



Digitaltechnik Vorlesung 1: Organisation und Einführung in die digitale Welt

Mathieu Luisier

Institut für Integrierte Systeme, ETH Zürich

- **Warum Digitaltechnik?**
Elektronische Schaltungen
- **Vorlesung, Übung, Praktikum**
Organisation
- **Grundlagen der Elektronik**
Analog vs. Digital
Strom und Spannung
Transistoren
- **Zusammenfassung**

- **Warum Digitaltechnik?**
Elektronische Schaltungen
- Vorlesung, Übung, Praktikum
 Organisation
- Grundlagen der Elektronik
 Analog vs. Digital
 Strom und Spannung
 Transistoren
- Zusammenfassung

Elektrotechnik an der ETH: vier Kerngebiete

(1) Elektronik und Photonik



Entwurf von neuen elektronischen Geräten

(2) Information und Kommunikation



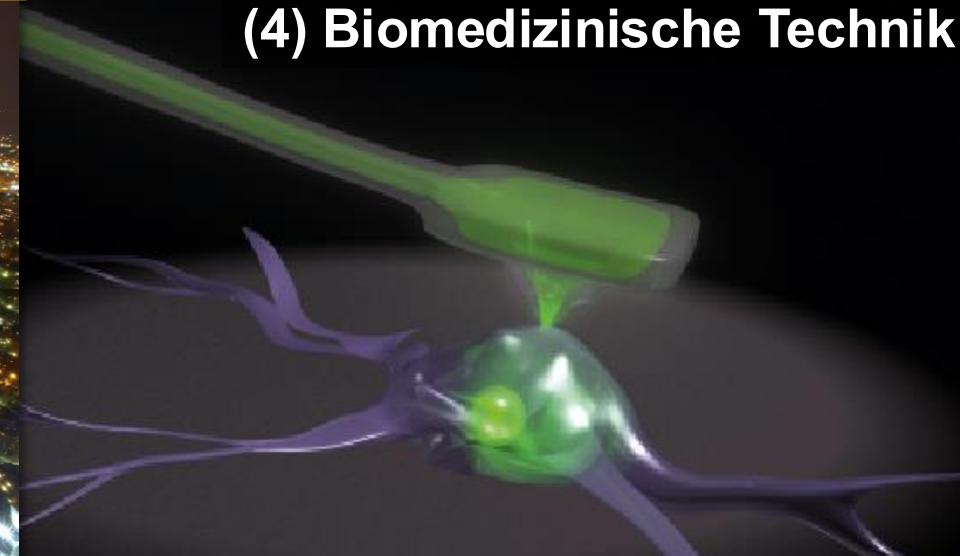
Sichere und fehlerfreie Datenübertragung

(3) Energie



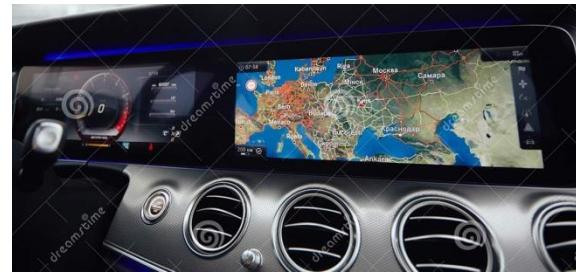
Nachhaltige Energiequellen und Batterien

