

# **M 5.3 Elektronik (ELK)**

Mirco Meiners

2024-11-11



# Inhaltsverzeichnis

<b>Unsyllabus</b>	<b>1</b>
<b>I. Seminar</b>	<b>3</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
1.1. Lernziele des Moduls . . . . .	5
1.2. Wissenschaftliches Rechnen . . . . .	5
1.3. Schaltungsentwurf (EDA Tools) . . . . .	5
1.4. OS-Tools . . . . .	6
1.5. Code Editoren . . . . .	6
1.6. Data Science . . . . .	6
1.7. Publish Computational Content . . . . .	7
1.8. Schreibst Du noch oder TeXst Du schon? . . . . .	7
1.9. LaTeX Editoren . . . . .	7
1.10. Literaturverwaltung und LaTeX . . . . .	7
1.11. Experimentelle Arbeit - Entwurf elektronischer Systeme . . . . .	8
1.12. Analyse vs. Design . . . . .	8
1.13. Es war einmal ... . . . . .	9
1.14. Damals und heute . . . . .	9
1.15. Packungsdichten . . . . .	10
1.16. Moore'sches Gesetz . . . . .	10
1.17. Chip Manufacturing - How are Microchips made? (Infineon, Dresden) . . . . .	11
1.18. FinFET (Intel) . . . . .	11
1.19. TSMC Fab (Next Gen 7/5 nm) . . . . .	11
1.20. Reiseaussichten . . . . .	11
1.21. Reiseziele . . . . .	11
1.22. Reisebedingungen . . . . .	12
1.23. Systemhierarchie . . . . .	13
1.24. System Assembly . . . . .	14
1.25. Schnittstellen zur Aussenwelt . . . . .	15
1.26. Meeting mit einem System . . . . .	15
1.27. System in a Package (SiP) . . . . .	16
1.28. Backend Phasen . . . . .	16
1.29. Sie werden Experte . . . . .	17
1.30. Evolution von Produkten . . . . .	17
1.31. EDA Kompetenz . . . . .	18

## Inhaltsverzeichnis

1.32. Design-/Entwurfsmethodik . . . . .	18
1.33. Nachhaltige Elektronik . . . . .	18
1.34. Warum es sicht lohnt . . . . .	19
1.35. Und ab an den Strand . . . . .	19
<b>2. Signale und Systeme</b>	<b>21</b>
2.1. Einfache Signale . . . . .	21
2.2. Signaltypen . . . . .	21
2.3. Konstantes Signal . . . . .	22
2.4. Nominal (nom) und Worst Case (wc) . . . . .	22
2.5. Zeitkontinuierliche Signale . . . . .	23
2.6. Sprungsignale . . . . .	23
2.7. Zeitdiskrete Signale . . . . .	24
2.8. Stochastische Signale . . . . .	24
2.9. Rauschen . . . . .	25
2.10. LTI System . . . . .	25
2.11. PSD zu SNR . . . . .	26
2.12. Rauschen eines passiven Tiefpassfilters . . . . .	26
2.13. Total Integrated Noise . . . . .	27
2.14. LC Tiefpassfilter . . . . .	27
<b>3. Halbleiterphysik</b>	<b>29</b>
3.1. Grundlagen der Elektrotechnik . . . . .	29
3.2. Einführung in die Halbleiterphysik . . . . .	30
3.3. Elektronen im Festkörper . . . . .	31
3.4. Energiebänder-Modell . . . . .	31
3.5. Wellenfunktion . . . . .	31
3.6. Newton Mechanik vs. Quantentheorie . . . . .	32
3.7. Schrödinger-Gleichung (zeitabhängig) . . . . .	32
3.8. Energiebänder-Modell (2) . . . . .	32
3.9. Energiebandstruktur . . . . .	33
3.10. Aufenthaltswahrscheinlichkeit . . . . .	34
3.11. Reduziertes Zonenschema . . . . .	35
3.12. Besetzungswahrscheinlichkeit . . . . .	35
3.13. Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion . . . . .	35
3.14. Fermi-Dirac-Statistik (1) . . . . .	36
3.15. Halbleiter im thermischen Gleichgewicht . . . . .	37
3.16. Intrinsischer Halbleiter . . . . .	37
3.17. Dotierter Halbleiter . . . . .	38
3.18. Stromgleichung . . . . .	38
3.19. Stromgleichung 1D . . . . .	39
3.20. Kontinuitätsgleichung . . . . .	39
3.21. Kontinuitätsgleichung 1D . . . . .	39
3.22. Poisson-Gleichung . . . . .	39

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>41</b>
<b>II. Labor</b>	<b>43</b>
<b>4. Laborversuche</b>	<b>45</b>
<b>5. IV-Charakterisierung von Siliziumdioden</b>	<b>47</b>
5.1. Zielsetzung . . . . .	47
5.2. Hintergrund . . . . .	47
5.3. Schematische Symbole der Diode . . . . .	48
5.4. Materialien . . . . .	48
5.5. IV-Charakteristik . . . . .	49
5.6. Zeitbereichsmessungen . . . . .	50
5.6.1. Messungen mit der STEMlab Oszilloskop-App . . . . .	50
5.6.2. Messungen mit SCPI-Server und Python . . . . .	53
<b>6. Der BJT als Diode</b>	<b>55</b>
6.1. Zielsetzung . . . . .	55
6.2. Materialien . . . . .	55
6.3. Verfahren . . . . .	57
6.4. IV-Kurvenmessungen . . . . .	57
<b>7. Der MOSFET als Diode</b>	<b>61</b>
7.1. Zielsetzung . . . . .	61
7.2. Materialien . . . . .	61
7.3. nMOS als Diode . . . . .	61
7.4. Verfahren . . . . .	62
7.5. IV-Kurvenmessungen . . . . .	65
7.6. pMOS als Diode . . . . .	65
7.7. Verfahren . . . . .	66



# **Unsyllabus**

Name	Description
Course	M 5.3 Elektronik (ELK)
Term	WiSe24/25
Instructor	Prof. Dr.-Ing. M. Meiners
Lectures	Die., 9 Uhr bis 13 Uhr, E 507



# **Teil I.**

# **Seminar**



# 1. Einleitung

## 1.1. Lernziele des Moduls

- Einblicke in mikroelektronische Systeme
- Analyse und Funktion von Halbleiterbauelementen
  - Halbleiterphysik
  - Modellbildung
  - Netzwerkanalyse/-synthese
- Anwendung von SPICE in der Schaltungsanalyse
  - Spezifikation
  - Partitionierung
  - Design
- Einsatz von Entwicklungsboards, Embedded Systems / System-on-Chip (SoC)
  - STEMlab von [Red Pitaya](#)

## 1.2. Wissenschaftliches Rechnen

- Python ([Anaconda](#))
- Matlab ([Campus Lizenz](#))
- Command-line tools

## 1.3. Schaltungsentwurf (EDA Tools)

- PCB / System Design
  - LTspice
  - KiCad EDA
  - Altium Designer
  - SiemensEDA PCB tools
  - [cadence System Design & Analysis](#)

## *1. Einleitung*

- IC / Silicon Design
  - IIC-OSIC-TOOLS (open-source)
  - SiemensEDA IC tools
  - cadence IC Design & Verification
  - synopsys silicon design (IC)

## **1.4. OS-Tools**

- Microsoft-Terminal
- Microsoft-PowerShell
- MacOS-Terminal
- Linux/MacOS Shell zsh-tools,
- git (Versionskontrolle)

## **1.5. Code Editoren**

- Visual Studio Code
- Spyder IDE
- Thonny (Micro-)Python IDE
- Emacs
- Vim

## **1.6. Data Science**

- Dateisystem: Dateien- und Ordnerstruktur
- Tabellenformate: Comma/Tab-Separated-Values (CSV/TSV), Spreadsheet (.xlsx, .ods)
- Spezielle Formate, z.B. MATLAB mat, HDF5
- Embedded Datenbanken
  - SQL, z.B. SQLite
  - OLAP, z.B. DuckDB

## 1.7. Publish Computational Content

- Jupyter-Book
- quarto

## 1.8. Schreibst Du noch oder TeXst Du schon?

- MikTeX (Windows, MacOS, Linux)
- MacTeX (MacOS)
- TeXLive (Linux)

## 1.9. LaTeX Editoren

- IDE's
  - TeXStudio
  - TeXMaker
- Kollaborative Frameworks
  - Overleaf, Online LaTeX
  - CoCalc - Online LaTeX

## 1.10. Literaturverwaltung und LaTeX

- Citavi im Detail > Titel exportieren > Export nach BibTeX
- RefWorks - Library Guide Univ. Melbourne
- Benutzerdefinierte BibTex-Keys mit Zotero | nerdspause
- JabRef - Library Guide Univ. Melbourne
- EndNote - Library Guide Univ. Melbourne

## *1. Einleitung*

### **1.11. Experimentelle Arbeit - Entwurf elektronischer Systeme**

Analyse und Synthese von elektronischen Bauelementen und Systemen mit

- Modellbildung auf Systemebene / Verhaltensmodellierung
- Simulation auf Schaltungsebene / SPICE
- Charakterisierung auf Hardwareebene mit
  - Analog System Lab Kit ASLK Pro
  - Red Pitaya's STEMlab 125-14/10
- Technische Dokumentation mit [quarto](#)

### **1.12. Analyse vs. Design**

- Entgegen populärwissenschaftlicher Meinungen ist Schaltungsanalyse und Schaltungsentwurf keine “Schwarze Magie”
  - Schaltungsanalyse
    - ist die Fähigkeit, Schaltungen in handhabbare Teile zu zerlegen
    - basierend auf einem einfachen, aber hinreichend genauen Modell
    - “Just-in-time” Modellierung – verwende kein komplexes Modell, so lange es nicht benötigt wird ...
    - eine Schaltung  $\Rightarrow$  eine Lösung
  - Schaltungsentwurf
    - ist die Fähigkeit der Schaltungssynthese auf Basis von Erfahrung und intensiver Analyse
    - eine Spezifikation  $\Rightarrow$  viele Lösungen
    - Entwurfspraktiken werden am besten durch's “Selbermachen” ausgebildet – daher ein Entwurfsprojekt ...

### 1.13. Es war einmal ...



Abbildung 1.1.: 1906 die Elektronenröhre

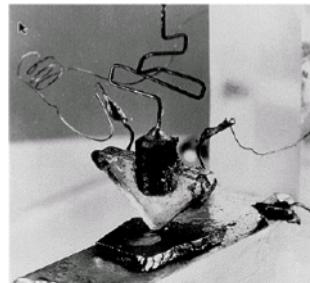


Abbildung 1.2.: 1947 der erste Transistor, Bell Labs Foto

### 1.14. Damals und heute

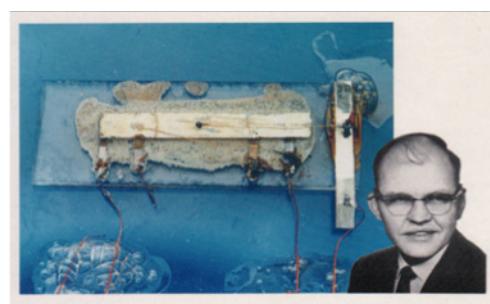


Abbildung 1.3.: 1958 Jack Kilby's erster IC

## 1. Einleitung

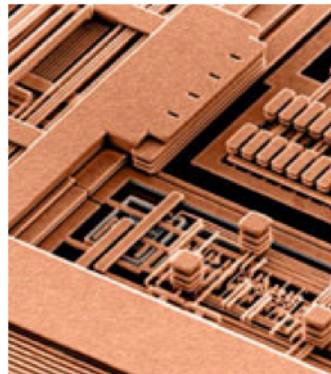


Abbildung 1.4.: Moderner IC

## 1.15. Packungsdichten

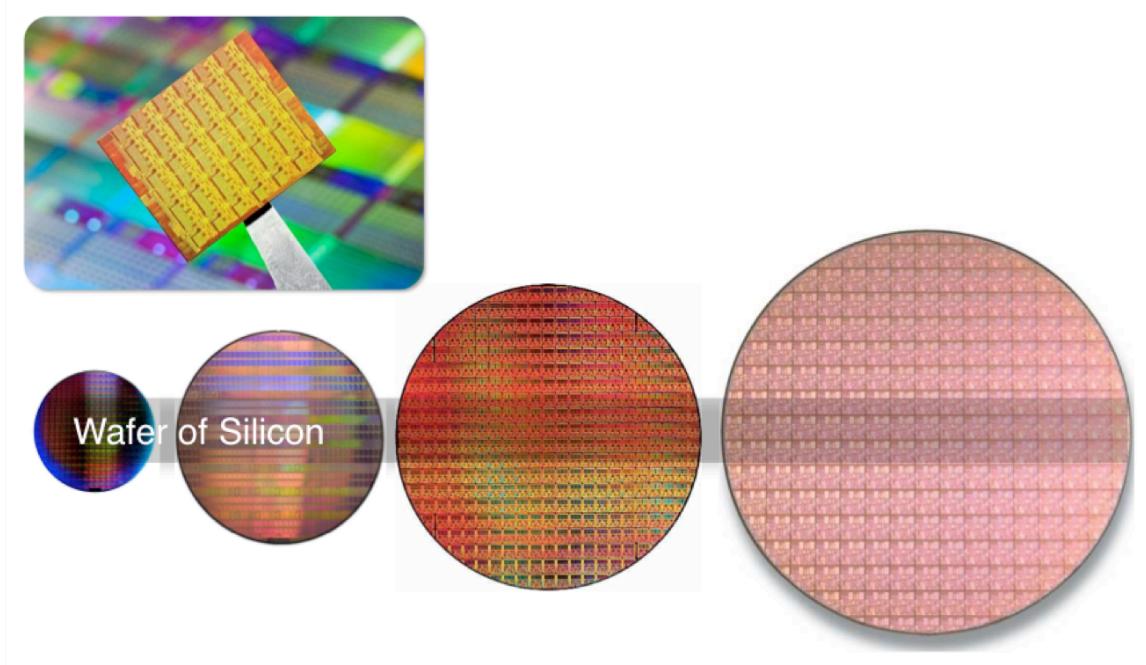


Abbildung 1.5.: Wafergenerationen

## 1.16. Moore'sches Gesetz

[https://www.youtube.com/embed/basGrfRDqts?list=PLO\\_wT97BGA6xC6hNy9VGtt1bKwVuQXI5B](https://www.youtube.com/embed/basGrfRDqts?list=PLO_wT97BGA6xC6hNy9VGtt1bKwVuQXI5B)

*1.17. Chip Manufacturing - How are Microchips made? (Infineon, Dresden)*

## **1.17. Chip Manufacturing - How are Microchips made? (Infineon, Dresden)**

[https://youtu.be/bor0qLifjz4?list=PLO\\_wT97BGA6xC6hNy9VGtt1bKwVuQXI5B](https://youtu.be/bor0qLifjz4?list=PLO_wT97BGA6xC6hNy9VGtt1bKwVuQXI5B)

## **1.18. FinFET (Intel)**

[https://www.youtube.com/embed/\\_VMYPLXnd7E](https://www.youtube.com/embed/_VMYPLXnd7E)

## **1.19. TSMC Fab (Next Gen 7/5 nm)**

<https://www.youtube.com/embed/Hb1WDxSoSec>

## **1.20. Reiseaussichten**

Dies ist der **Beginn eines Prozesses**,

besser noch, **eines Abenteuers**.

## **1.21. Reiseziele**

- Mehr über Signale wissen, die in elektronischen Systemen verarbeitet werden.
- Schaltungsdiagramme lesen können.
- Wissen über grundlegende Blöcke eines Systems aneignen.
- Wissen, wie Transistoren arbeiten und in modernen integrierten Technologien hergestellt werden.
- Eigenarten der Modellierung mikroelektronischer Bauelemente und der physikalischen und chemischen Prinzipien im Herstellungsprozess kennenlernen.

