



# Von Terabits und Chips – Zur Kommunikation der Zukunft

Juerg Leuthold

ETH Zurich, Switzerland

“Uber” erregt

“Uber”

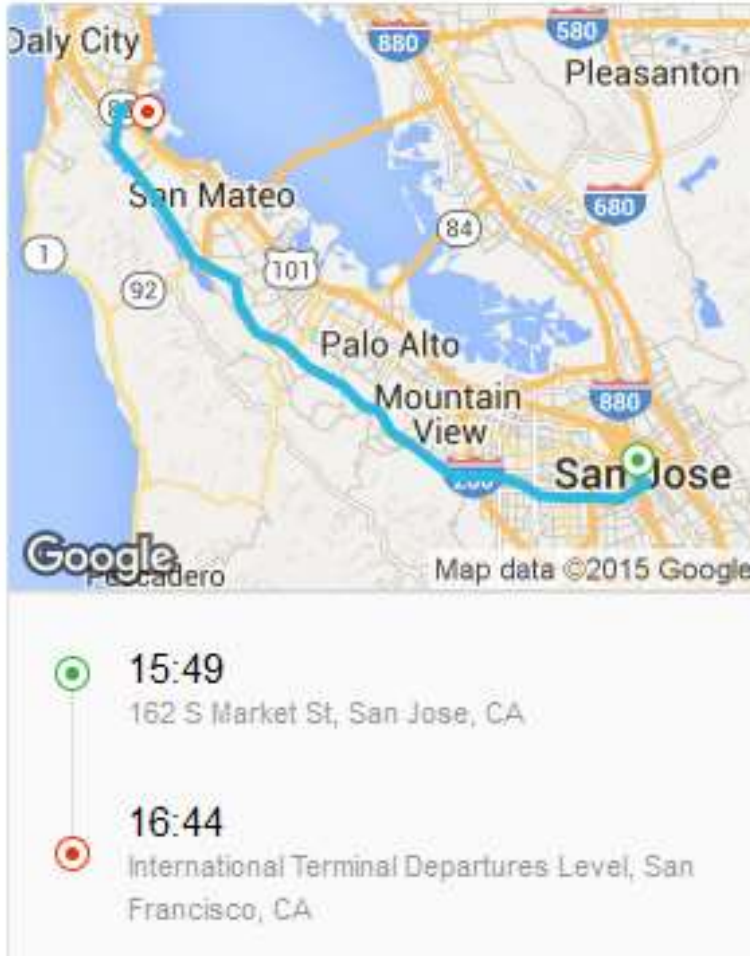
Wo?

Wann?

Wer?

Wieviel?

# Uber



TARIF-AUFSCHLÜSSELUNG

Grundpreis	1.95
Entfernung	50.89
Zeit	11.11

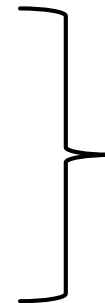
<b>Zwischensumme</b>	<b>\$ 63.95</b>
SFO Airport Surcharge (?)	3.85
Fahrsicherheitsgebühr (?)	1.35

BERECHNET	
Personal **** 7791	<b>\$ 69.15</b>

# Uber – gegründet 2009

Uber ist ein Geschäftsmodell basierend auf

- Idee
- Software
- Kommunikation
  - mit grosser Bandbreite
  - zu jeder Zeit
  - an jedem Ort



Hardware-Infrastruktur  
-  
Voraussetzung

Kommunikation steht damit am Anfang einer Innovationskette!

# Herausforderungen

Ideen zur Gesellschaft von Morgen hängen von Kommunikation ab

- Bsp.: Geschäftsmodelle im Sinne und Geiste von “Uber” basieren auf 2 Faktoren:
  - Genügend Kommunikation &
  - Zuverlässige Kommunikation!

Hätte “Uber” 2009 in der Schweiz erfunden werden können?

- “Uber” bedingt, dass Taxifahrer Koordinaten permanent weiterleiten.
- “Uber” bedingt, dass Kunden an jd. Ort, zu jd. Zeit genügend bezahlbare Bandbreite haben.

Hatten wir das 2009?

Und wenn man erst 2012 kommt – ist man dann noch dabei?

# Inhalt

Die Trends

Die Hardware hinter dem Erfolg!

Die Physik – setzt sie dem Wachstum Grenzen?

Der Mensch – setzt er dem Wachstum Grenzen?

# Inhalt

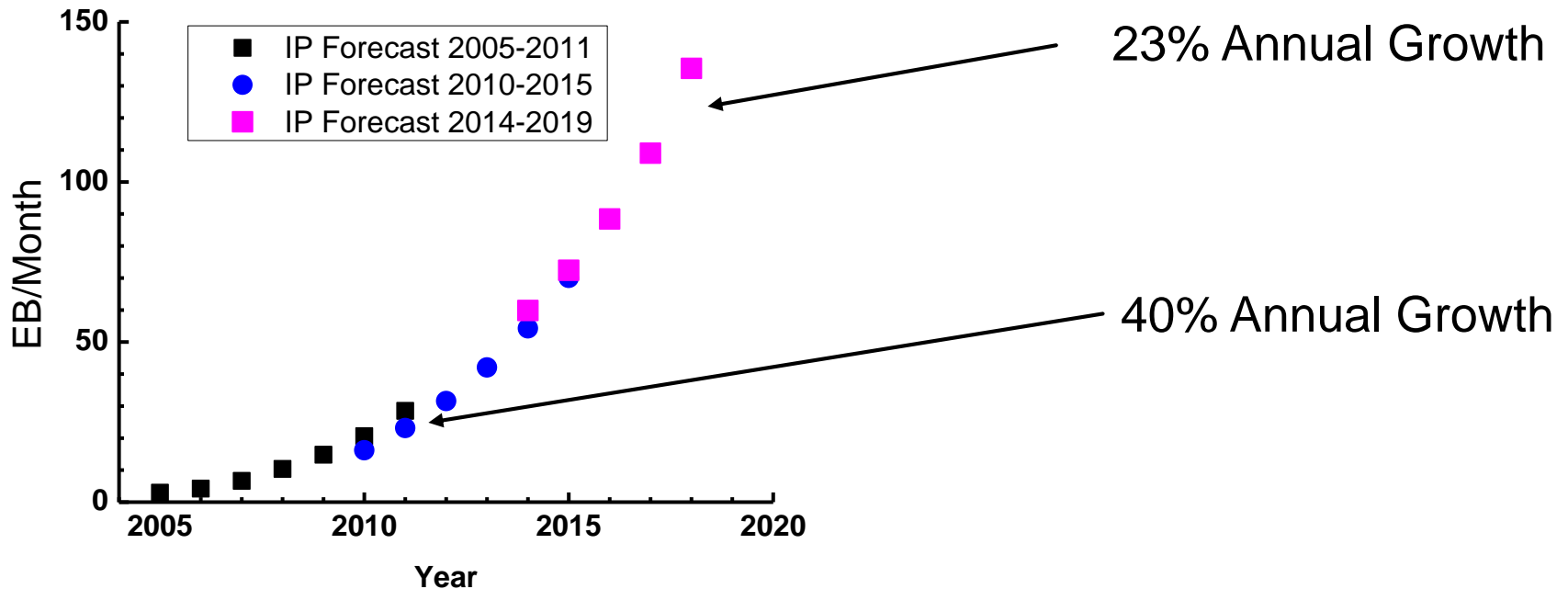
## Die Trends

Die Hardware hinter dem Erfolg!

Die Physik – setzt sie dem Wachstum Grenzen?

Die Gesellschaft – weitere Herausforderungen

# Global IP Forecast

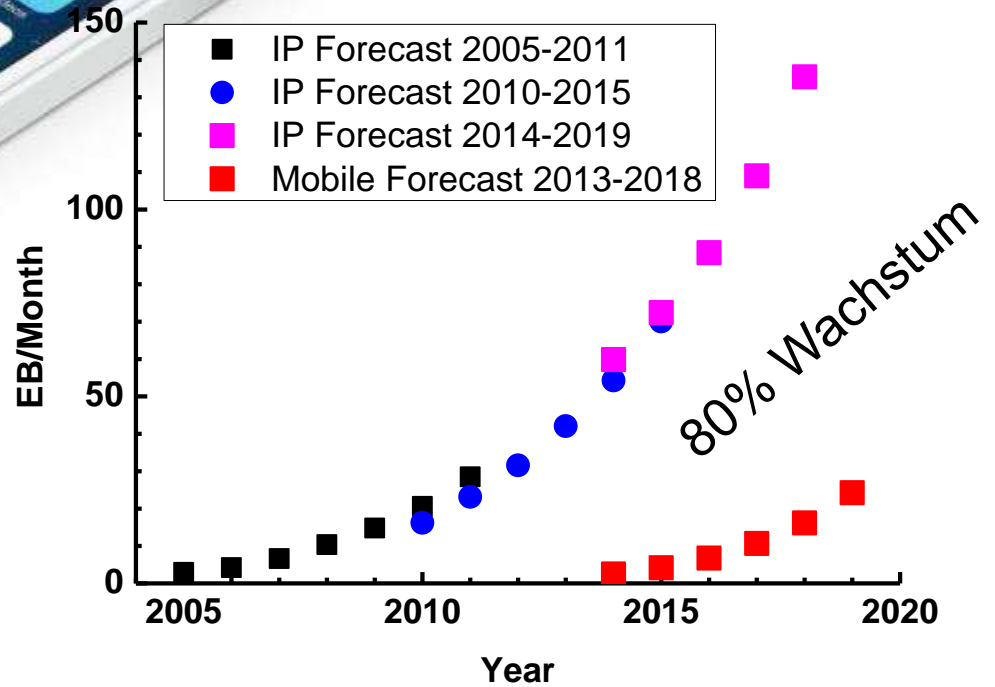


E=Exa= $10^{18}$

Mobile Dienste werden zu einem Verbrauchsgut – so wie etwa Wasser  
 → Wachstum getrieben von neuen Diensten

Ref.: CISCO Global IP and Global Mobile Data Traffic Forecast, June 2015

# Mobilkommunikation



Ref.: CISCO GobaL IP and Global Mobile Data Traffic Forecast, June 2015

# An jedem Ort, zu jeder Zeit – alle mit allem

- Soziale Netzwerke  
→ Personen sind vernetzt
- Internet der Dinge (IoT)  
→ Dinge sind vernetzt



Meine Brille,  
Meine Jacke,....

© by [www.dreamstime.com](http://www.dreamstime.com)

# An jedem Ort, zu jeder Zeit – unterwegs zu Fuss



Google Glasses 2



Quelle Google

# An jedem Ort, zu jeder Zeit – im Auto



Die Welt, Mit dem Tiefflug-Display über die deutsche Autobahn, 21.7. 2012  
© by BMW Deutschland

## Neue Anwendungen – Eben noch Vision!

Autonomes Fahren:



Rotierender Sensor auf dem Dach überwacht die Umgebung innerhalb von 60 m in 3D.

Google: 120'000 km autonomes Fahren in 2010.

Computer sehen mehr, schlafen nicht, und fahren präziser.  
Behinderte Leute werden wieder mobil.

Ref.: [COSC 311 - Spring 2012](#) report by Google

## Neue Anwendungen – bald Realität!



«Die Post geht in die Luft»  
NZZ 7.7.2015

Daimlers autonomer Lkw schon 2016 auf Deutschlands Strassen.

Ref.: 25. Juli 2015; FAZ

Computer sehen mehr, schlafen nicht, und fahren präziser.  
Behinderte Leute werden wieder mobil.

# Data Mining – die Kunst, Information zu nutzen

“90% aller Mobiltelefone sind weniger als 3 m von ihren Besitzern entfernt”



Google

Online-Karten  
sind real-time!

**2000: 128 kbit/Sekunde**

**2015: 1 Gbit/Sekunde**

# 2025: 10 Gbit/Sekunde und mehr!



Gbit/s an Daten benötigt.

[http://ex-blog.panasonic.co.jp/exhibition/2008/09/ceatec08\\_250.html](http://ex-blog.panasonic.co.jp/exhibition/2008/09/ceatec08_250.html)

## 3D-Bilder, 3D-Filme



- 250,000 Linsen.
- Jeder der 30,000 Betrachtungswinkel erhält ein anderes Bild.

Als bewegtes Bild: eher 100 Gbit/s

Press Release Fraunhofer Institute IPM, University of Kiel, und real-eyes.eu May 2010

## 3D Druck

- Teile werden gedruckt – statt Post-Pakete gibt es Datenpakete

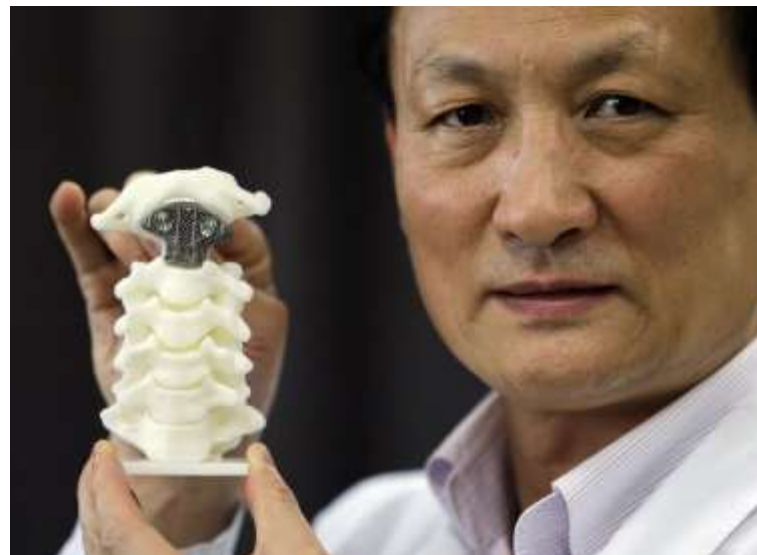


Noa Raviv, Modedesign, Tel Aviv

3D-Druck erlaubt es

- Einkäufe zu personalisieren
- Erlaubt Kreationen, die sonst nicht möglich wären

3D-Druck in der Medizin bald unverzichtbar.



