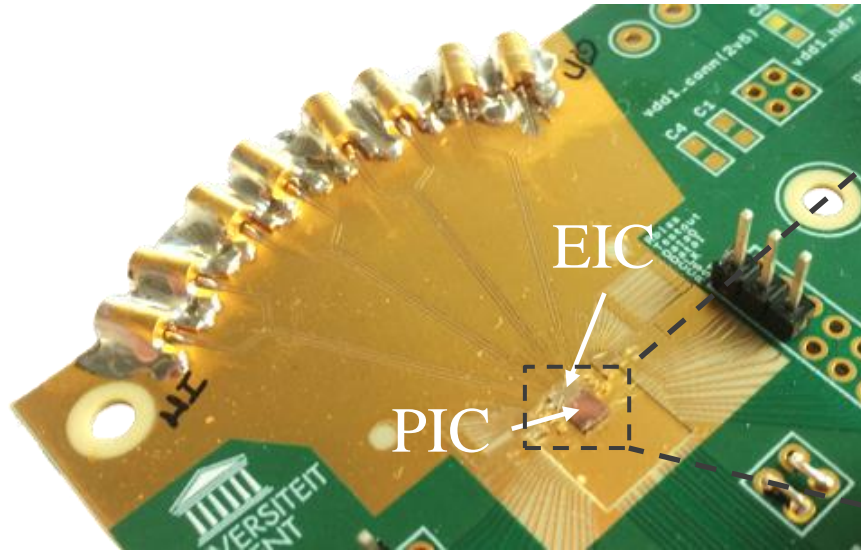
- Uitgangstrap splitsen: hoge zwaai/benadrukte flank



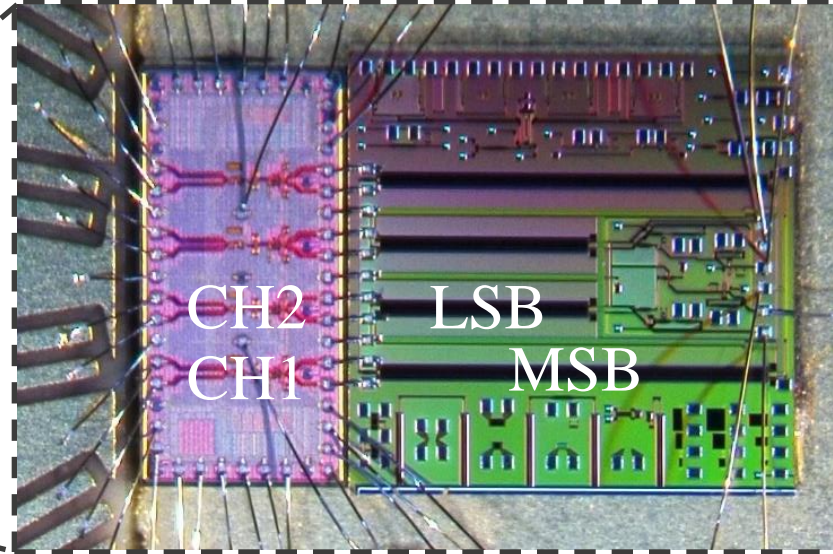
IMPLEMENTATIE VAN DE DRIVER



DRIVER EN MODULATOR GEÏNTEGREERD

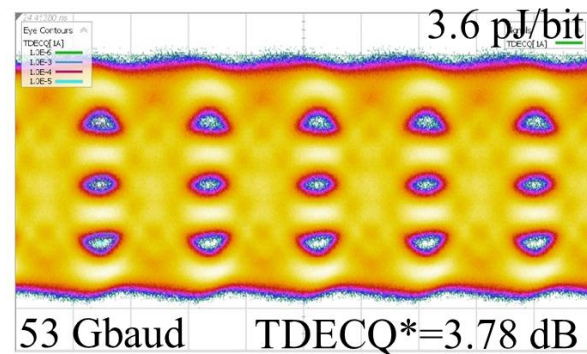
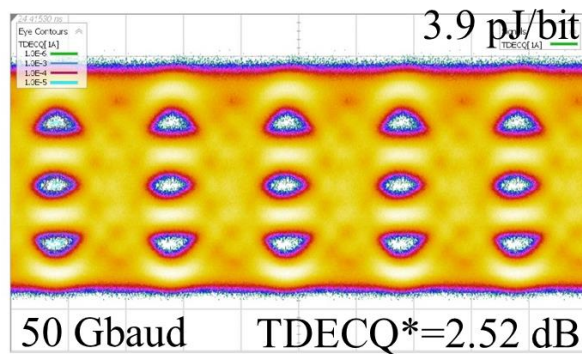
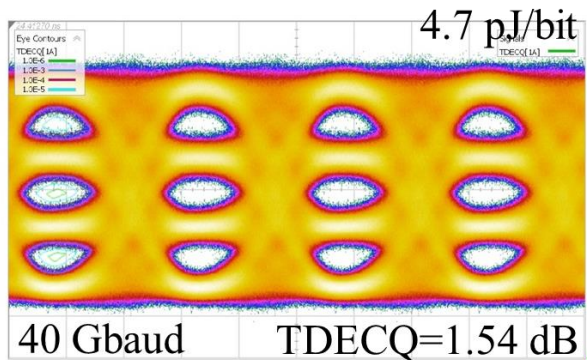
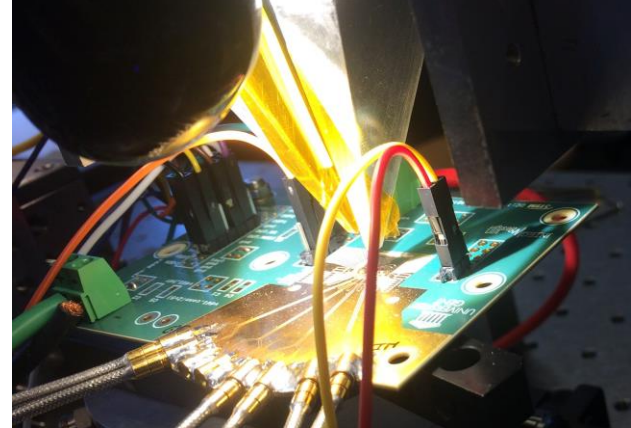