1. Einleitung

## 1.22. Reisebedingungen

*Anwendung Ihres Werkzeugkastens.* \* Grundlagen der Elektrotechnik/Physik

- Elektromagnetische Wellen
- Angewandte Mathematik und Systemtheorie
- Trainingswille
- Pioniergeist
- Spa{ß}

*Schnallen Sie sich an, die Reise beginnt ...*

## 1.23. Systemhierarchie

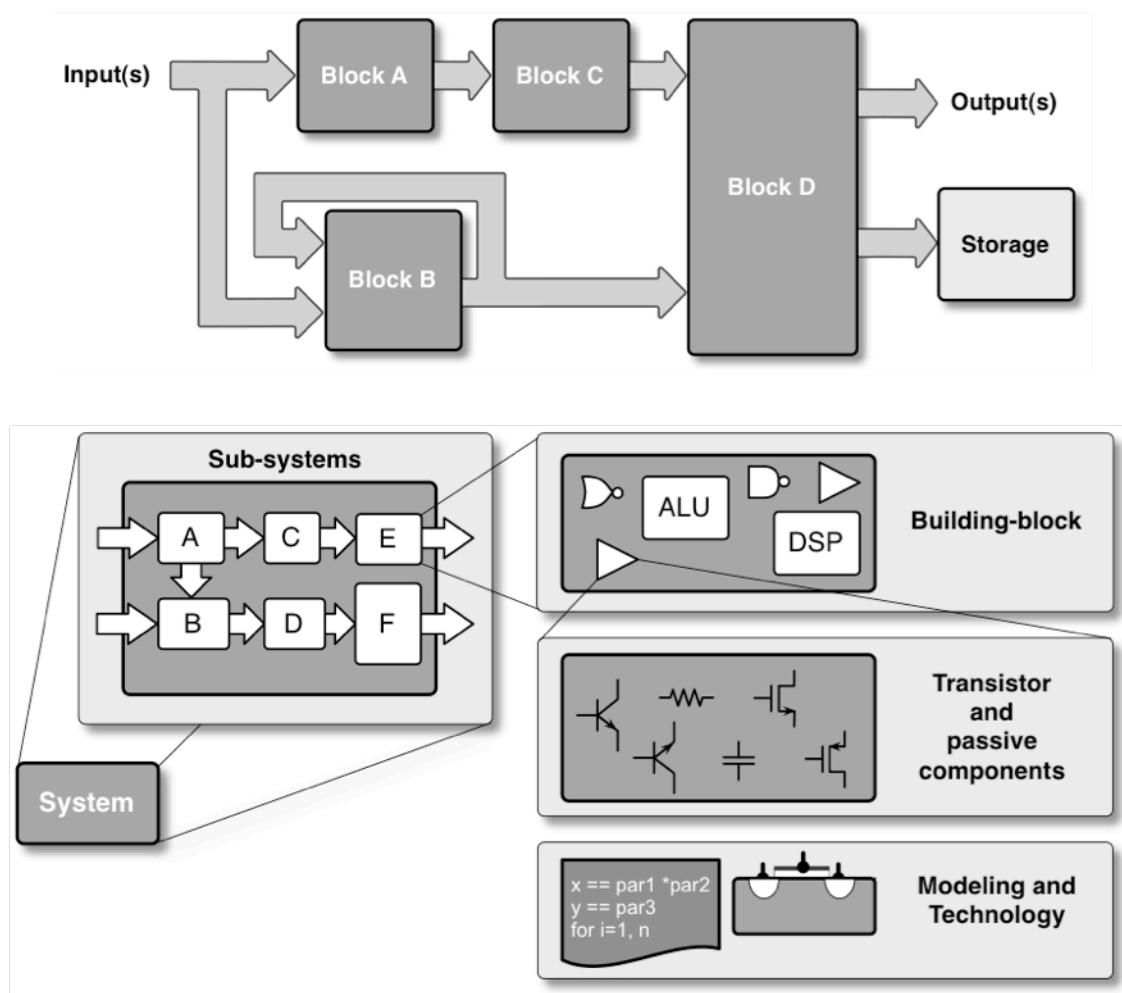
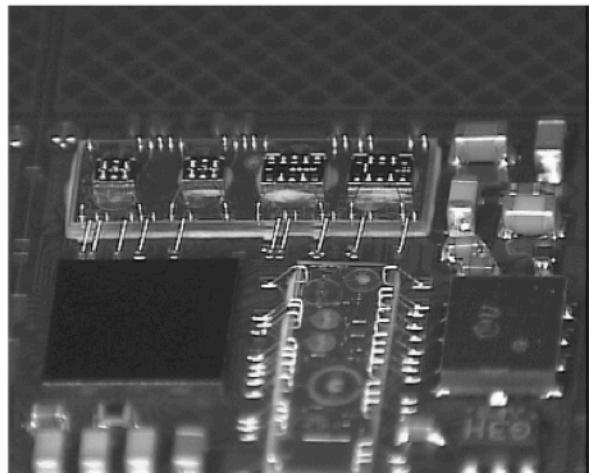
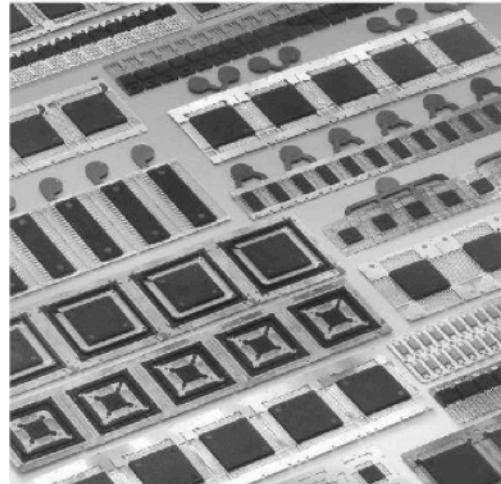


Abbildung 1.6.: Funktionsblöcke eines elektronischen Systems

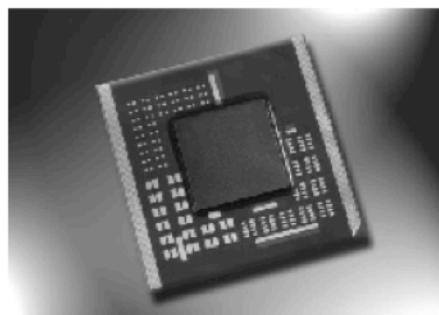
## 1.24. System Assembly



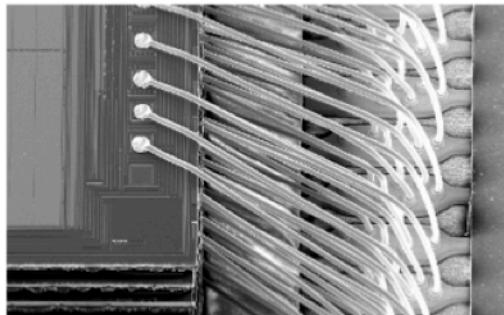
(a)



(b)



(c)

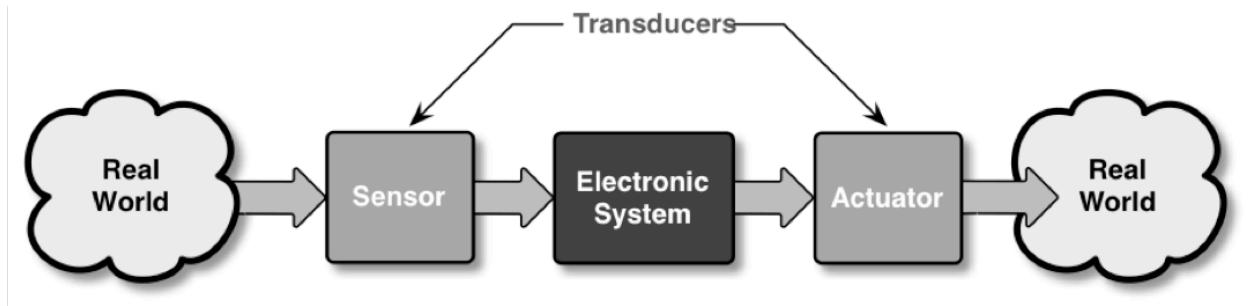


(d)

Abbildung 1.7.: Bottom-up Prozess, Integration

Entnommen den Vorlesungsfolien von Maloberti (2011).

## 1.25. Schnittstellen zur Aussenwelt



Entire system involving signals of real world.

Abbildung 1.8.: Interfacing

Entnommen den Vorlesungsfolien von Maloberti (2011).

## 1.26. Meeting mit einem System

Block diagram of a wireless communication system

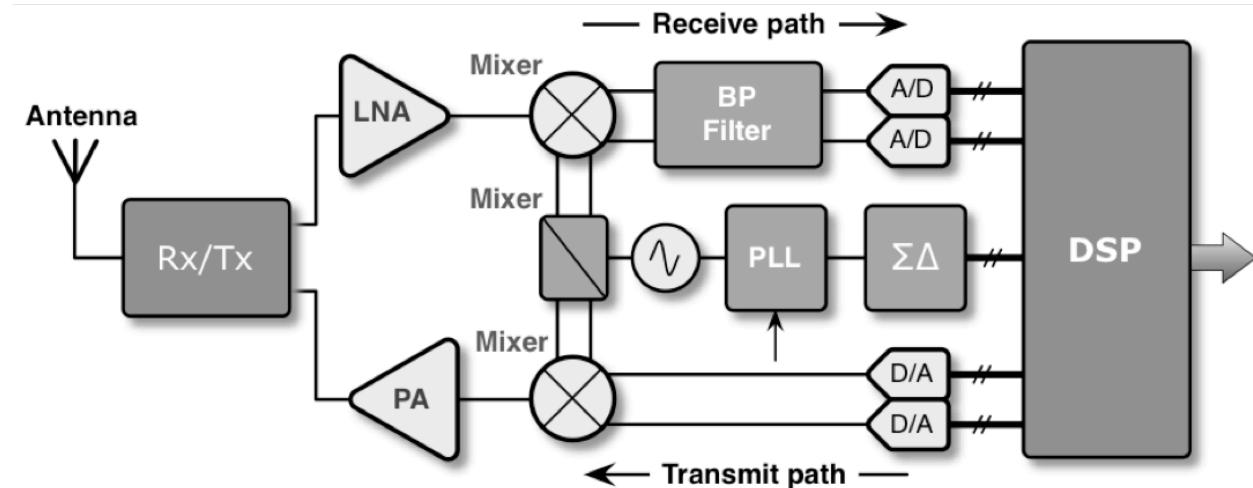
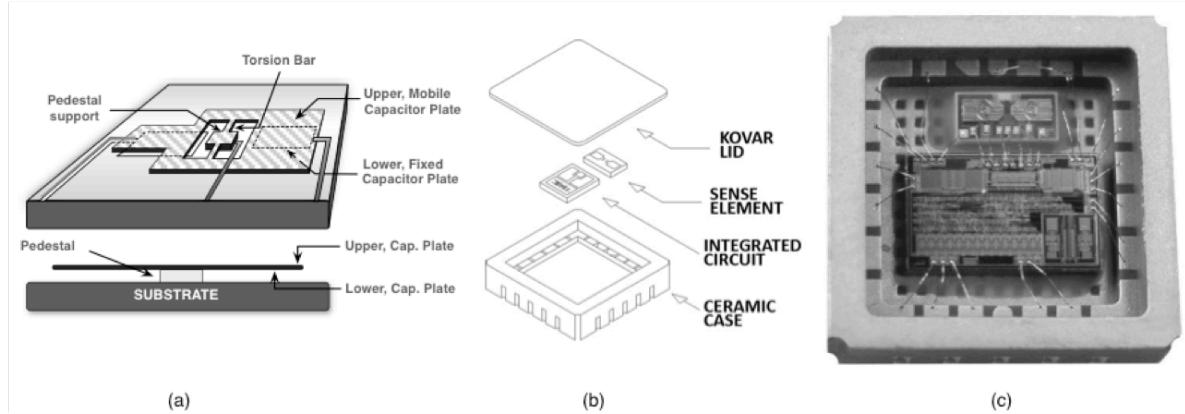


Abbildung 1.9.: Drahtloses Kommunikationssystem

## 1. Einleitung

Entnommen den Vorlesungsfolien von Maloberti (2011).

### 1.27. System in a Package (SiP)



- (a) Micro structure of an accelerometer.
- (b) Assembling diagram of the system-on- package.
- (c) Microphotograph. (*Courtesy of Silicon Designs, Inc.*).

Abbildung 1.10.: Beschleunigungssensor

Entnommen den Vorlesungsfolien von Maloberti (2011).

### 1.28. Backend Phasen

- Packaging
- Zuverlässigkeit = Qualität auf Zeit
- Testing auf Wafer Level, known good die (KGD)
  - Burn-in und Accelerated Aging (thermischer Stress, Arrhenius Gesetz)
  - Automatic Test Equipment (ATE)
    - \* System Probe
    - \* Interconnect Test
    - \* Build-in Self-Test (BIST)

- Statistische Datenanalyse und Yield Prognosen
  - Ausfallrate FIT (failure in time)
  - Badewannenkurve

## 1.29. Sie werden Experte

*Leistungsmerkmale.*

- Hintergrundwissen
  - Systemverständnis, Architektur, Herstellungsverfahren, Implementation
- Unterbewusste Kompetenz
  - Abgespeicherte Erfahrungen aus Erfolgsgeschichten und Misserfolgen
- Spezialwissen
  - Berufsspezifisches Wissen
- Teamwork Haltung
  - Kommunikationsfähigkeit, Berichtswesen und technische Präsentation
- Kreativität
- Tool-Kenntnisse

## 1.30. Evolution von Produkten

- Angetrieben durch Technologieverbesserung
  - Kosten (größere Chips, geringere Größe der Merkmale, bessere Ausbeute)
  - Leistung (neue Bauteile, höhere Geschwindigkeit, weniger Stromverbrauch)
- Angetrieben durch Verbesserung der Entwurfsmethodik
  - Architektur (Leistung, Funktionen)
  - CAD (Entwicklungskosten, Time-to-Market)
- Komplexität der Designs verdoppelt sich jedes Jahr (Moore's Gesetz)
- Rolle von CAD
  - Verbesserung der Produktivität von Konstruktionsprozessen
  - Reduzierung der Komplexität für den Konstrukteur
  - Sicherstellung des ordnungsgemäßen Betriebs der Geräte

## 1. Einleitung

### 1.31. EDA Kompetenz

- EDA-Anbieter (Tool-Entwickler)
  - Identifikation von Entwurfsaufgaben, Bedarf an Werkzeugen
  - Entwicklung von Strategien und Algorithmen
  - Implementierung von Software-Werkzeugen
  - Verifikation der Stabilität und Funktionalität der Software-Tools
- IC-Hersteller
  - Entscheidungsplanung, welches Tool die Produktivität steigern könnte
  - EDA-Tool-Manager, Installation und Wartung
  - Experten für Softwareeinsatz, Anwendung in Produktdesign und -entwicklung
- Dozenten und Studenten
  - Jobchancen
  - Notwendigkeit, auf dem Laufenden zu bleiben

### 1.32. Design-/Entwurfsmethodik

- Full Custom - vollständig manuell: ASIC
  - Überwiegend analoge Schaltungen
  - Einfache digitale Gatter
  - Volle Kontrolle, aber lange Entwicklungszeit (bis zu Jahren)
- Semi-custom: ASIC-Fertigung mit Verwendung von vorgefertigten Teilen
  - Standardzellen, Makrozellen, IP's
  - Wiederverwendung von vordefinierten Blöcken oder Maskensätzen
  - Eingeschränkte Kontrolle/Flexibilität, aber kürzere Entwicklungszeit (bis zu Wochen)
- Vollständig automatisiert: Keine Fertigung, reprogrammierbare ASICs
  - FPGA, PLA
  - Ausschließlich digitale Schaltungen
  - Schnelles Prototyping

### 1.33. Nachhaltige Elektronik ...

<https://www.youtube.com/embed/7S5IuaKiZIY>

*1.34. Warum es sicht lohnt ...*

### **1.34. Warum es sicht lohnt ...**

<https://www.youtube.com/embed/SwPGxwBZw6I>

### **1.35. Und ab an den Strand ...**

<https://www.youtube.com/embed/ekkJlQf-K4I>



## 2. Signale und Systeme

### 2.1. Einfache Signale

Signale repräsentieren Informationen, z.B. *Temperatur eines Backofens*.

Mögliche Signale sind:

- Temperatur des Backofens
- Temperatur und Feuchtigkeit des Kuchenteigs
- Geschmack / Qualität des Kuchens.

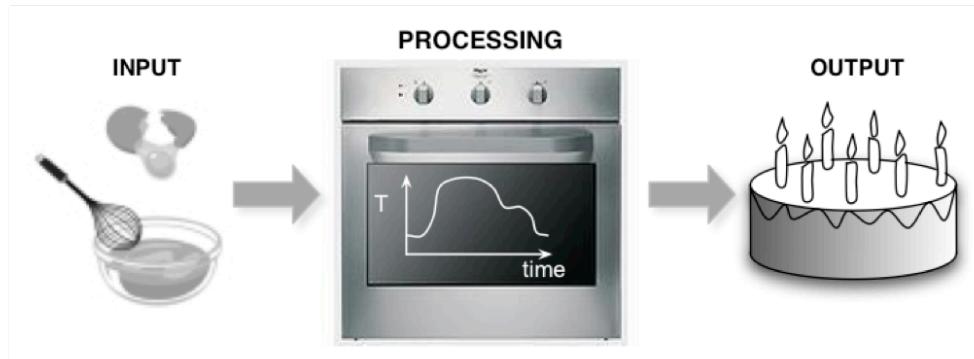


Abbildung 2.1.: Signale beim Kuchenbacken.

### 2.2. Signaltypen

- Zeitabhängiges Signal,  $f(t)$
- Raumabhängiges Signal,  $f(x_1, x_2, x_3)$
- Lokal oder verteiltes Signal
- Kontinuierliches oder diskretes Signal
  - zeitdiskret

## 2. Signale und Systeme

- amplitudendiskret (quantisiert)
- ge-sampled, samples
- Logisches oder binäres Signal

### 2.3. Konstantes Signal

- Ein konstantes Signal für ein elektronisches System korrespondiert nicht mit der mathematischen Definition einer Konstanten.
- Versorgungsspannungen und Referenzsignale elektronischer Schaltungen sind immer fehlerbehaftet (statisch und/oder statistisch).
- Toleranzen/Fehlergrenzen

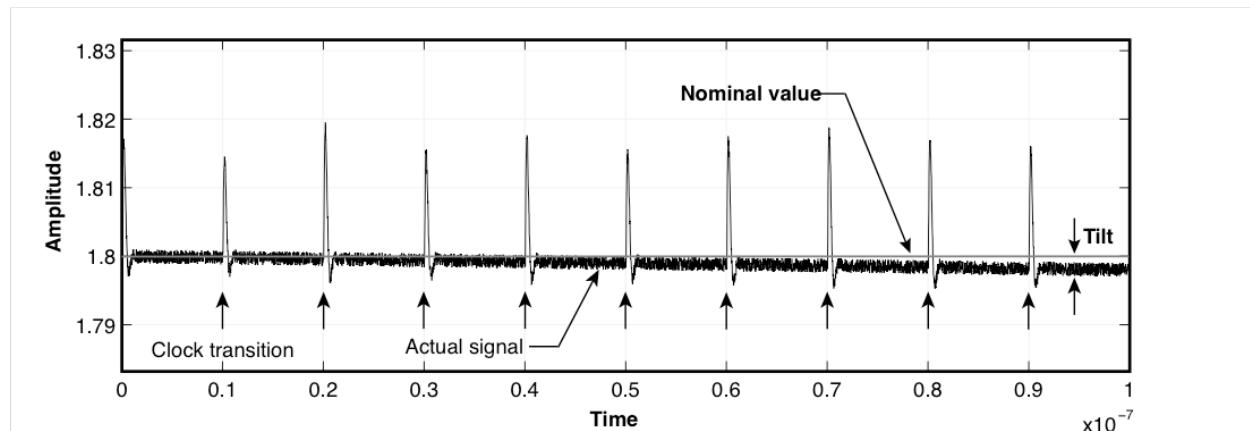


Abbildung 2.2.: Elektrokardiogramm, kurz EKG

### 2.4. Nominal (nom) und Worst Case (wc)

- Wir definieren **nominal** als das Ausgangssignal, welches wir bei einem spezifizierten Eingangssignal erwarten; E/A-Verhalten.
- **Worst case high** und **worst case low** definieren Signale, die über und unter dem nominalen Signal liegen.

