



Schaltungsentwicklung **Vom Basteln zur Wissenschaft**

Prof. Dr.-Ing. Michael Möller
Lehrstuhl für
Elektronik und Schaltungstechnik

Beispiele für Elektronik?

Was ist Elektronik?

Was ist Elektronik?

- beispielhaft -

- Was mit **Strom, Spannung** und **Kabel und Platinen** mit **kleinen Bauelementen** wie **Transistoren, und Silizium-Chips**
- Das sind **Mikrokontroller** und **CPUs** und Teile, die daran angeschlossen werden wie **Displays, Motoren...**
- **Smartphone, Tablet, MP3 Player, Fernseher...**
- **Zahnbürste, Kühlschrank, Auto, IoT, IoE...**

Was ist Elektronik?

- soziologisch -

- Elektronik ist die **Basis** unseres **modernen Lebens** (Kommunikation, Unterhaltung, Wohnen, Gesundheit, Mobilität, Produktion, Vernetzung ...)

Was ist Elektronik?

- sensorisch -

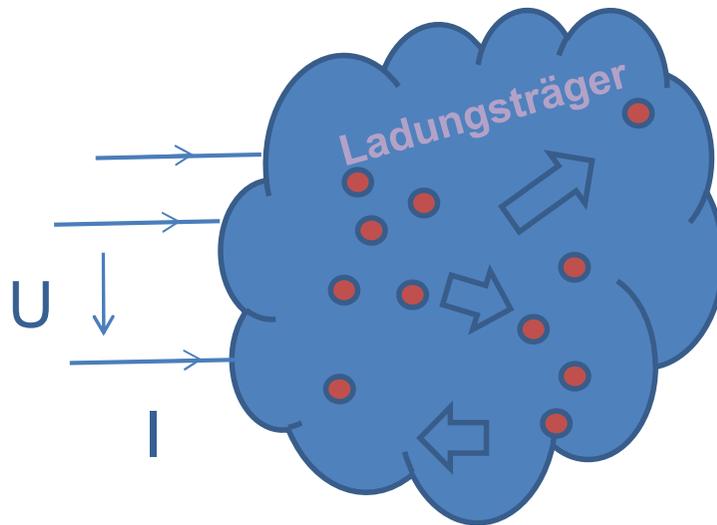
- Oft **warm**
- Kann **leuchten**
- Unsichtbar

Was ist **Elektronik**?

- physikalisch -

- Elektronik, beinhaltet **elektronische Bauelemente mit elektrischen Anschlüssen**, an denen **Spannungen und Ströme gezielt** mit den **Ladungsträgern (Elektronen/Moleküle...)** in den Bauelementen **interagieren**.

Elektronische Bauelemente haben elektrisch leitende Anschlüsse



Wechselwirkung  mit

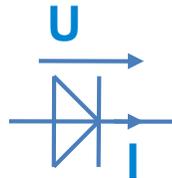
- Spannungen und Strömen
- elektromagnetische Feldern
- Kraft/Druck
- Temperatur
- Licht
- umgebenden Medien
-

Der jeweilige Zusammenhang zwischen Spannungen und Strömen an einem Bauelement bestimmt die **Funktion**.

Elektronische Bauelemente

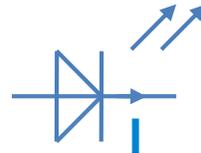
Beispiele

- Diode



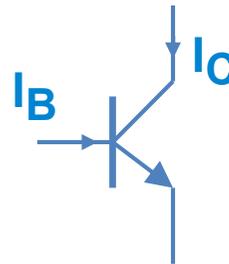
Elektronen (Strom I) fließen nur wenn U in Vorwärtsrichtung gepolt wird

- Leuchtdiode



Elektronen geben Energie durch Strahlung (Licht) ab

- Transistor



Kleiner Elektronenstrom I_B steuert einen großen Strom I_C

- . . . Solarzelle, Hall-/ Temperatursensor, Peltier-Element, Thyristor, FET, IGBT, OLED, . . .

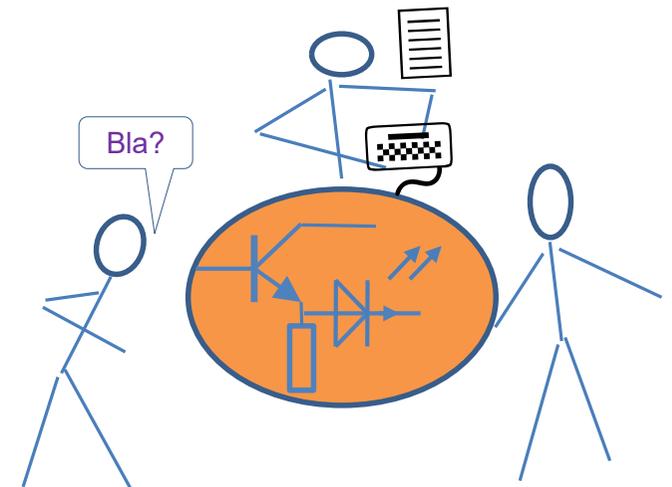
Was ist **Elektronik**?

- technisch -

- Eine zielführende **Verschaltung** (Verknüpfung) von **elektronischen Bauelementen**,

die über elektrisch/physikalische Schnittstellen mit der **durch Menschen erfahrbaren Welt interagieren**

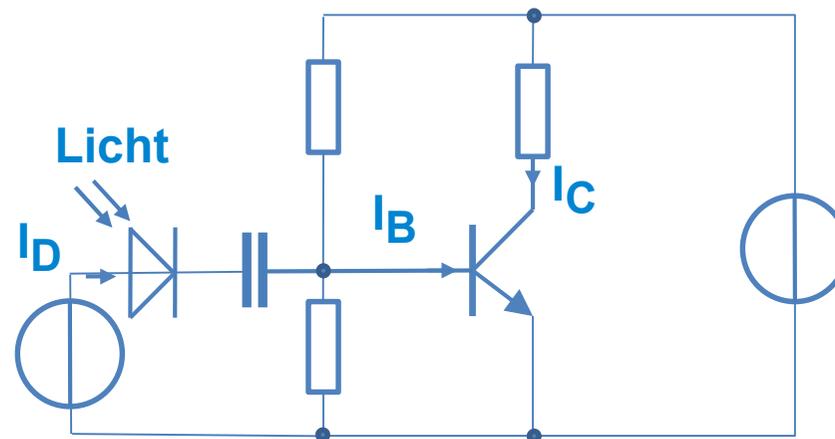
und so eine **Funktion** ausüben.



Verschaltung \Rightarrow Schaltungstechnik!

- Die **Schaltungstechnik** liefert die Methoden um Spannungen und Ströme an Bauelemente anzulegen bzw. auszulesen
- Die **elektronischen Bauelemente** werden dazu mit anderen Bauelementen **in geeigneter Weise verschaltet** (verbunden).

Beispiel einer einfachen Schaltung zur opto-elektrischen Wandlung und Verstärkung



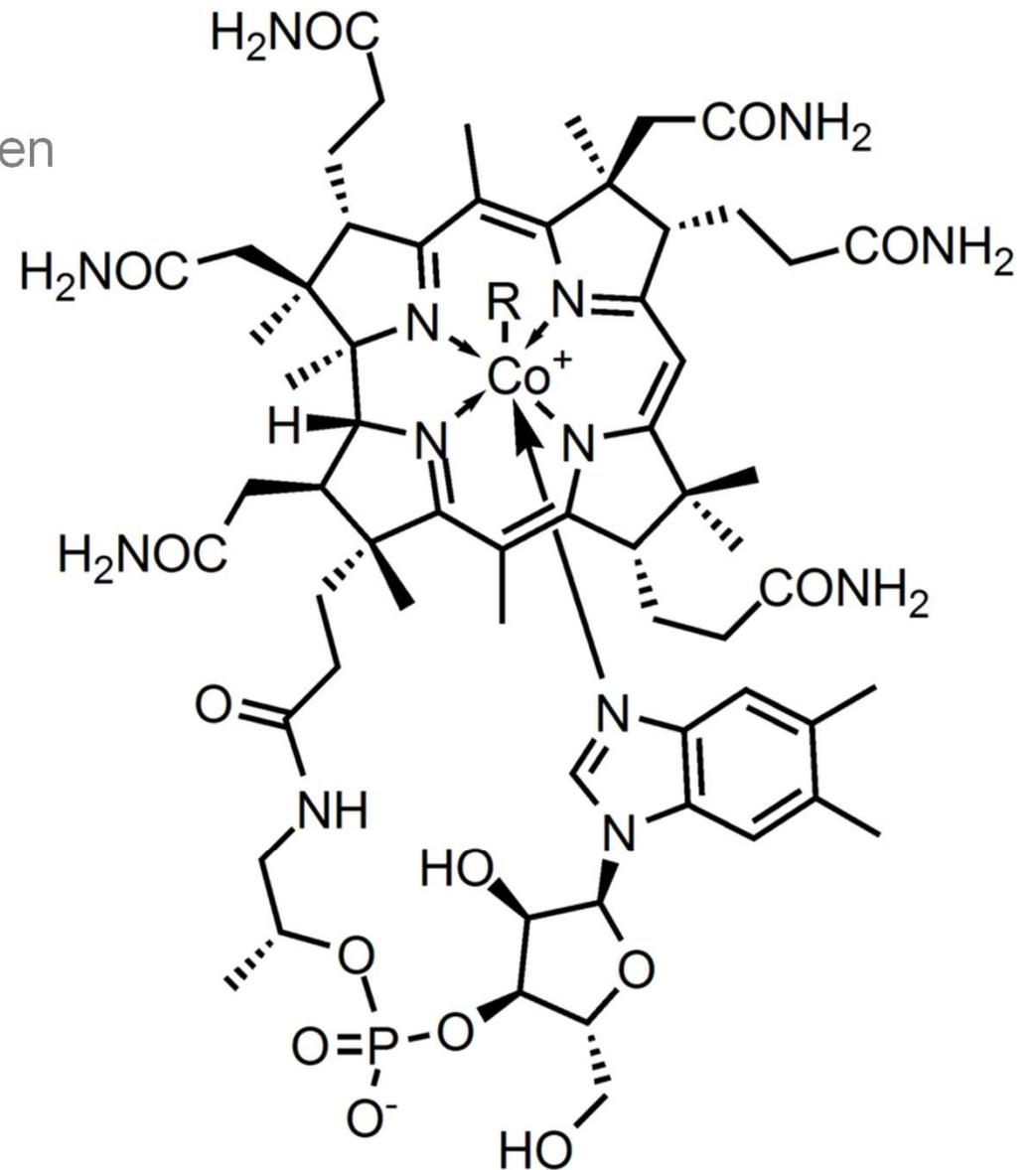
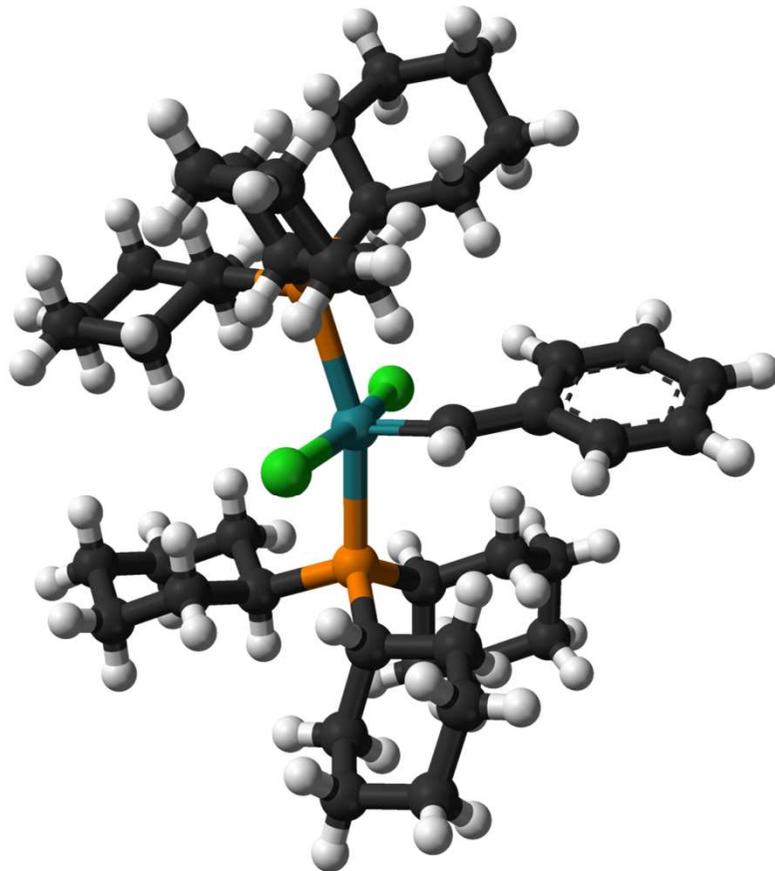
Angepasste Sprachen