Rückenwirbel  
ersetzt.

Dr. Liu Zhongjun, Peking University, Aug. 2014

# Lack of Bandwidth – Lack of Vision

- Um die Märkte der Zukunft zu verstehen, muss man die Bandbreite erahnen, welche wir in 5 Jahren haben werden.
  - Bsp.: Autonomes Fahren
    - Eine grosse Kommunikationsbandbreite
      - im Auto,
      - mit der Umgebung und
      - den Netzen
- ermöglicht erst autnomes Fahren
- Kommunikation steht damit am Anfang einer Innovationskette, welche z.B. älteren Personen Mobilität ermöglicht, und hat damit einen direkten Einfluss auf Lebensqualität und die Kosten der Sozialsysteme

# Inhalt

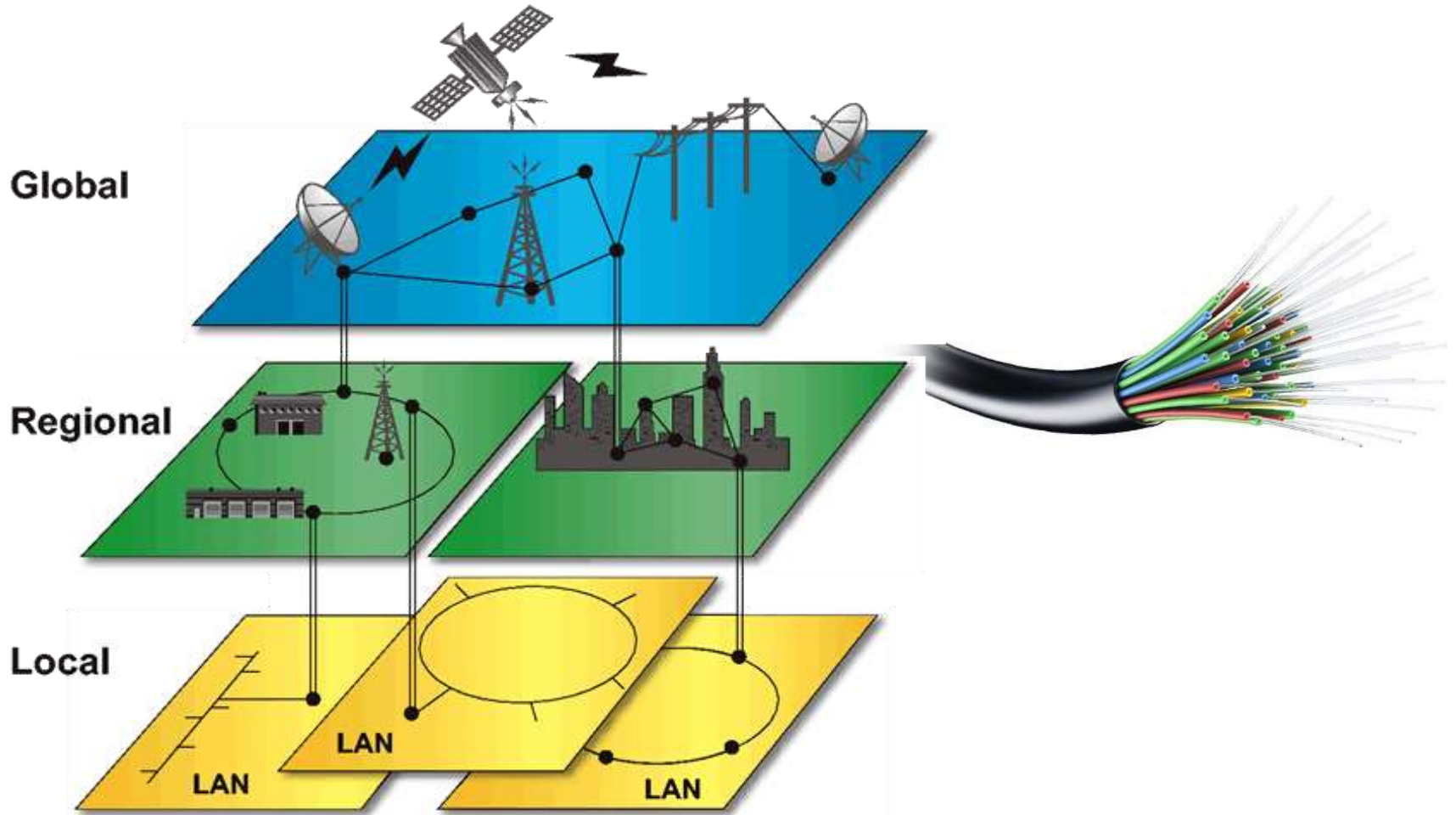
Die Trends

Die Hardware hinter dem Erfolg!

Die Physik – setzt sie dem Wachstum Grenzen?

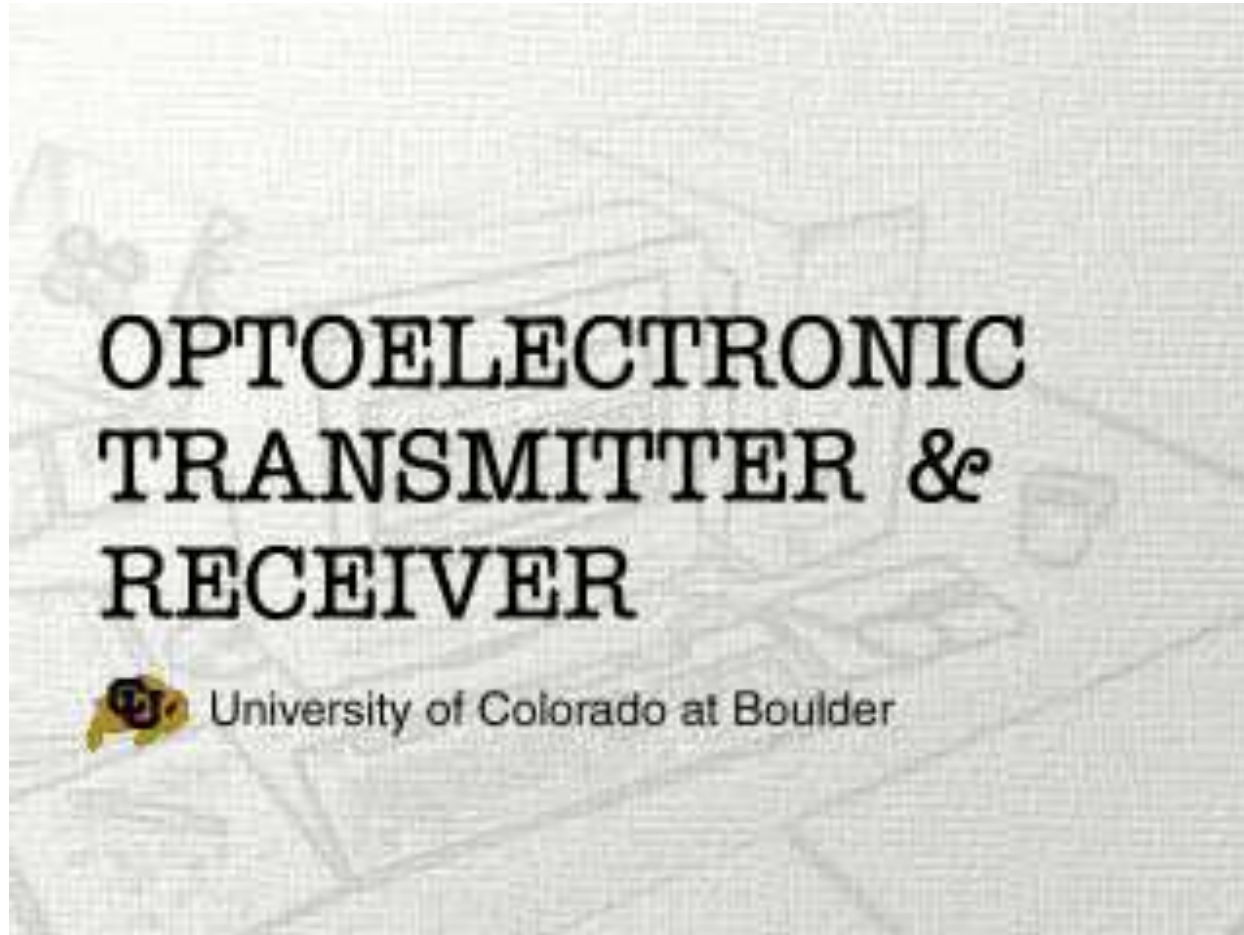
Der Mensch – setzt er dem Wachstum Grenzen?

# Kommunikations-Infrastruktur



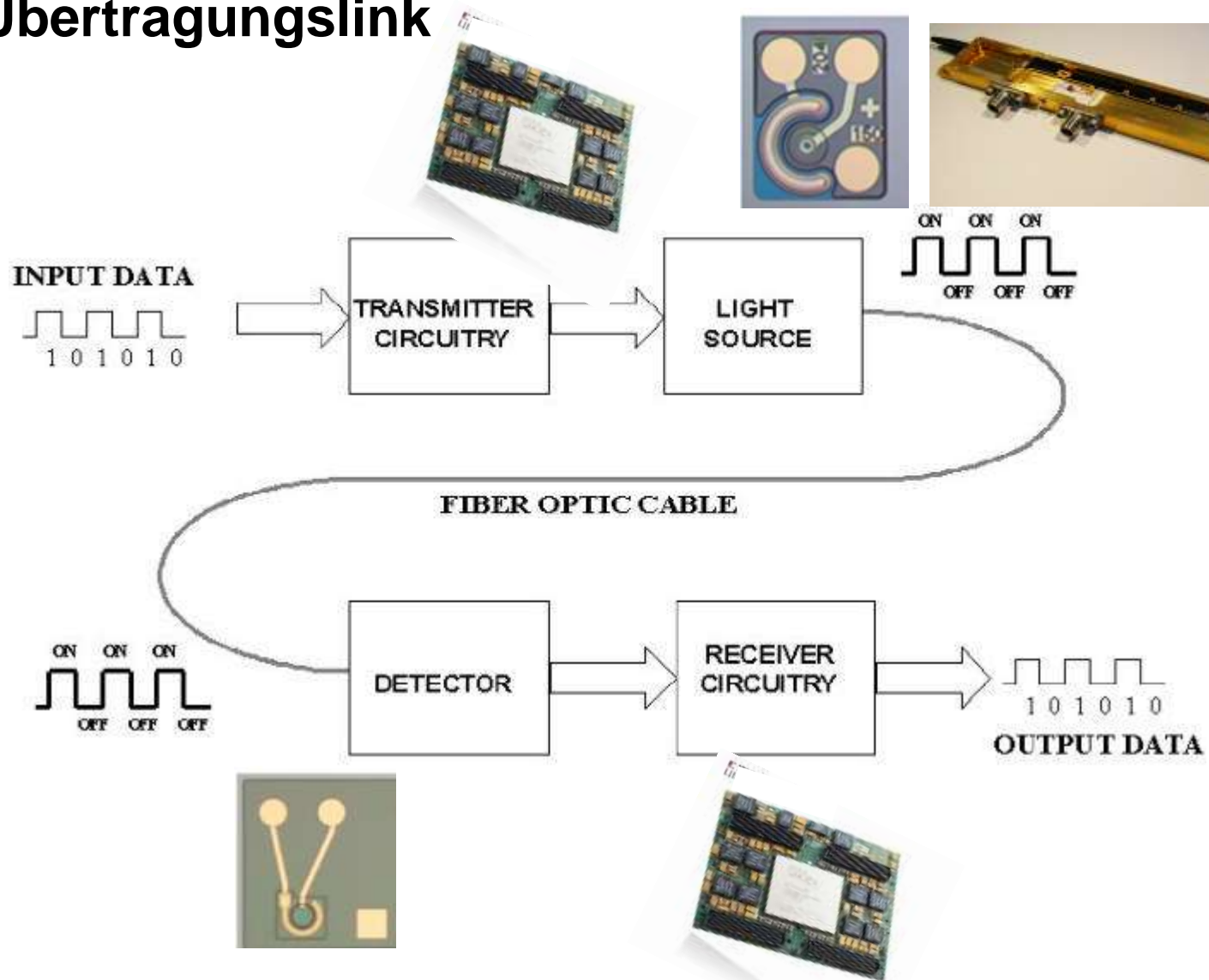
[pubs.opengroup.org/architecture](https://pubs.opengroup.org/architecture)

# Ein Glasfaser-Übertragungslink



Ref.: Bart Van Zeghbroeck, University of Colorado Boulder, Technology for Education Group