2.5x3.8 mm



GEMETEN OOGDIAGRAMMEN

- Beide segment aangestuurd met binaire data
- Ogen gemeten na een snelle fotodiode





Segmentering van
lopende-golf modulator

Zorgvuldig modulator &
driver ontwerp

Vermogens-efficiënte PAM4
generatie aan hoge snelheden



Internet, datacenters en optische verbindingen

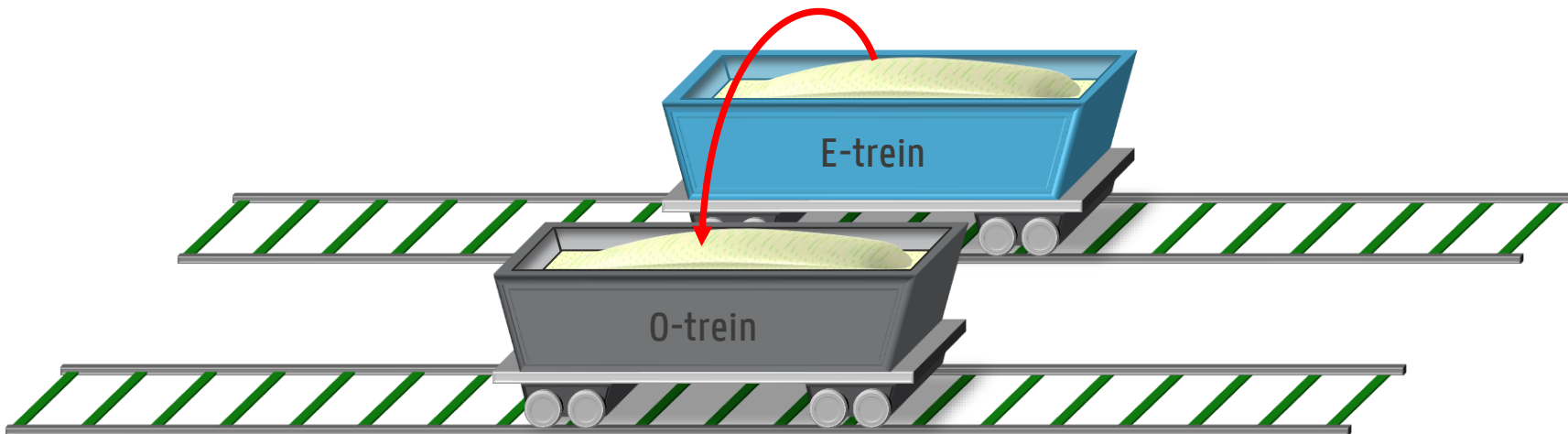
Gesegmenteerde modulatoren

Niet-Lineaire Drivers

Egalisatie in modulatoren

WAT ALS?

- Modulatoren nóg sneller moeten?



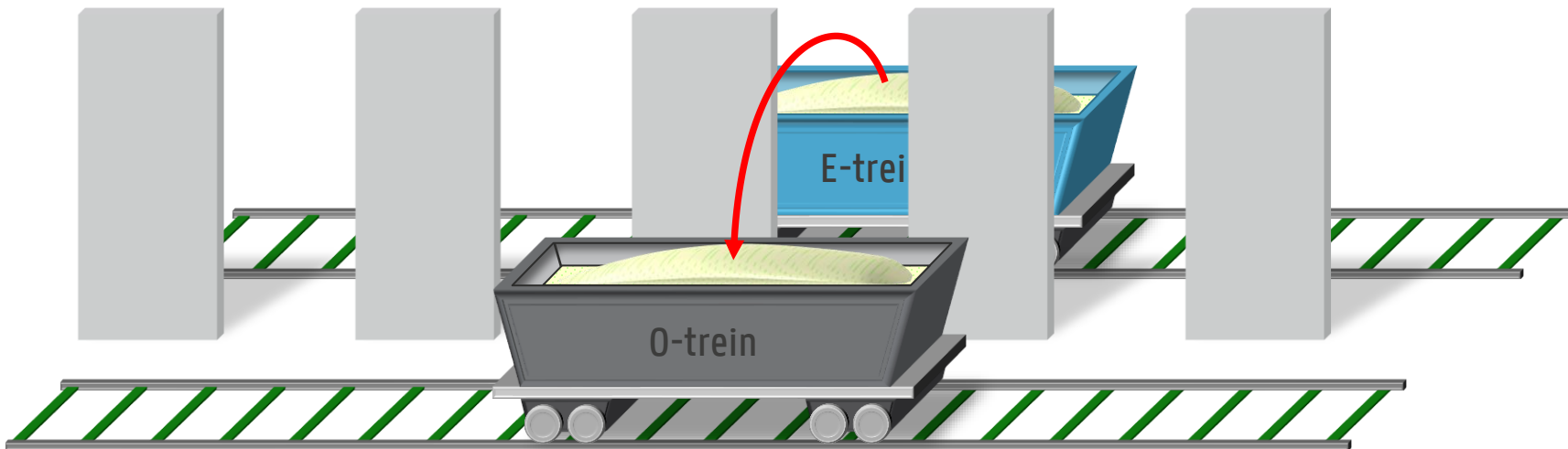
Sneller zand overladen



Meer zandverlies

WAT ALS?