(4) Biomedizinische Technik

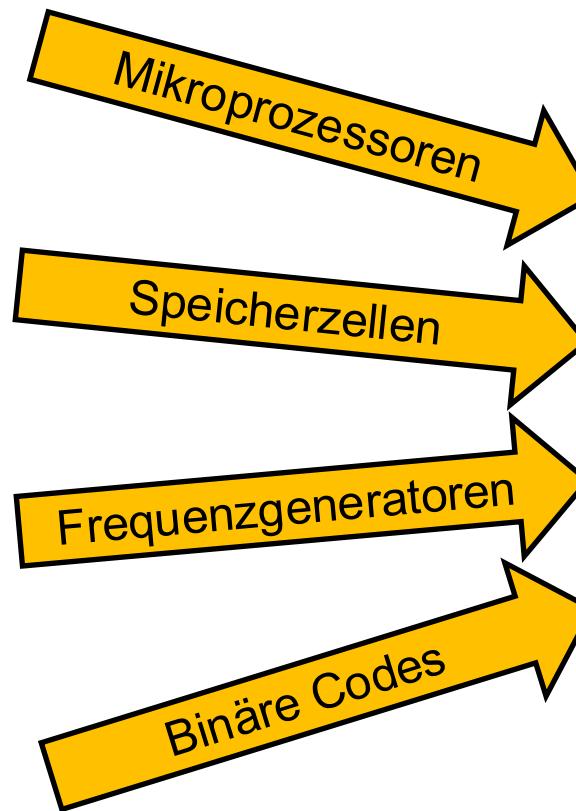


Verbesserung der Gesundheitsverordnung

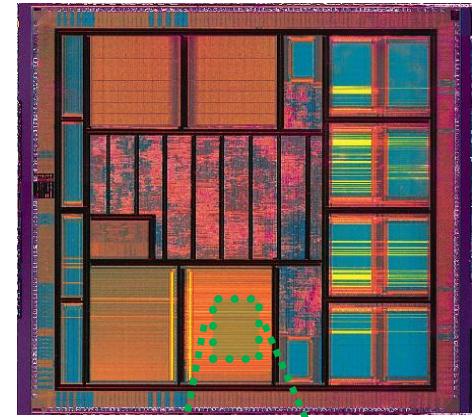
Digitaltechnik ist überall



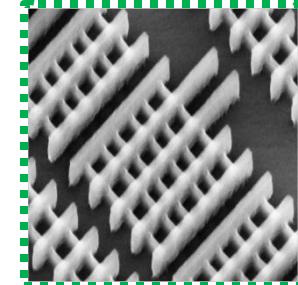
Moderne elektronische Geräte
(Personal Computer, Telefon,
Tablet, Smartwatch, Wagen...)



Integrierte Schaltung



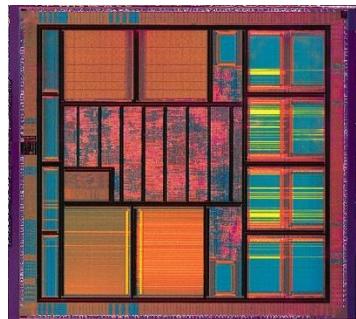
Was findet man im Kern
von diesen Geräten?



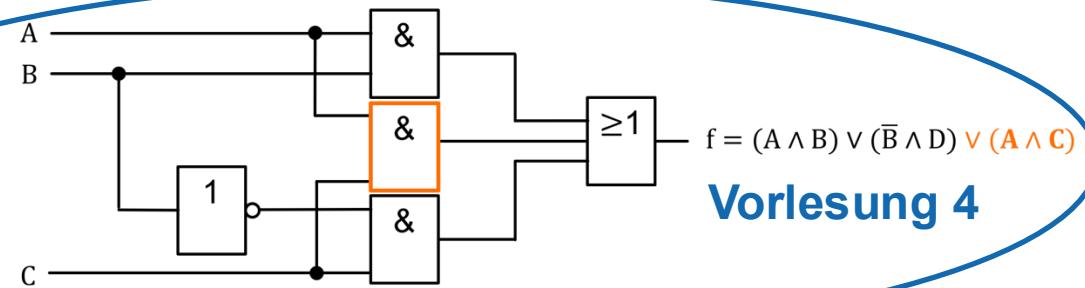
Transistoren

Was werden wir in dieser Vorlesung studieren?

Integrierte Schaltung

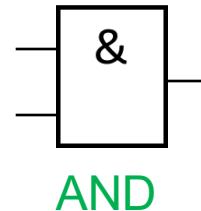
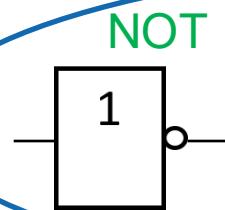


Vorlesung 5

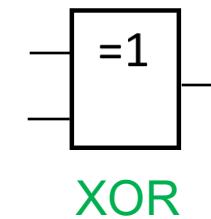
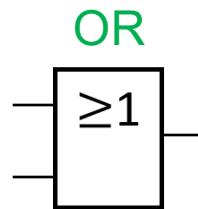


Vorlesung 4

Basisschaltungen



Vorlesung 2



Vorlesung 3

Logische Bauelemente

Wie kombinieren wir
diese Komponenten?