Für **mathematische** Aufgaben

$$\begin{aligned}
 \left(\vec{\sigma} \cdot \left[\vec{p} + \frac{e}{c} \vec{A}(\vec{r}, t) \right] \right)^2 &= \sigma_i \sigma_j \left(p_i p_j + \frac{e^2}{c^2} A_i A_j + \frac{e}{c} (p_i A_j + A_i p_j) \right) \\
 &= \frac{1}{2} (\sigma_i \sigma_j + \sigma_j \sigma_i) \left(p_i p_j + \frac{e^2}{c^2} A_i A_j \right) + \frac{e}{c} \sigma_i \sigma_j \left(A_j p_i + A_i p_j + \frac{\hbar}{i} \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \right) \\
 &= \delta_{ij} \left(p_i p_j + \frac{e^2}{c^2} A_i A_j \right) + \frac{e}{c} (\sigma_i \sigma_j A_j p_i + \sigma_j \sigma_i A_j p_i) + \frac{e \hbar}{i c} \sigma_i \sigma_j \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \\
 &= p^2 + \frac{e^2}{c^2} A^2 + \frac{e}{c} \{ \sigma_i, \sigma_j \} A_j p_i + \frac{e \hbar}{i c} \frac{1}{2} (\sigma_i \sigma_j + \sigma_i \sigma_j) \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \\
 &= p^2 + \frac{e^2}{c^2} A^2 + \frac{e}{c} 2 \delta_{ij} A_j p_i + \frac{e \hbar}{i c} \frac{1}{2} (\sigma_i \sigma_j - \sigma_j \sigma_i + 2 \delta_{ij}) \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \\
 &= p^2 + \frac{e^2}{c^2} A^2 + \frac{2e}{c} \vec{A} \cdot \vec{p} + \frac{e \hbar}{i c} (i \epsilon_{ijk} \sigma_k + \delta_{ij}) \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \\
 &= p^2 + \frac{e^2}{c^2} A^2 + \frac{2e}{c} \vec{A} \cdot \vec{p} + \frac{e \hbar}{i c} i \epsilon_{ijk} \sigma_k \frac{\partial A_j}{\partial x_i} \\
 &= p^2 + \frac{e^2}{c^2} A^2 + \frac{2e}{c} \vec{A} \cdot \vec{p} + \frac{e \hbar}{c} \vec{\sigma} \cdot \vec{B}
 \end{aligned}$$

Angepasste Sprachen

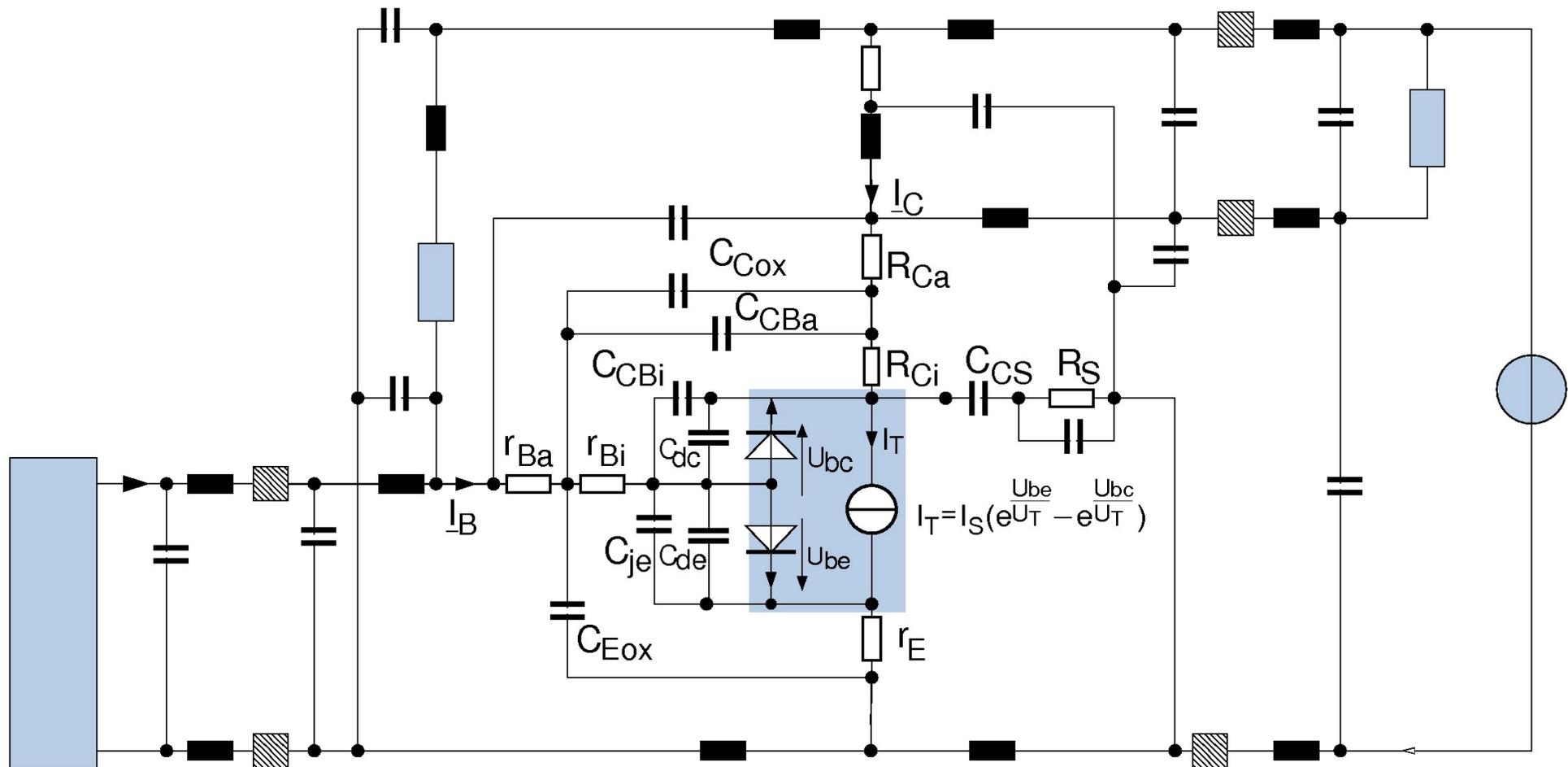
Für **chemische** Aufgaben



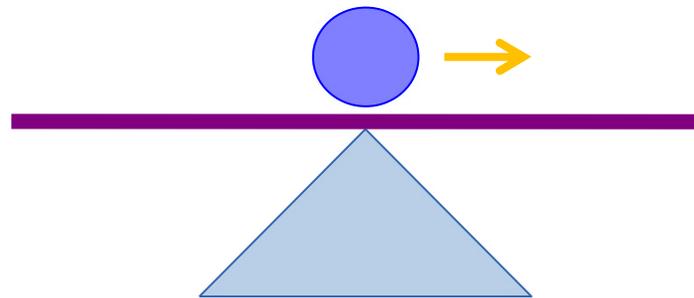
R = 5'-deoxyadenosyl, Me, OH, CN

Angepasste Sprachen

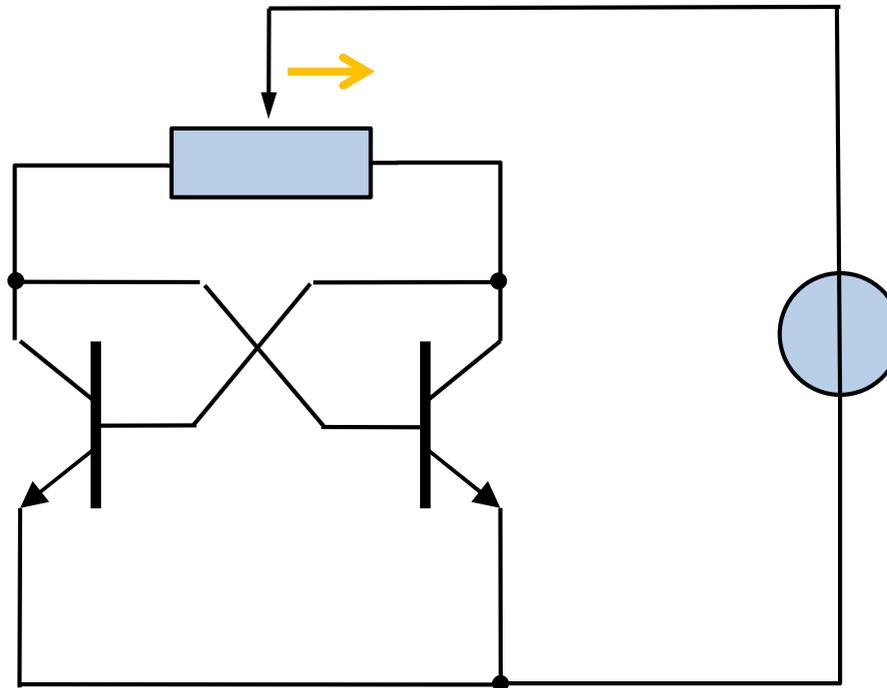
Für **schaltungstechnische** Aufgaben



„Mechanik ist einfach und praktisch!“



„Elektronik ist kompliziert und theoretisch!“



Einfache **Elektronik**?