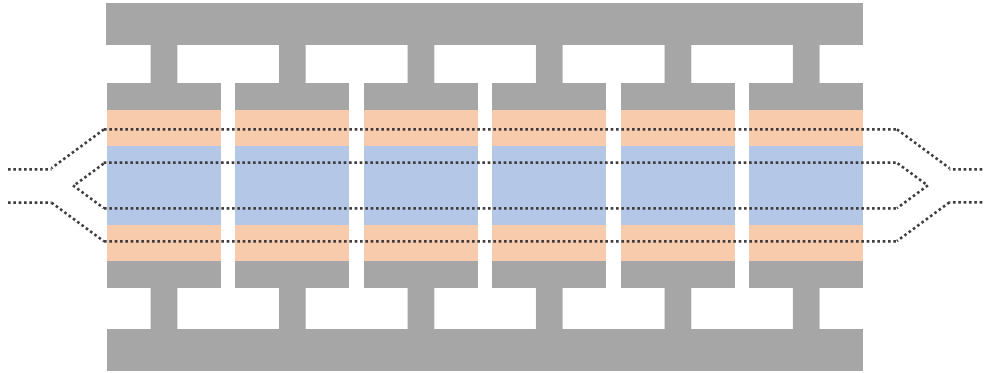
- Modulatoren nóg sneller moeten?