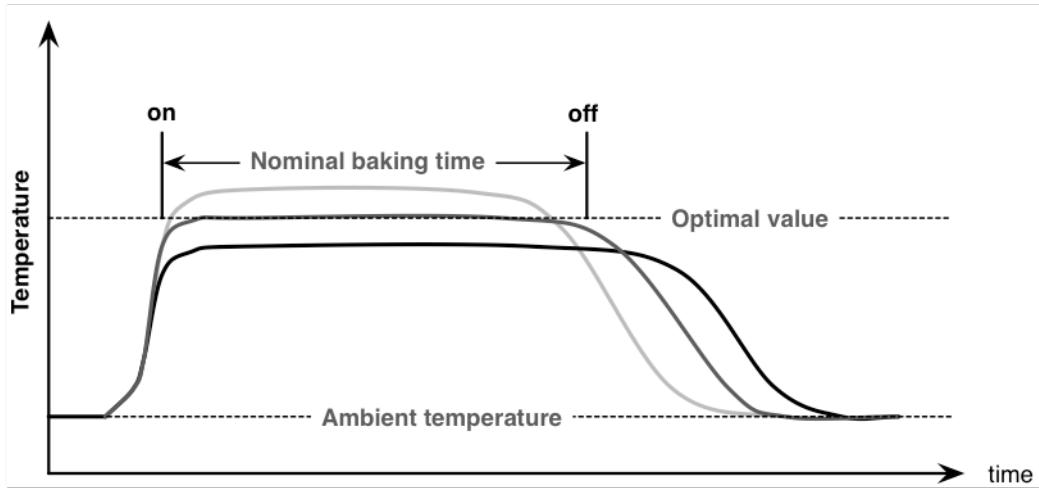


Abbildung 2.3.: Signalklassen

## 2.5. Zeitkontinuierliche Signale

- Wdh. aus Modul GEL2
- allgem. Exponentialfunktion

$$x(t) = \underline{A} \exp(st) \quad (2.1)$$

$$\underline{A} = \Re \underline{A} + j \Im \underline{A} = A' + jA'' \quad (2.2)$$

$$s = \sigma + j\omega \quad (2.3)$$

## 2.6. Sprungsignale

- Wdh. aus Modul SYS
- Plötzliche Amplitudenänderung, unstetig
- Sprungfunktion

$$\epsilon(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < 0 \\ 1 & \text{für } t > 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

- Rechteckfunktion

## 2. Signale und Systeme

$$rect(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } |t| > \frac{1}{2} \\ 1 & \text{für } |t| < \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.5)$$

- Signumfunktion

$$sgn(t) = \begin{cases} -1 & \text{für } t < 0 \\ 1 & \text{für } t > 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

- Dreieckfunktion

$$tri(t) = \begin{cases} 1 - |t| & \text{für } |t| \leq 1 \\ 0 & \text{für } |t| \geq 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

## 2.7. Zeitdiskrete Signale

- Exponentialfolge

$$x(n) = A \exp(snT) = A \exp(\sigma nT) \exp(j\omega nT) \quad (2.8)$$

- Sinus- und Kosinusfolge

$$x'(n) = A' \cos(\omega nT) = A' \cos(\Omega T) \quad (2.9)$$

- Sprungfolge und verwandte Folgen
- Abgetastetes Signal (sampled)
- Dirac-Impuls

## 2.8. Stochastische Signale

- Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, vgl. Halbleiterphysik Aufenthaltswahrscheinlichkeit
- Erwartungswert (Mittelwert, Varianz)
- Autokorrelationsfunktion

## 2.9. Rauschen

- Rauschen ist ein spezieller Signaltyp, es ist ein statistischer Prozess und beinhaltet keine Informationen.
- Rauschen stört bzw. überlagert die eigentliche Information, die mit einem Signal transportiert wird.

**Signal-zu-Rausch-Verhältnis** (Signal-to-Noise Ratio, SNR, engl.)

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{\overline{f_{sig}^2(t)}}{\overline{v_{noise}^2(t)}} \quad (2.10)$$

## 2.10. LTI System

**Parseval'sches Theorem**

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(j\omega)|^2 d\omega \quad (2.11)$$

$$\text{Energie: } E_f = \int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt \quad (2.12)$$

$$\text{Leistung: } P_f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (2.13)$$

**Wiener-Khintchine Theorem (Autokorrelation)**

$$r_{ff}^E(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)f(t+\tau)dt = \int_{-\infty}^{\infty} |F(j\omega)|^2 e^{j\omega t} df \quad (2.14)$$

**Mittlerer Erwartungswert**

$$\overline{y(t)} = E\{y(t)\} = E \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} u(t)h(t-\tau)dt \right\} \quad (2.15)$$

$$r_{uy}(t) = r_{uu}(t) * h(t) \quad (2.16)$$

$$S_{uy}(j\omega) = S_{uu}(j\omega) \cdot H(j\omega) \quad (2.17)$$

**Wiener-Lee Beziehung**

$$r_{yy}(t) = r_{uu}(t) * r_{hh}^E(t) \quad (2.18)$$

$$S_{yy}(j\omega) = S_{uu}(j\omega) \cdot |H(j\omega)|^2 \quad (2.19)$$

## 2.11. PSD zu SNR

**Leistungsdichtespektrum** (Power Spectral Density, PSD, engl.)

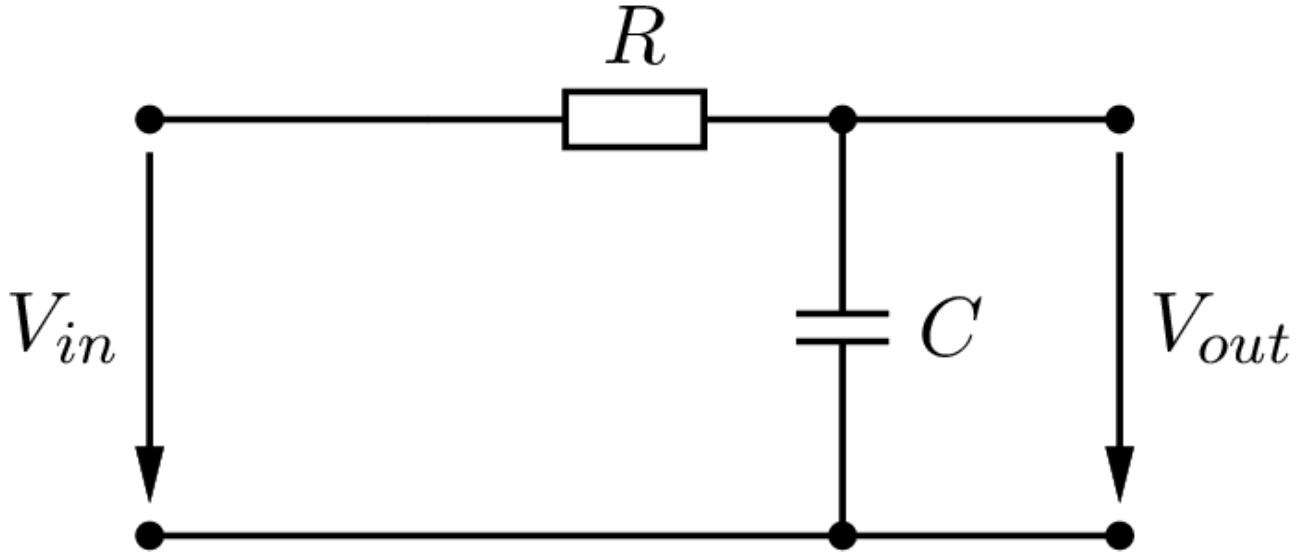
$$\overline{v_{noise}^2(t)} = r_{yy}(0) = \int_{-\infty}^{\infty} S_{yy}(j\omega) df \quad (2.20)$$

$$\overline{v_{noise}^2(t)} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{uu}(j\omega) \cdot |H(j\omega)|^2 df \quad (2.21)$$

**Signal-zu-Rausch Verhältnis** (Signal-to-Noise Ratio, SNR, engl.)

$$SNR = \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = \frac{\overline{f_{sig}^2(t)}}{\overline{v_{noise}^2(t)}} \quad (2.22)$$

## 2.12. Rauschen eines passiven Tiefpassfilters



$$\overline{v_{out}^2} = \int_{f_1}^{f_2} 4kTR \left| \frac{1}{1 + j2\pi f \cdot RC} \right|^2 df = 4kTR \int_{f_1}^{f_2} \frac{1}{1 + (2\pi f RC)^2} df \quad (2.23)$$

 Tipp

$$\int \frac{1}{1+x^2} dx = \arctan(x) \quad (2.24)$$

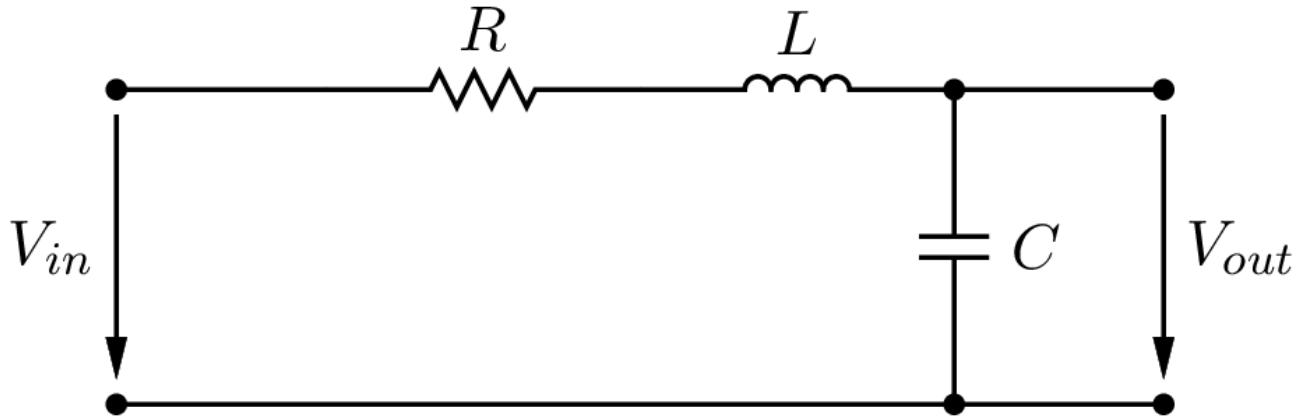
## 2.13. Total Integrated Noise

$$\overline{v_{out,tot}^2} = \int_0^\infty 4kTR \left| \frac{1}{1+j2\pi f \cdot RC} \right|^2 df \quad (2.25)$$

$$= 4kTR \int_{f_1}^{f_2} \frac{1}{1+(2\pi f RC)^2} df \quad (2.26)$$

$$= 4kTR \frac{1}{4RC} = \frac{kT}{C} \quad (2.27)$$

## 2.14. LC Tiefpassfilter



$$\overline{v_{out,tot}^2} = \int_0^\infty 4kTR \left| \frac{1}{1+\frac{s}{\omega_p Q_p} + \frac{s^2}{\omega_p^2}} \right|^2 df \quad (2.28)$$

$$= 4kTR \frac{\omega_p Q_p}{4} = \frac{kT}{C} \quad (2.29)$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Q_p = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad \omega_p Q_p = \frac{1}{RC} \quad (2.30)$$



# 3. Halbleiterphysik

## 3.1. Grundlagen der Elektrotechnik

Als Vorbereitung für ein besseres Verständnis der Halbleiterphysik, sollten die Grundbegriffe aus den Grundlagenvorlesungen der ersten beiden Semester aufgefrischt werden.

Rufen Sie sich folgende physikalische Größen und Gesetze in Erinnerung:

- Elektrische Stromstärke
- Elektrische Spannung
- Kirchhoff'schen Gesetze
- Elektrische Energie
- Elektrische Leistung.

### 💡 Elektrische Ladung

- Ladung  $Q$ , Einheit  $[Q] = 1 \text{ Coulomb} = 1\text{C} = 1 \text{ As}$
- Ladung  $q$  von Ladungsträgern, elektrische Ladung ist eine Eigenschaft von Elementarteilchen.

### 💡 Coulomb'sches Gesetz

Ladungen erzeugen Kraftfelder und üben Kräfte aufeinander aus.

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} \quad (3.1)$$

$$[F] = 1\text{N} = 1 \frac{\text{kg m}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{m}} \quad (3.2)$$

### 3. Halbleiterphysik

#### 💡 Elektrische Feldstärke

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}}{Q} \quad (3.3)$$

$$[E] = \frac{[F]}{[Q]} = 1 \frac{N}{As} = 1 \frac{kg \cdot m}{As^3} = 1 \frac{V}{m} \quad (3.4)$$

## 3.2. Einführung in die Halbleiterphysik

#### ℹ Hinweis

Die hier präsentierten Inhalte zur Halbleiterphysik sind den Kap. 8, Atom- und Kernphysik und Kap. 9, Festkörperphysik, des Buches *Physik für Ingenieure* von Hering, Martin, und Stohrer (2012), sowie Kap. 12, Halbleiter, des Buches *Elektronische Bauelemente* von Reisch (2007) entnommen.

- Quantentheorie
  - Welle-Teilchen Dualismus
  - Schrödinger-Gleichung
- Elektronengas
  - Zustände und Aufenthaltswahrscheinlichkeiten
  - Zustandsdichten:  $\int D(E)$  bzw.  $\int N(E)$
  - Fermi-Dirac-Verteilung
- Dotierung
  - Donatoren und Akzeptoren

### 3.3. Elektronen im Festkörper

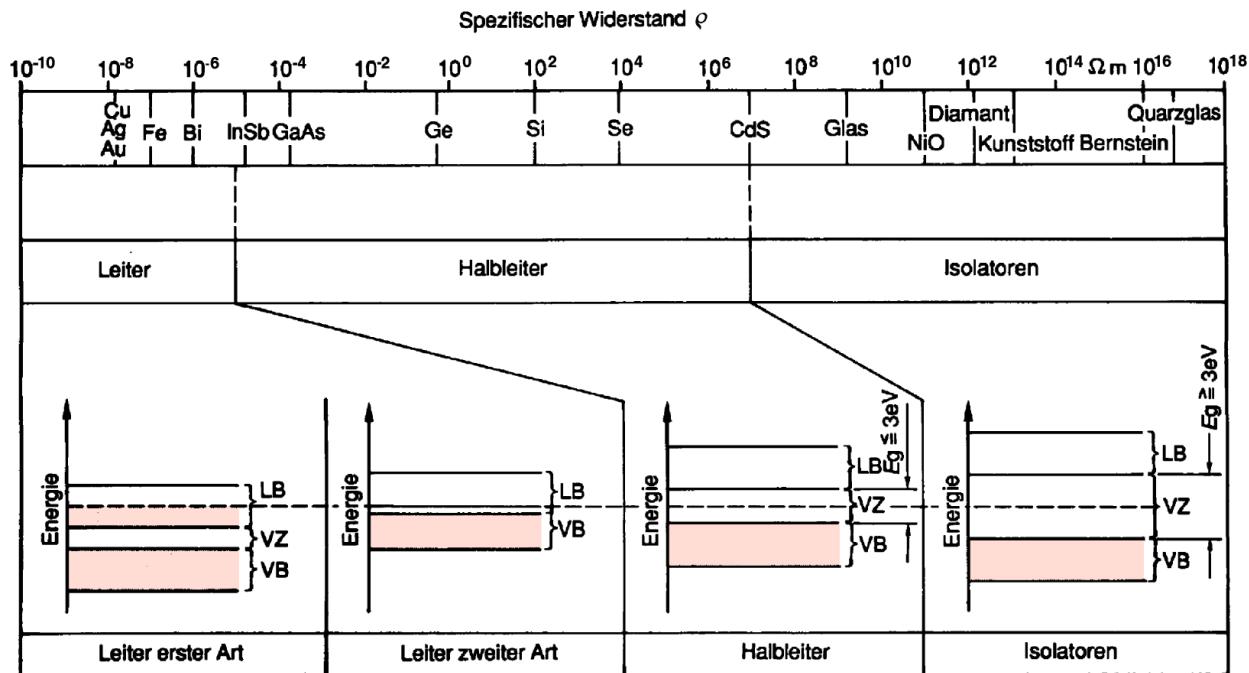


Abb. 9.29 Spezifischer elektrischer Widerstand und Bandstrukturen der Festkörper. Die mit Elektronen besetzten Energiezustände sind rot gekennzeichnet. VB: Valenzband, LB: Leitungsband, VZ: Verbotene Zone

- **Leiter** mit  $\rho < 10^{-5} \Omega m$
- **Halbleiter** mit  $10^{-5} \Omega m < \rho < 10^7 \Omega m$
- **Isolator** mit  $\rho > 10^7 \Omega m$

### 3.4. Energiebänder-Modell

- **Modell gebundener Elektronen:** Das Bohr'sche Atommodell beschreibt, "dass sich Elektronen, die an isolierte Atome gebunden sind, nur auf diskreten Energieniveaus aufhalten können."
- "Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen um die Kerne wird durch das Quadrat der Wellenfunktion  $|\Psi|^2$  beschrieben."

### 3.5. Wellenfunktion

Die Lösung für die Wellenfunktion  $\Psi$  liefert räumlich stehende Wellen. "Nach de Broglie kann dem Teilchen eine Welle  $\Psi$  mit dem Wellenvektor  $\mathbf{k} = \mathbf{p}/\hbar$  und der Kreisfrequenz  $\omega$  zugeordnet werden."

### 3. Halbleiterphysik

#### Wellenfunktion (eindimensional)

$$\Psi(x, t) = a \exp(i k_x x - i \omega t) = a \exp\left(\frac{i}{\hbar} (p_x x - E t)\right) \quad (3.5)$$

mit  $E = \hbar \omega$ ,  $p_x = \hbar k_x$  und  $i = \sqrt{-1}$ .