- Komplexität der Verschaltungen geht vom Einzeltransistor bis zu mehreren **Milliarden** Transistoren auf einem Halbleiterchip.
- Für viele Anwendungen existieren Halbleiterchips (ICs) mit fertigen (Ver)schaltungen von Transistoren zur Ausführung von Standard-Funktionen **“Standard ICs“**

„OP-Amp, Mikrokontroller, FPGA, und so'n Zeug kann man einfach im WWW bestellen, is' billig und morgen da... kommt irgendwo aus China oder Taiwan ...
... einfach zusammenbauen, programmieren, fertig!“



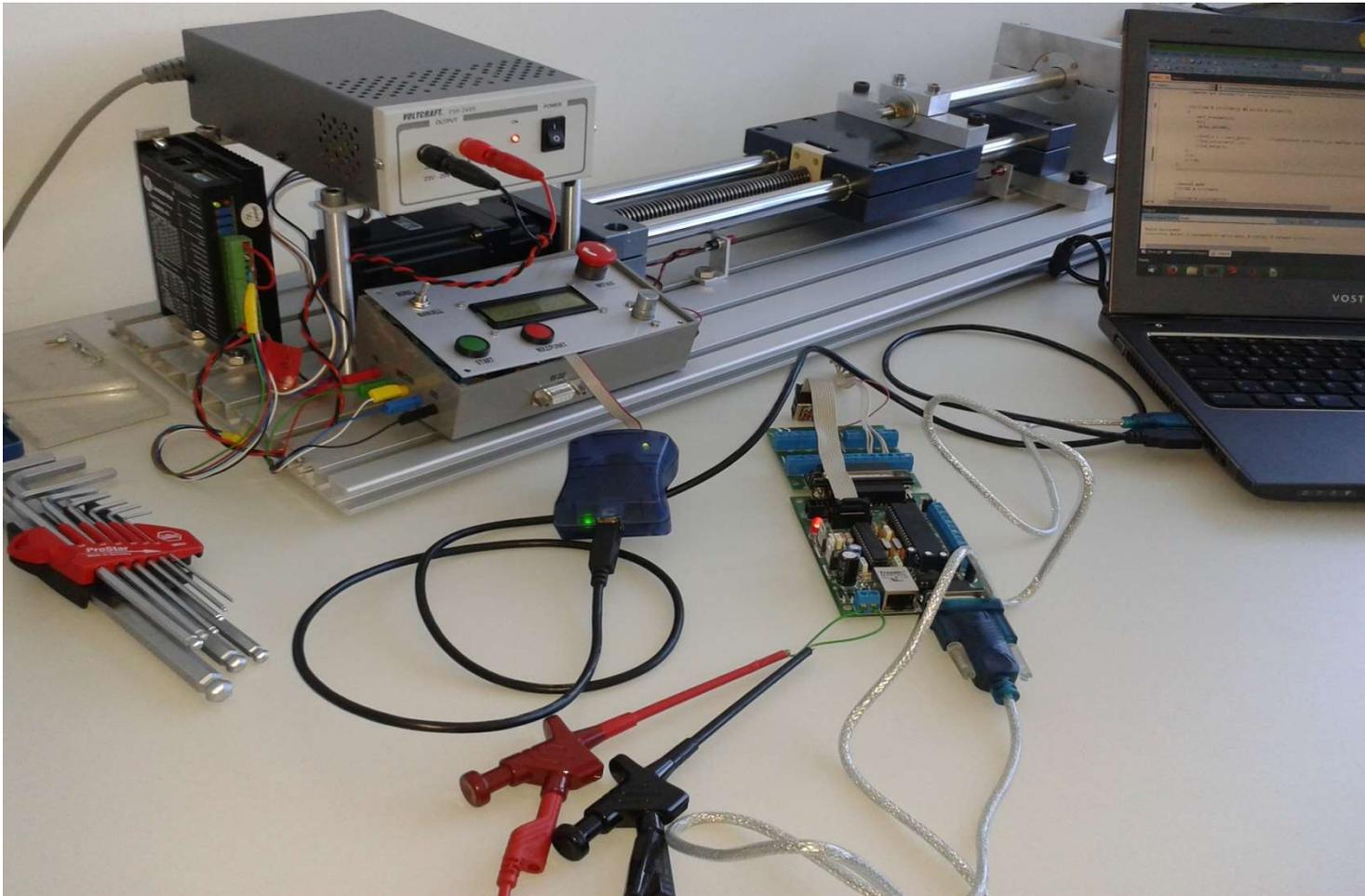
Zusammenbauen, programmieren, fertig!

?

Manchmal auch probieren und austauschen ...
am Ende wird es irgendwie “hingebastelt“ ...



Basteln mit Elektronik



Studierendenprojekt „Linearer Vorschub zur automatischen Kolbenpositionierung in einem Hydraulikzylinder“. (aus dem Industrieprojekt „Mikrowellensensorik“, Zema, Hydac)

Vom **Basteln** zur **Wissenschaft**

Basteln¹⁾

... sich an etwas **handwerklich oder technisch betätigen**,
was man anfertigen, verbessern, um- oder ausbauen will.

Wissenschaft²⁾

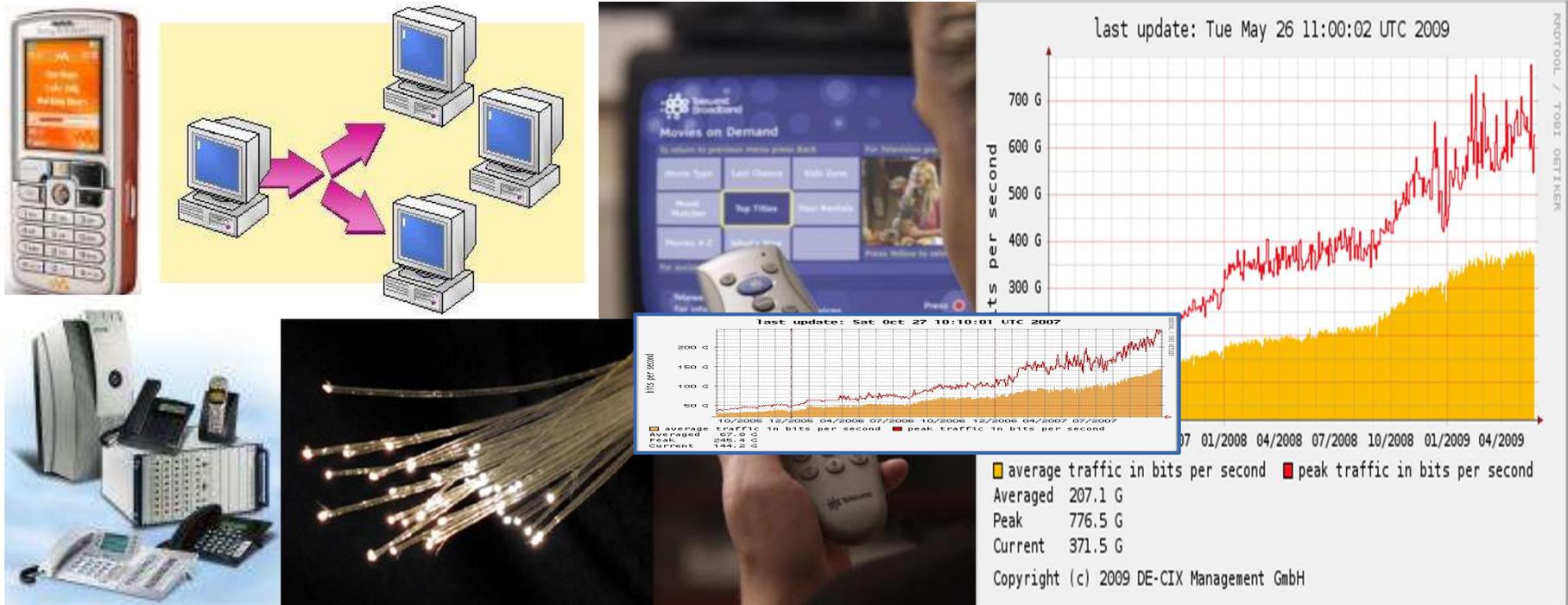
... **methodische Suche nach neuen Erkenntnissen** zur
Erweiterung des Wissens und Weitergabe durch die Lehre.

¹⁾ frei nach Duden, ²⁾ frei nach Wikipedia.

Fragen aus der Entwicklung an die Forschung

- Welche Schaltungen liefern mir die gewünschte **Funktion**?
- Wie kann ich die **Performance** meiner Schaltung verbessern?
- Wie kann ich die **Energieeffizienz** verbessern ?
- Wie kann ich **Ausbeute** und **Zuverlässigkeit** verbessern?
- Wie kann ich die **Kosten** senken?
- Es gibt (noch) **keine Schaltung** für meine Funktion:
 - Wie **erfinde** ich eine **neue Schaltung**?
 - Welche **Bauelemente** gibt es / kann ich entwickeln?
 - Wie muss ich sie **verschalten** (Schaltungstechnik)?
- Wo sind die **Grenzen** der (heutigen) Elektronik?
- Welche elektronischen Elemente kann es in **Zukunft** geben?
- ...

Forschung im Bereich Informations- und Kommunikationstechnik (ICT)



Grenzen der Machbarkeit erkunden und verschieben

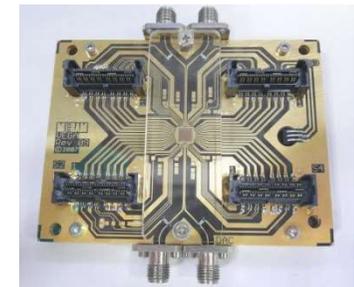
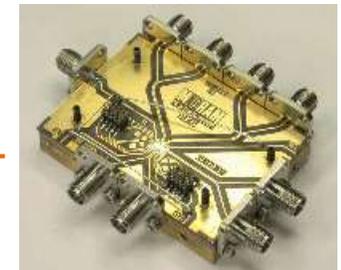
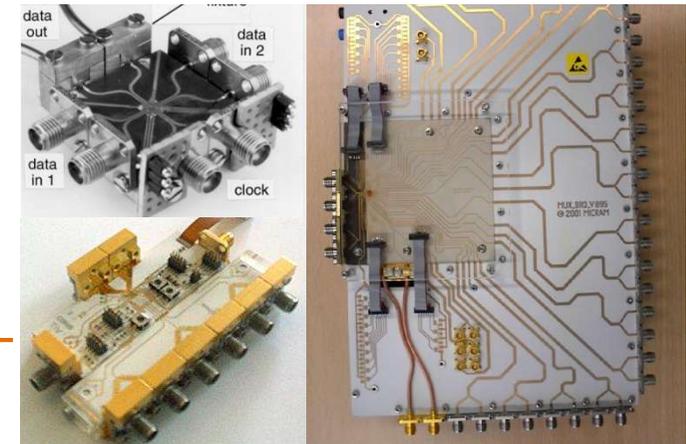
- 1991 World's 1st 30 Gb/s MUX*
- 1995 World's 1st 50 Gb/s MUX*

- 1997 World's 1st 60 Gb/s MUX / DEMUX chipset*
- 1998 World's 1st 50 Gb/s EAM driver MUX*
- 1999 World's 1st 40 Gb/s CDR & TIA & 1:2 DEMUX

- 2000 World's 1st 43.5 Gb/s fully integrated SONET CDR
- 2001 World's 1st 43.5 Gb/s SONET/SDH 16:1 MUX
- 2002 World's 1st Low power, SFI-5 compl. 43.5 Gb/s SerDes Chipset
- 2004 World's 1st fully integrated 87 Gb/s CDR & TIA & 1:2 DEMUX
- 2007 World's 1st 100 Gb/s fully integrated SiGe MUX, CDR & DEMUX

- 2008 World's 1st 30 GS/s 6 Bit DAC
- 2009 World's 1st 30 GS/s 6 Bit ADC
- 2013 World's 1st 64 GS/s 6 Bit DAC
- 2015 World's 1st 100 GS/s 6 Bit ADC

- 2017 World's 1st 140 Gb/s MUX
- 2018 World's 1st 128 GS/s 6 Bit DAC
- 2019 World's 1st 200 Gb/s MUX
- 2021 World's 1st 120 GS/s Analog MUX with Nyquist band ENoB > 4 bit



Schaltungsentwicklung aus
ingenieurwissenschaftlicher Sicht
an einem Beispiel aus der
Hochgeschwindigkeits-Elektronik