Muren beperken zandverlies: hogere snelheden mogelijk

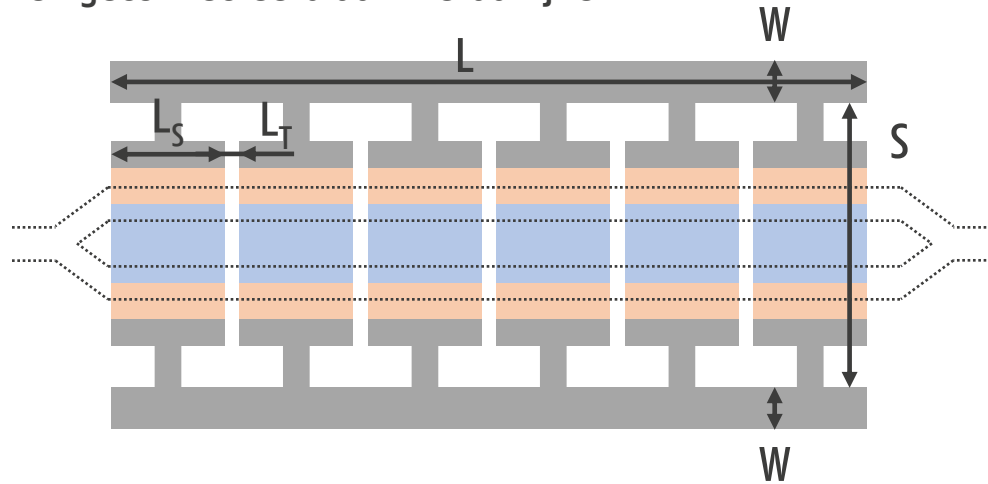
SEGMENTERING, MAAR ANDERS

- Meerdere segmenten geconnecteerd aan metaallijnen



SEGMENTERING, MAAR ANDERS

- Meerdere segmenten geconnecteerd aan metaallijnen



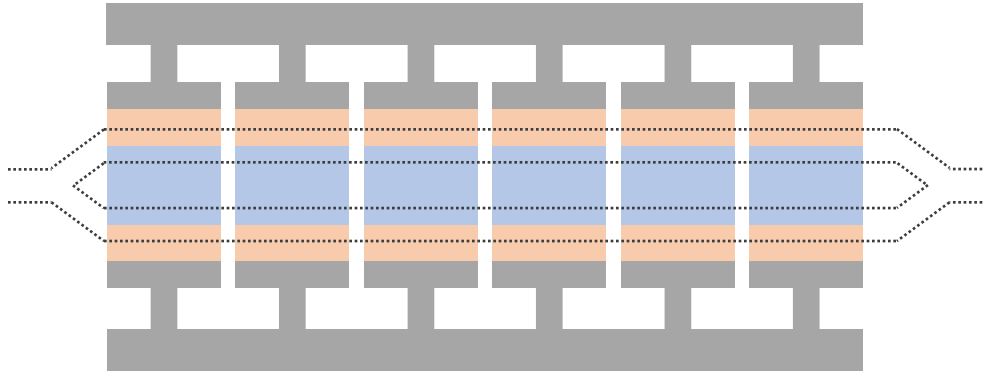
Originele parameters:
 W, S, L



Nieuwe parameters:
 W, S, L, L_S, L_T

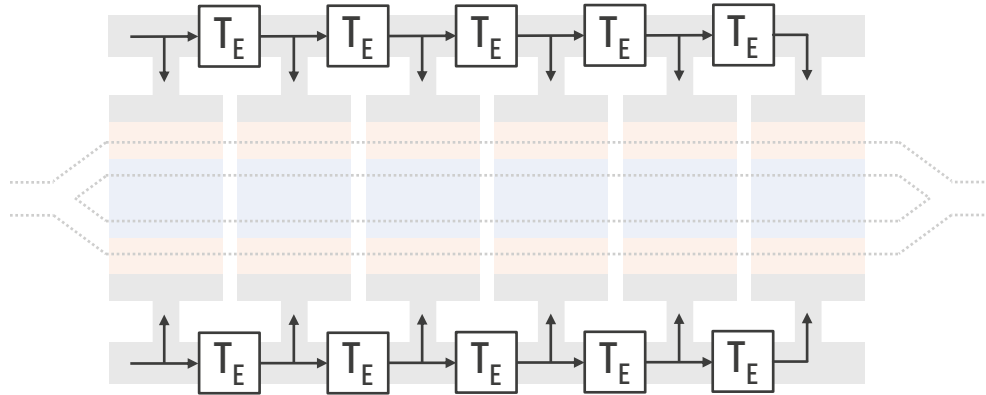
SEGMENTERING, MAAR ANDERS

- Meer ontwerpvrijheid vereist doordachte ontwerpaanpak
 - Met gerichte vereenvoudigingen



SEGMENTERING, MAAR ANDERS

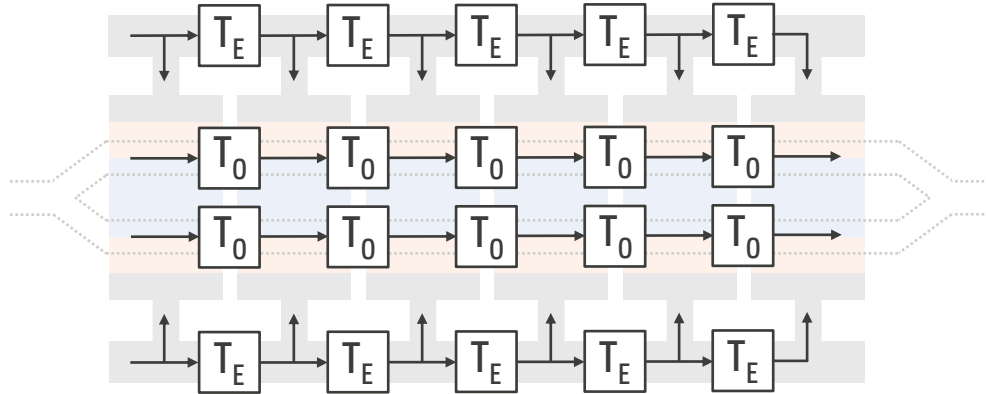
- Meer ontwerpvrijheid vereist doordachte ontwerpaanpak
 - Met gerichte vereenvoudigingen



Elektrische verbindingen = vertraging

SEGMENTERING, MAAR ANDERS

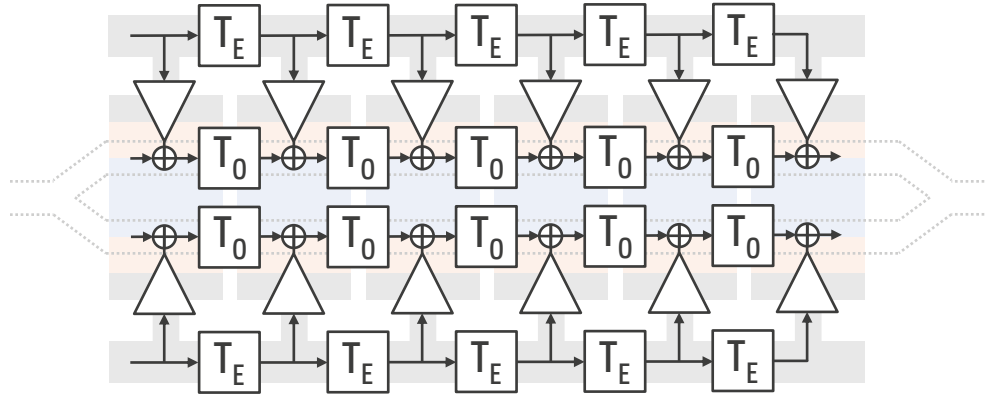
- Meer ontwerpvrijheid vereist doordachte ontwerpaanpak
 - Met gerichte vereenvoudigingen



Optische verbindingen = vertraging

SEGMENTERING, MAAR ANDERS

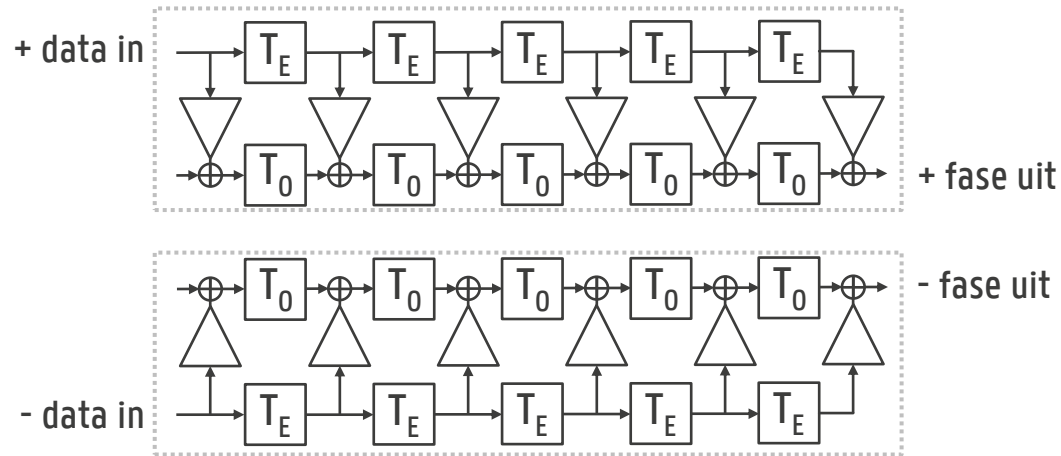
- Meer ontwerpvrijheid vereist doordachte ontwerpaanpak
 - Met gerichte vereenvoudigingen