#### 3.6. Newton Mechanik vs. Quantentheorie

- “In der klassischen Physik (Newton Mechanik) wird das Teilchen durch seine *Bahnkurve*  $\mathbf{r}(t)$  beschrieben, in der Quantentheorie dagegen nur durch seine *Aufenthaltswahrscheinlichkeit*  $|\Psi|^2 dV$ .”
- “Die Fundamentalgleichung der Quantentheorie, die die Bestimmung von  $\Psi$  ermöglicht, ist die Schrödinger-Gleichung (E. Schrödinger, 1887 bis 1961). Sie ist vergleichbar mit der Newton’schen Bewegungsgleichung, aus der die Bahnkurve  $\mathbf{r}(t)$  bestimmt wird.”

#### 3.7. Schrödinger-Gleichung (zeitabhängig)

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\Delta + V(\mathbf{r})\right)\Psi(\mathbf{r}, t) = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\mathbf{r}, t) \quad (3.6)$$

wobei

- $m$ , Masse des Teilchens,
- $V(\mathbf{r})$ , potentielle Energie;  $\mathbf{r} = (x, y, z)$
- $\Delta$ , Laplace-Operator:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)^2 = \nabla^2 \quad (3.7)$$

#### 3.8. Energieänder-Modell (2)

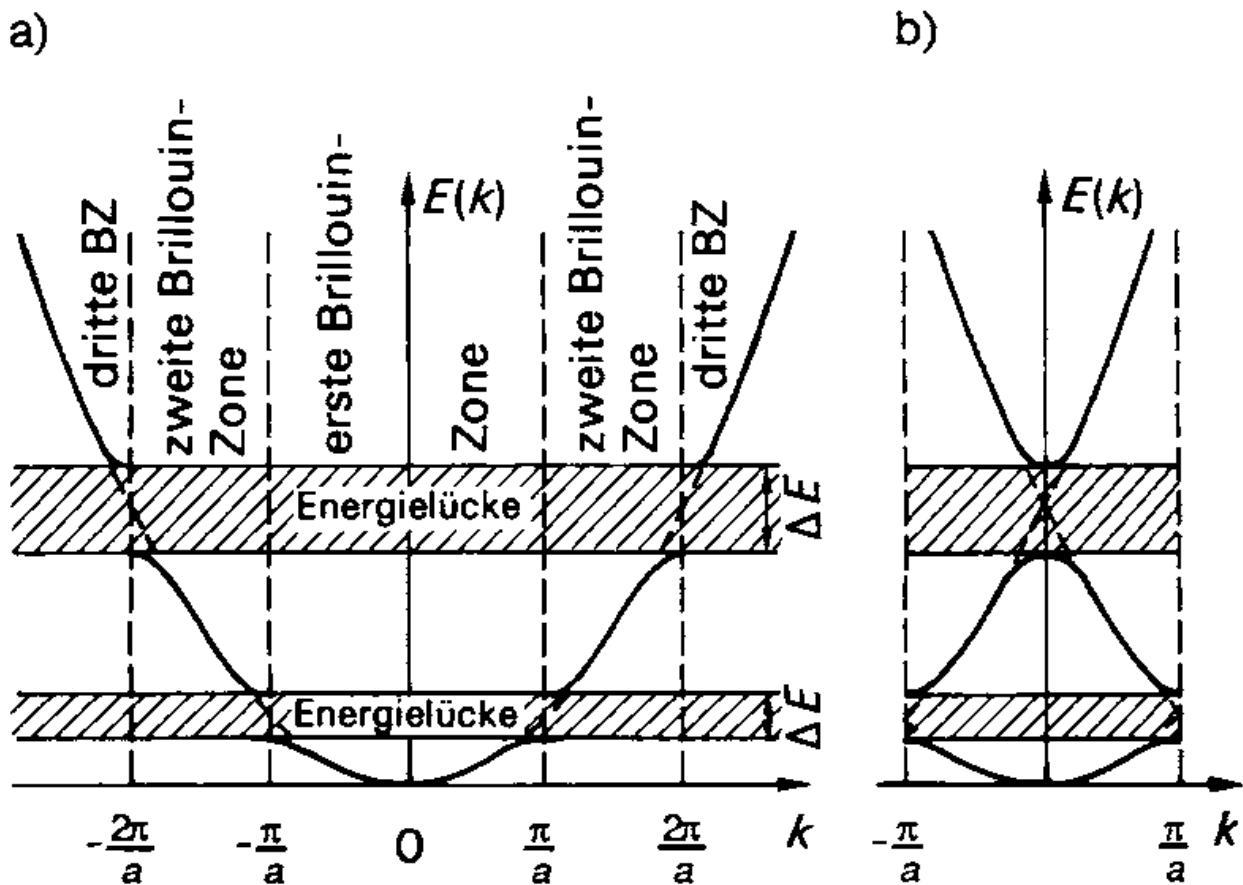
- **Modell freier Elektronen:** “Nach der Quantentheorie wird die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen im Kristall durch das *Quadrat der Wellenfunktion*  $|\Psi|^2$  beschrieben.”
- **De-Broglie-Beziehung** (Teilchenbild / Wellenbild)

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar k \quad (3.8)$$

- **Kinetische Energie der Elektronen :** Der Physiker schreibt hier  $E$  anstelle von  $W$ . In der Elektrotechnik ist der Buchstabe  $E$  allerdings mit dem elektrischen Feld verknüpft.

$$E_{kin} = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad (3.9)$$

### 3.9. Energiebandstruktur



**Abb. 9.32** Energiebandstruktur a) im erweiterten und b) reduzierten Zonenschema

- Die kinetische Energie  $E_{kin}$  als Funktion der Wellenzahl  $k$  ergibt eine Parabel.

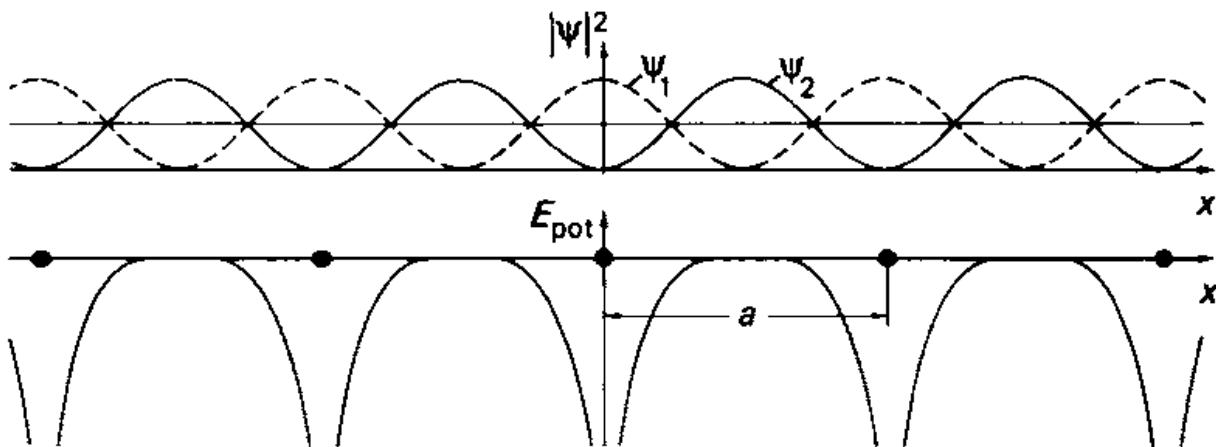
### 3. Halbleiterphysik

- Für Elektronen in Kristallen ergeben sich *verbotene* Energiebereiche.
- Stehende Wellen durch Reflexionen am Kristallgitter mit der Gitterkonstanten  $a$ .
- Elektronen- bzw. Materiewellen mit der Wellenlänge  $\lambda$  erfüllen die **Bragg'sche Reflexionsbedingung**

$$\lambda_n = \frac{2a}{\pi}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.10)$$

$$k_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} = \frac{\pi}{a} n \quad (3.11)$$

### 3.10. Aufenthaltswahrscheinlichkeit



**Abb. 9.33** Aufenthaltswahrscheinlichkeit  $|\Psi|^2$  stehender Elektronenwellen mit  $\lambda = 2a$  und potentielle Energie  $E_{\text{pot}}$  der Elektronen im Feld der Atomrümpfe

### 3.11. Reduziertes Zonenschema

- “Durch Überlagerung der laufenden mit den reflektierten Wellen entstehen stehende Elektronenwellen mit ortsfesten Knoten und Bäuchen.”
- “Die  $E(k)$ -Parabel bekommt daher an der Stelle  $k_1 = \pm\pi/a$  Unstetigkeitsstellen.” Dieses sind die sog. *verbotenen Zonen* oder *Energielücken*.
- Aufgrund der Periodizität des  $k$ -Raumes kann die Parabel durch ein *reduziertes Zonenschema* dargestellt werden, vgl. *Energiebandstruktur*.

### 3.12. Besetzungswahrscheinlichkeit

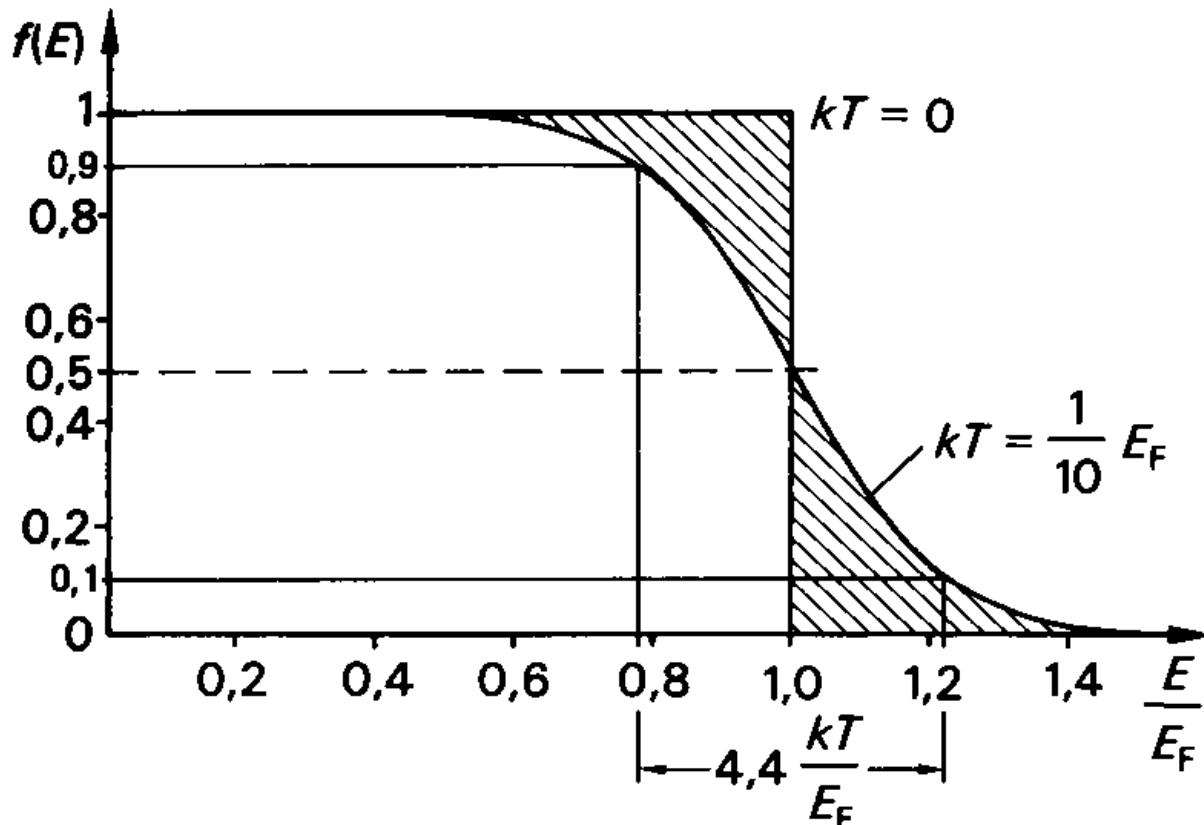
- Die Berechnung der Ladungsträgerdichten von Elektronen ( $n$ ) und Löchern ( $p$ ) erfolgt mithilfe der Fermi-Dirac-Statistik.
- **Modell des freien Elektronengases:** “Dieses wurde von A. Sommerfeld (1868 bis 1951) vorgeschlagen und von E. Fermi (1901 bis 1954) erweitert. Es beschreibt die Leitungselektronen der Metalle so wie die frei beweglichen Moleküle eines Gases, vernachlässigt also die Wechselwirkung der Elektronen mit den ortsfesten Atomkernen und damit auch das Auftreten von Energielücken.”
- “Befinden sich die Elektronen in einem Würfel der Kantenlänge  $L$ , dann ist ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit durch das Quadrat der Wellenfunktion  $\Psi$  gegeben, die als Lösung aus der Schrödinger-Gleichung folgt.”
- Streng genommen gilt das Modell des freien Elektronengases nur für  $T = 0$ . “Nur am absoluten Nullpunkt besetzen die Elektronen alle Energieniveaus von Null bis  $E_F$ .”
- Bei endlicher Temperatur nimmt die kinetische Energie des Elektronengases zu, sodass einige Energieniveaus oberhalb der Fermi-Kante besetzt werden und eine gleiche Anzahl unterhalb leer bleibt.

### 3.13. Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion

- “Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein bestimmter Energiezustand  $E$  mit Elektronen besetzt ist, wird beschrieben durch die *Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion*”

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{k_B T}\right)} \quad (3.12)$$

### 3.14. Fermi-Dirac-Statistik (1)



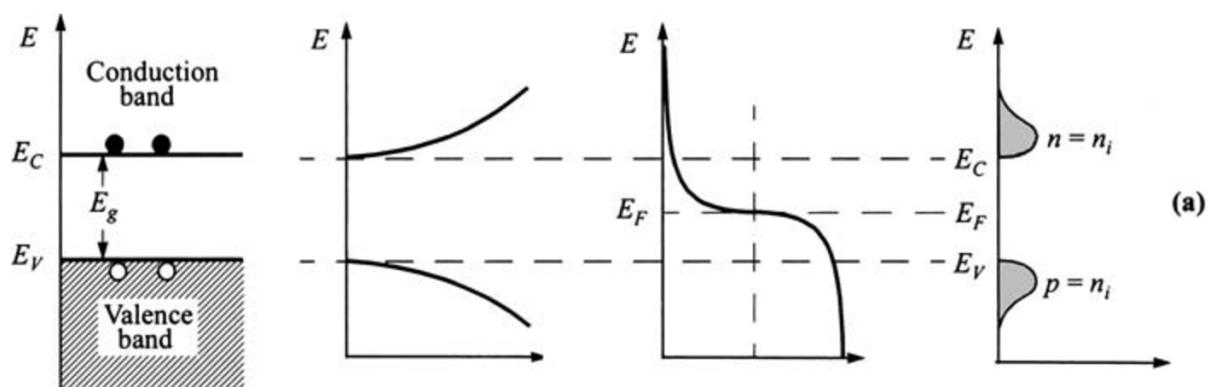
**Abb. 9.35** Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion  
( $k$ : Boltzmann-Konstante)

- “Die Fermi-Dirac-Statistik ist anwendbar auf Teilchen mit halbzahligem Spin, zu denen die Elektronen gehören.”
- “Bei  $T = 0$  sind alle Zustände unterhalb der Fermi-Energie  $E_F$  besetzt, oberhalb  $E_F$  leer:  $f_{FD}(E) = 1$  für  $0 \leq E < E_F$ ,  $f_{FD}(E) = 0$  für  $E > E_F$ .”
- “Bei endlicher Temperatur sind entsprechend den schraffierten Flächen Zustände unterhalb der Fermi-Energie leer und oberhalb besetzt. Die Besetzungswahrscheinlichkeit nimmt von 90% auf 10% ab innerhalb eines Energiebereiches von  $\Delta E \approx 4.4kT$ . Die bei tiefen Temperaturen scharfe Fermi-Kante weicht also mit zunehmender Temperatur immer mehr auf.”