# Der Übertragungslink



# Neue programmierbare Elektronik (FPGA)

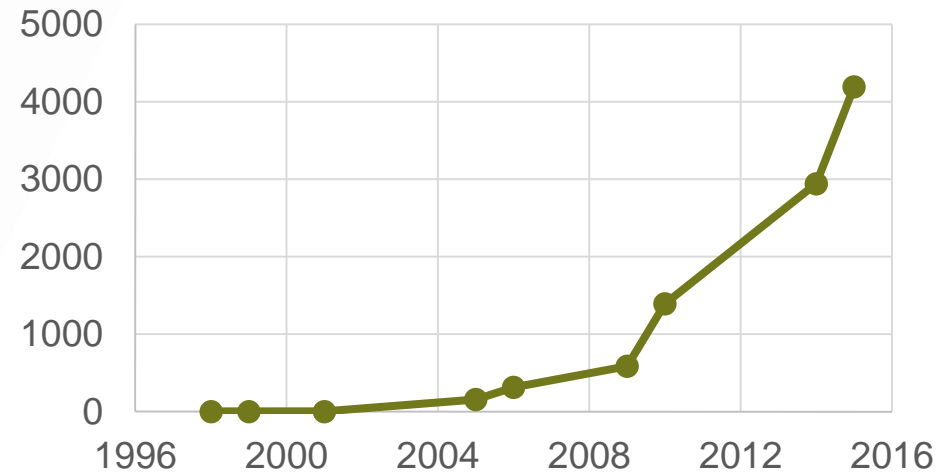
Jahr 2000: 1 x 40 Gbit/s → 60 kCHF

Jahr 2015: Neuste FPGA Hardware → < 20 kCHF

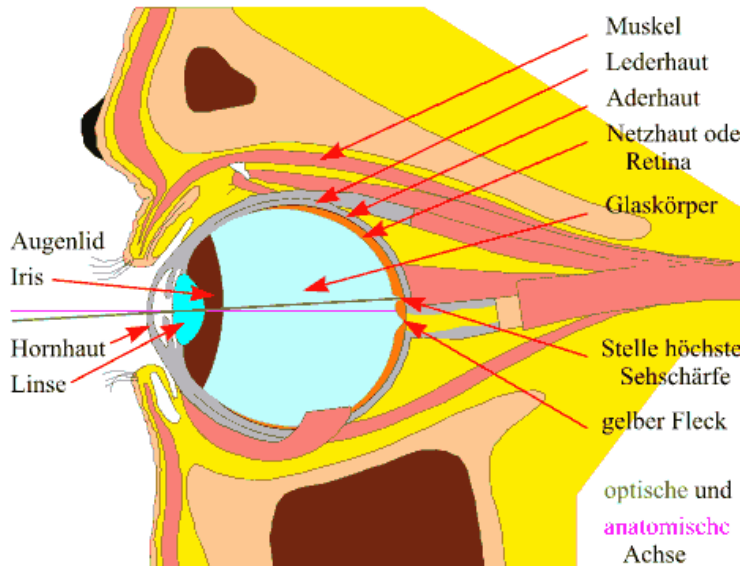
Kommunikation mit >4Tbit/s Bandbreite  
128 Eingänge & Ausgänge @ 32.75 Gbit/s



High-Speed IO Bandwidth [Gbit/s]



# Die Information, welche ein Auge prozessiert



Die zwei Augen erhalten ca. 70 Gbit/s. (\*)

\*  $24 \text{ Images/s} \times 12 \text{ bit ENOB} \times 2 \text{ eyes} \times (6 \text{ Zapfen} + 120 \text{ Stäbchen}) \cdot 10^6 \sim 70 \text{ Gb/s}$

# FPGA Processing Power

Latest Xilinx FPGA hardware

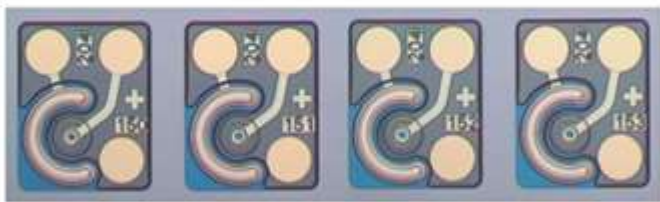
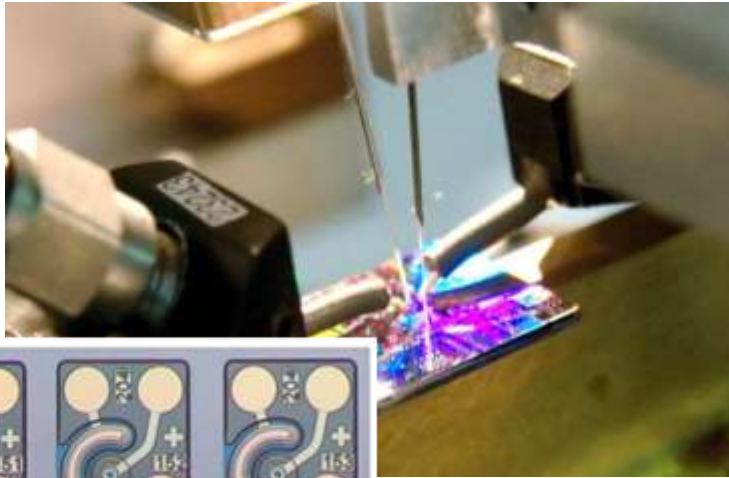


The latest programmable hardware offers IO Bandwidth (>4Tbit/s). This is more than what can be received and processed by the eye.

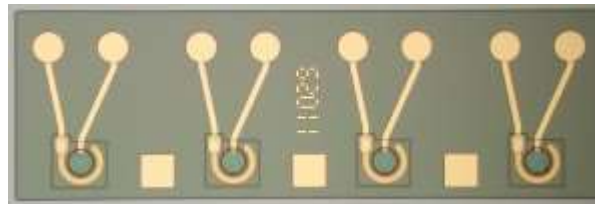


Why then, do we still allow humans to drive on the street?

# Neue optische Komponenten

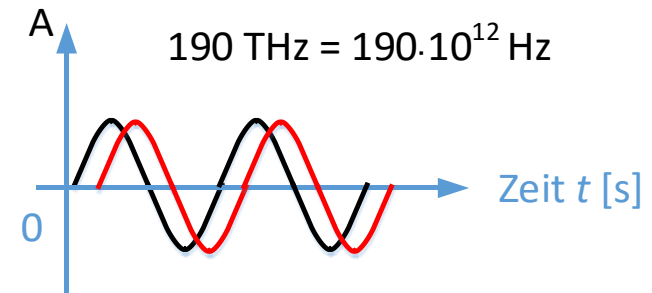


4 x 20 Gb/s Laser  
II-VI Laser Enterprise, Zürich



25 Gb/s Photodioden  
Albis Opto, Rüschlikon

Fortschritt:  
kohärente Empfänger



# Kommunikations Infrastruktur

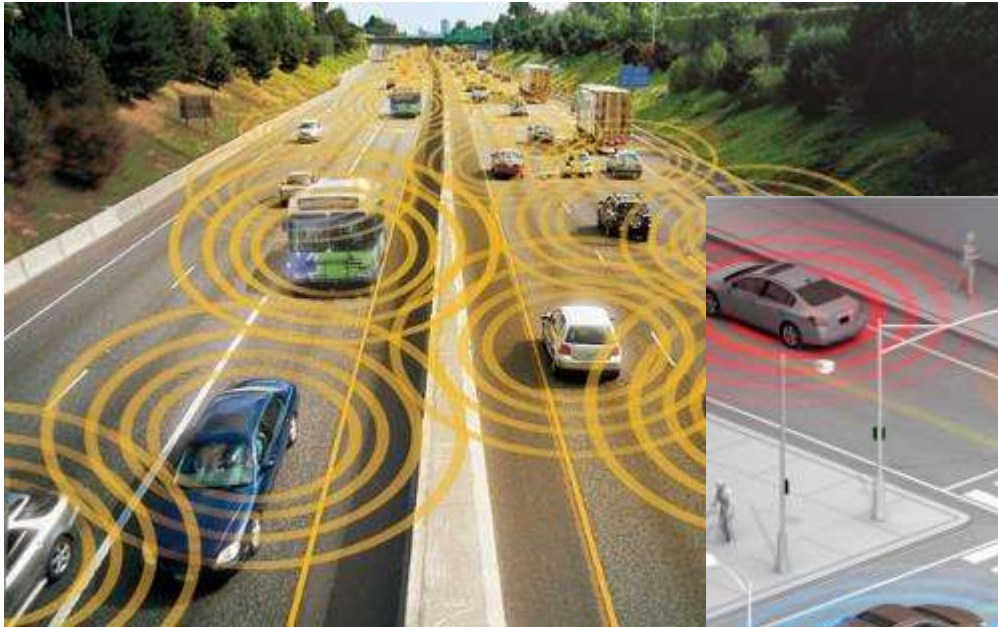


[ec.europa.eu/digital-agenda/](http://ec.europa.eu/digital-agenda/)

[pubs.opengroup.org/architecture](http://pubs.opengroup.org/architecture)

# Car-to-X Communications

- Car-to-car



- Car-to-Infrastructure



Frequency spectrum in the 5.9 GHz; IEEE 802.11

[www.car-2-car.org](http://www.car-2-car.org)

# Inhalt

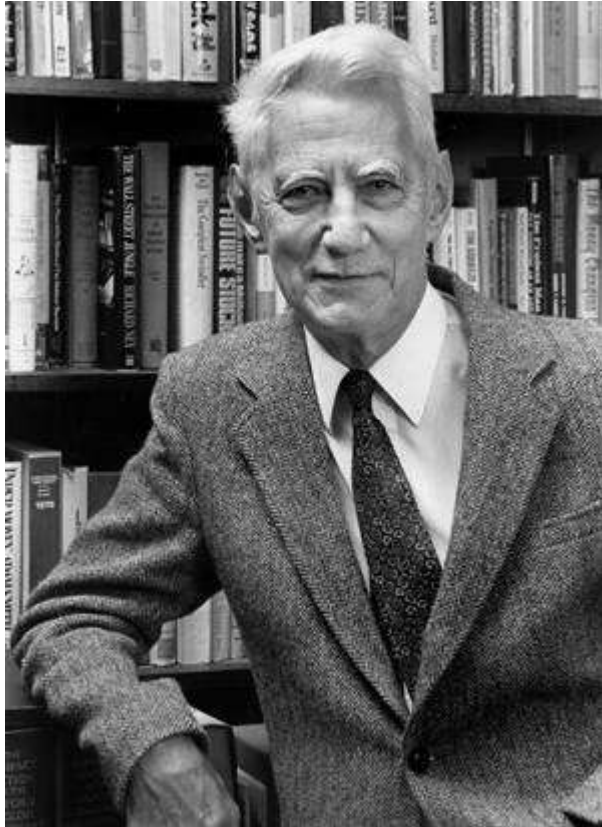
Die Trends

Die Infrastruktur – die Hardware hinter dem Erfolg!

Die Physik – setzt sie dem Wachstum Grenzen?

Der Mensch – setzt er dem Wachstum Grenzen?

# Kanalkapazität



<http://www.landley.net/history/>

*Claude Elwood Shannon, 1918 – 2001*

*Mitarbeiter bei den Bell Labs*

*Wissenschaftliche Arbeit zu “Maximal möglicher Übertragungskapazität”:*

*“A mathematical theory of communication.”  
Bell Syst. Tech. J. 27 (1948) 379–423*

# Shannon Kanal-Kapazität

→ Lsg 3:

Anzahl der Sender vervielfachen

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

Verfügbares

Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR)

Verfügbare Frequenzbandbreite

→ Lsg. 1:

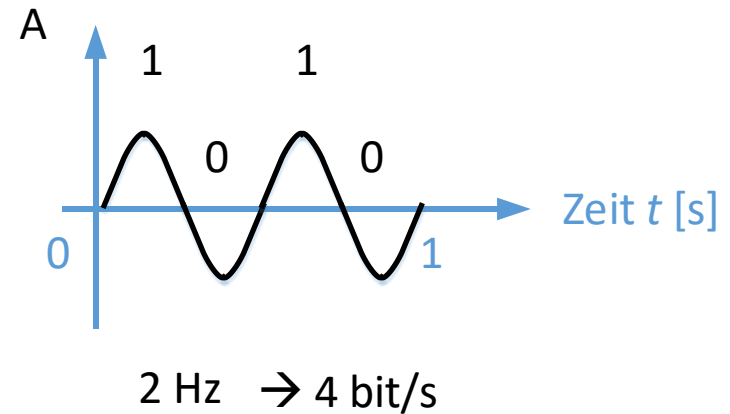
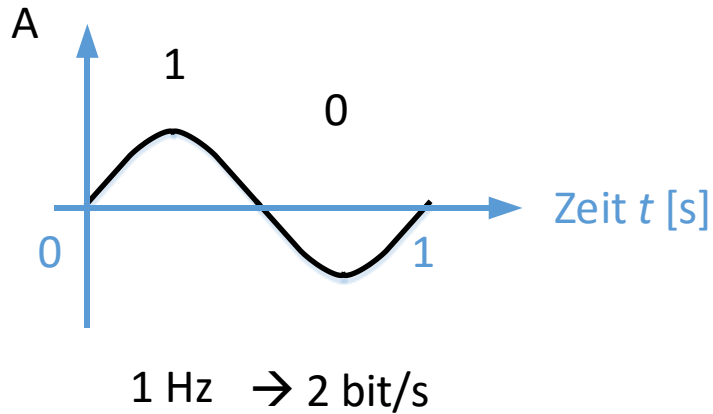
Höhere Frequenzen – mehr Kapazität

→ Lsg 2:

Mehr Leistung – mehr Kapazität

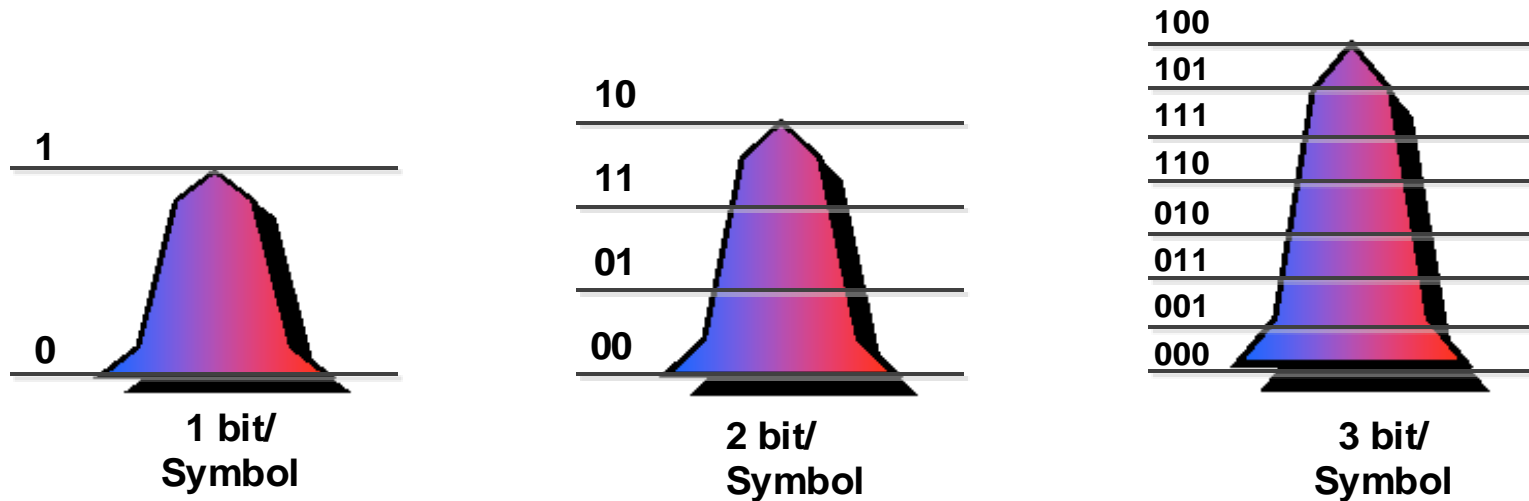
Bemerkung: Es werden hier nur streng physikalische Beschränkungen diskutiert. Kodierverfahren werden nicht diskutiert.

# Höhere Frequenzen – Mehr Kapazität



Je höher die Frequenz – desto mehr Kapazität!

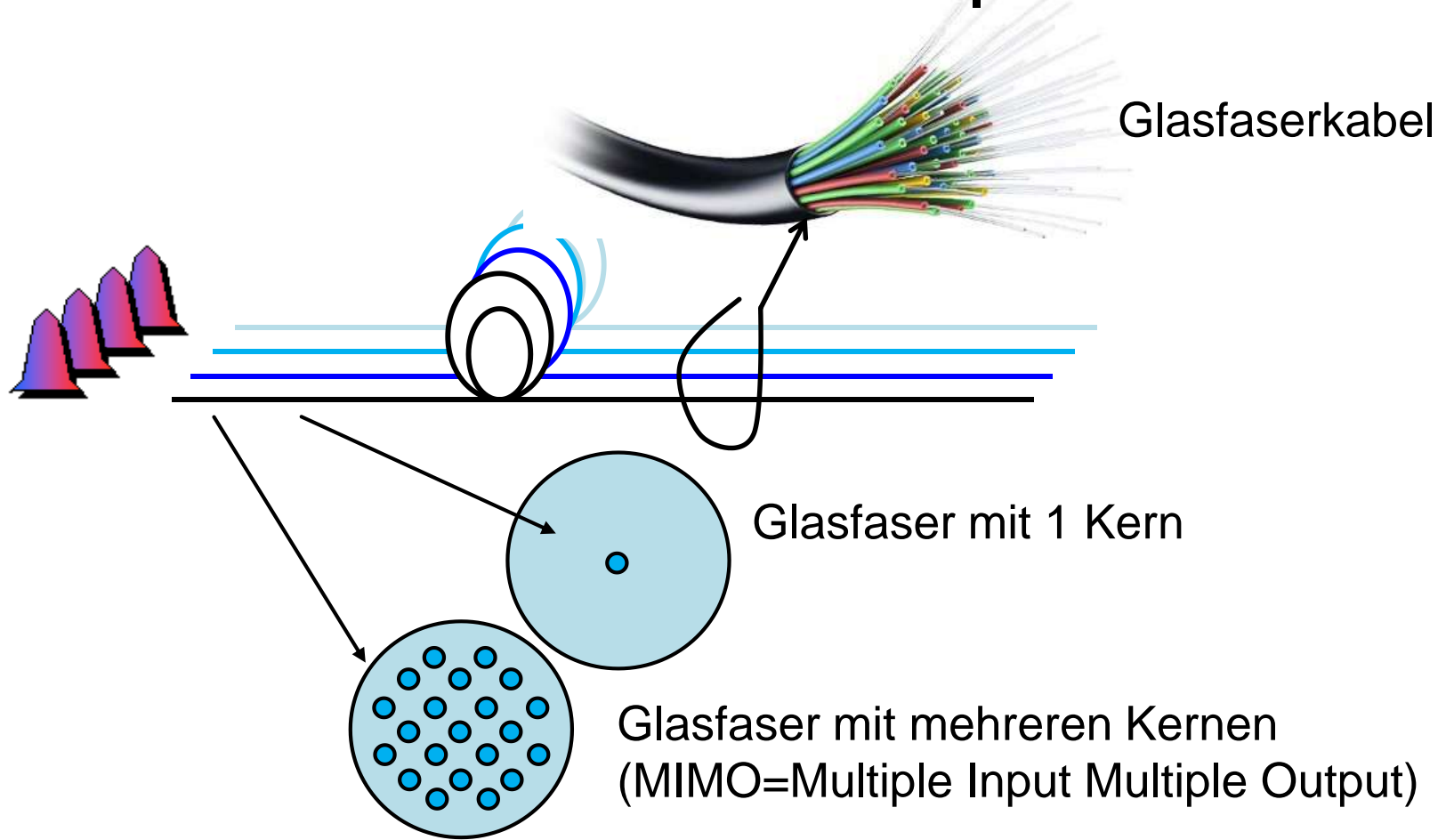
# Mehr Leistung $P$ – Mehr Kapazität



Mehr Sendeleistung – mehr Kapazität!

$$\text{Anzahl bits} = \log_2 (\text{Anzahl Niveaus})$$

# Mehr Pfade – mehr Sender – mehr Kapazität



Mehr Pfade – mehr Kapazität!

# Die Glasfaser

Verluste pro km (0.15 dB) oder:

70% nach 10 km



[www.corning.com/media/](http://www.corning.com/media/)

Die Glasfaser bietet:

Hohe Übertragungsfrequenzen

190 THz

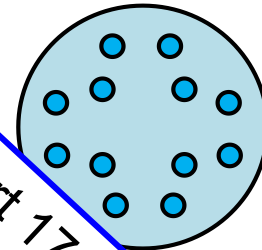
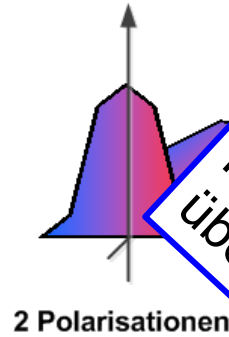
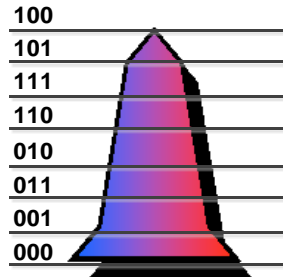
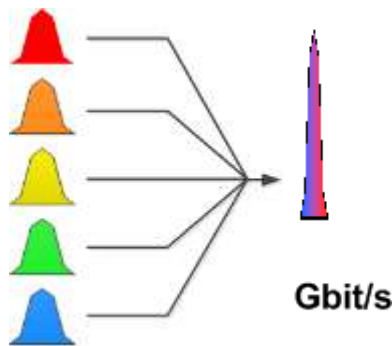
Überträgt "hohe" Signal-Leistungen:

1 W und mehr

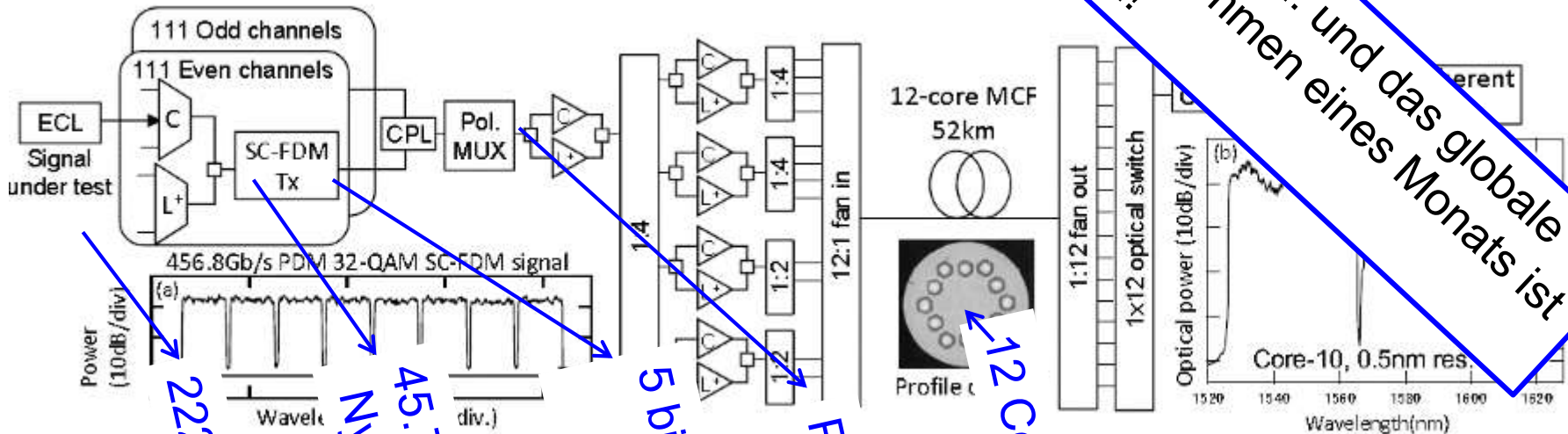
Erhältlich als Kabel mit vielen Fasern

1000 und mehr

# 1.01 Pb/s Transmission über 53 km Glasfaser



Es dauert 17 Std. und das globale Internetaufkommen eines Monats ist übertragen!



222 Lasers

Nyquist 45.7 Gbaud

5 bit/Symbol

Pol. Mux

12 Core SDM

Bit-Rate: 222 x 45.7 Gbaud x 5 x 2 x 12 1/1.20 = 1010 Tb/s

Ref. Proc. ECOC'2012, PDP 3C.1

# Herausforderung - Energieverbrauch

Cisco CRS-1 Multi Shelf System



<http://newsroom.cisco.com>



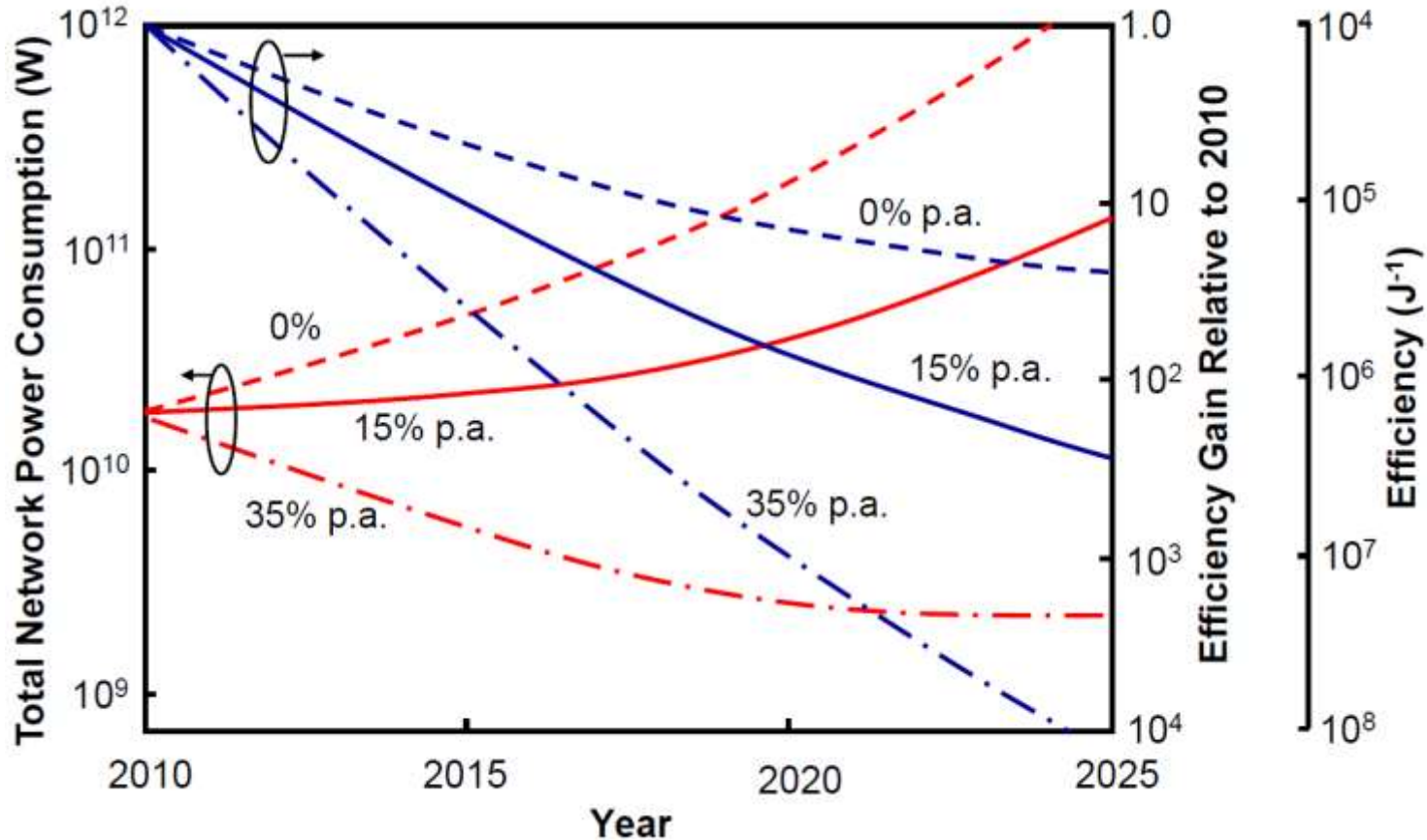
Verarbeitet 92 Terabits pro Sekunde

1152 Eingänge zu 40 Gb/s → Energieverbrauch 1020 kW

Datenzentren:

- zentrale & kühle Orte
- genügend & günstige Energie
- Datenschutz und politische Stabilität

# Herausforderung - Energieverbrauch



Global electricity consumption =  $2 \times 10^{12}$ W

Ref.: Rod Tucker, Green Touch Consortium 2010

R. Tucker, IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics, 2010

# Elektrische Signale auf Laser kodieren

## Kommerzieller Modulator



100 Gbit/s

Dimension: 100 mm x 20 mm

Verbrauch: 10'000 fJ/bit

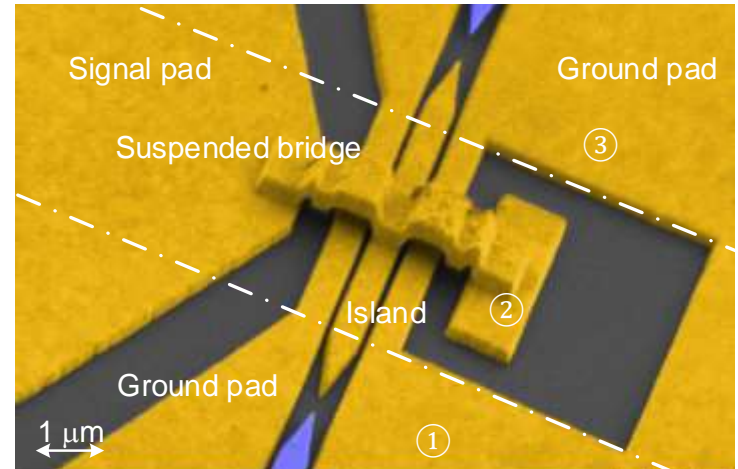
→ 0.5 Watt im Modulator

5 Watt für Kühlung

:  $100 \times 10^6$  →

: 500 →

## Neuster Modulator - ETH



120 Gbit/s

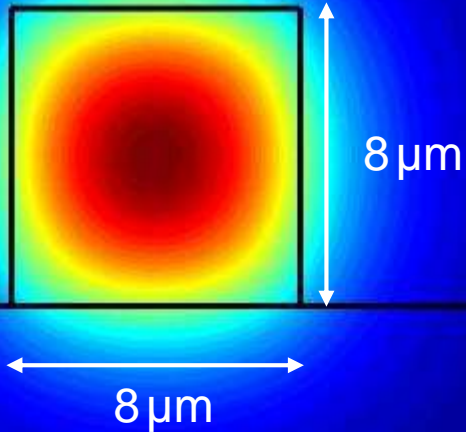
Dimension: 10 μm x 2 μm

Verbrauch: 20 fJ/bit

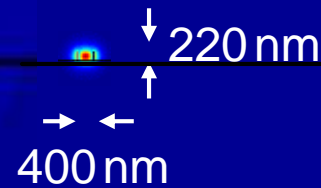
→ 0.002 Watt

# Scaling to Smaller Dimensions

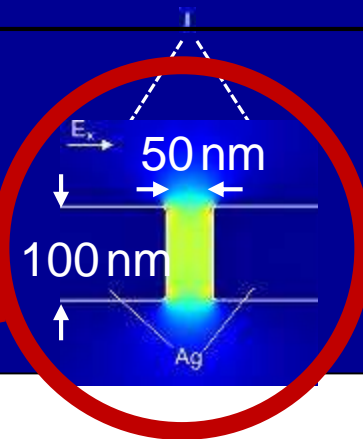
Low index  
waveguide  
 $\text{LiNbO}_3$



High index contrast  
waveguiding  
Si Platform



Plasmonic  
waveguiding

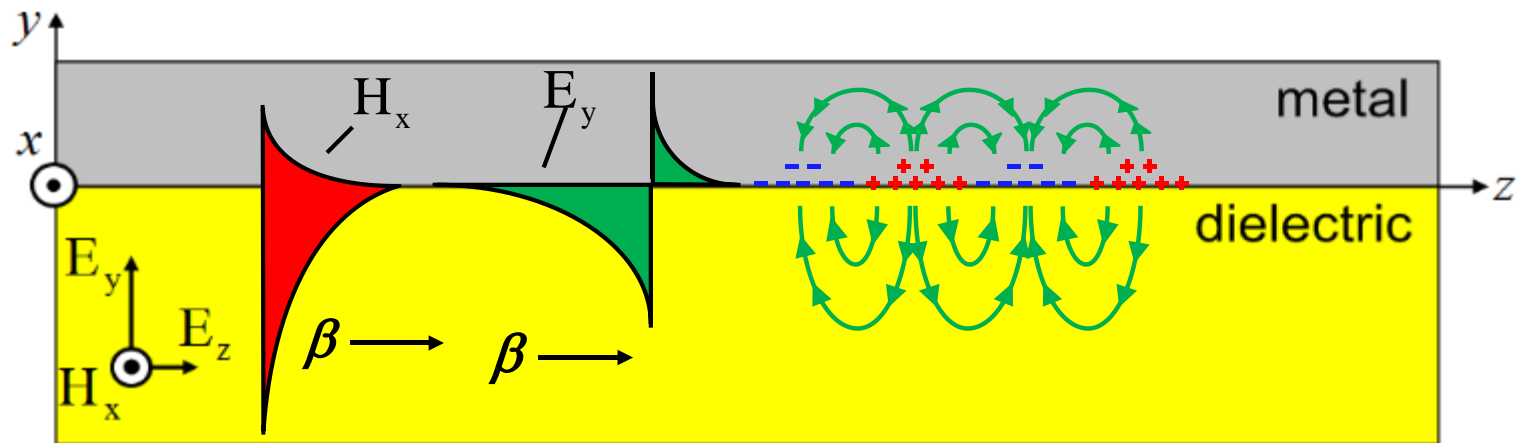


# Surface Plasmon Polariton (SPP)

**Plasmon:** Coherent electron gas oscillations

**Polariton:** If coupled to light

**SPP:** Coherent electron gas oscillation coupled to light at surface.



**Derivation:** Wave Equation

Boundary Conditions

→ Dispersion Relations

$$\frac{d^2 H_x(y)}{dy^2} + [k_0^2 \varepsilon(y) - \beta^2] H_x(y) = 0,$$

$$H_{x,m} = H_{x,d} \quad \varepsilon_m E_{y,m} = \varepsilon_d E_{y,d}$$

$$\beta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_M \varepsilon_D}{\varepsilon_M + \varepsilon_D}}$$

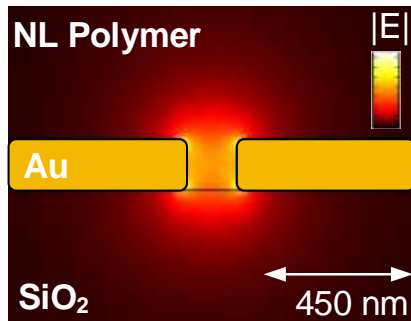
# Why Plasmonics? – Enhanced Pockels-Effect

$$\Delta\varphi = k_0 \cdot \Delta n_{\text{eff}} \cdot L =$$

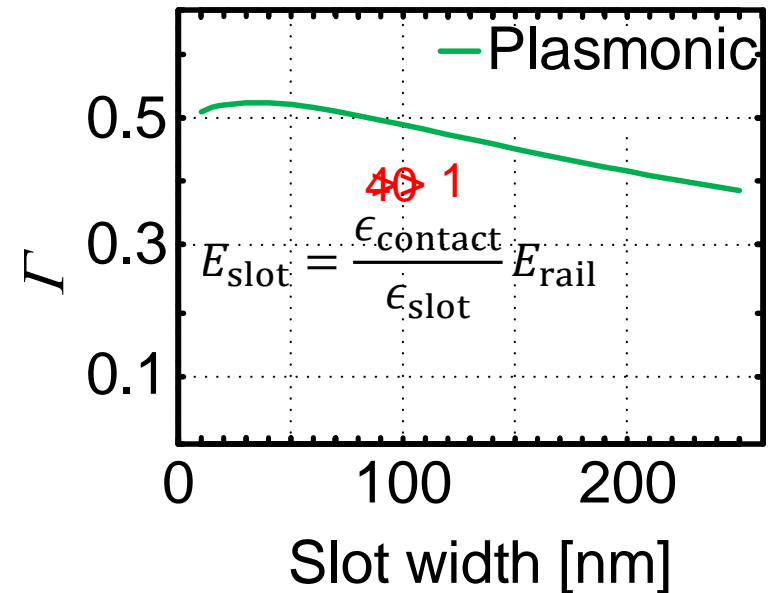
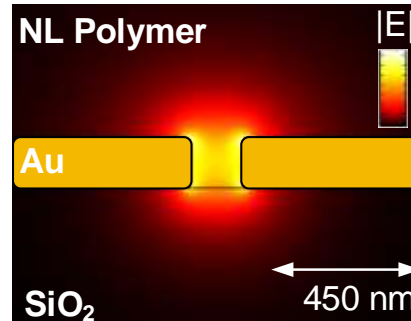


Plasmonics

RF Field



Optical Field

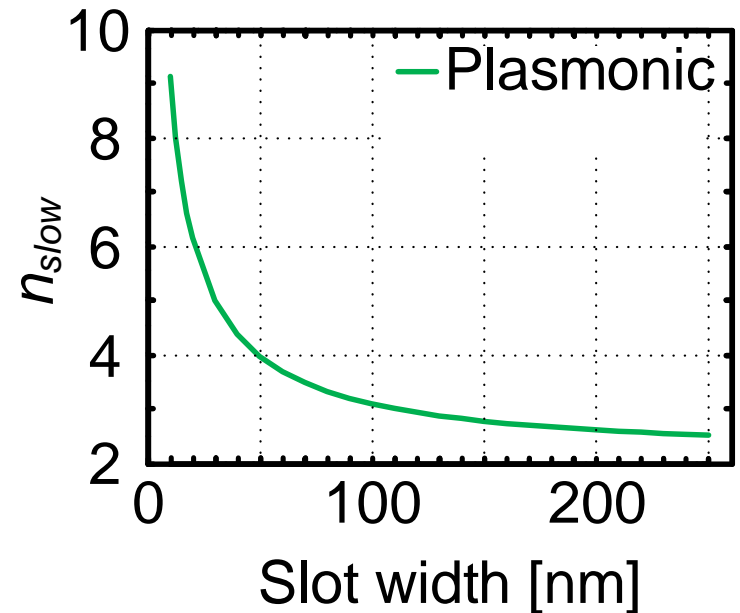
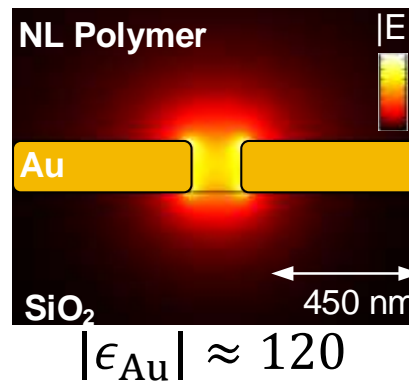


Haffner, C. et al. *Nature Phot.*, (2015)