Segmenten als vertaalstap

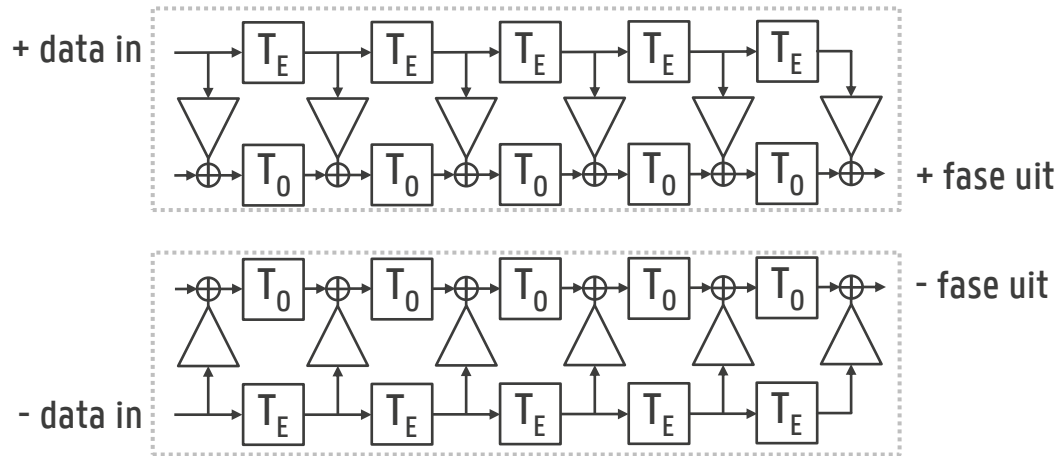
SEGMENTERING, MAAR ANDERS

- Meer ontwerpvrijheid vereist doordachte ontwerpaanpak
 - Met gerichte vereenvoudigingen



SEGMENTERING, MAAR ANDERS

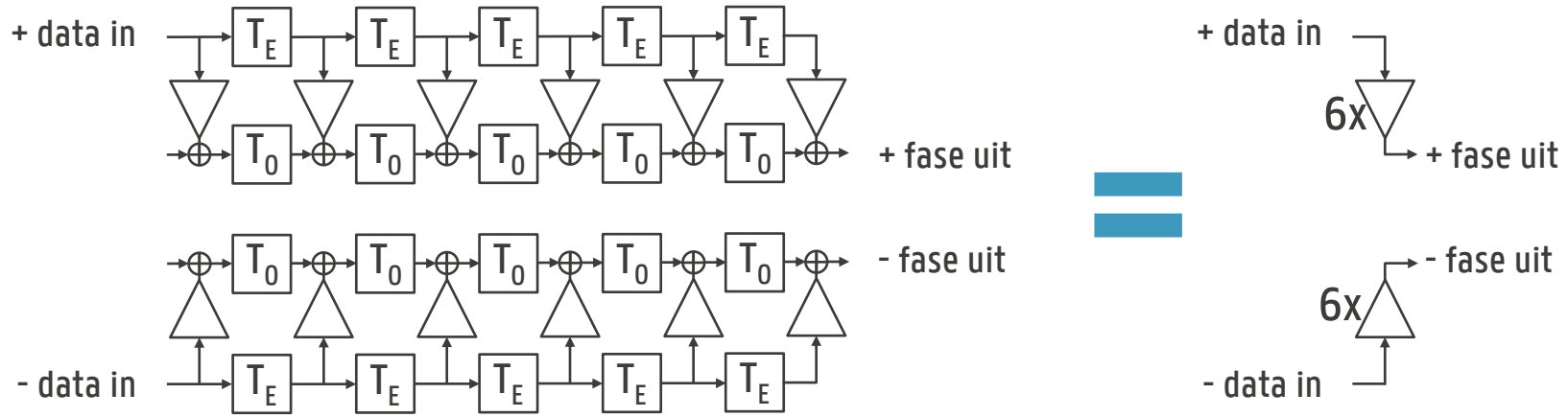
- Meer ontwerpvrijheid vereist doordachte ontwerpaanpak
 - Met gerichte vereenvoudigingen