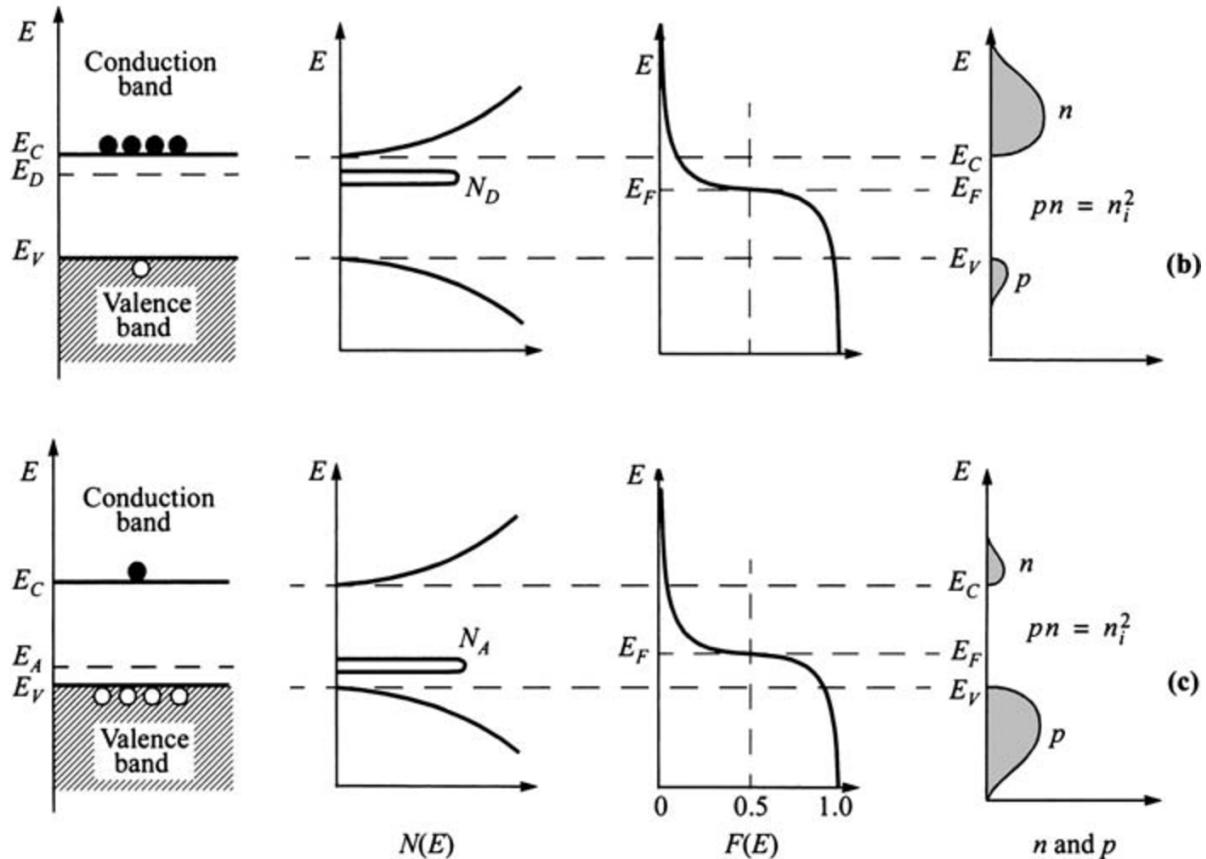
### 3.15. Halbleiter im thermischen Gleichgewicht

- Ladungsträgerkonzentration Elektronen  $n_0 \approx N_C \exp\left(\frac{E_F - E_C}{kT}\right)$
- Ladungsträgerkonzentration Löcher  $p_0 \approx N_V \exp\left(\frac{E_V - E_F}{kT}\right)$
- Massenwirkungsgesetz  $n_i^2(T) = n_0 \cdot p_0 = N_C N_V \exp\left(-\frac{(E_C - E_V)}{kT}\right)$
- Neutralitätsbedingung der Raumladung  $N_A^- + n = N_D^+ + p$

### 3.16. Intrinsischer Halbleiter



### 3.17. Dotierter Halbleiter



### 3.18. Stromgleichung

- Ohmsches Gesetz für Halbleiterphysiker
- Allgem. Ansatz (vektoriell)

$$\mathbf{J}_n = \underbrace{e\mu_n n \mathbf{E}}_{\text{Feldanteil}} + \underbrace{eD_n \nabla n}_{\text{Diffusionsanteil}} \quad D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \quad \text{Einstein-Relation} \quad (3.13)$$

$$\mathbf{J}_p = \underbrace{e\mu_p n \mathbf{E}}_{\text{Feldanteil}} - \underbrace{eD_p \nabla p}_{\text{Diffusionsanteil}} \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad \text{Einstein-Relation} \quad (3.14)$$

## 3.19. Stromgleichung 1D

Vereinf. eindimensionaler Fall

$$J_n = \underbrace{e\mu_n n E}_{\text{Feldanteil}} + \underbrace{eD_n \frac{\partial n}{\partial x}}_{\text{Diffusionsanteil}} \quad D_n = \mu_n \frac{kT}{q} \quad \text{Einstein-Relation} \quad (3.15)$$

$$J_p = \underbrace{e\mu_p n E}_{\text{Feldanteil}} - \underbrace{eD_p \frac{\partial p}{\partial x}}_{\text{Diffusionsanteil}} \quad D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad \text{Einstein-Relation} \quad (3.16)$$

## 3.20. Kontinuitätsgleichung

Allgem. Ansatz

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}_n - (\mathcal{R} - \mathcal{G}) \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e} \nabla \cdot \mathbf{J}_p - (\mathcal{R} - \mathcal{G}) \quad (3.17)$$

## 3.21. Kontinuitätsgleichung 1D

Vereinf. eindimensionaler Fall

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} - (\mathcal{R} - \mathcal{G}) \quad \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} - (\mathcal{R} - \mathcal{G}) \quad (3.18)$$

## 3.22. Poisson-Gleichung

- “Für eine vollständige Beschreibung der Vorgänge im Halbleiter unter Nichtgleichgewichtsbedingungen sind die Strom- und Kontinuitätsgleichungen durch eine Beziehung zu ergänzen, die es erlaubt, die elektrische Feldstärke bzw. das elektrostatische Potential aus der Verteilung der Ladungen zu berechnen.”

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = -\nabla^2 \varphi = \frac{\varrho}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \quad (3.19)$$

- Hierbei bezeichnet  $\varrho$  die Raumladung

$$\varrho = e(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (3.20)$$



# Literaturverzeichnis

- Hering, Ekbert, Rolf Martin, und Martin Stohrer. 2012. *Physik für Ingenieure*. Springer-Lehrbuch. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-22569-7>.
- Maloberti, Franco. 2011. *Understanding Microelectronics: A Top-Down Approach*. Wiley-Blackwell.
- Reisch, Michael. 2007. *Elektronische Bauelemente*. 2nd Aufl. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34015-7>.



**Teil II.**

**Labor**



## 4. Laborversuche

In den Laborversuchen des Moduls M 5.3 Elektronik (ELK) sollen Halbleiterbauelemente, wie Dioden, Bipolartransistoren (Bipolar Junction Transistor, BJT, engl.) und Feldeffektransistoren (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET, engl.) charakterisiert werden. Die Versuche sind der Versuchsreihe [Active Learning](#) von Red Pitaya entnommen.

Sie experimentieren in Gruppen mit bis zu vier Studierenden an elektronischen Bauelementen und Baugruppen, bspw.

- Dioden vom Typ 1N4001 und 1N4148,
- BJTs vom Typ 2N3904 (npn) und 2N3906 (pnp),
- MOSFETs vom Typ BS170 und BS250.

Die Charakterisierung geschieht über das VPN der Hochschule, in dem Sie an dem Ihnen zugewiesenen Laborplatz ELIE1 bis ELIE6 die Messungen über ein Red Pitaya STEMLab steuern. Die Steuerung der STEMlabs kann sowohl über das Web-Frontend mit der Oszilloskop-App geschehen, als auch über den jeweiligen [SCPI Server](#) des STEMlabs.

Als Ergebnis der Untersuchungen soll ein Technischer Bericht/Entwicklungsbericht mit [quarto](#) angefertigt werden.

Im Entwicklungsbericht beschreiben und vergleichen Sie die Messungen mit SPICE-Simulationen gestützt durch Literaturrecherche in Fachjournalen, Fachforen (z.B. auf den Webseiten der Halbleiterhersteller) und der Bibliothek (SuUB).



# 5. IV-Charakterisierung von Siliziumdioden

## 5.1. Zielsetzung

Ziel dieses Laborversuchs ist es, Strom- (I) und Spannungs- (V, eigentlich U) eigenschaften zwei verschiedener Siliziumdiode vom Typ 1N4001 und 1N4148 zu untersuchen. Parallel zu Messungen mit dem Red Pitaya STEMlab soll die Schaltung vollständig mit SPICE (LTspice, ngspice) simuliert werden, so dass Messdaten vom STEMLab auf dem eigenen Rechner verglichen (validiert) werden können.

*Hinweis.* In diesem Laborversuch wird die Terminologie aus der [Dokumentation](#) verwendet, wenn es um Verbindungen zum [Red Pitaya STEMlab](#) geht.

Die Erweiterungsstecker-Pins für die Spannungsversorgung -3.3 V und +3.3 V sind in der [Dokumentation](#) dargestellt.

Die [Oszilloskop und Signalgenerator App](#) wird zum Erzeugen und Beobachten von Signalen in der Schaltung verwendet, wenn der Web-Server des STEMlab's aktiviert ist.

## 5.2. Hintergrund

Eine Halbleiterdiode ist ein elektronisches Bauelement, welches häufig in Schaltungsanwendungen, bei denen der Strom nur in eine Richtung fliessen darf, als Gleichrichtung eingesetzt wird.

Wenn die Diode aus Silizium hergestellt wird, liegt die Durchlaßspannung typischerweise bei  $\approx 0.7$  V und die IV-Charakteristik im Bezug auf Diodenstrom und -spannung kann durch eine exponentielle Beziehung beschrieben werden:

$$I_D = I_S \left( e^{\frac{V_D}{NV_T}} - 1 \right) \quad (5.1)$$

wobei  $I_S$  der Sättigungssperrstrom ist und  $N$  ein Skalierungsfaktoren (Emissionskoeffizient),  $V_T = kT/q$  ist die sogenannte thermische Spannung und beträgt 25,4 mV bei Raumtemperatur ( $T = 300$  K).

### 5.3. Schematische Symbole der Diode

Jeder Diodentyp hat ein spezifisches Schaltsymbol, welches vom herkömmlichen Diodensymbol der Siliziumdiode abgeleitet ist, vgl. Abbildung 5.1. Eine Z-förmige Kathode bezeichnet eine Zener-Diode, wie im zweiten Symbol von links in Abbildung 5.1 zu sehen ist. Eine S-förmige Kathode bezeichnet eine Schottky-Diode und Pfeile, die von der Diode wegzeigen, kennzeichnen eine LED (Light Emitting Diode, engl.), wie im rechten Symbol dargestellt. Pfeile, die auf die Diode zeigen, kennzeichnen eine Photodiode.

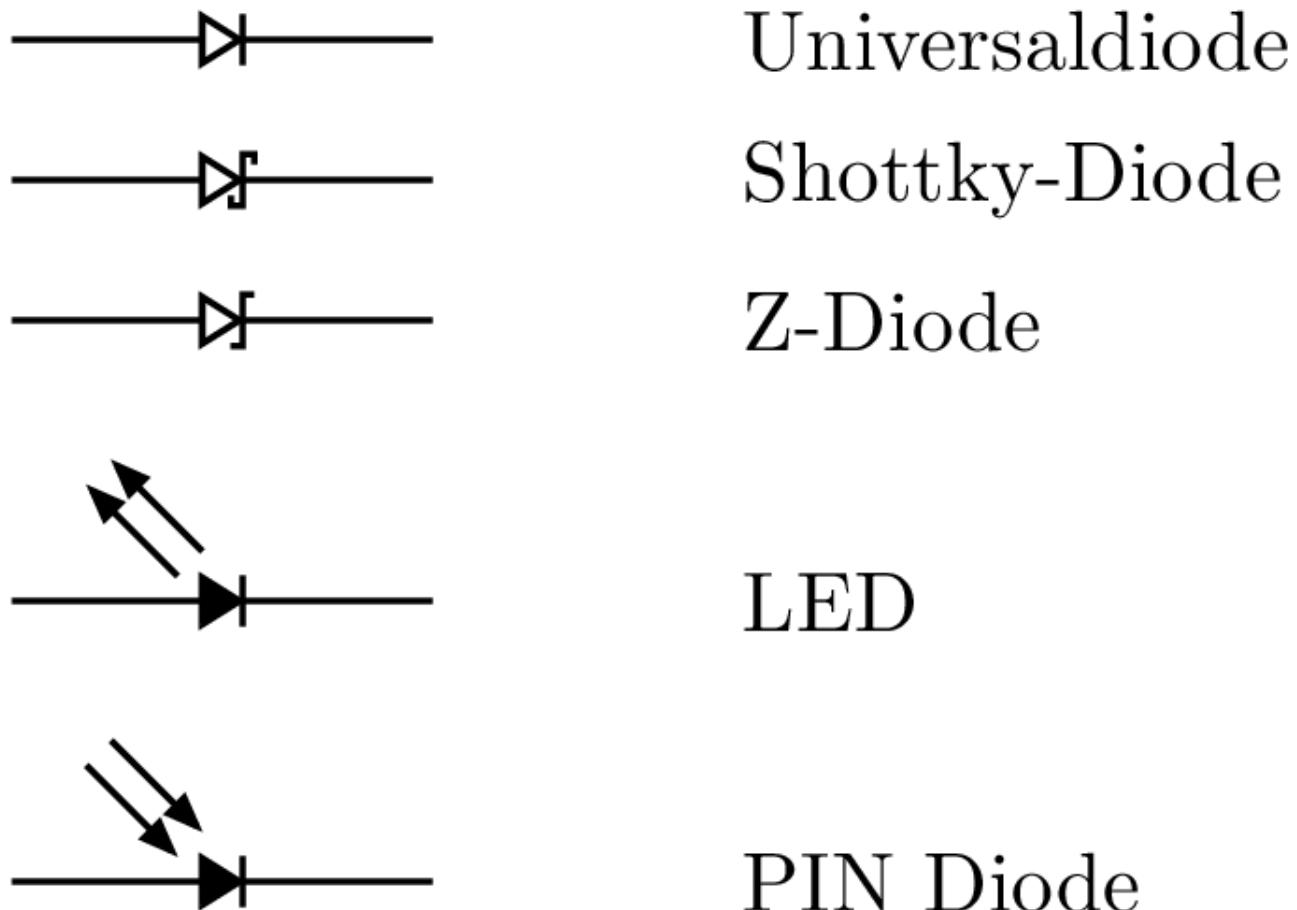


Abbildung 5.1.: Diodensymbole

### 5.4. Materialien

- Red Pitaya's STEMlab
- $10 \Omega$  Widerstand
- Diode 1N4148
- Diode 1N4001

- Platine

## 5.5. IV-Charakteristik

Die Strom- und Spannungseigenschaften der pn-Übergangsdiode können mit dem STEMlab und den in Abbildung 5.2 dargestellten Anschlüssen gemessen werden. Richten Sie die Steckplatine mit dem Generator OUT1-Kanalausgang an einem Ende des Widerstandes ein. Das andere Ende des Widerstandes ist mit einem Ende der zu messenden Diode verbunden, wie im Diagramm dargestellt. Die Eingangskanäle IN1 und IN2 sind ebenfalls unterschiedlich angeschlossen, daher werden Diodenstrom und -spannung:

$$I_D = (IN_1 - IN_2)/R_1 \quad (5.2)$$

$$V_D = IN_2 \quad (5.3)$$

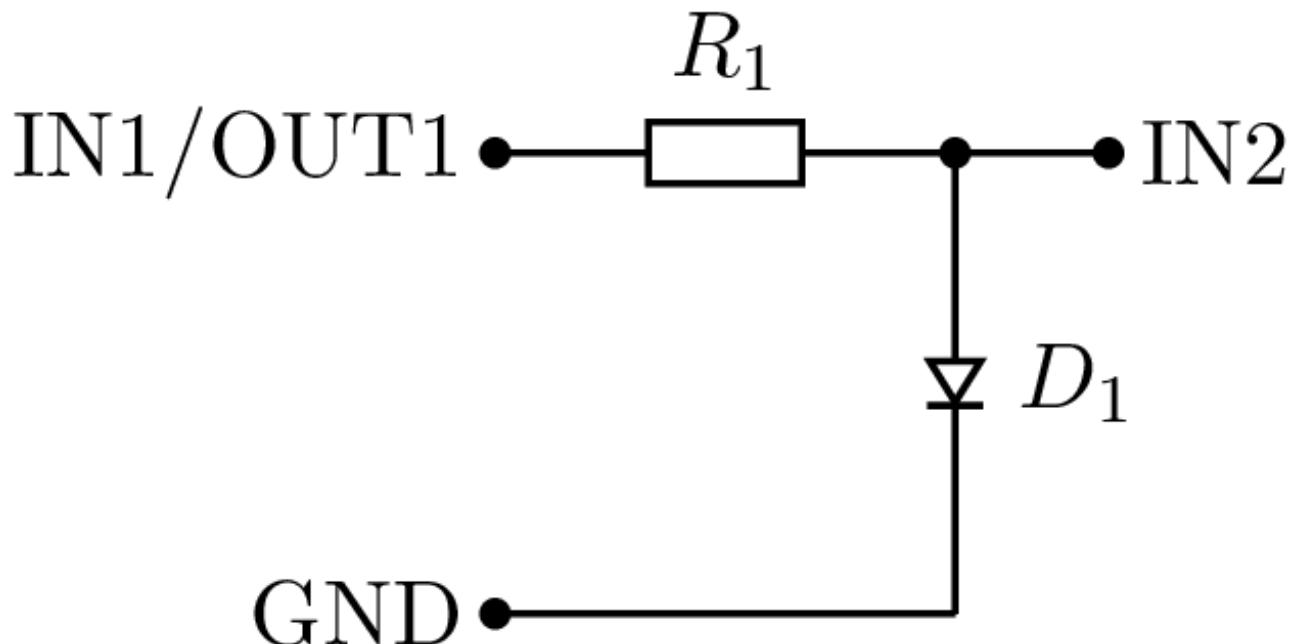


Abbildung 5.2.: Anschlussplan für Dioden IV-Kurven

Zur Messung der Strom- und Spannungseigenschaften einer Siliziumdiode sollte der OUT1-Generator als 1 kHz-Dreieckssignal mit einer maximalen Amplitude von 1 V und einer minimalen Amplitude von 0 V konfiguriert werden. Für die Messung der Strom-Spannungskurve (IV-Kurve) ist ein zweidimensionaler Graph (xy-Graph/Plot) erforderlich, wobei die x-Achse die Diodenspannung an IN2 und die y-Achse den Diodenstrom  $I_D = (IN_1 - IN_2)/R_1$  darstellen.

## 5. IV-Charakterisierung von Siliziumdioden

### 5.6. Zeitbereichsmessungen

**⚠ Warnung 1:** Unterschiedliche Zugriffsarten / Messverfahren mit dem STEMlab

NIEMALS UNTERSCHIEDLICHE ZUGRIFFSARTEN / MESSVERFAHREN PARALLEL VERWENDEN.

NICHT MIT ZWEI ODER MEHREREN RECHNERN ZUM MESSEN AUF DAS STEMLAB ZUGREIFEN.

Greifen Sie nur von einem Rechner aus auf das STEMlab zu und deaktivieren Sie die aktuell nicht genutzte Methode, bspw. Oszilloskop-App (OFF-Button), bevor Sie den Zugriff via JupyterLab oder SCPI erproben.