# Why Plasmonics? – Enhanced Pockels-Effect

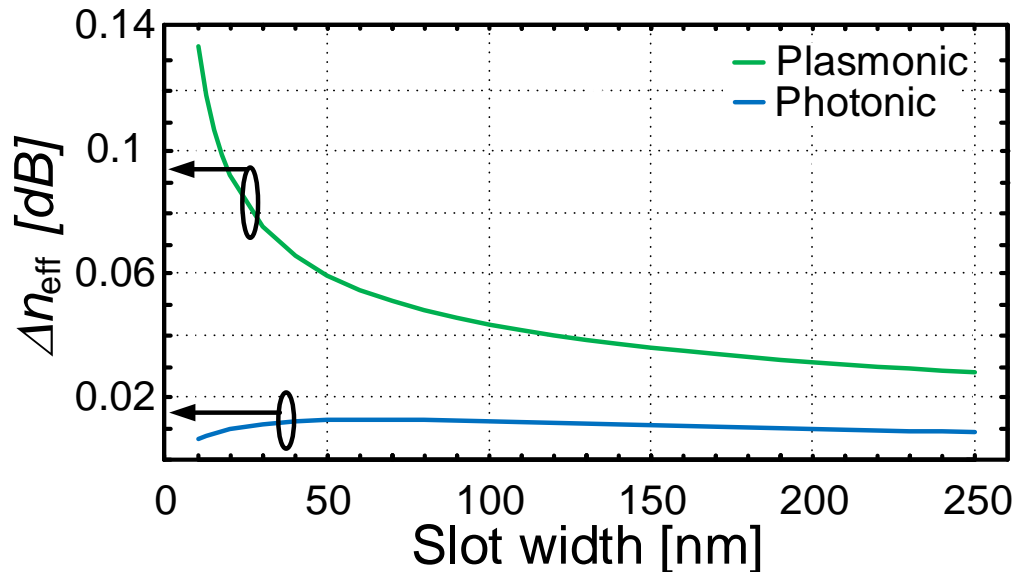
$$\Delta\varphi = k_0 \cdot \Delta n_{\text{eff}} \cdot L = k_0 \cdot \Gamma \cdot n_{\text{slow}} \cdot \frac{\Delta n_{\text{mat}}(E)}{n_{\text{mat}}} \cdot L$$

Plasmonics

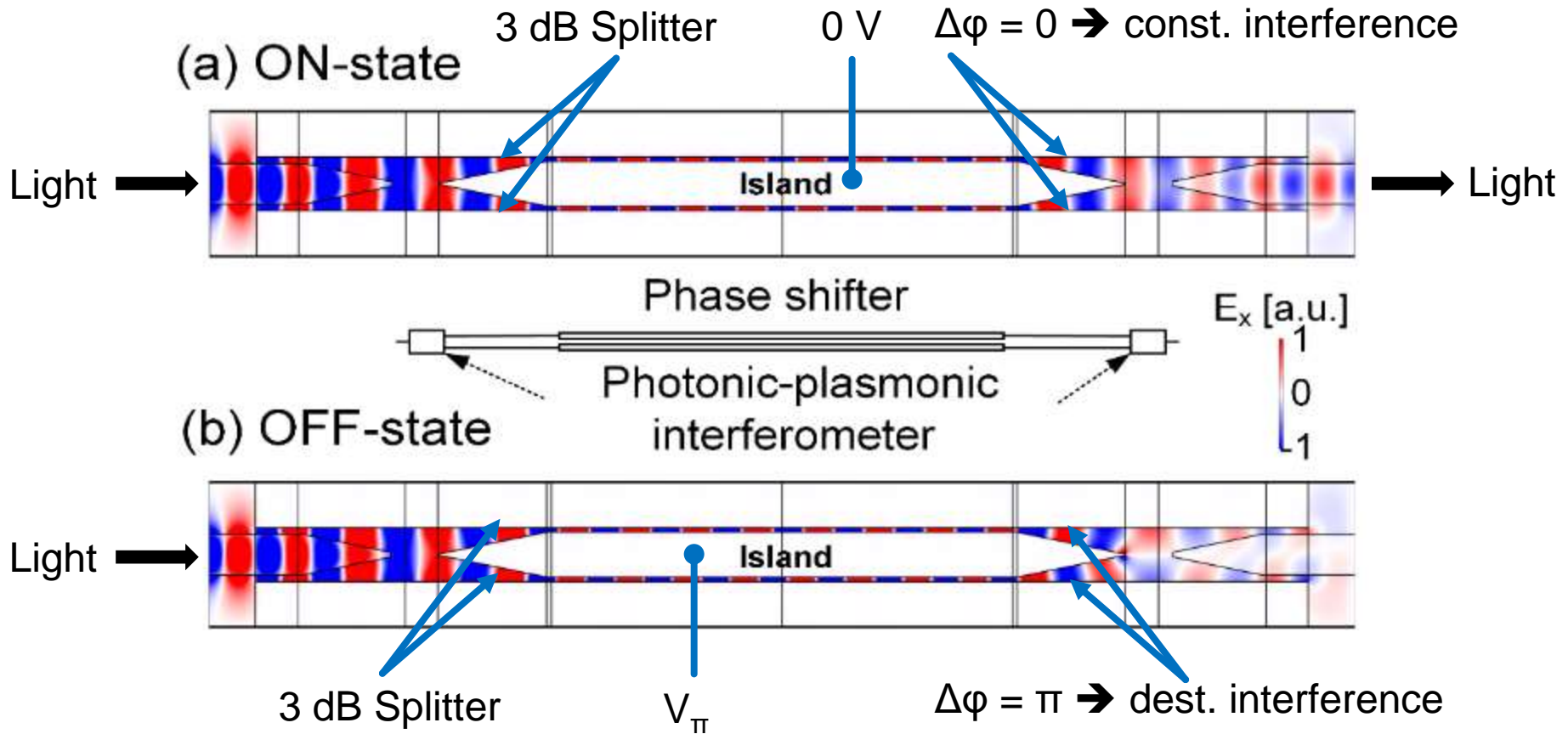


# Why Plasmonics? – Enhanced Pockels-Effect

$$\Delta\varphi = k_0 \cdot \Delta n_{\text{eff}} \cdot L = k_0 \cdot \Gamma \cdot n_{\text{slow}} \cdot \frac{\Delta n_{\text{mat}}(E)}{n_{\text{mat}}} \cdot L$$

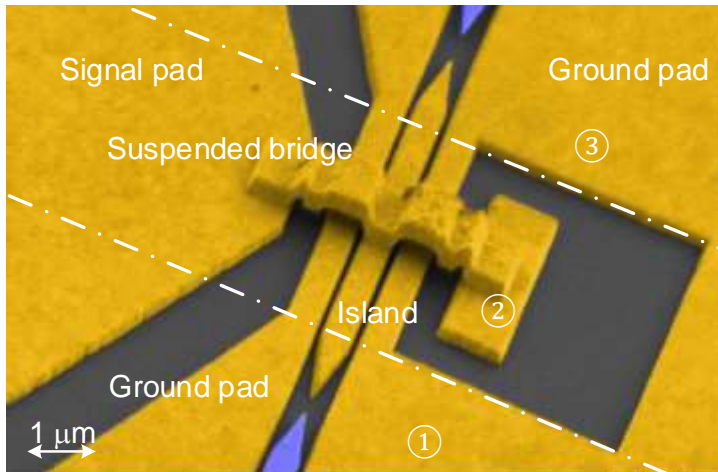


# A Path Towards an Ultra-Compact MZM

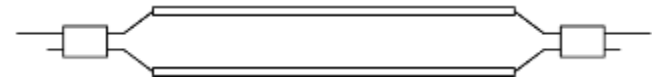


Ref.: C. Haffner et al., Nature Photonics 9, 525-528 (2015).

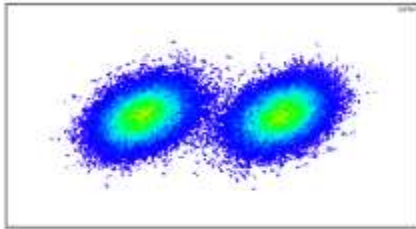
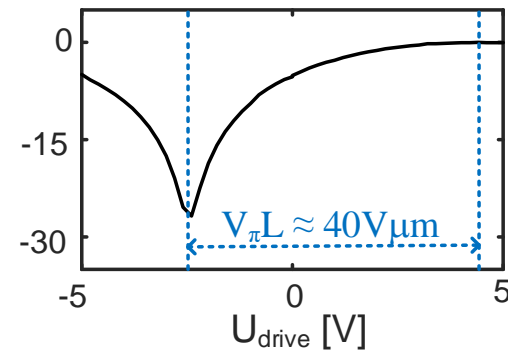
# All-Plasmonic MZM



3 dB Splitter    Phase shifter    Combiner



10 μm long device



72 Gbit/s – BER  $3 \times 10^{-3}$

Haffner, C. *et al. Nature Phot.*, (2015)

## Plasmonic MZM

- Record footprint ( $10 \times 1.5 \mu\text{m}^2$ )
- Speed – among the best 72 GBd
- World record 20 fJ/bit @ 72 GBd
- Chip-losses of 8 dB

# Kommunikations Infrastruktur



[ec.europa.eu/digital-agenda/](http://ec.europa.eu/digital-agenda/)

[pubs.opengroup.org/architecture](http://pubs.opengroup.org/architecture)

# Shannon Kanal-Kapazität

Lsg 3:

- Mehr Antennen in kleineren Zellen – mehr Kapazität
- MIMO Antennenverbund am Ort – mehr Kapazität

$$C = B \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

Frequenzbandbreite

Signal-zu-Rausch Verhältnis (SNR)

Lsg. 1:

- Mehr Frequenzbänder – mehr Kapazität
- Höhere Frequenzen – mehr Kapazität

Lsg 2:

- Mehr Leistung – mehr Kapazität
- “Strahl-Lenkung” – mehr Kapazität

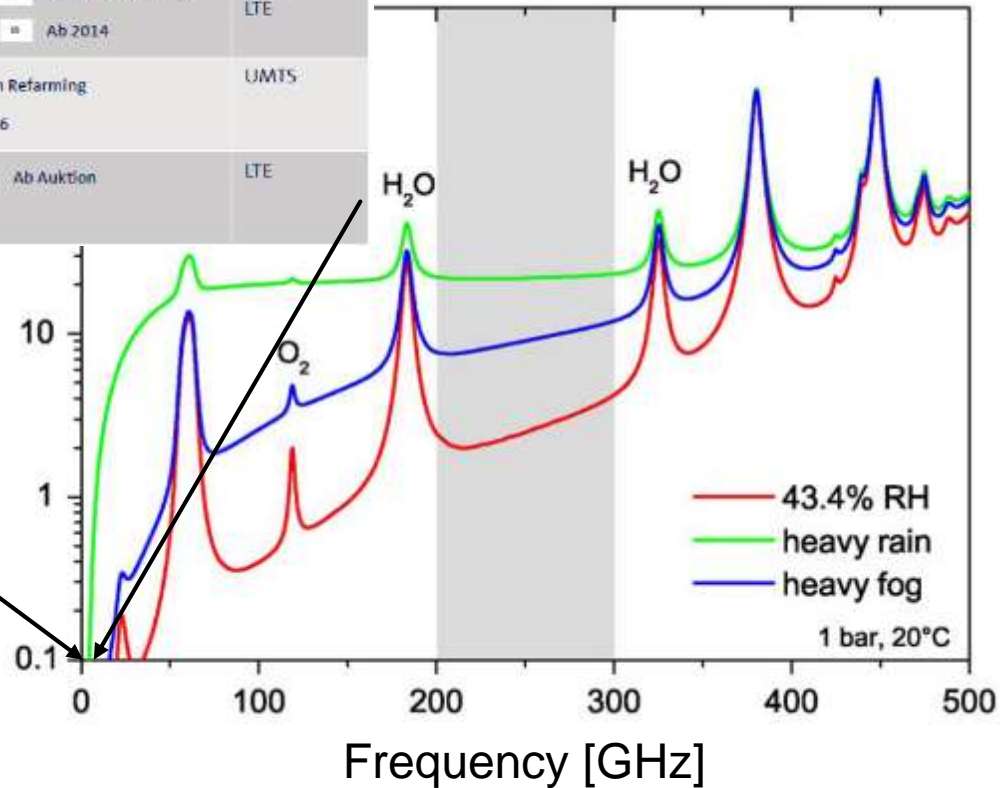
Bemerkung: Es werden hier nur streng physikalische Beschränkungen diskutiert. Kodierverfahren werden nicht diskutiert.