2 digitale filters!
=basisblokken van een link

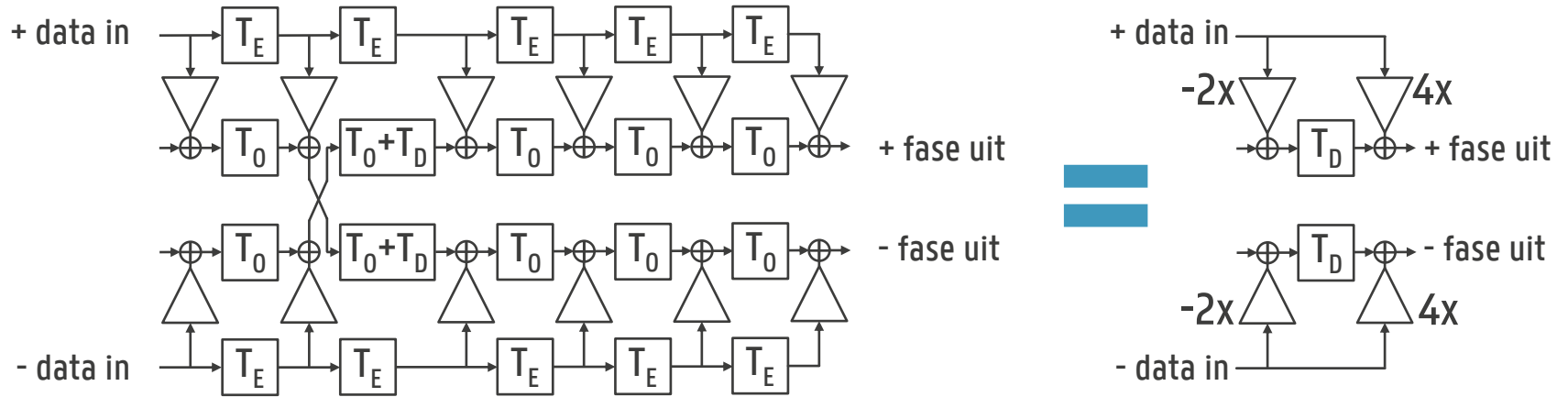
EGALISATIE IN MODULATOREN

- In een normaal ontwerp: $T_E = T_0$



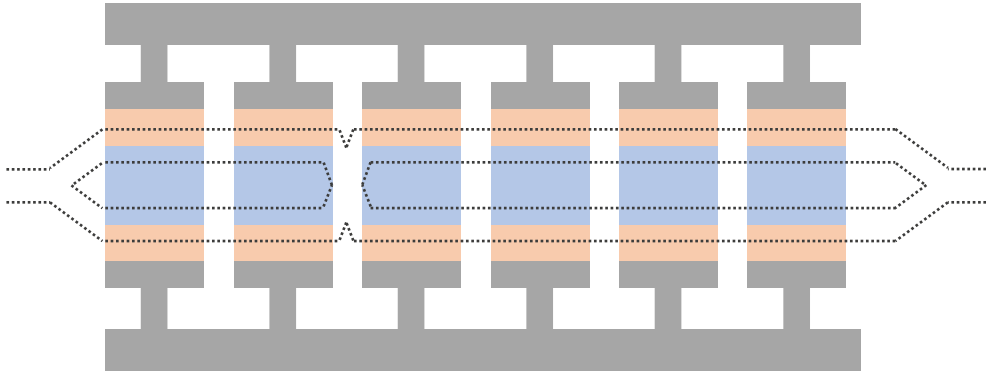
EGALISATIE IN MODULATOREN

- Gericht aanpassen van optische verbindingen ($T_E = T_0$)



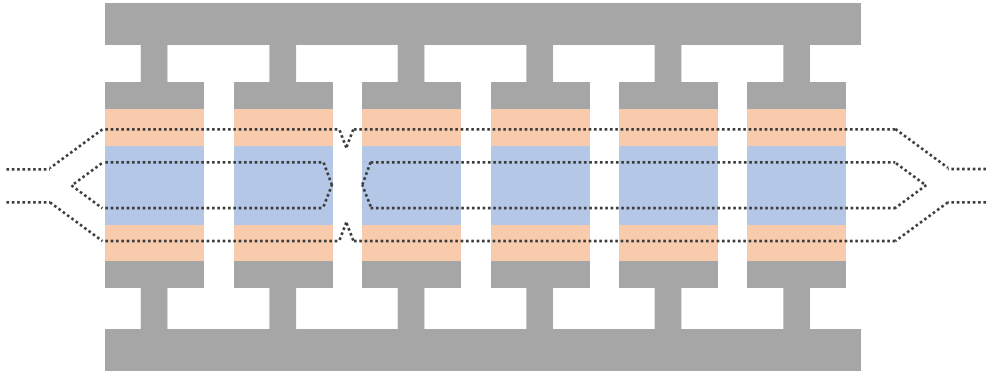
EGALISATIE IN MODULATOREN

- Gericht aanpassen van optische verbindingen
 - 0-treinen kruisen

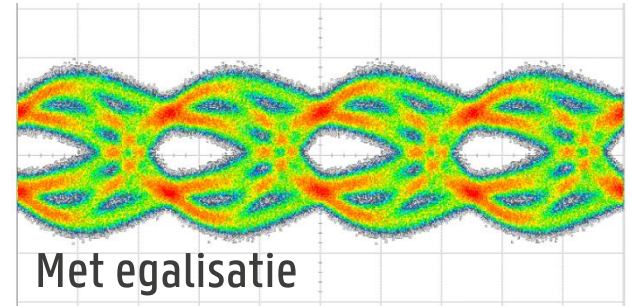
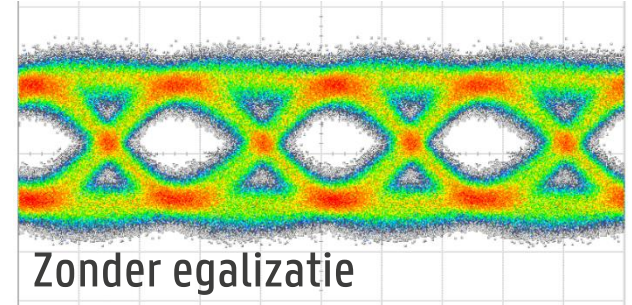