Ein Forschungs-Labor*

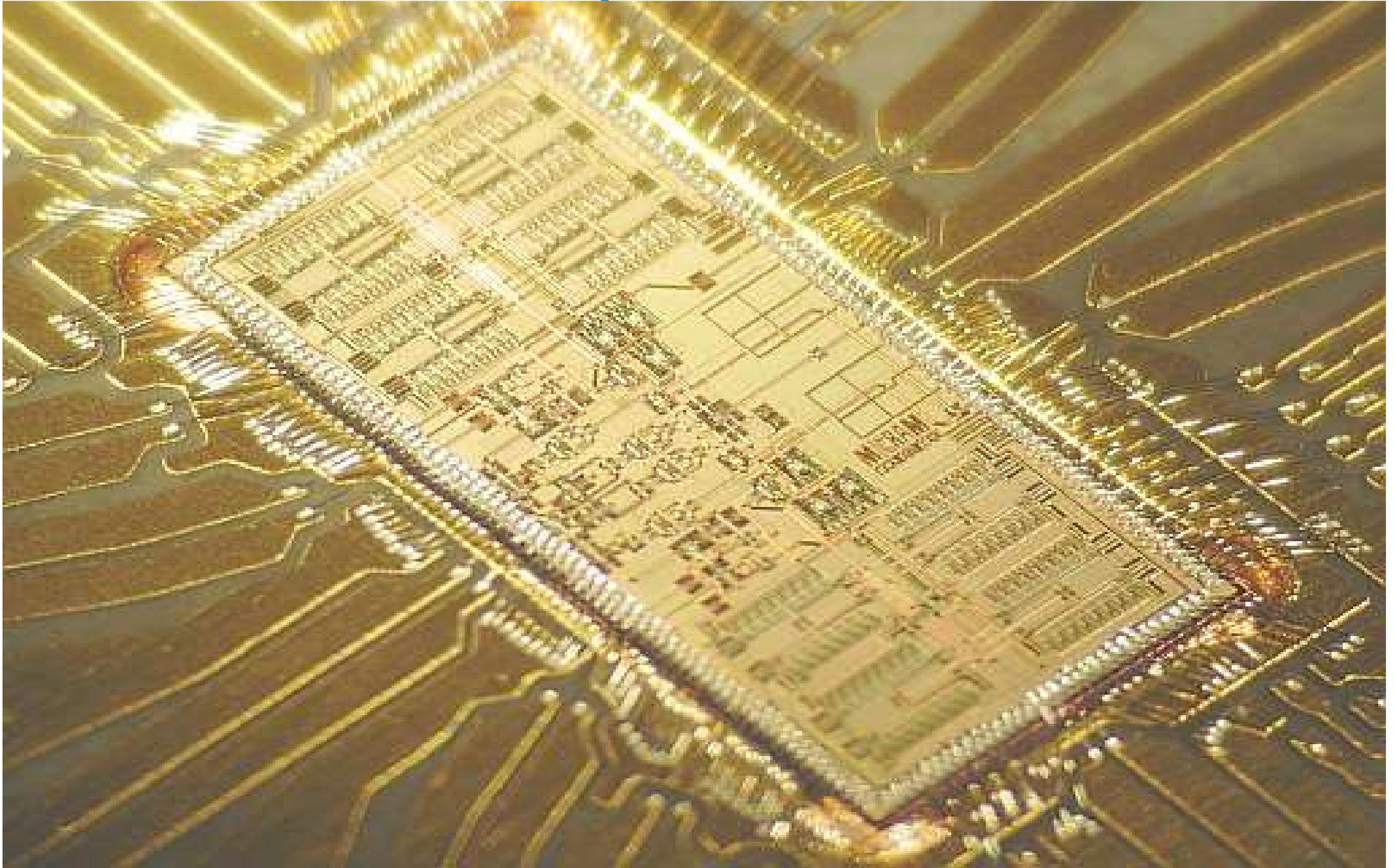


* Provisorisches Forschungslabor eines amerikanischen „Telekom Giganten“ am 24.07.2006.

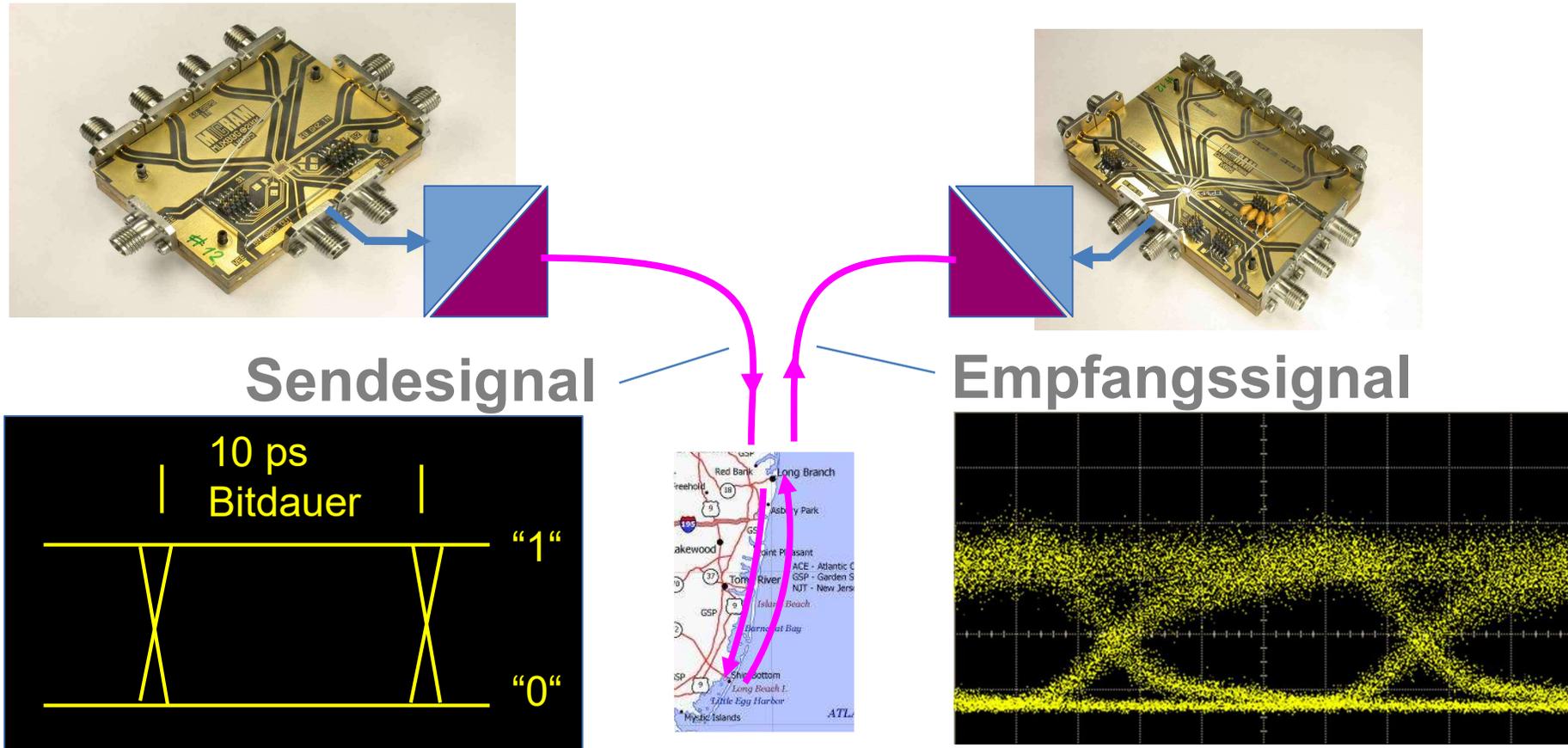
Zwei Kabel ...



Hochgeschwindigkeitselektronik als Schlüsselkomponenten

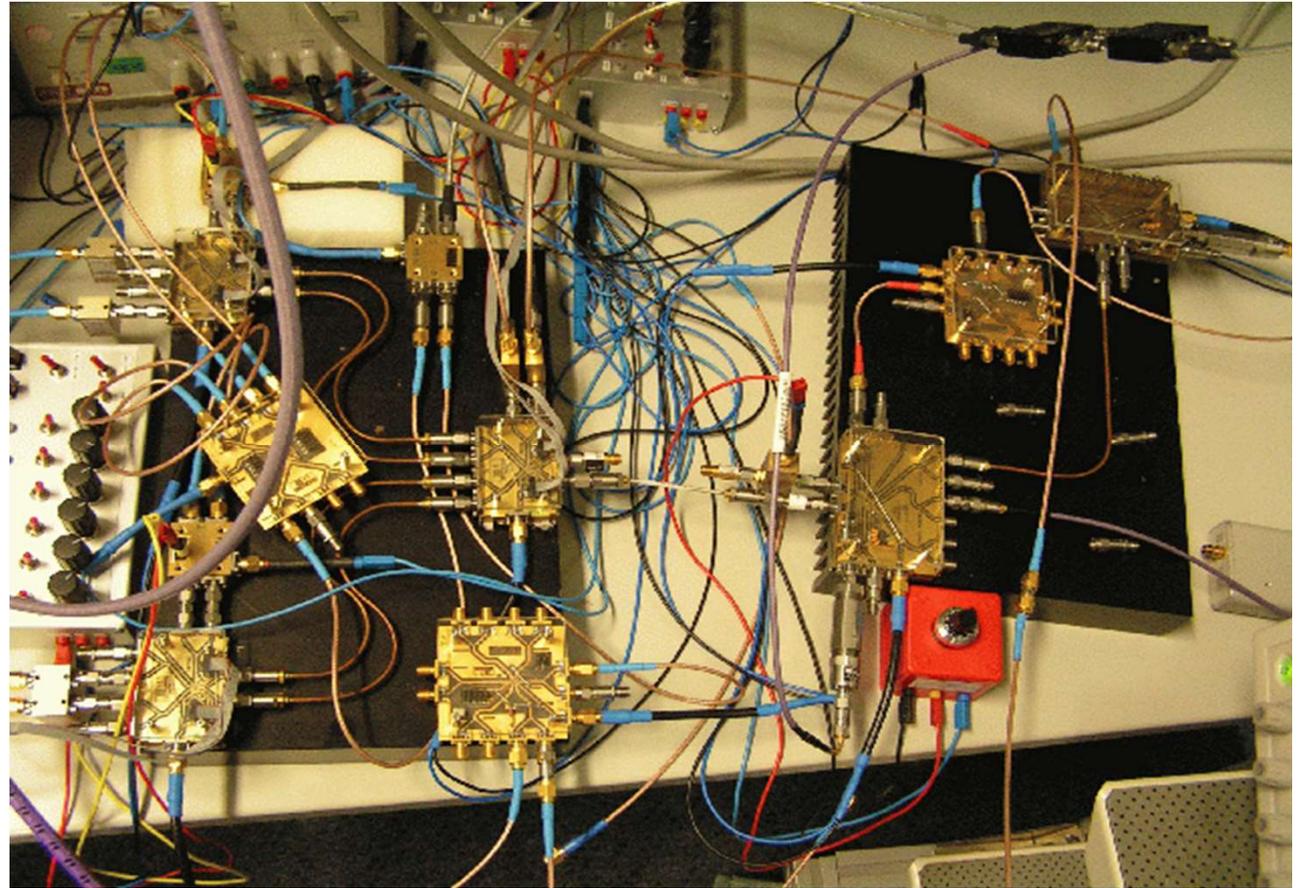
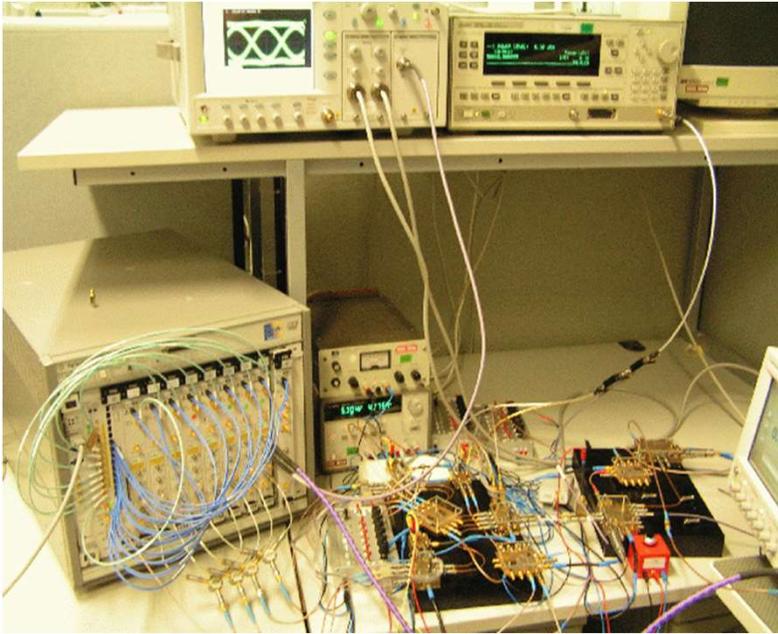