#### 5.6.1. Messungen mit der STEMlab Oszilloskop-App

**💡 Tipp 1**

URLs der STEMlabs für den Zugriff via Web-Server aus dem VPN der HSB

- [Laborplatz ELIE1](#)
- [Laborplatz ELIE2](#)
- [Labroplatz ELIE3](#)
- [Laborplatz ELIE4](#)
- [Laborplatz ELIE5](#)
- [Laborplatz ELIE6](#)

- Die Schaltung aus Abbildung [5.2](#) ist für Sie auf einer Platine aufgebaut und wird via SMA-Verbindern an das STEMlab angeschlossen.
- Loggen Sie sich mit vorzugsweise mit Google Chrome oder Mozilla Firefox auf dem STEMlab an ihrem Laborplatz ein und starten Sie die Oszilloskop- und Signalgenerator-App.
- Stellen Sie auf der rechten Seite im Menü bei OUT1 (Generator) den Amplitudenwert auf 0,5 V und den DC-Offset auf 0,5 V ein. Um ein Dreieckssignal als Eingangsspannung anzulegen wählen Sie im Waveform-Menü die Signalform “TRIANGLE” und aktivieren den Ausgang mit “ON”. Der “SHOW”-Button dient zum Anzeigen des Signals in der Oszilloskop-App.
- Stellen Sie sicher, dass sowohl IN1 V/div als auch IN2 V/div am linken unteren Bildschirmrand auf 200 mV/div eingesetzt sind. V/div können Sie im jeweiligen Kanal über die +/- Schaltflächen rechts unten kontrollieren.
- Setzen Sie den t/div-Wert auf 200 us/div. Auch hier können Sie t/div mit den +/- Schaltflächen einstellen.

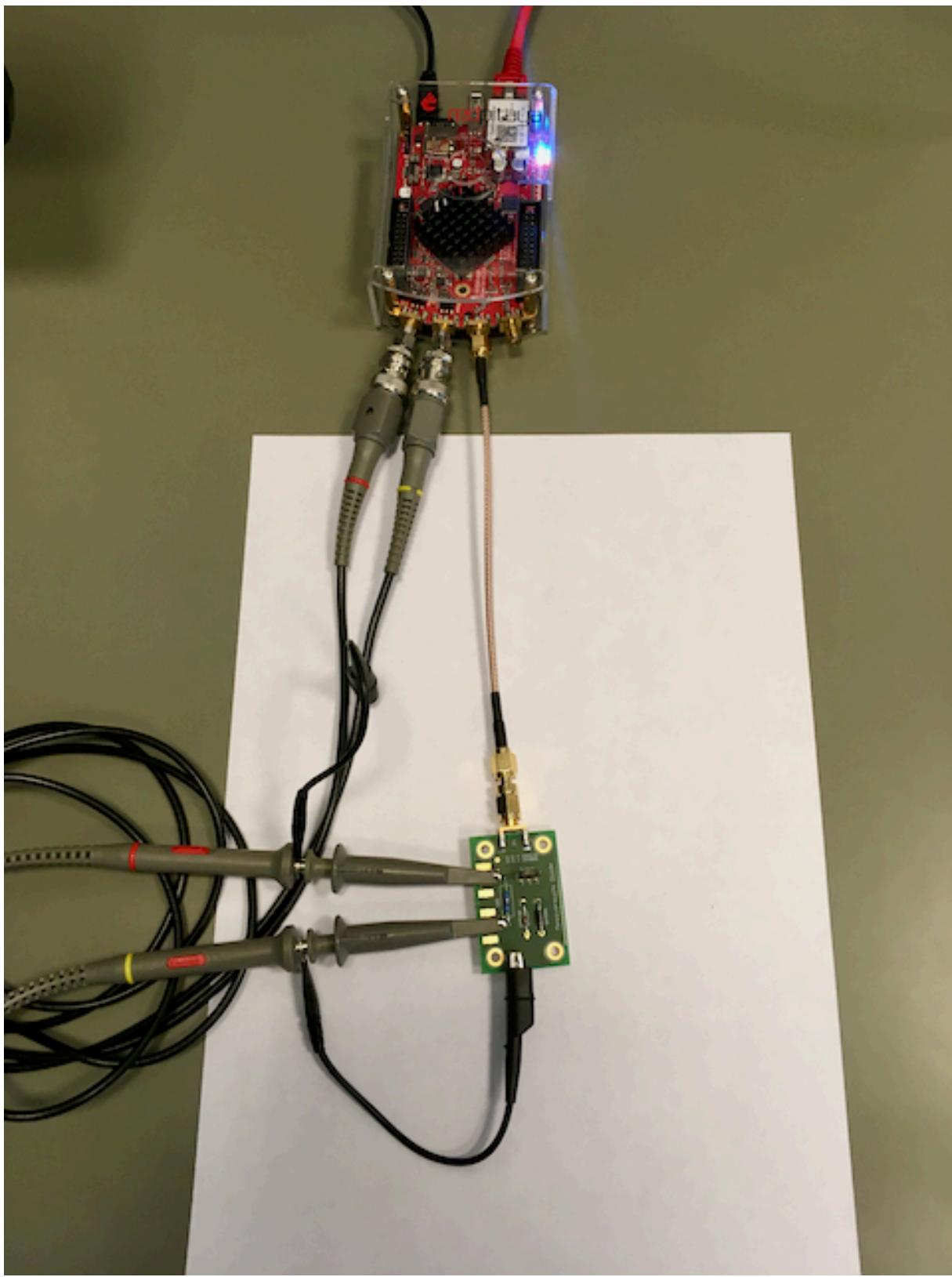


Abbildung 5.3.: Verbindungen auf dem Steckbrett

## 5. IV-Charakterisierung von Siliziumdioden

- Im Menü “MATH settings” stellen Sie die Differenz IN1-IN2 ein und aktivieren diese durch setzen des “ENABLE” Buttons. Die mathematische Kurve skaliert mit dem Faktor R1 und stellt den Diodenstrom dar.

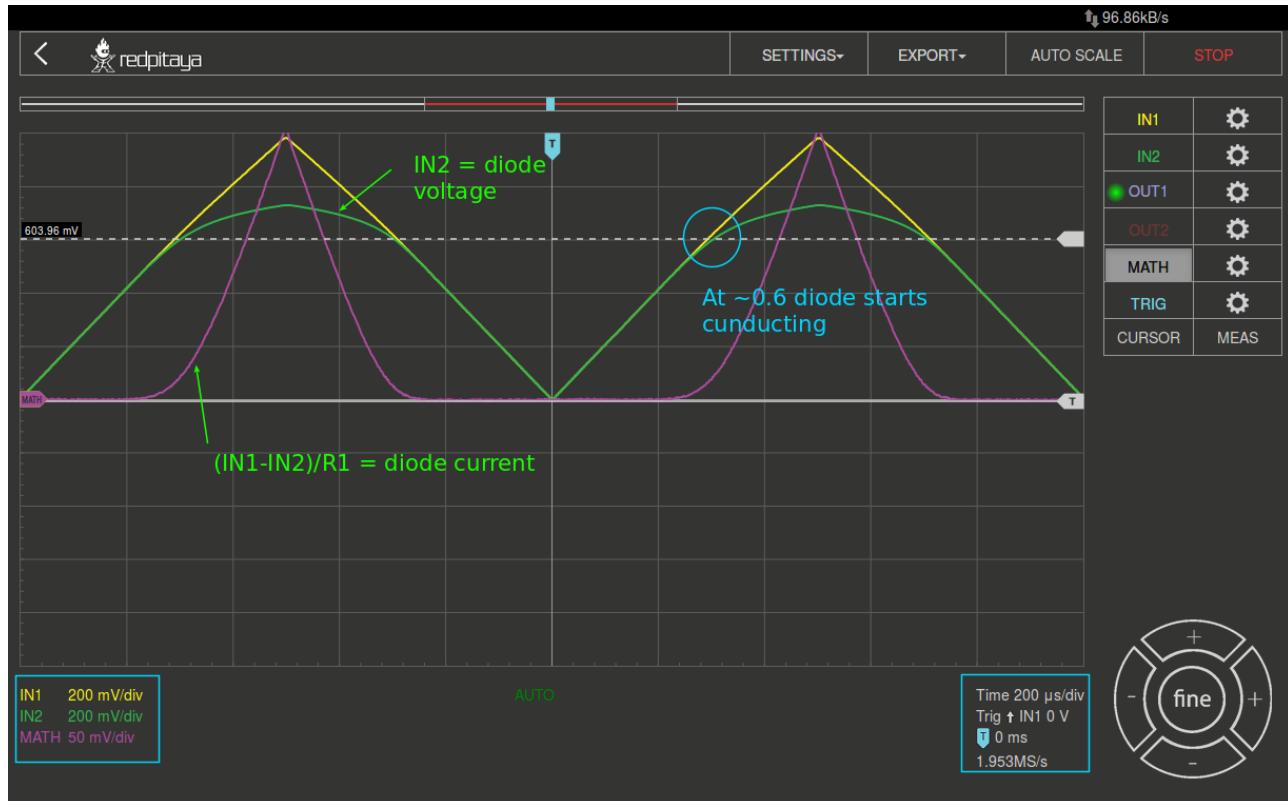


Abbildung 5.4.: Spannung und Strom einer Siliziumdiode (zeitabhängig)

In Abbildung 5.4 kann man sehen, dass die Diode zu leiten beginnt, wenn die Diodenspannung die Schwellenspannung von ca. 0.7 V erreicht.

Außerdem sollte der mit “MATH-Trace” dargestellte Diodenstrom beobachtet werden. Man sollte deutlich erkennen, dass der Diodenstrom 0 A beträgt, sobald die Diodenspannung unter 0.7 V liegt. Ab einem Zeitpunkt, ab dem die Diodenspannung größer 0.7 V ist, beginnt die Diode zu leiten und der Strom wird nur durch den Widerstand  $R_1$  begrenzt.

### 5.6.2. Messungen mit SCPI-Server und Python

 Tipp 2

*IP-Adressen der STEM Labs für den Zugriff via SCPI*

- Laborplatz ELIE1: 192.168.111.181
- Laborplatz ELIE2: 192.168.111.182
- Labroplatz ELIE3: 192.168.111.183
- Laborplatz ELIE4: 192.168.111.184
- Laborplatz ELIE5: 192.168.111.185
- Laborplatz ELIE6: 192.168.111.186



# 6. Der BJT als Diode

## 6.1. Zielsetzung

Der Zweck dieses Versuchs ist es, die Strom- und Spannungseigenschaften eines als Diode geschalteten Bipolartransistors (Bipolar Junction Transistor, kurz BJT, engl.) zu untersuchen.

### Tipp

Die für die Versorgungsspannungen von +5 V, -3,3 V und +3,3 V verwendeten Steckerstifte des STEMlab's sind in der Dokumentation aufgeführt.

Die STEMlab-Ausgänge können Spannungssignale mit einem maximalen Ausgangsbereich von  $\pm 1$  V (2 Vpp) erzeugen. Für diesen Versuch sind höhere Signalamplituden erforderlich. Aus diesem Grund wird ein Operationsverstärker (Opamp) als invertierender Verstärker eingesetzt, um die Signale der Ausgänge OUT1 und OUT2 für einen Spannungshub von -3,2 V bis +4,7 V zu verstärken. Der Opamp wird vom STEMlab aus mit +5 V und -3,3 V versorgt. Die Verstärkung des Opamps wird auf  $\approx 5$  gesetzt, wobei  $R_i = 2,2 \text{ k } \Omega$  und  $R_f = 10 \text{ k } \Omega$ .

## 6.2. Materialien

- Red Pitaya STEMlab
- OP484
- 1 k  $\Omega$  Widerstand
- 10 k  $\Omega$  Widerstand
- 2,2 k  $\Omega$  Widerstand
- Kleinsignal npn-Transistor (2N3904)
- Kleinsignal pnp-Transistor (2N3906)
- Platine
- Labornetzteil

Ein npn-Transistor, der wie in [?@fig-22-01](#) gezeigt angeschlossen ist, verhält sich wie eine Diode. Dies kann durch die Verwendung der Oszilloskop- und Signalgenerator-App gezeigt werden.

## 6. Der BJT als Diode

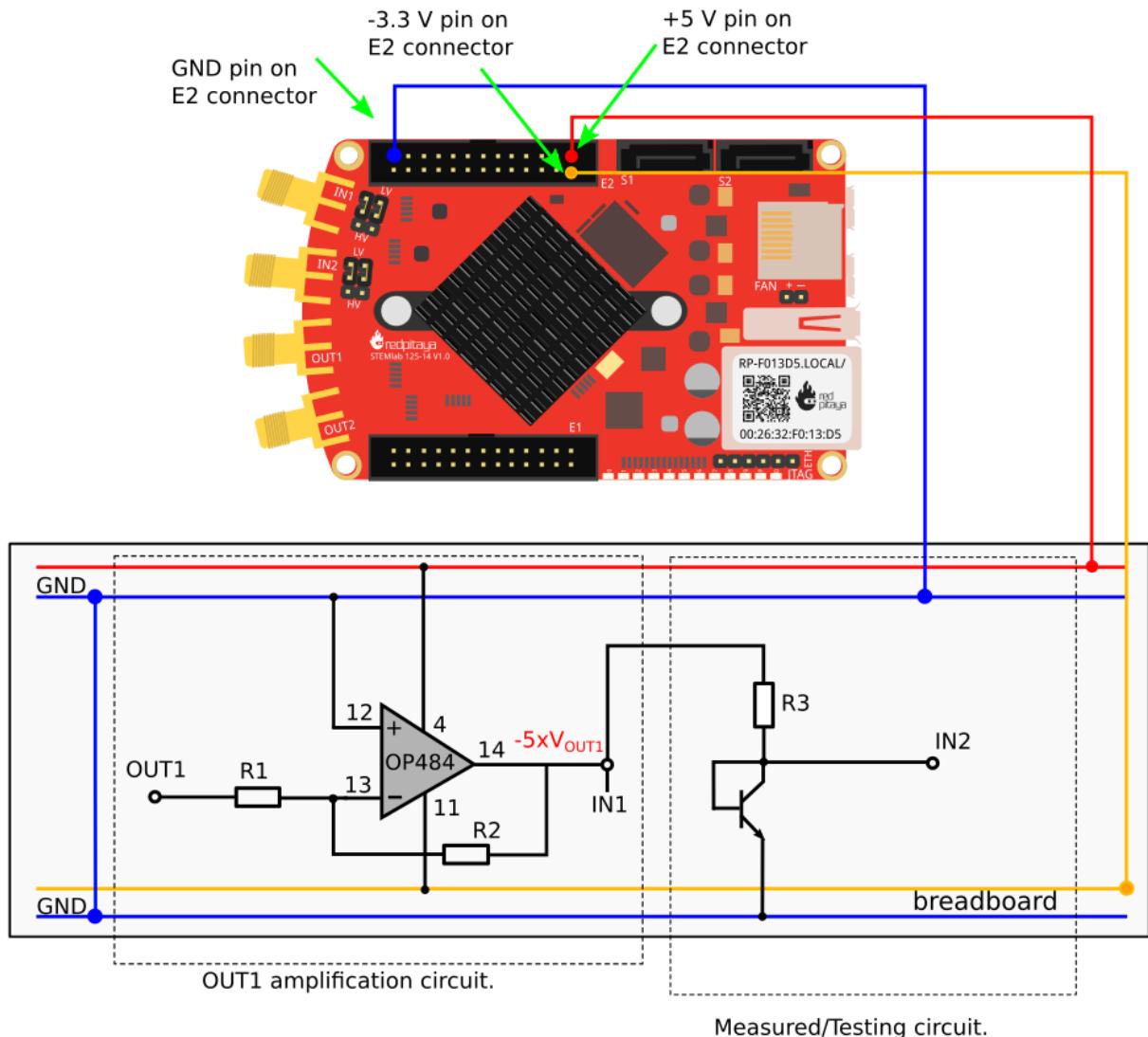


Abbildung 6.1.: npn-Transistor als Diode.

 Tipp

Beachten Sie, dass die in [?@fig-22-01](#) (links) gezeigte Verstärkerschaltung nicht das Hauptthema dieses Versuchs ist. Diese Schaltung wird nur hinzugefügt, um das Signal OUT1 zu verstärken; von hier an können Sie den Punkt  $-5 \times V_{OUT1}$  als Bezugspotenzial betrachten.

## 6.3. Verfahren

Im Labor in Raum E 507 ist an jedem Messplatz eine Platine, wie in Abbildung [6.2](#) gezeigt, an ein STEMlab angeschlossen, wobei  $R_1 = 2,2 \text{ k } \Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k } \Omega$  und  $R_3 = 1 \text{ k } \Omega$ .

 Warnung

Bevor Sie eigene Schaltungen, entweder auf dem Steckbrett oder einer eigenen Platine, an die STEMlab-Pins -3,3V und +3,3V anschließen, überprüfen Sie sorgfältig die Polarität Ihrer Schaltung. Die Spannungsversorgungsstifte -3,3V und +3,3V haben keine Schutzschaltung und können im Falle eines Kurzschlusses beschädigt werden.

- Starten Sie die Oszilloskop- und Signalgenerator-App
- Stellen Sie im Menü OUT1-Einstellungen den Amplitudenwert auf 0,8 V, den DC-Offset auf -0,12 V und die Frequenz auf 1 kHz ein, um die Eingangsspannung anzulegen. Wählen Sie im Wellenform-Menü TRIANGLE, deaktivieren Sie SHOW und wählen Sie ENABLE.
- Stellen Sie sicher, dass IN1, IN2 und MATH V/div auf der linken unteren Seite des Bildschirms auf 1 V/div eingestellt sind. Sie können V/div einstellen, indem Sie den gewünschten Kanal auswählen und die vertikalen +/- Button rechts unten verwenden.
- Setzen Sie den t/div Wert auf 200 us/div. Sie können t/div mit den horizontalen +/- Button einstellen.
- Stellen Sie unter MATH-Kanaleinstellungen folgendes ein: IN1-IN2 und wählen Sie ENABLE.
- Stellen Sie unter den Menüeinstellungen IN1 und IN2 den Messtaster auf x10 und den vertikalen Offset auf 0.