Grundblöcke

Beispiel einer einfachen Operation: Addition



Zahlenumwandlung

Instruktion

Problem
Stellung

01011001+00110000

89

48

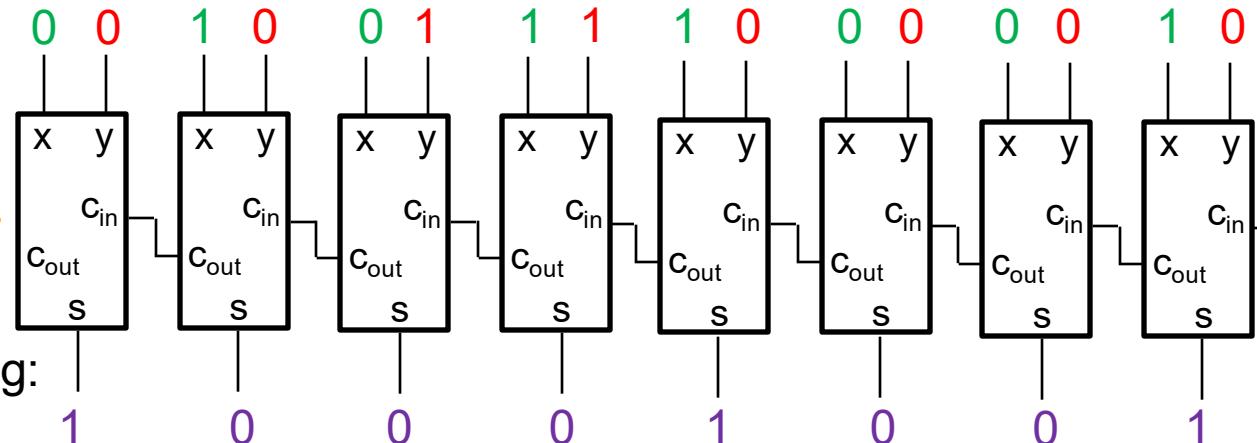
Wie funktioniert die
Addition von Zahlen
in Computern?

01011001
+00110000

????????

10001001

137



Logische
Operationen

Beispiel einer einfachen Operation: Addition



Zahlenumwandlung

Vorlesung 6

Instruktion

01011001 + 00110000

89

48

Problem
Stellung

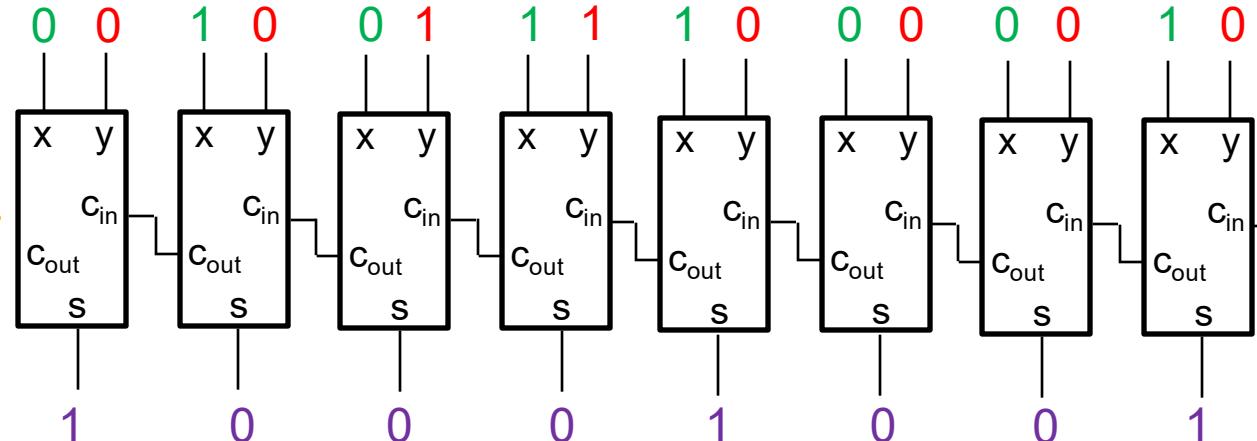
Wie funktioniert die
Addition von Zahlen
in Computern?

01011001
+ 00110000

????????