Konzept-Überlegung

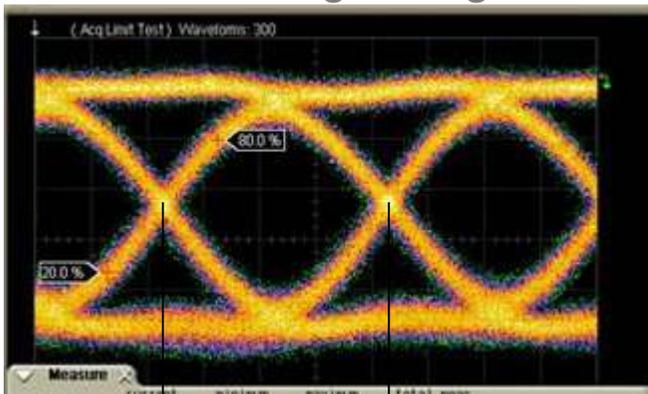


- Zeitabhängige, undefinierte „1/0“ Pegel und Wechsel.
- Adaptive Nachführung notwendig (μC geht nicht bei 10 ps!)
- Schaltungsentwicklung für adaptive Abtastung

Test der Hochgeschwindigkeits-Schaltungen



100 Gbit/s Augendiagramm



10 ps (d.h. 3 mm in Luft)

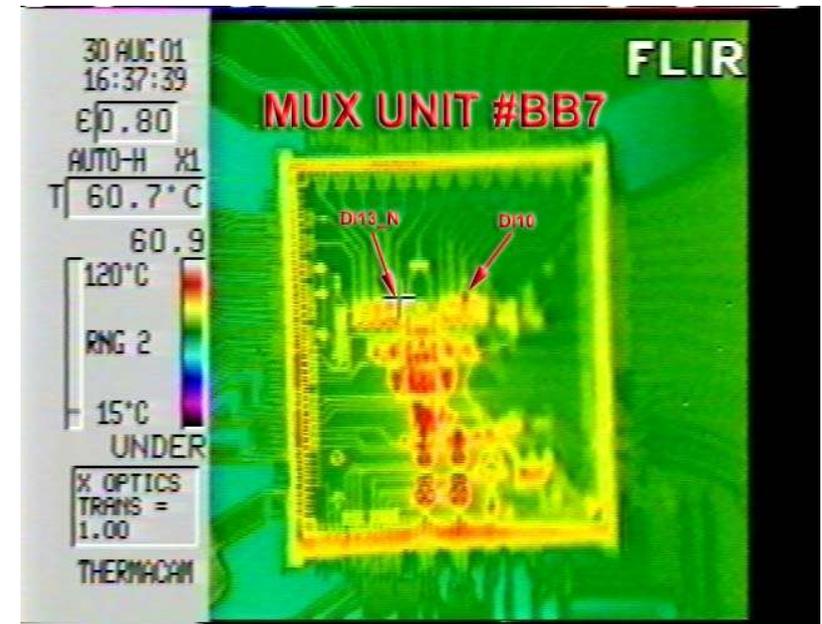
**Schnelle Messgeräte benötigt:
Henne-Ei Problem bei
Rekordgeschwindigkeiten!**

Entwärmung der Halbleiterchips

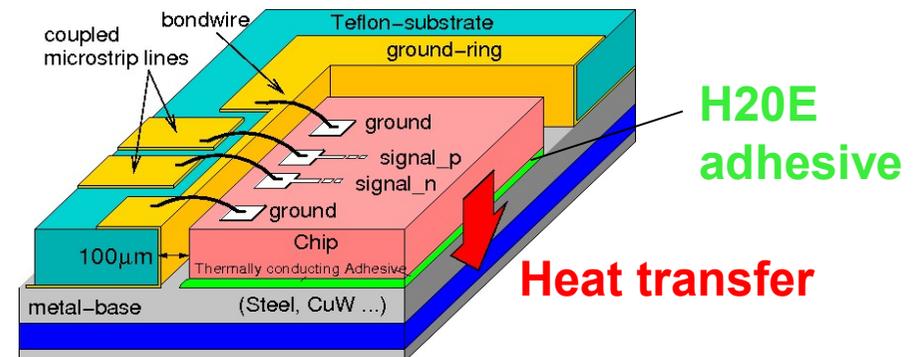
Vergleich der Verlustleistungsdichten

40 Gbit/s 16:1 Multiplexer - Chip
 $12 \text{ W} / (3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}) = 1 \text{ W/mm}^2$

Herdplatte mit 1000W:
 $1000 \text{ W} / (\pi (100 \text{ mm})^2) = 0,03 \text{ W/mm}^2$

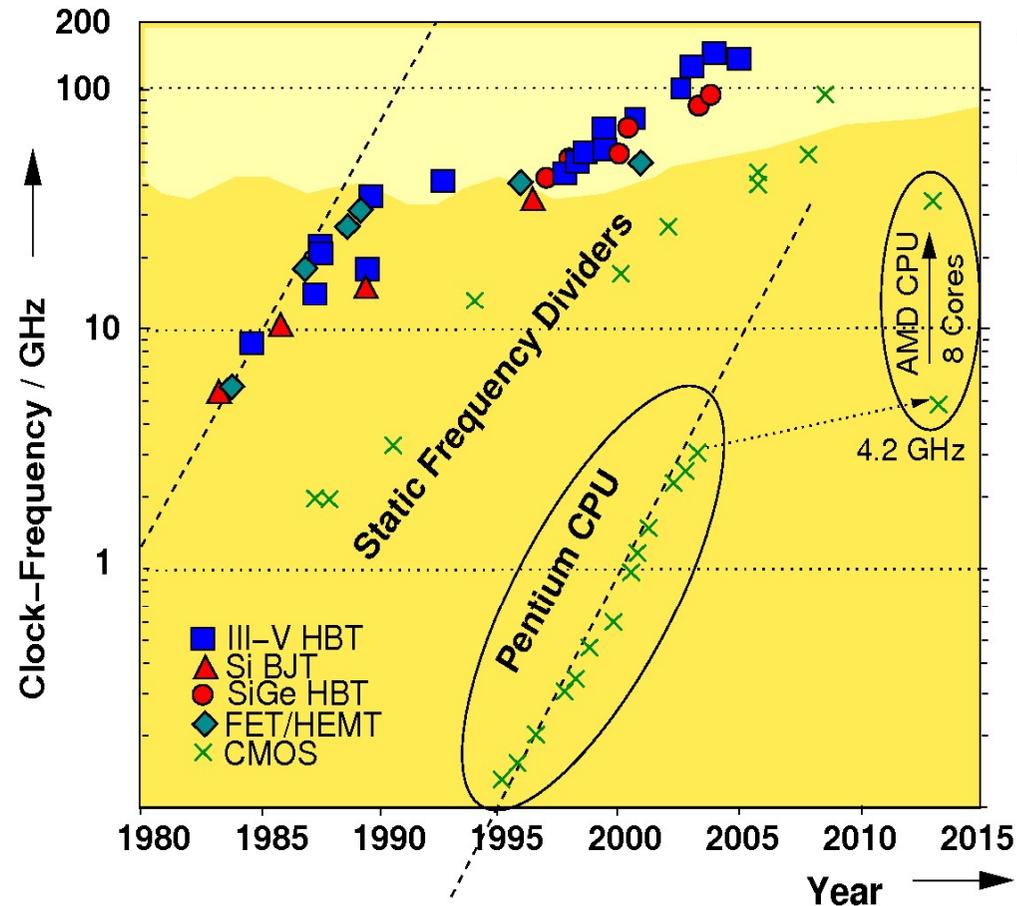
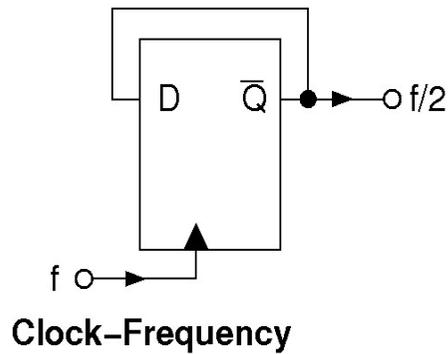


Spezielle Aufbautechnik für hohe
Verlustleistung notwendig!