# Mehr & höhere Frequenzen – Mehr Kapazität

Band	Beschreibung	Nutzung
800 MHz	Ab Auktion	LTE
900 MHz	Bis zum Refarming Ab 2014	GSM UMTS
1800 MHz	Bis zum Refarming Ab 2014	GSM LTE
2100 MHz	Bis zum Refarming Ab 2016	UMTS
2600 MHz	Ab Auktion	LTE

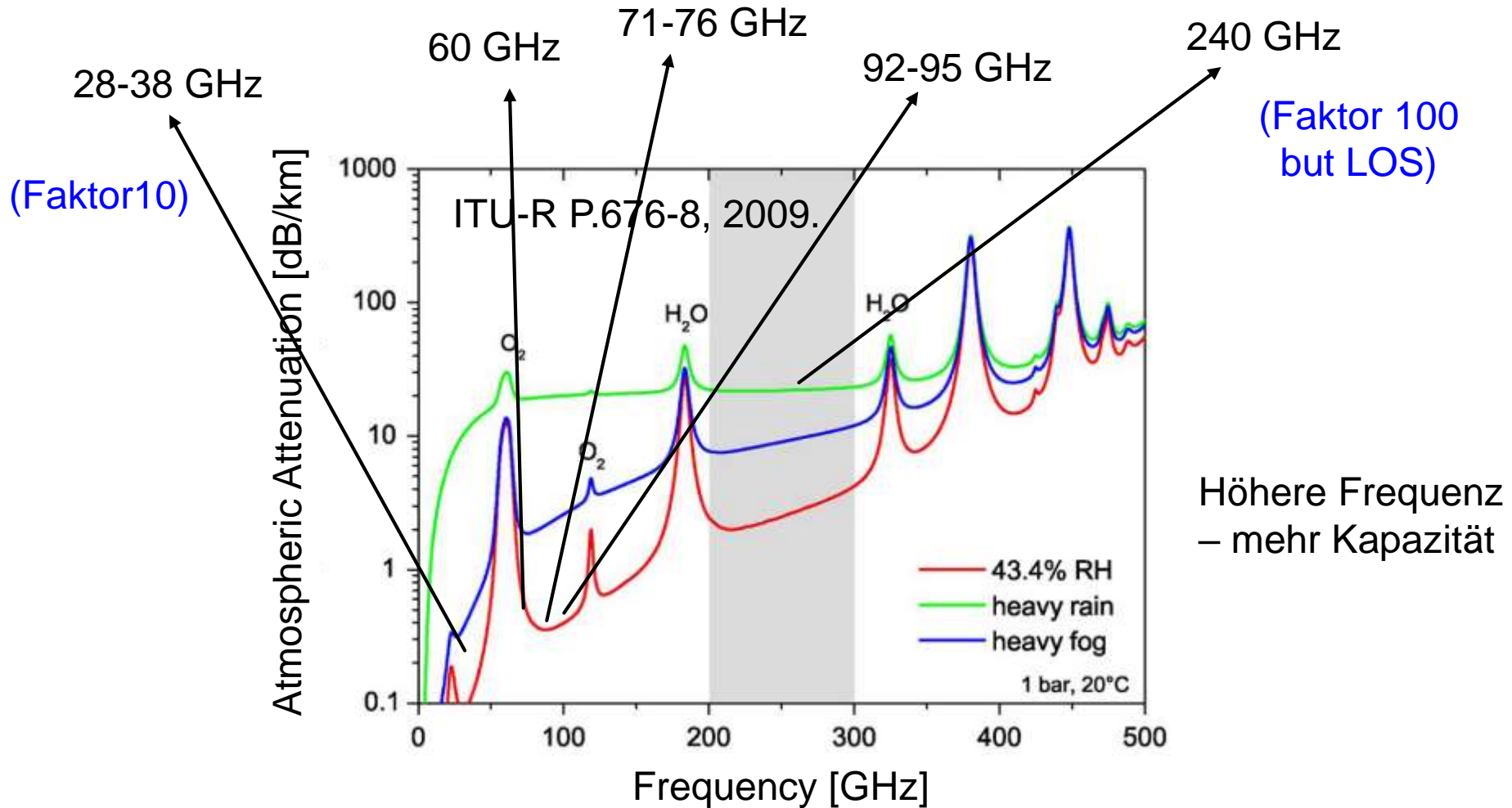
Swisscom

Atmospheric Attenuation



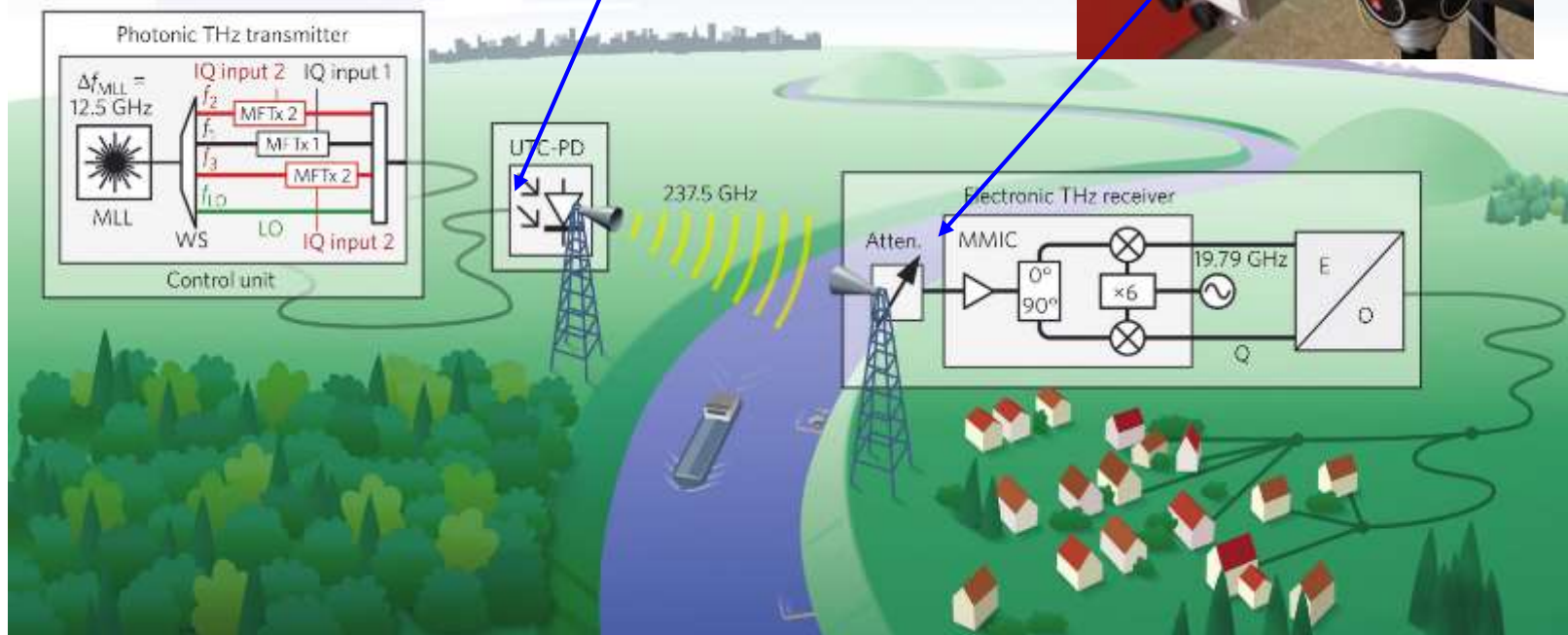
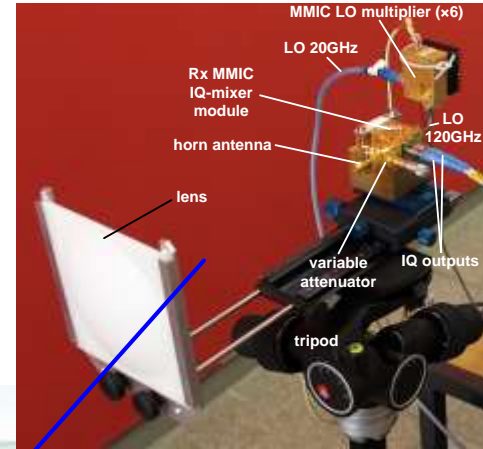
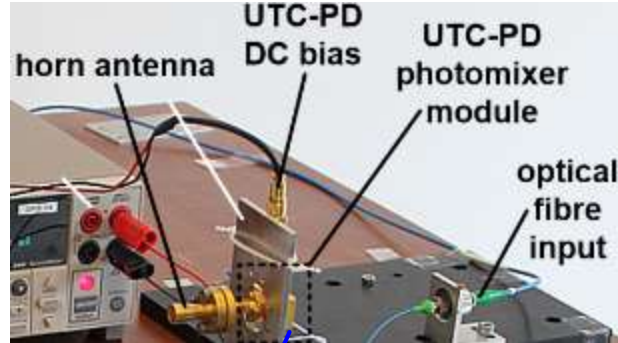
Kallfass et al., *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, vol.1, 2011.

# Mehr & höhere Frequenzen – Mehr Kapazität



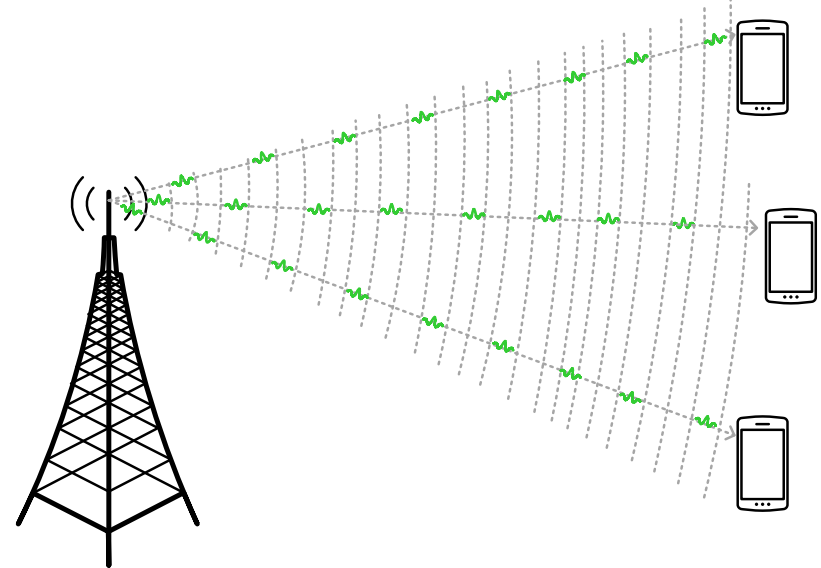
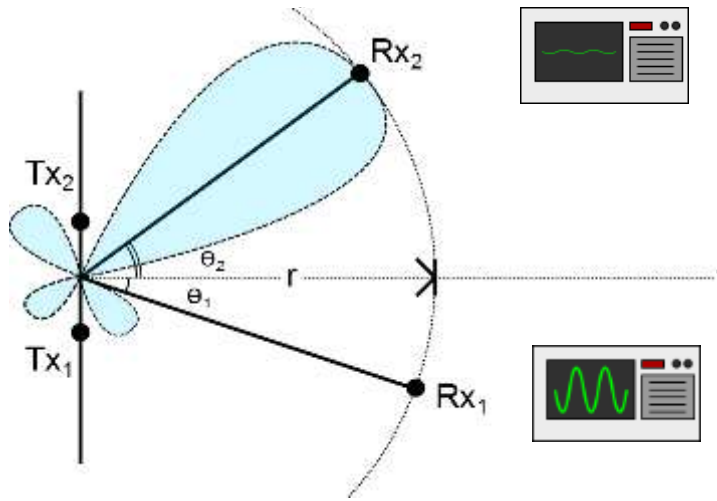
Kallfass et al., *IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology*, vol.1, 2011.

# Bsp: 100 Gbit/s Mobilverbindung – 240 GHz



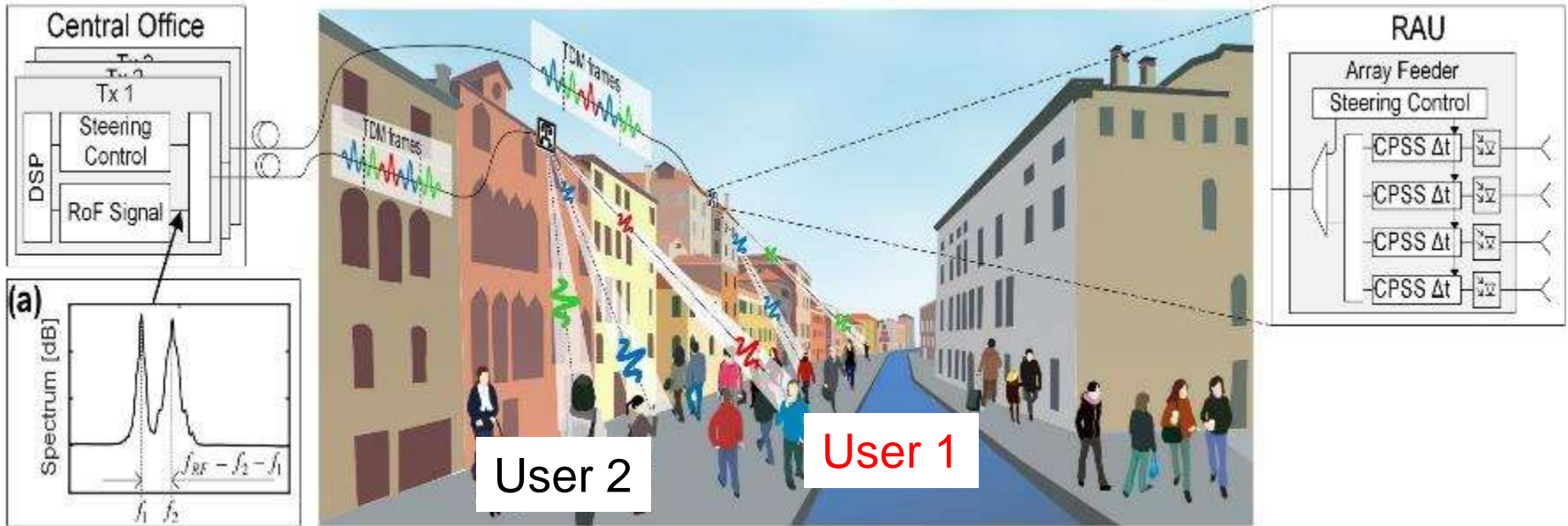
ETH/KIT: Koenig, S., et al., Nature Photonics, 2013. 7(12): p. 977-981.