Aus Abbildung [6.3](#) ist ersichtlich, dass der npn-Transistor in der in [?@fig-22-01](#) gezeigten Konfiguration sich wie eine Diode verhält. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den Diodenmessungen aus dem Diodenversuch.

## 6.4. IV-Kurvenmessungen

Da sich ein Bipolartransistor wie eine Diode verhalten kann (vgl. Konfiguration in [?@fig-22-01](#)), können sie die IV-Charakteristik mit den gleichen Messmethoden wie im Diodenexperiment ermitteln,

6. Der BJT als Diode

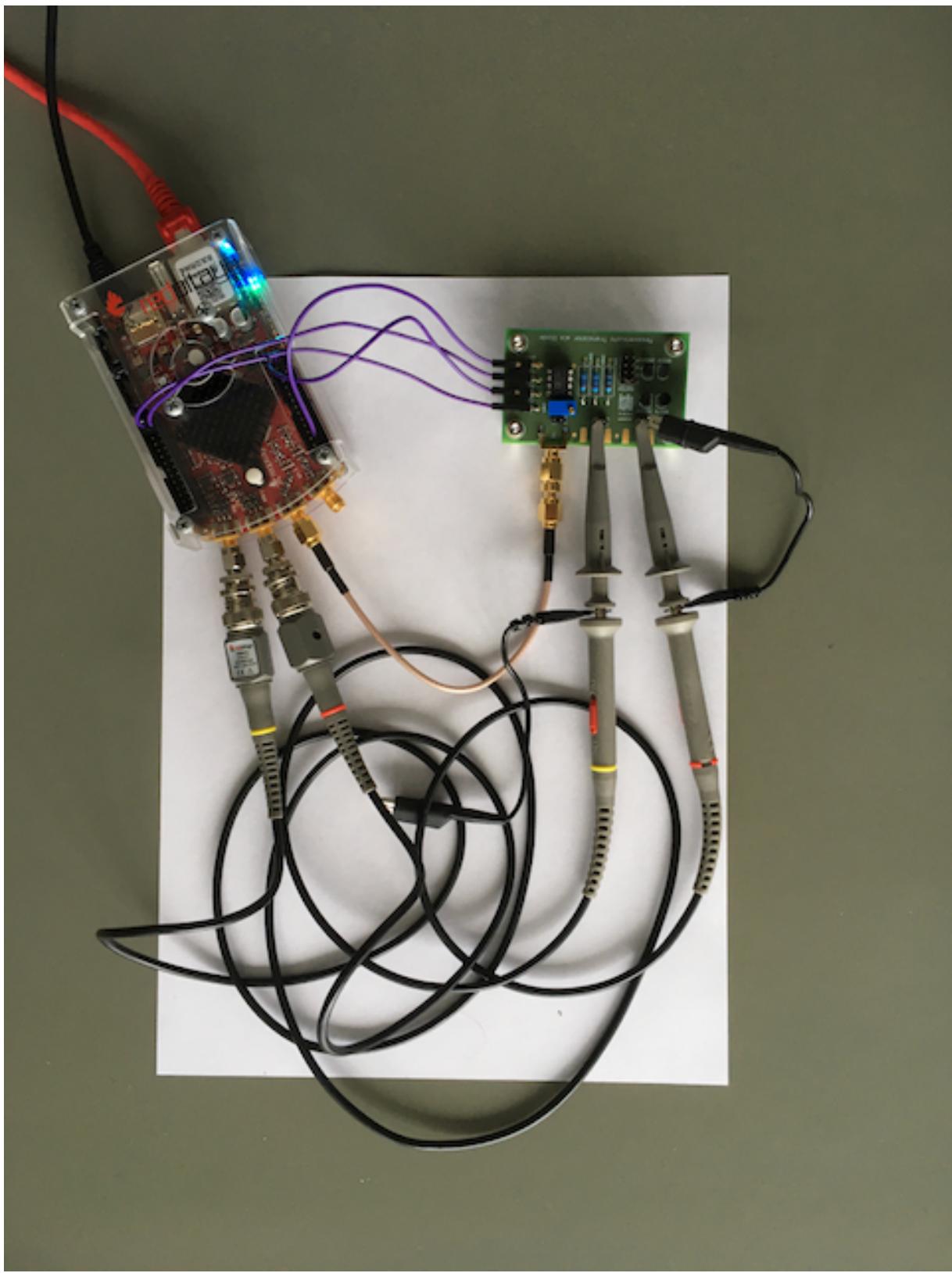


Abbildung 6.2.: Platine mit Transistorschaltung.

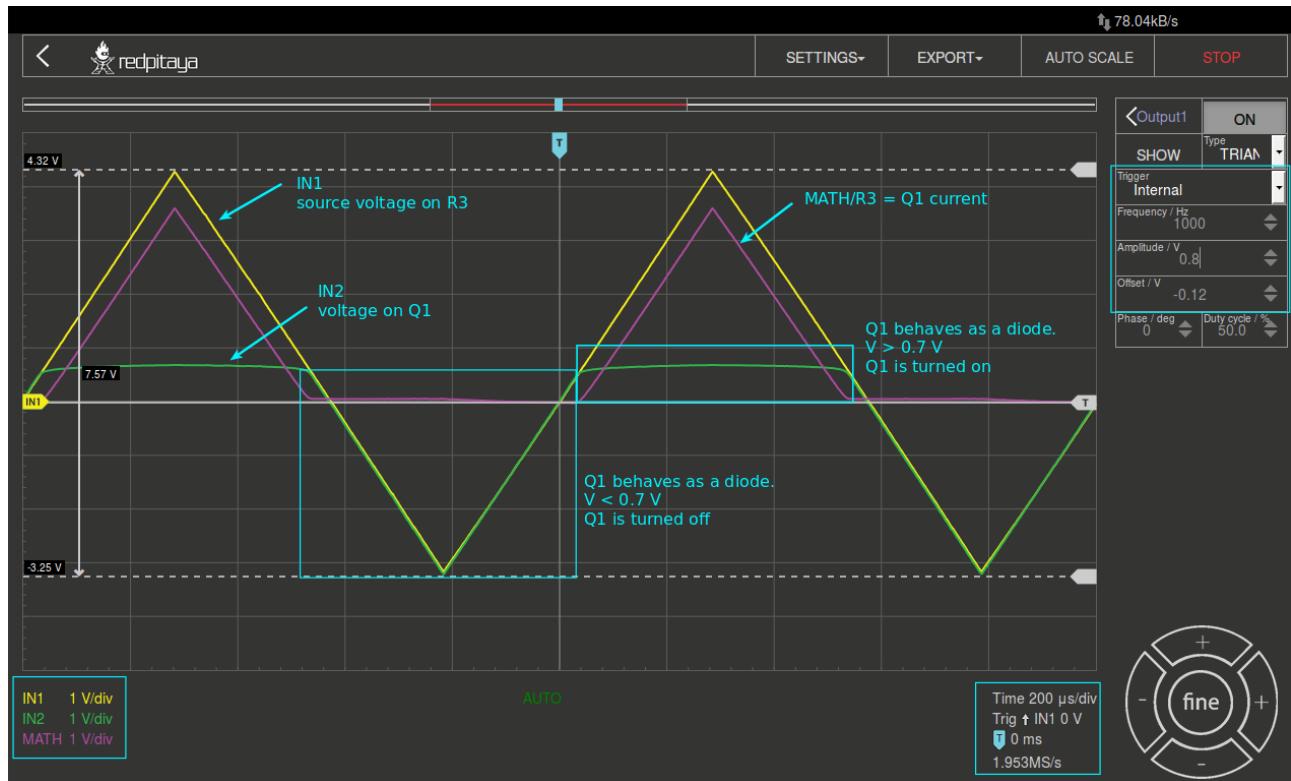


Abbildung 6.3.: npn-Transistor als Diode, Messungen.

## *6. Der BJT als Diode*

also mit der Oszilloskop-App im Web-Browser, mit einem SCPI-Skript und mit dem JupyterLab auf dem STEMlab.

# 7. Der MOSFET als Diode

## 7.1. Zielsetzung

Ziel dieses Versuches ist die Untersuchung der Strom- und Spannungscharakteristik von n-Kanal und p-Kanal MOS Feldeffekttransistoren (kurz nMOS und pMOS), die jeweils als Diode geschaltet sind.

### Tipp

Die STEMlab-Ausgänge können Spannungssignale mit einem maximalen Ausgangsbereich von  $\pm 1$  V (2 Vpp) erzeugen. Für diesen Versuch werden höhere Signalamplituden benötigt. Aus diesem Grund wird wieder ein OP27 als invertierenden Verstärker benötigt, um die Signalverstärkung von OUT1 und OUT2 für einen Spannungshub von +4,7V bis -3,2V zu erreichen. Ein OP27 wird vom STEMlab über die +5 V und -3,3 V Spannungsschienen versorgt. Der Verstärkungsfaktor des invertierenden Verstärkers wird auf  $\approx 5$  gesetzt, wobei  $R_1 = 2,2 \text{ k } \Omega$  und  $R_2 = 10 \text{ k } \Omega$  eingesetzt werden.

## 7.2. Materialien

- Red Pitaya STEMlab
- OP27 Operationsverstärker
- 1  $k\Omega$  Widerstand
- BS170 Kleinsignal-nMOS-Transistor
- BS250 Kleinsignal-pMOS-Transistor
- Platine

## 7.3. nMOS als Diode

Die Schaltung des nMOS in Diodenkonfiguration ist in Abbildung 7.2 gezeigt. In Diodenkonfiguration arbeitet ein nMOS vergleichbar zu einem npn-Transistor.

Die Schwellspannung (Threshold Voltage,  $V_{Tn,p}$ ,  $V_{th}$ ,  $V_{TH}$ ) liegt nicht zwingend bei  $\approx 0,7$  V wie bei einem Bipolartransistor. Bei einem unipolaren Transistor hängt sie von der Technologie und der Kanalgröße des Transistors ab. Für den ausgewählten nMOS-Transistor liegt die Schwellenspannung  $V_{Tn}$  bei etwa 2,0 V nominal. Das bedeutet, wenn die vom Gate-Kontakt zum Source-Kontakt anliegende Spannung ( $V_{GS}$ ) die Schwellspannung  $V_{Tn}$  überschreiten, schaltet der nMOS Transistor ein und beginnt

## 7. Der MOSFET als Diode

zu leiten. Da bei der Diodenkonfiguration des nMOS sein Drain-Kontakt schalttechnisch mit seinem Gate-Kontakt verbunden ist, ist die Drain-Source-Spannung gleich der Gate-Source-Spannung.

### Tipp

Diese Konfiguration des nMOS erzeugt effektiv eine Diode mit einer Durchlaßspannung, die der Schwellenspannung  $V_{Tn}$  entspricht.

## BS170G

**ELECTRICAL CHARACTERISTICS** ( $T_A = 25^\circ\text{C}$  unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>					
Gate Reverse Current ( $V_{GS} = 15 \text{ Vdc}$ , $V_{DS} = 0$ )	$I_{GSS}$	–	0.01	10	nAdc
Drain-Source Breakdown Voltage ( $V_{GS} = 0$ , $I_D = 100 \mu\text{Adc}$ )	$V_{(BR)DSS}$	60	90	–	Vdc
<b>ON CHARACTERISTICS</b> (Note 1)					
Gate Threshold Voltage ( $V_{DS} = V_{GS}$ , $I_D = 1.0 \text{ mA}$ )	$V_{GS(\text{Th})}$	0.8	2.0	3.0	Vdc
Static Drain-Source On Resistance ( $V_{GS} = 10 \text{ Vdc}$ , $I_D = 200 \text{ mA}$ )	$r_{DS(\text{on})}$	–	1.8	5.0	$\Omega$
Drain Cutoff Current ( $V_{DS} = 25 \text{ Vdc}$ , $V_{GS} = 0 \text{ Vdc}$ )	$I_{D(\text{off})}$	–	–	0.5	$\mu\text{A}$
Forward Transconductance ( $V_{DS} = 10 \text{ Vdc}$ , $I_D = 250 \text{ mA}$ )	$g_{fs}$	–	200	–	mmhos
<b>SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS</b>					
Input Capacitance ( $V_{DS} = 10 \text{ Vdc}$ , $V_{GS} = 0$ , $f = 1.0 \text{ MHz}$ )	$C_{iss}$	–	–	60	pF
<b>SWITCHING CHARACTERISTICS</b>					
Turn-On Time ( $I_D = 0.2 \text{ Adc}$ ) See Figure 1	$t_{on}$	–	4.0	10	ns
Turn-Off Time ( $I_D = 0.2 \text{ Adc}$ ) See Figure 1	$t_{off}$	–	4.0	10	ns

1. Pulse Test: Pulse Width  $\leq 300 \mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2.0\%$ .

Abbildung 7.1.: BS170 Spezifikation.

## 7.4. Verfahren

Für Sie ist die Schaltung aus (fig23-01?) auf einer Platine aufgebaut;  $R_1 = 2,2 \text{ k } \Omega$ ,  $R_2 = 10 \text{ k } \Omega$  und  $R_3 = 1 \text{ k } \Omega$ , Transistor M1 ist der nMOS Transistor vom Typ BS170.