Geschwindigkeitsgrenze

Test vehicle:
Static Frequency Divider

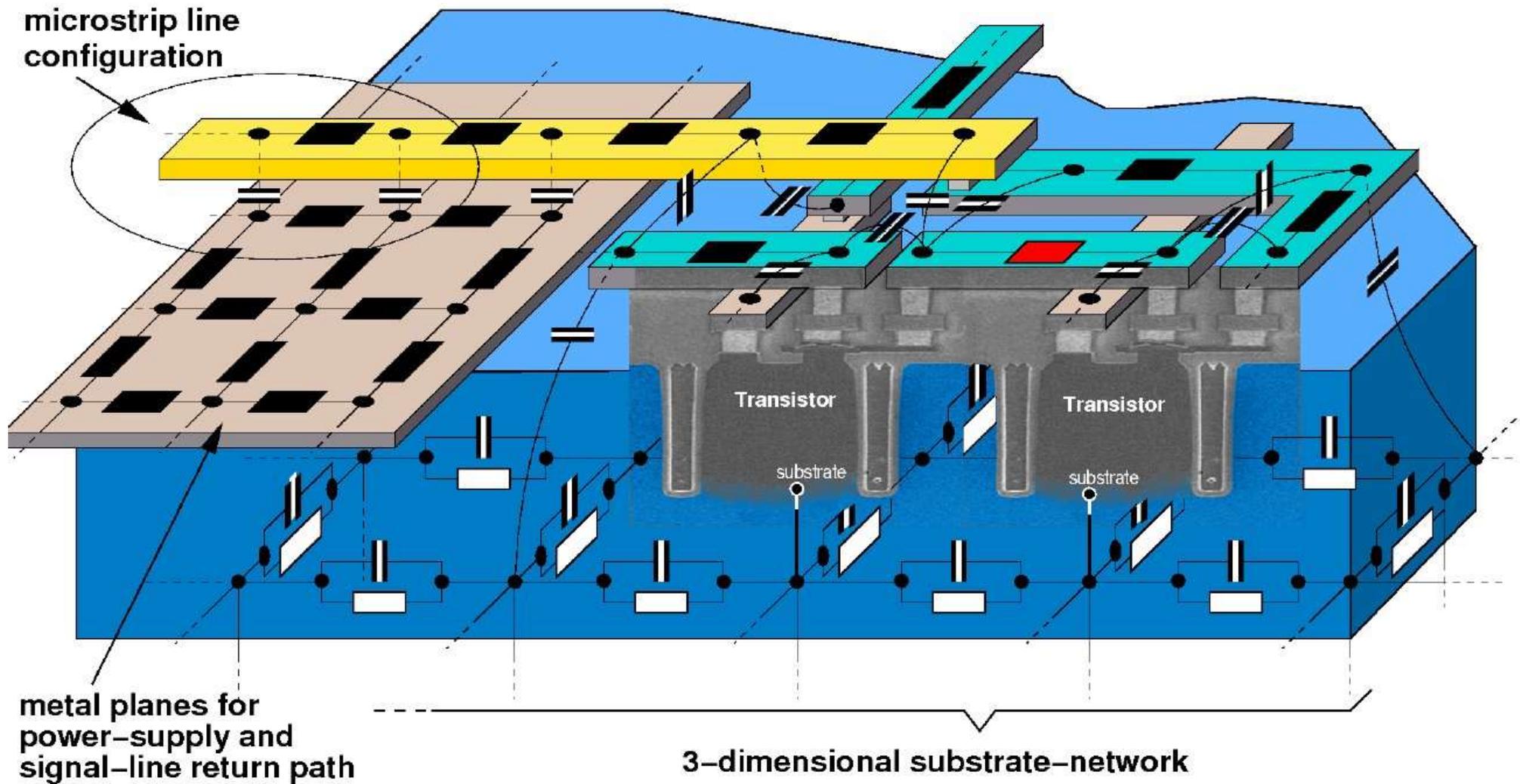


Today's operation area of
High-Speed Circuits

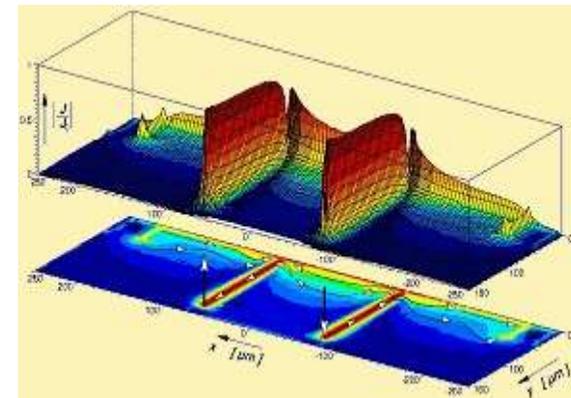
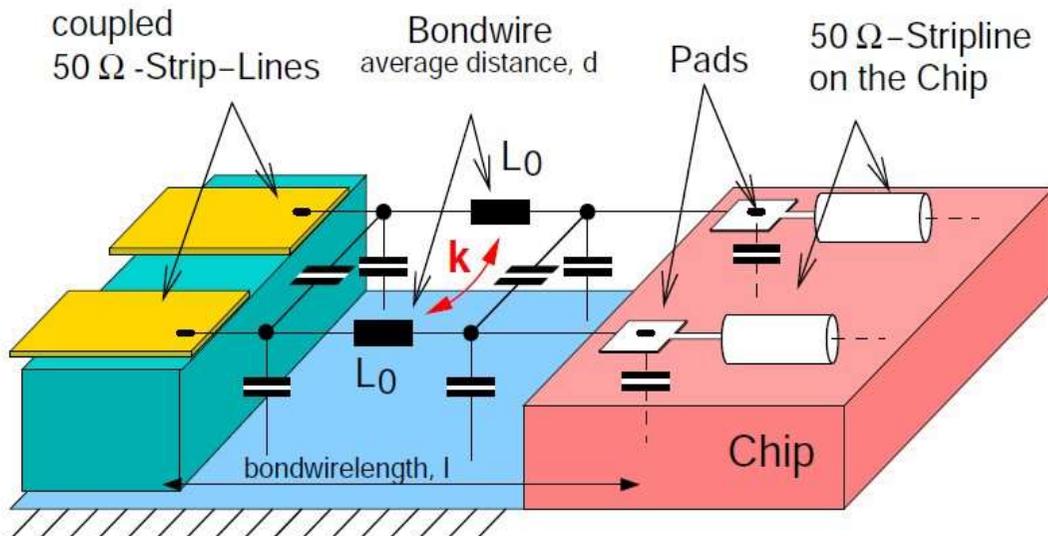
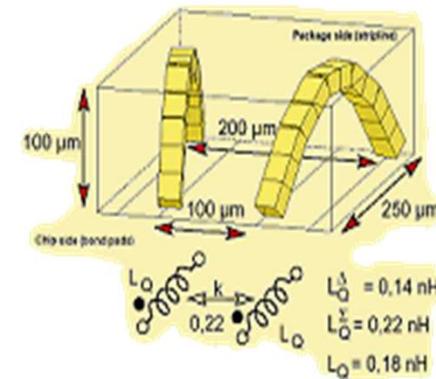
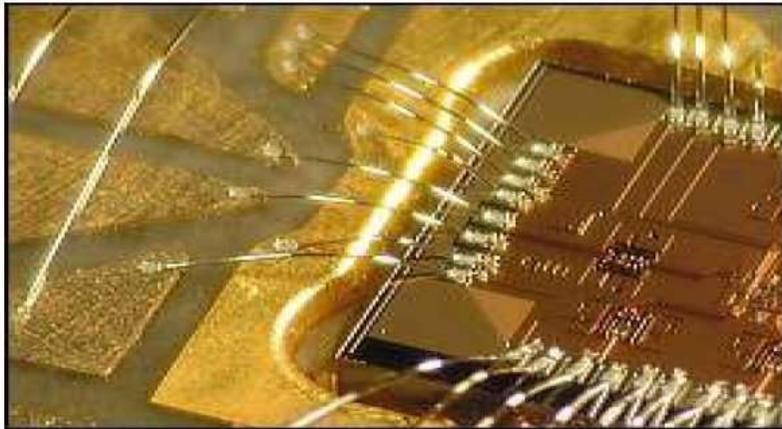
Moores Law:
double performance
(here perform. =: speed)
every 20 months

Geschwindigkeit wird begrenzt durch **nicht ideale Eigenschaften** der Bauelemente und deren Verschaltung.

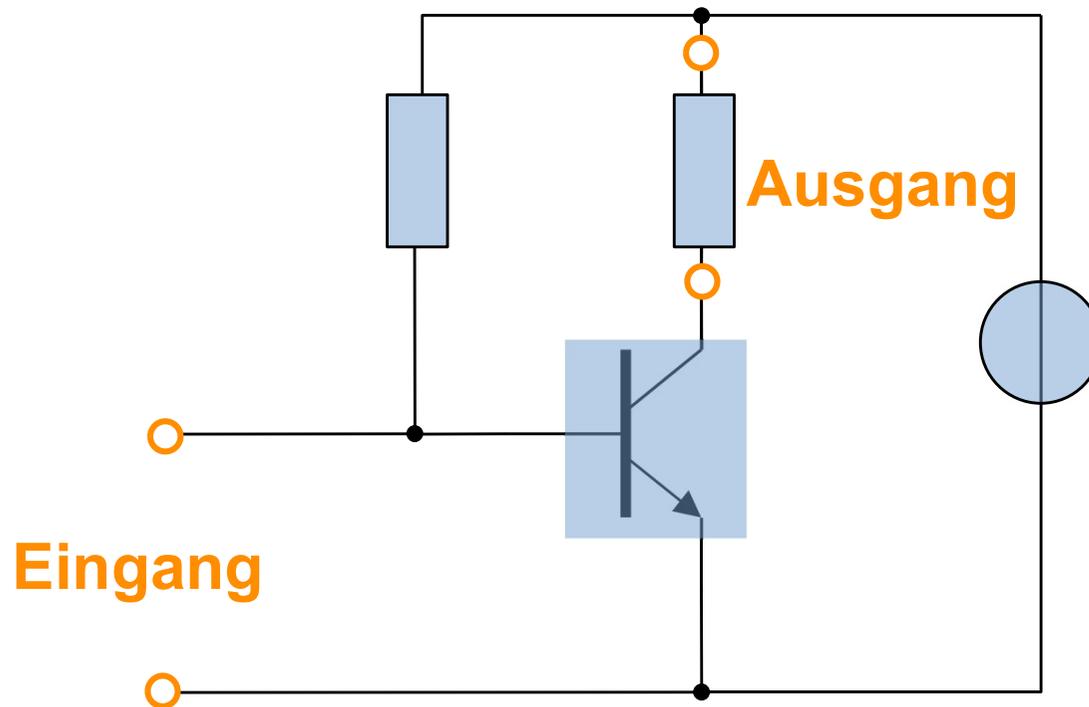
Modell für Verschaltung



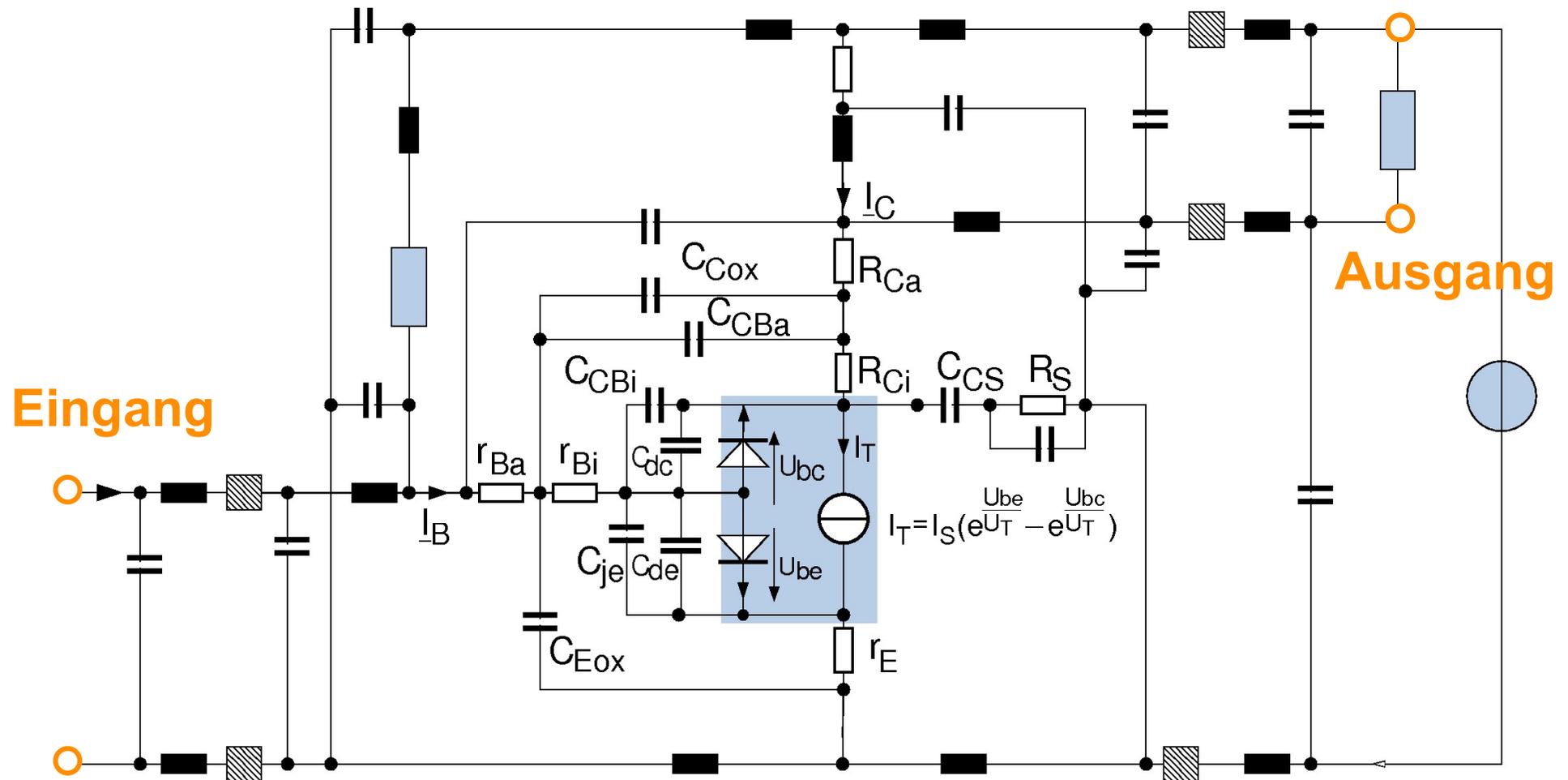
Modell für Bonddraht -Verbindung



Einfache Schaltung mit idealen Elementen (Modell für niedrige Datenraten)



Die einfache Schaltung bei hohen Datenraten



Parasitäre Elemente verschlechtern mit zunehmender Frequenz die Eigenschaften der Schaltung!