# Mehr Leistung beim Empfänger durch Strahl lenkung



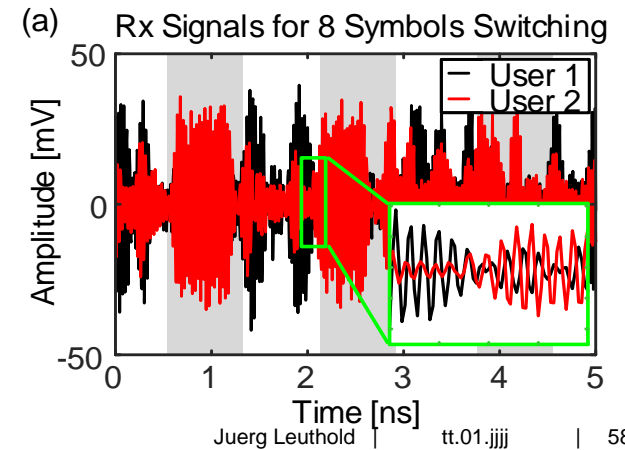
- Die Energie wird dahin gelenkt, wo sie gebraucht wird
- Mehr Energie beim Teilnehmer
  - Weniger Strahlenbelastung
  - Mehr Teilnehmer können gleichzeitig bedient werden

# Bsp: Strahlenlenkung



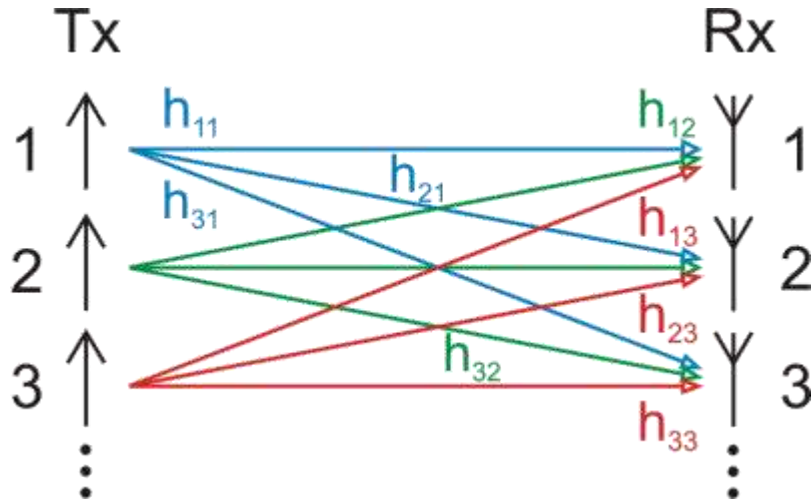
Experiment: 2 Teilnehmer - verschiedene Standorte  
 Jeder erhält 5 Gbit/s

ETH: R. Bonjour, Journal of Quantum Electronics, to be published



## Trend zu “Massive MIMO”

- MIMO=Multiple Input Multiple Output



Idea:

3 Tx send at the same frequency but from a different location.

3 Rx receive and exchange information.

Since signal from antenna 1 is received with a time delay in antenna 1, 2 and 3 one can distinguish the information.

# Mehr Antennen durch “Massive MIMO”

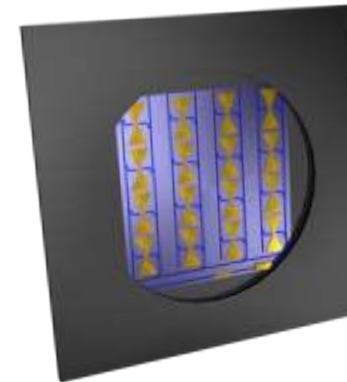
96 Antennen @ 2.4 GHz



10 Teilnehmer können gleichzeitig bedient werden.

64 Antennen @ 240 GHz

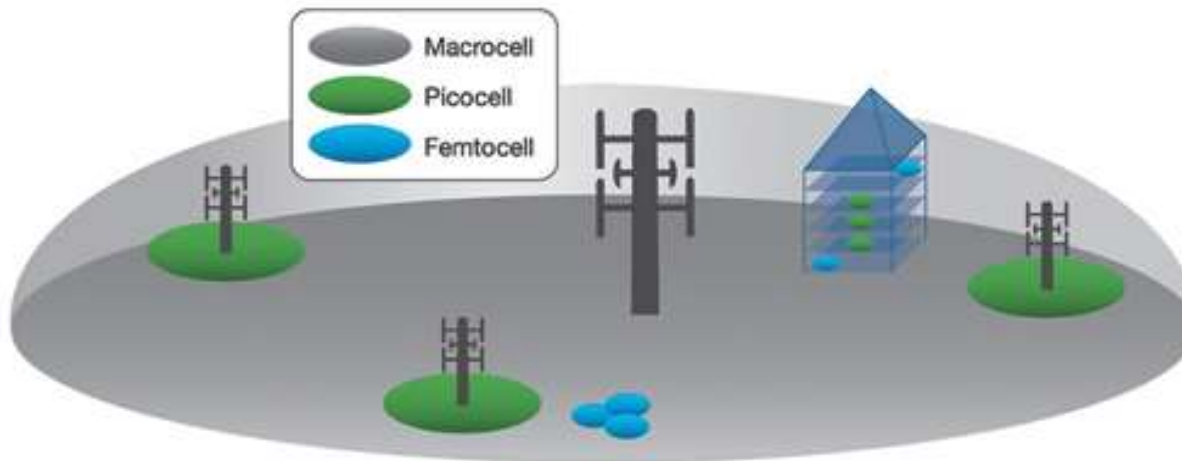
Entwicklung  
→



[MobiCom '13](#) Proceedings of the 19th annual international conference on Mobile computing & networking

# Trend zu kleineren Zellen für mehr Antennen

- Idea: Shorter distance  $\rightarrow$  More power  
(to compensate for higher frequency band losses)



# Inhalt

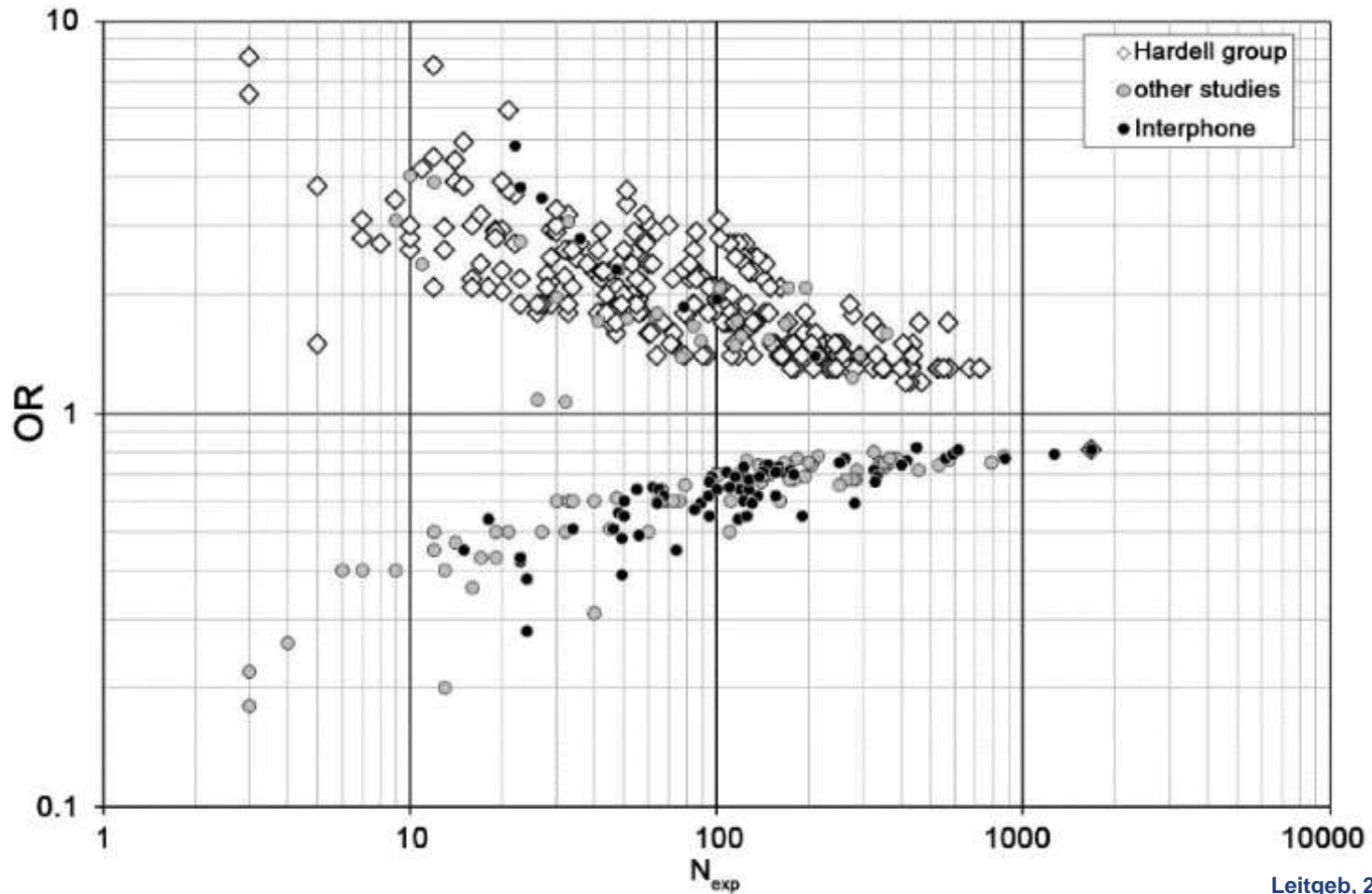
Die Trends

Die Infrastruktur – die Hardware hinter dem Erfolg!

Die Physik – setzt sie dem Wachstum Grenzen?

Der Mensch – setzt er dem Wachstum Grenzen?

# Gesundheit: Strahlenbelastung und Gehirntumor



Quelle: Forschungsstiftung Strom Mobilkommunikation (FSM); ETH Zürich

# Missbrauch - Cybermobbing



Amanda Todd (15)

Kompromitierendes Bild gelangt ins Internet.

Das Bild wird herumgereicht. An Familie, Freunde und Mitschüler..

Sie wird es nicht mehr los... und geht.

# Sicherheit

- Hacker übernehmen Kontrolle über Auto



21. Juli 2015

Grösste Gefahr: Fehlendes Sicherheitsbewusstsein  
bei Herstellern und Kunden!

## Produkte in Form von Daten – 3D Drucken

Wiki Weapon Project: CAD-Dateien zum 3D-Drucken einer Waffe namens Liberator jetzt im Netz.



Nur ein Bolzen ist aus Metall – damit ist die Waffe detektierbar.

Notwendig wäre dieser nicht.

NZZ, 3. Mai 2013

# Staat beobachtet - Interesse an Sicherheit/Steuern – versus eigene Sicherheit & Privatsphäre



Alle Telekom Knoten müssen eine Schnittstelle zum Abhören per Fernüberwachung haben.

In Deutschland hat der Staat vollen online Zugriff auf alle Bankkonten.

- ist das eine gute Lösung?
- wenn der Staat mithöhrt, wer dann noch?

**Bsp. England:** Gemäss “Snowden” werden sämtliche Daten während 3 Tagen vorgehalten und via Datamining auf Stichworte abgesucht. Verbindungsdaten sollen 30 Tage gespeichert sein.

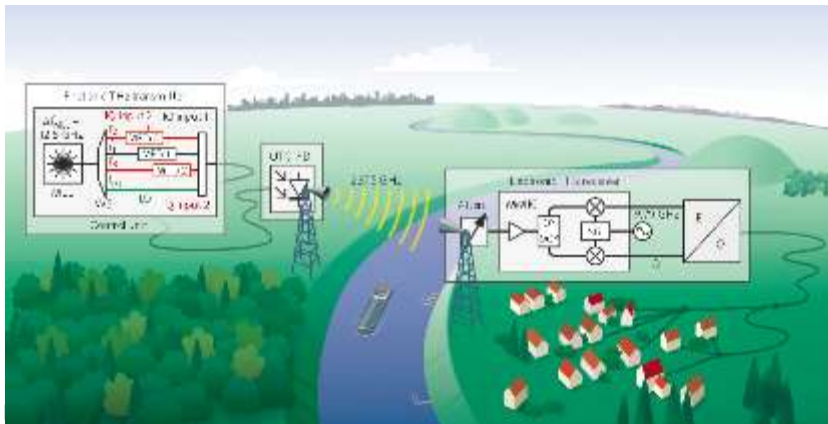
# Private hinterlegen

The image shows a screenshot of a Facebook profile for Dr. Sanjay Gupta. The profile includes a cover photo, a profile picture, and a bio. The bio text is partially obscured by a diagonal watermark that reads "Korrekte Infos?". Below the bio, there are statistics for tweets (50,187), following (7,012), and followers (1,903,328). A "Follow" button is visible. On the left side, there is a menu with options like "Info", "Friend Activity", "Related Posts", and "Wikipedia". Below the menu, it says "1,153 like this". In the main content area, there is a tweet from "The Associated Press @AP" with the text "Breaking: Two Explosions in the White House and ... Obama is injured". A diagonal watermark "Falsche Infos" is overlaid on the tweet. The overall layout is typical of a Facebook profile page.

Alles mit dem Ziel reich zu werden.

## Schlussfolgerung

- Um die Märkte der Zukunft zu verstehen, muss man die Bandbreite erahnen, welche wir in 10 Jahren haben werden.
- Die Märkte der Zukunft, die Lebensqualität, der Sozialstaat,... setzt Kommunikation als Infrastruktur voraus.
- Die Physik setzt der Kommunikation “noch” keine Grenzen  
Die Herausforderung an die Wissenschaft:
  - die Hardware, Software & Netze der Zukunft zu erfinden
- Die Herausforderung an die Gesellschaft:
  - Gesetzliche & regulatorische Anpassungen vornehmen, selbst wenn der Nutzer noch keinen Nutzen sieht.



**Danke!**