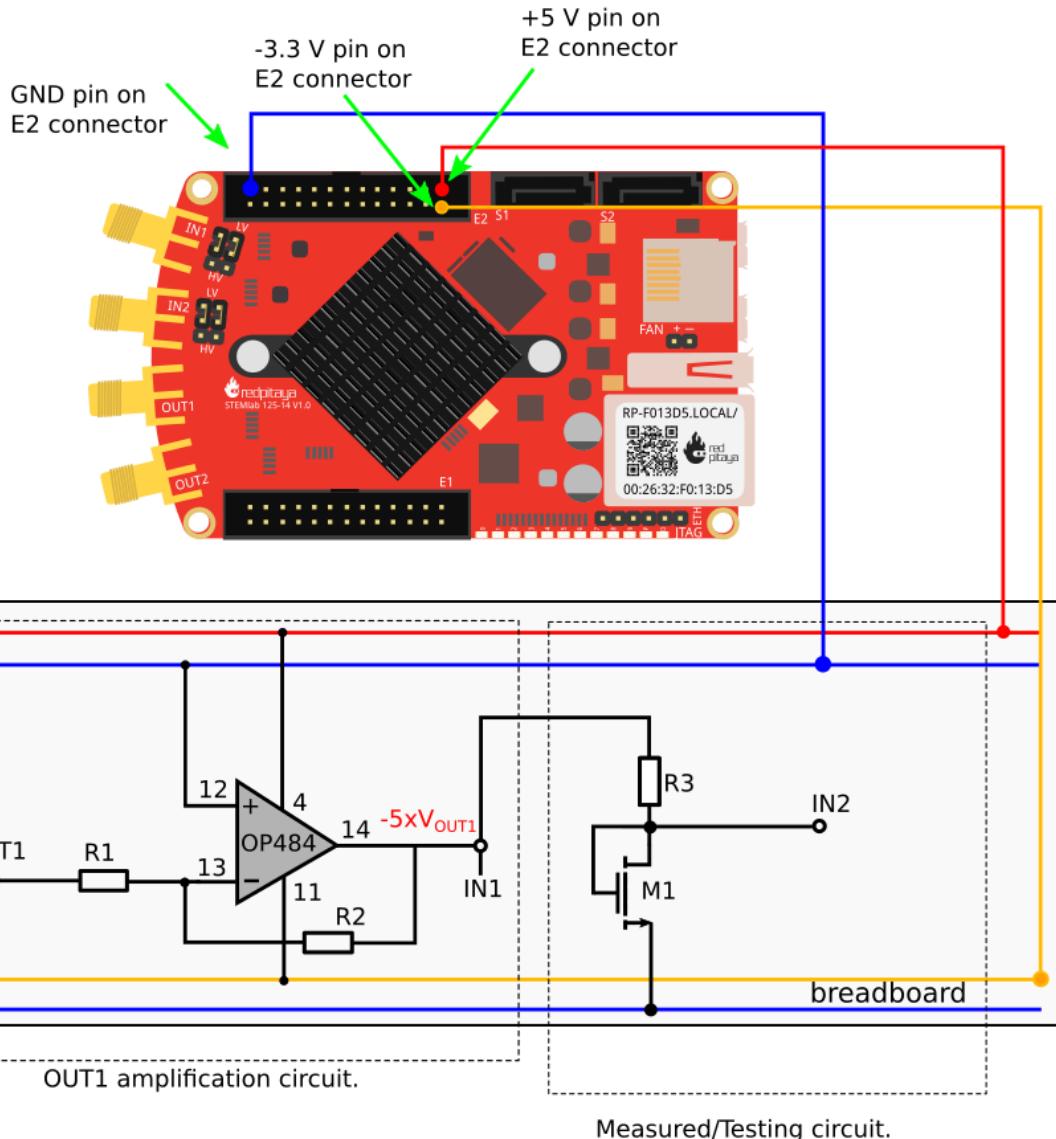


Abbildung 7.2.: Anschlussdiagramm nMOS-Messung

7. Der MOSFET als Diode

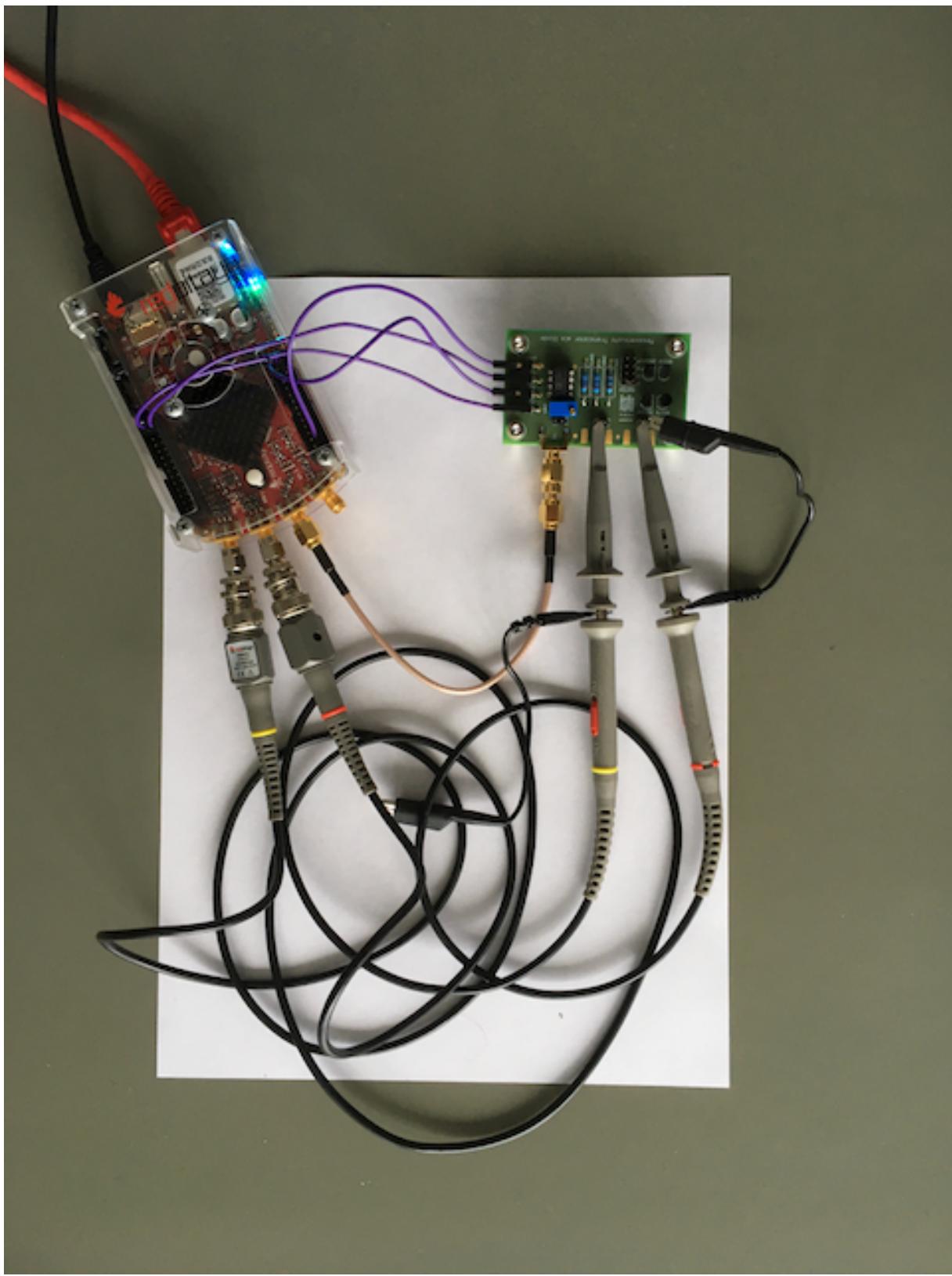


Abbildung 7.3.: nMOS-Schaltung auf der Platine

### Warnung

Bevor Sie die Schaltung an die STEMlab-Pins -3,3 V und +3,3 V anschließen, überprüfen Sie Ihre Schaltung nochmal. Die Spannungsversorgungsstifte -3,3 V und +3,3 V haben keine Schutzschaltung und können im Falle eines Kurzschlusses beschädigt werden.

- Starten Sie die Oszilloskop und Signalgenerator-App
- Stellen Sie im Menü OUT1-Einstellungen den Amplitudenwert auf 0,45 V, den DC-Offset auf -0,45 V und die Frequenz auf 1 kHz ein, um die Eingangsspannung anzulegen. Wählen Sie im Wellenform-Menü TRIANGLE, deaktivieren Sie SHOW und wählen Sie ENABLE.
- Stellen Sie sicher, dass IN1, IN2 und MATH V/div auf der linken unteren Seite des Bildschirms auf 1 V/div eingestellt sind (Sie können V/div einstellen, indem Sie den gewünschten Kanal auswählen und mit dem vertikalen +/- Regler einstellen).
- Setzen Sie t/div Wert auf 200 us/div (Sie können t/div mit dem horizontalen +/- Reglern einstellen).
- Stellen Sie unter MATH-Kanaleinstellungen IN1-IN2 ein und wählen Sie ENABLE.
- Stellen Sie unter Menueinstellungen IN1 und IN2 den Messtaster auf x10 und den vertikalen Offset auf 0.
- Stellen Sie unter Einstellungen des MATH-Menüs den vertikalen Offset auf 0 ein.
- Stellen Sie unter TRIGGER-Einstellungen den Triggerpegel auf 1 V ein

## 7.5. IV-Kurvenmessungen

Da sich ein nMOS wie eine Diode mit einer Durchlaßspannung entsprechend der  $V_{Tn}$  verhalten kann (Konfiguration in Abbildung 7.2), können sie die IV-Charakteristik wie bei der Diodenschaltung messen. Sie können die Oszilloskop-App, ein Jupyter Notebook oder ein SCPI-Skript verwenden.

## 7.6. pMOS als Diode

Die selben Messungen können auch mit einem pMOS-Transistor durchgeführt werden. Beim pMOS-Transistor wird allerdings die Polarität der Spannung umgekehrt, so dass die Konfiguration der pMOS-Diode anders sein muss als bei einem nMOS. Die Konfiguration der pMOS-Diode ist in Abbildung 7.5 dargestellt.

## 7. Der MOSFET als Diode

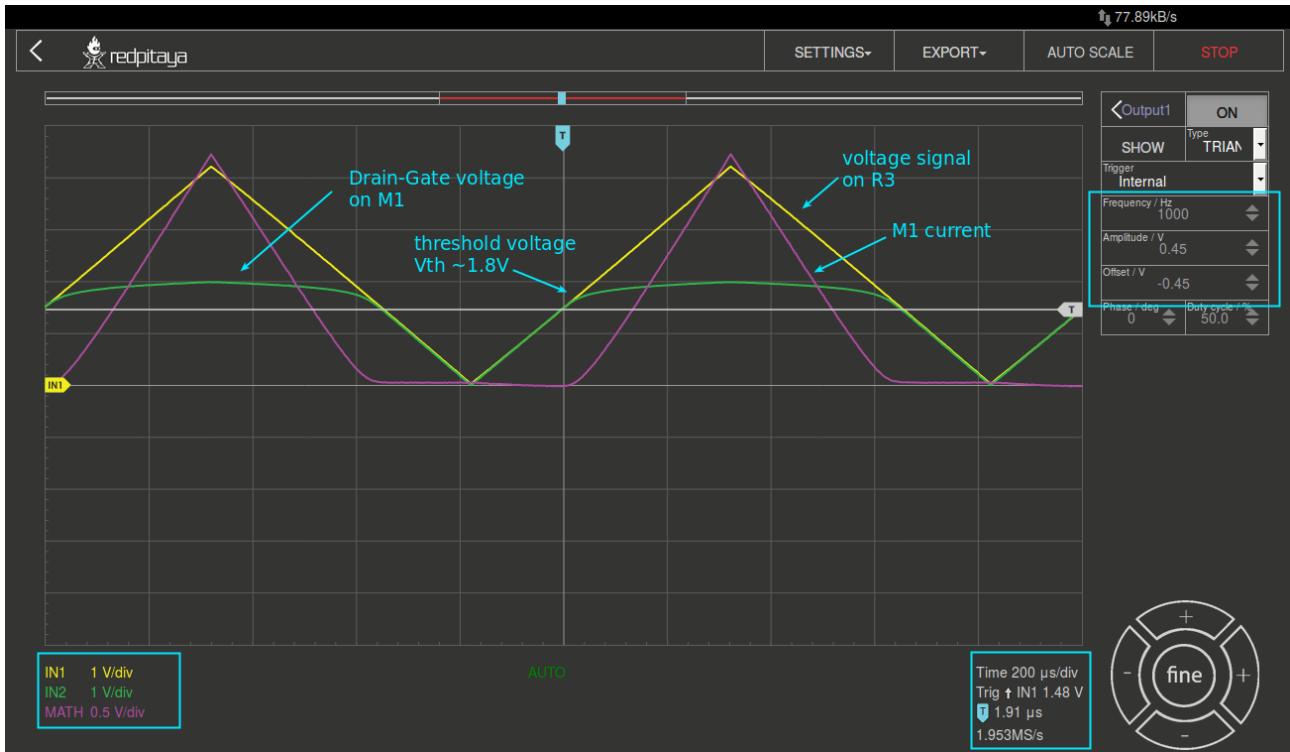


Abbildung 7.4.: nMOS Diodenmessung

## 7.7. Verfahren

Für Sie ist die Schaltung aus Abbildung 7.5 auf einer Platine aufgebaut;  $R_1 = 2,2\text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 10\text{ k}\Omega$  und für  $R_3 = 1\text{ k}\Omega$ , der Transistor M1 ist ein pMOS Transistor vom Typ BS250.

### ⚠ Warnung

Bevor Sie die Schaltung an die STEMlab-Pins -3,3V und +3,3V anschließen, überprüfen Sie Ihre Schaltung nochmal. Die Spannungsversorgungsstifte -3,3V und +3,3V haben keine Schutzschaltung und können im Falle eines Kurzschlusses beschädigt werden.

- Starten Sie die Anwendung Oszilloskop und Signalgenerator-App
- Stellen Sie im Menü OUT1-Einstellungen den Amplitudenwert auf 0,45 V, den DC-Offset auf -0,45 V und die Frequenz auf 1 kHz ein, um die Eingangsspannung anzulegen. Wählen Sie im Wellenform-Menü TRIANGLE, deaktivieren Sie SHOW und wählen Sie ENABLE.
- Stellen Sie sicher, dass IN1 und IN2 auf der linken unteren Seite des Bildschirms auf 1 V/div eingestellt sind (V/div kann im gewünschten Kanal mit den vertikalen +/--Buttons eingestellt werden) und MATH auf 0.5 V/div.
- Setzen Sie t/div Wert auf 200  $\mu$ s/div (t/div wird mit den horizontalen +/--Buttons eingestellt).

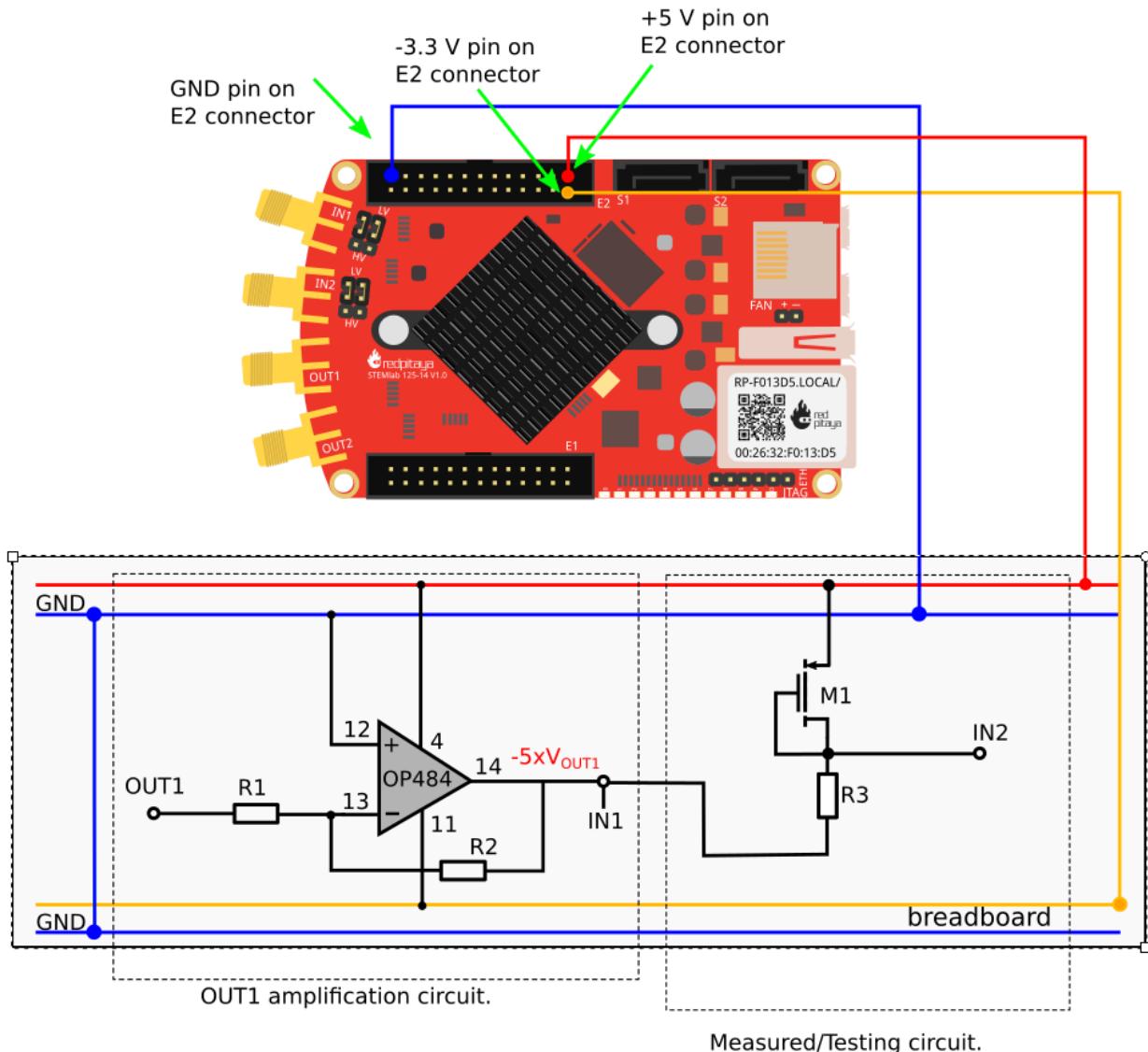


Abbildung 7.5.: pMOS Anschlussdiagramm.

## 7. Der MOSFET als Diode

- Stellen Sie unter MATH-Kanaleinstellungen die Differenz IN1-IN2 ein und wählen Sie ENABLE.
- Stellen Sie unter den Menueinstellungen IN1 und IN2 den Messtaster auf x10 und den vertikalen Offset auf 0.
- Stellen Sie unter Einstellungen des MATH-Menüs den vertikalen Offset auf 0 ein.
- Stellen Sie unter TRIGGER-Einstellungen den Triggerlevel auf 4 V ein.

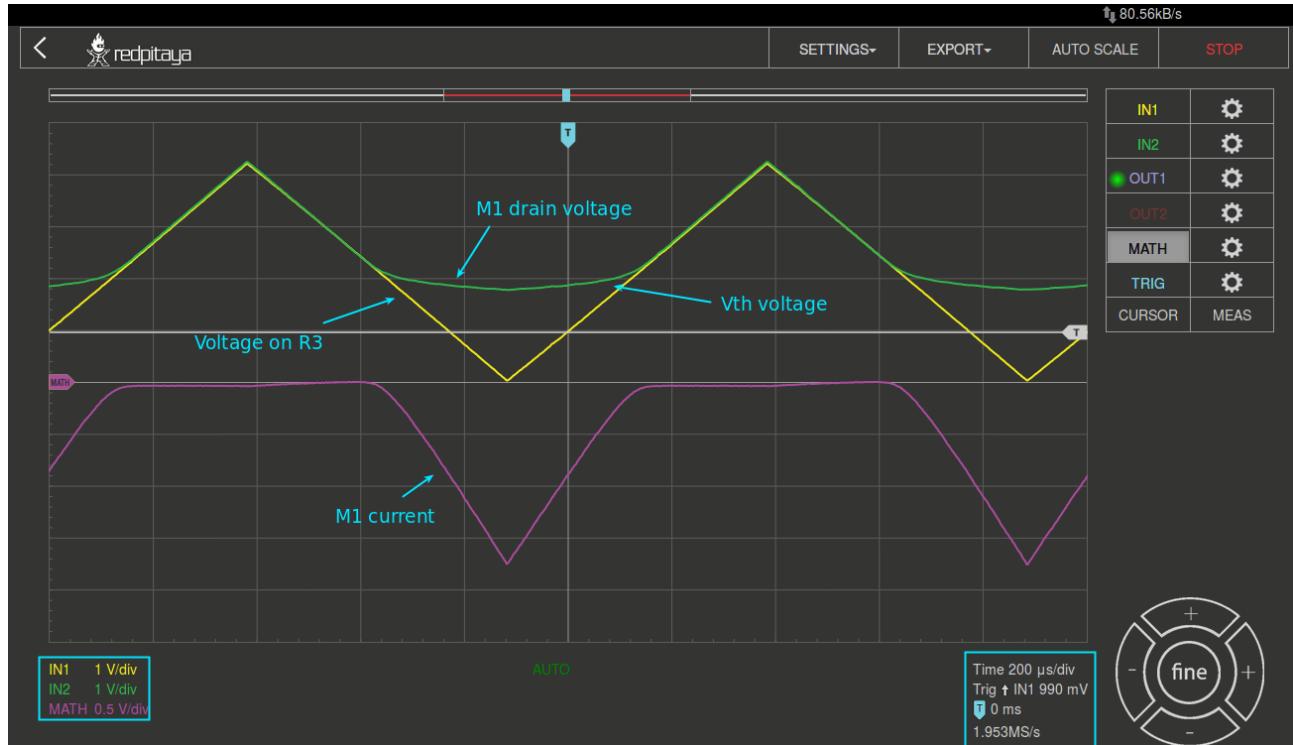


Abbildung 7.6.: pMOS Diodenmessung.

Wie in Abbildung 7.6 zu sehen, verhält sich der pMOS in der Diodenkonfiguration wie eine Diode mit einer Durchlaßspannung gleich der pMOS Schwellenspannung  $V_{T_P}$ .

Vergleichen Sie Abbildung 7.6 mit Abbildung 7.4 und versuchen Sie, den Unterschied zwischen nMOS- und pMOS-Diodenkonfigurationen zu erklären.