Forschungsziele

- Schaltung muss für **hohen Geschwindigkeit** und **viele (20-30) weitere Performance-Kriterien optimiert** werden.
- **Qualität** der Ergebnisse wird durch **nichtideale Eigenschaften** von Bauelementen und Verdrahtung beeinträchtigt.
- Häufig **gegenläufige** Anforderungen an die Optimierung der Eigenschaften.
- **Forschung:**
 - Ursachen für die Abhängigkeiten **entdecken**.
 - Abhängigkeit **verringern** (z.B. andere Schaltungstechnik).
 - Technologie **verbessern** (z.B. Halbleiter, Schaltungstechnik).
 - **Umsetzen** (z.B. neue Methoden, Demonstrator/Prototyp).

Zukünftige Elektronik-Themen

- Noch **schneller und komplexer**
- Noch **geringere Verlustleistung**
- **Mobil** und **vernetzt** überall
- **Neue Technologien** (Quanten-Informationssysteme, Memristoren Organische Elektronik ...)
- **Neue und interdisziplinäre Lösungsansätze**

Grundlagenwissen für wissenschaftliches Arbeiten

- **Wissen** über die verwendeten **Bauelemente**
→ Physikalische Grundlagen der Elektronik (3. Semester BA SE)
- **Wissen** zu **Schaltungstechniken**
→ Schaltungstechnik (4. Semester BA SE)
- **Wissen** zu **Methoden** der Ergebnis-Analyse
→ High-Frequency Engineering, High Speed Electronics (MA SE, „ICS“)
- **Fähigkeit** Erkenntnisse **zu kombinieren**
→ Phantasie, Intuition, Kreativität, ... ausprobieren in Projektpraktika

Elektronik im Bachelor-Studium

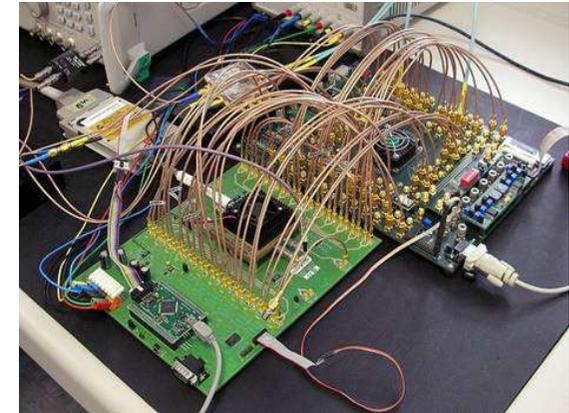
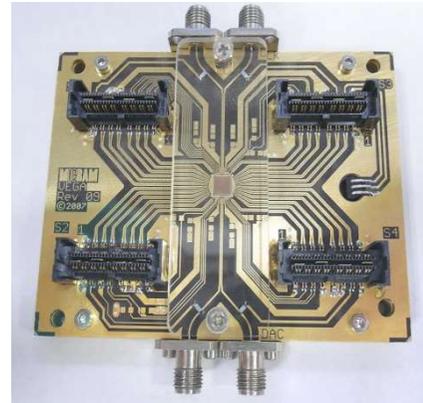
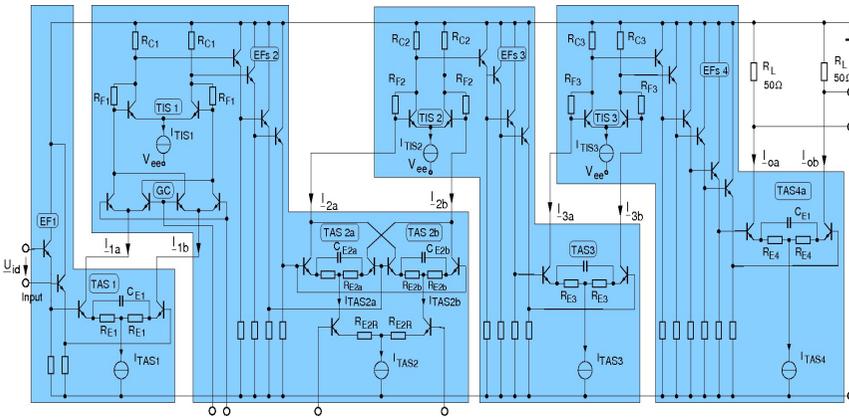
- geht von
 - 0% (Vertiefung Maschinenbau) bis
 - **100%** (Vertiefung Elektrotechnik)
- Vertiefung Elektrotechnik ist konform mit den Richtlinien des **deutschen Fakultätentages**
- Sie lernen die selben Grundlagen wie alle **Studierende der E-Technik** an deutschen Universitäten (München, Aachen, Dresden...)



**Das war ein
kleiner Einblick in die
Schaltungsentwicklung
vom Basteln zur Wissenschaft**

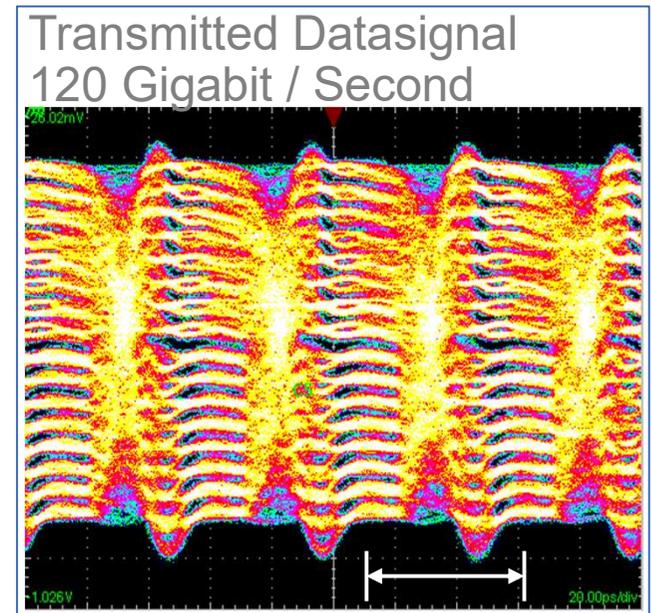
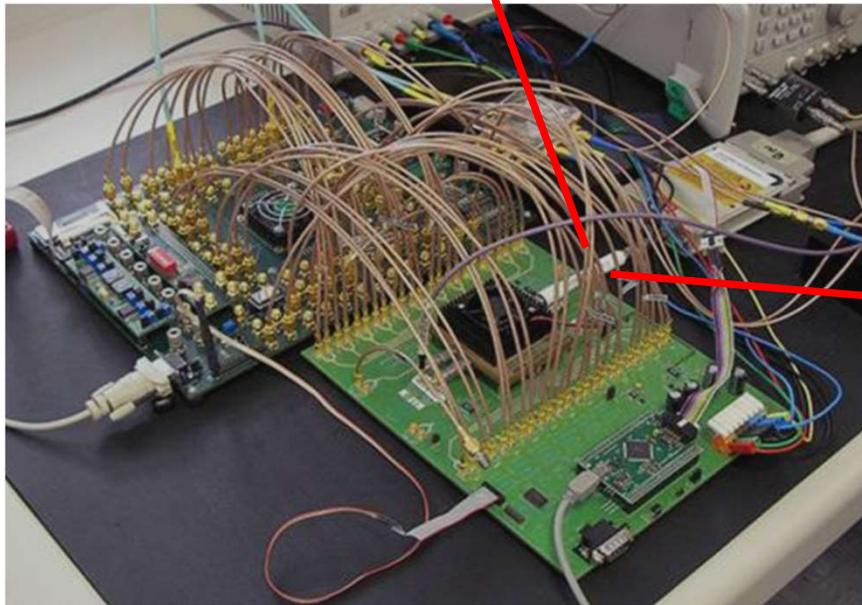
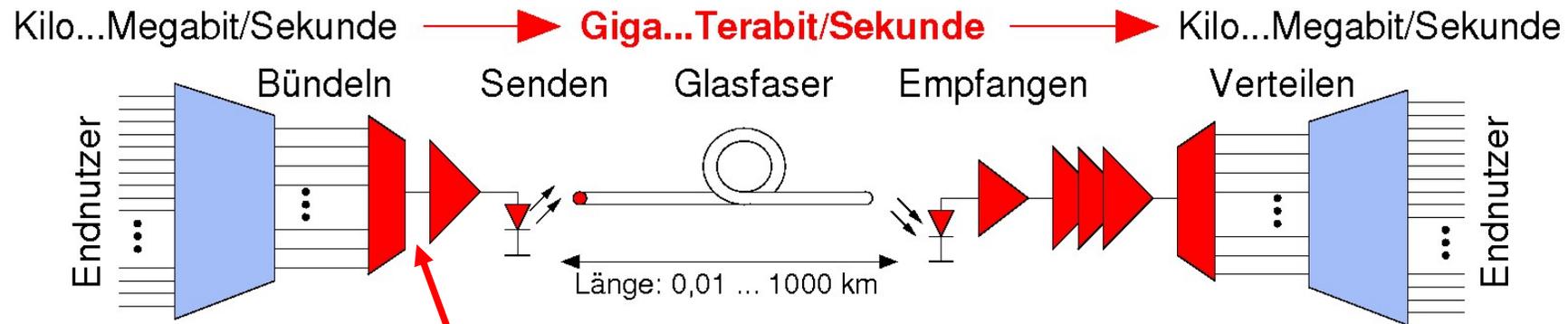
Datentransport-Netze der Zukunft