EGALISATIE IN MODULATOREN

- Gericht aanpassen van optische verbindingen
 - O-treinen kruisen

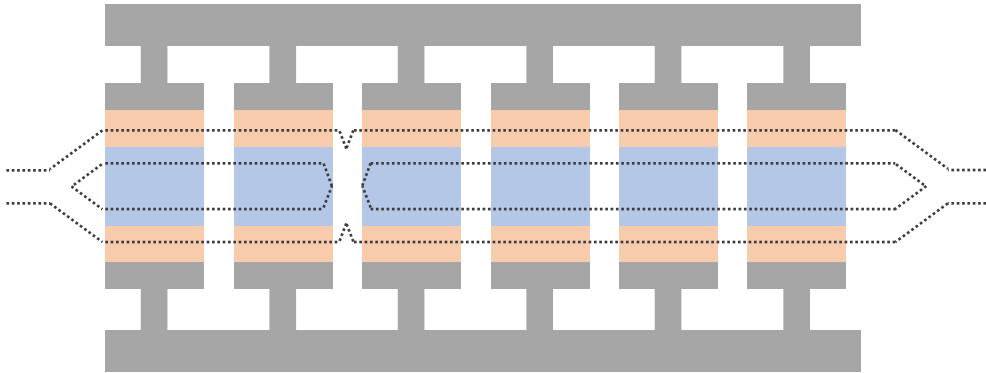


Ogen van geïmplementeerde MZM
(10 segmenten)

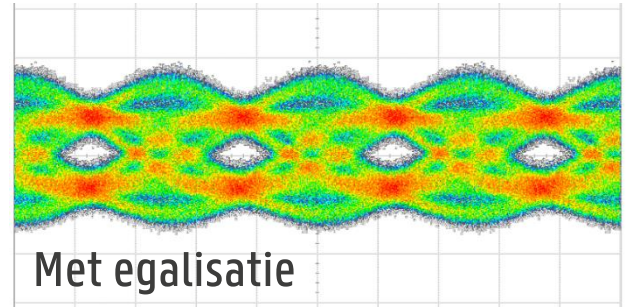
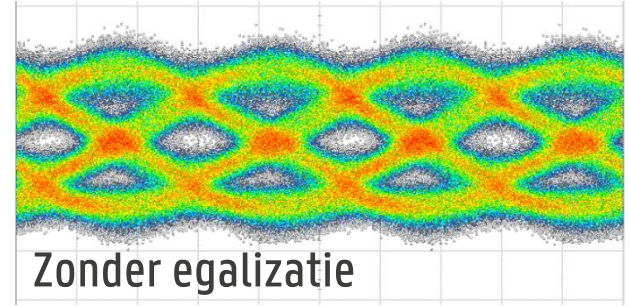


EGALISATIE IN MODULATOREN

- Gericht aanpassen van optische verbindingen
 - 0-treinen kruisen



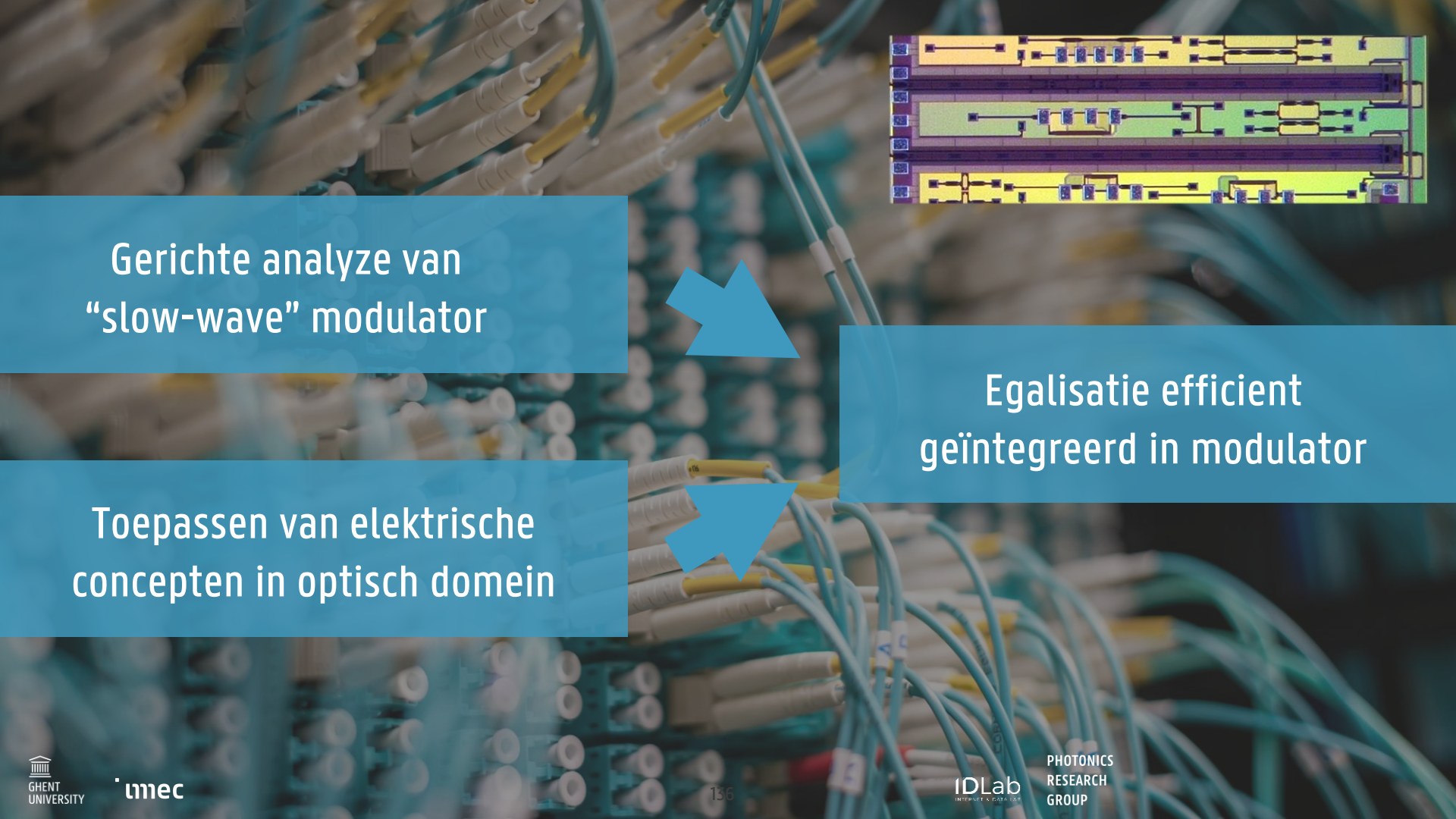
Ogen van geïmplementeerde MZM
Na bandbreedtebeperking