Schaltungsentwicklung → Prototypen → Evaluation



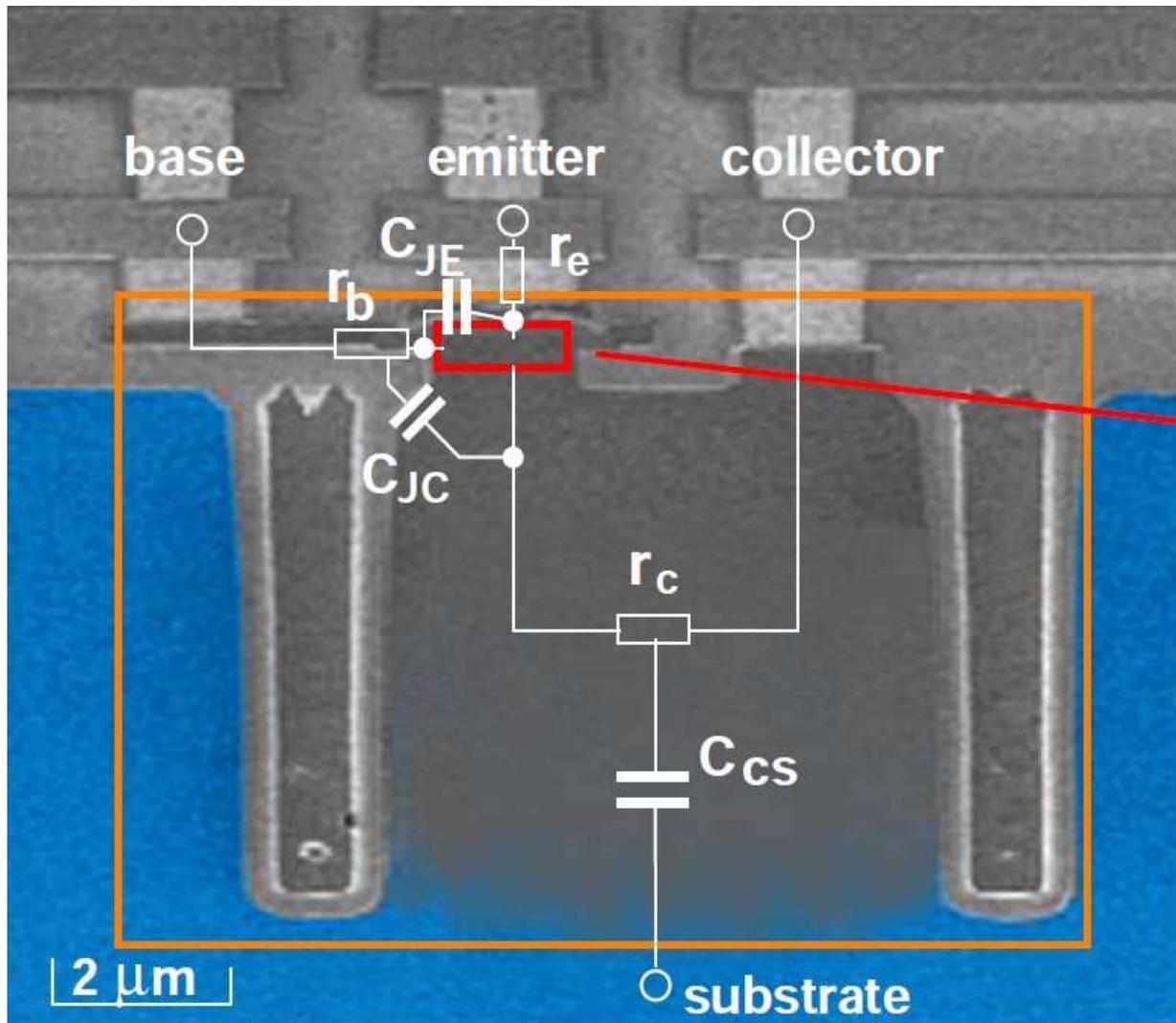
- Forschung: **Energy Efficient High Speed Electronics** for future Information and Communication Technology.
- EU Projekt „100GET“, „NGOA“, „RF2THzSiSoC“ Schnelle A/D- und D/A Wandler für Terabit/Sekunde Datentransportnetze und hochperformate Messgeräte.

A/D und D/A Wandler für den Datentransport der Zukunft

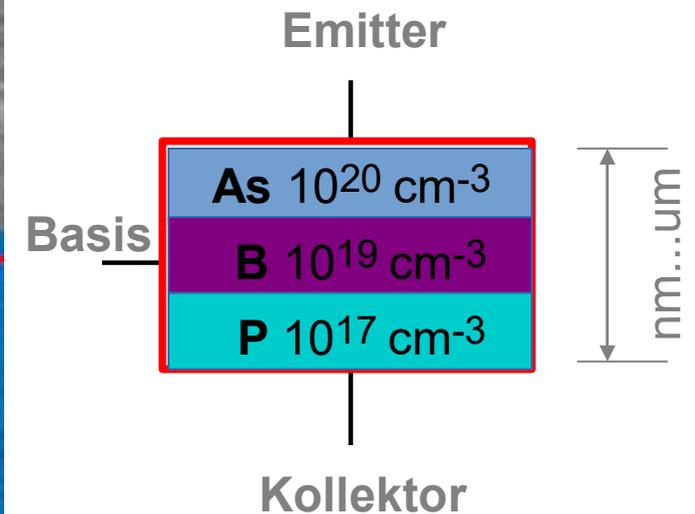


World record 2008: 30 Giga-Samples/Sec 6 Bit resolution
World record 2015: 100 Giga-Samples/Sec 6 Bit resolution

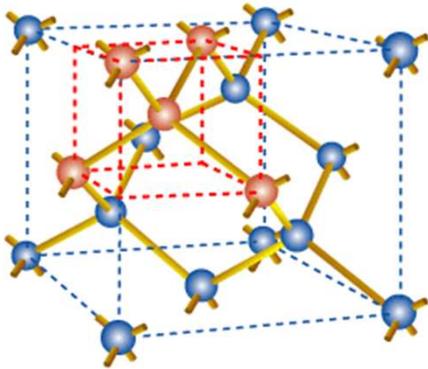
Eigentlicher und Parasitärer Transistor



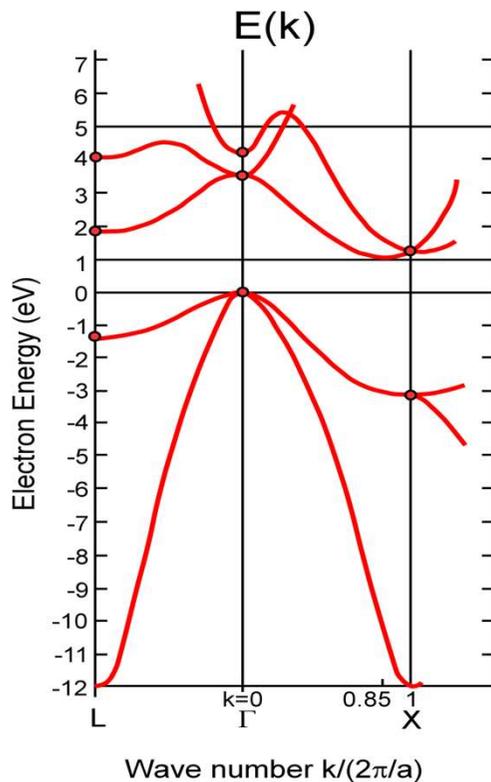
Eigentlicher Transistor:



mit Fremdatomen
dotierte Schichten im
Silizium-Kristall

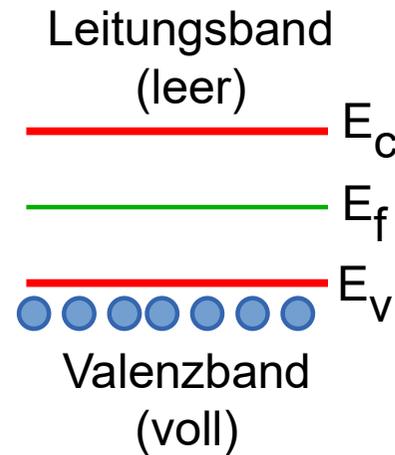


Bändermodell
reines Silizium



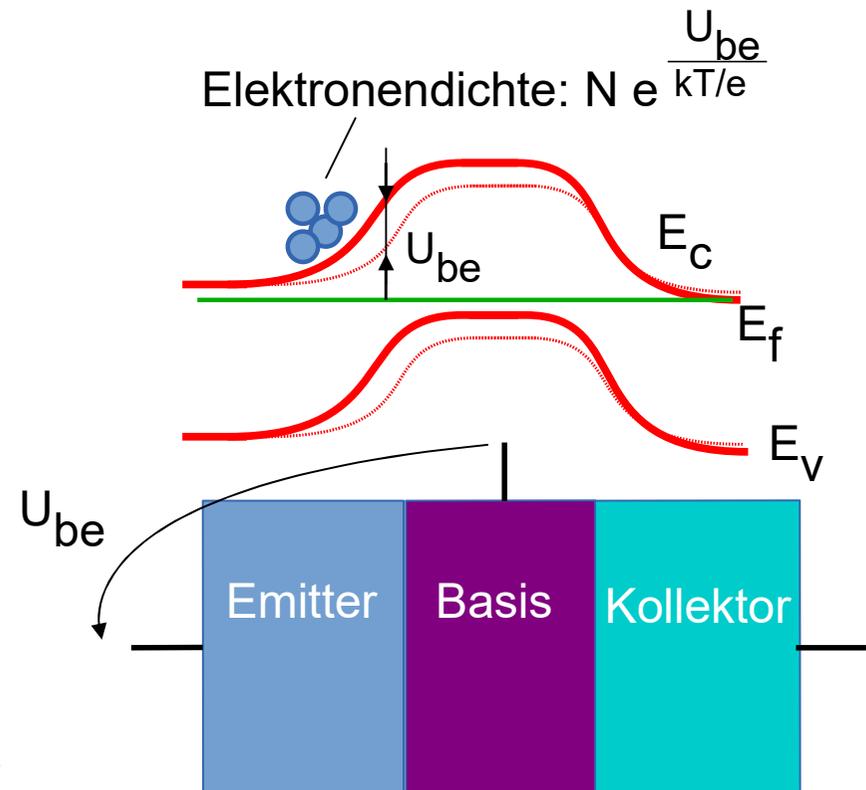
Modell des Eigentlichen Transistors aus physikalischen Grundlagen

Vereinfachtes
Bändermodell
reines Silizium



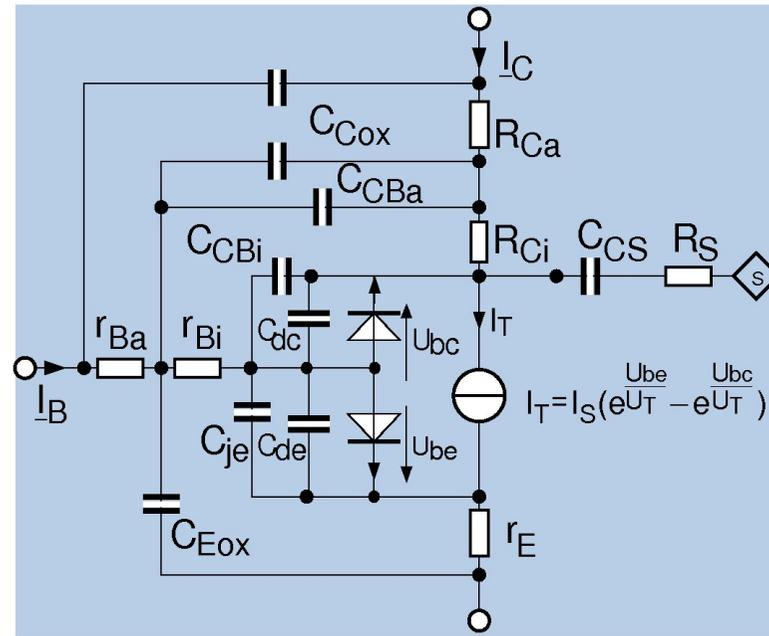
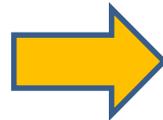
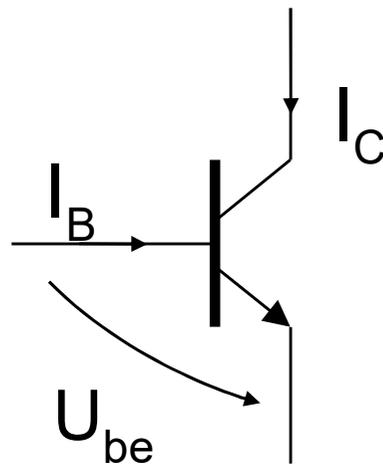
Wave number or location k, x

Vereinfachtes
Bändermodell
dotiertes Silizium



Modell für (Bipolar) Transistor

$$I_C = I_S e^{U_{be}/U_T}$$



$$B \approx \frac{I_C}{I_B}$$

$$f_T \approx \frac{I_C}{2\pi (C_{be} + C_{cb}) u_T}$$

- Grenzfrequenz f_T des inneren Transistors proportional Ruhestrom I_C
- Eigenschaften werden durch **parasitäre Elemente** verschlechtert