Egalisatie in modulator



Plaats- & energie-efficiënte
snellere modulatoren



Gerichte analyse van
“slow-wave” modulator

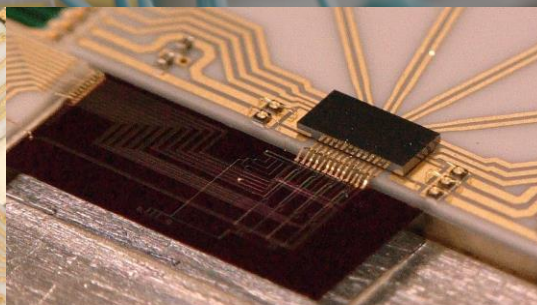
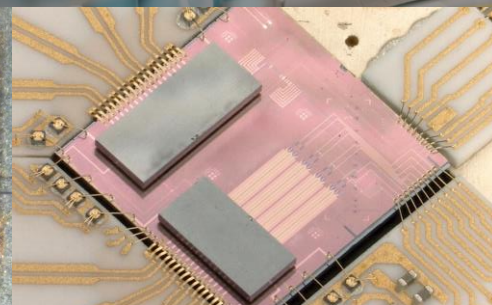
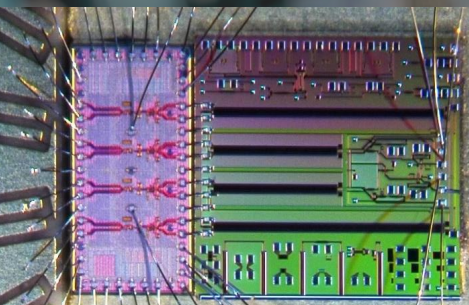
Toepassen van elektrische
concepten in optisch domein

Egalisatie efficient
geïntegreerd in modulator

Zorvuldig elektro-optisch
co-ontwerp

Vermogens-efficiënte PAM4
generatie aan hoge snelheden

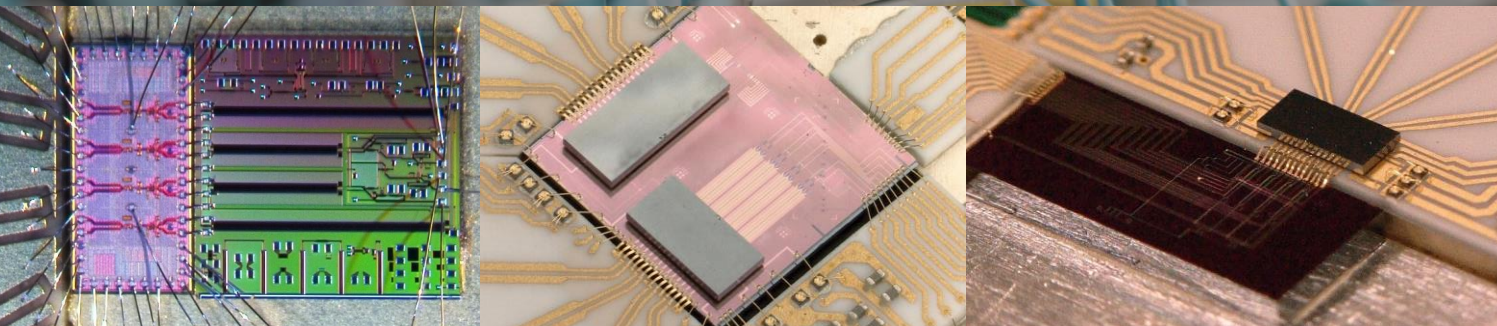
Egalisatie in modulatoren



Vermogens-efficiënte PAM4
generatie aan hoge snelheden

Egalisatie in modulatoren

Snelle, efficiënte optische
verbindingen in datacenters





imec

embracing a better life