10001001

137

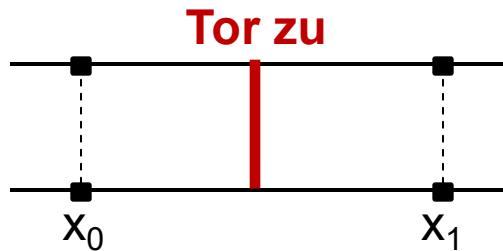


Vorlesung 7

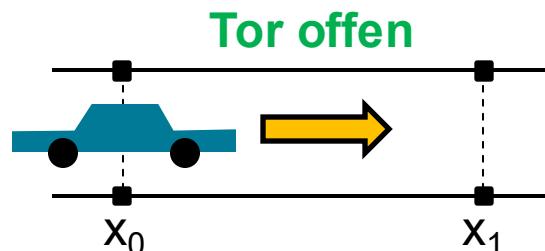
Beispiel eines Garagenautomaten

Ziel: Entwurf eines Automaten, um ein Garagentor zu öffnen/schliessen

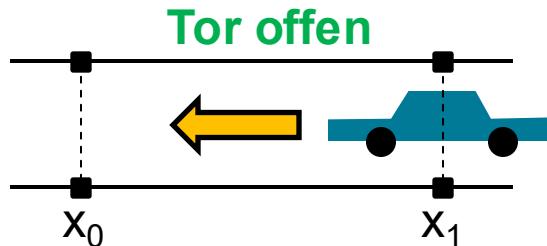
1) Es kommt kein Auto



2) Ein Auto will rein

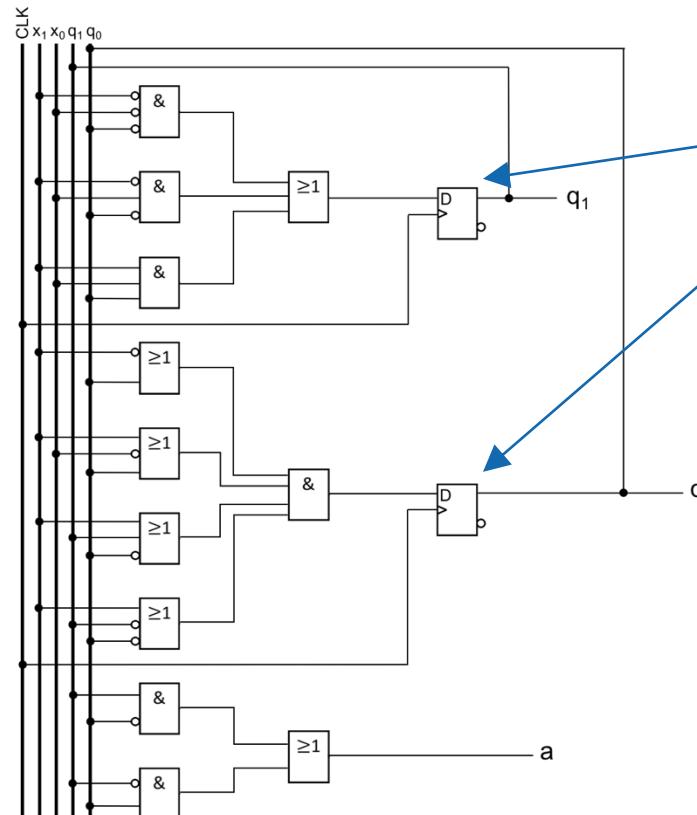


3) Ein Auto will raus



Automat Daten:

- 3 Zustände (kein Wagen, Wagen rein, Wagen raus)
- 2 Eingänge (Detektoren x_0 und x_1)
- 1 Ausgang (Tor kann zu oder offen sein)



Vorlesungen 8/9

Wie kommt man auf eine solche Schaltung?

Vorlesungen 10-12

Ziele der Digitaltechnik Vorlesung

Am Ende dieser Vorlesung werden Sie:

- die Grundlagen der Digitaltechnik beherrschen;
- die wesentlichen Baublöcke (er)kennen;
- Digitalschaltungen analysieren können;
- Digitalschaltungen selber entwickeln können;
- Erfahrung in der Handhabung und der Einschätzung digitaler Systeme gewonnen haben;
- mit dem Entwurf von Automaten vertraut werden.

Begeisterung für die Elektronik, die Informations-technologie und die Elektrotechnik noch weiter zu steigern und zu stärken

- Warum Digitaltechnik?
Elektronische Schaltungen
- **Vorlesung, Übung, Praktikum**
Organisation
- Grundlagen der Elektronik
Analog vs. Digital
Strom und Spannung
Transistoren
- Zusammenfassung

Vorlesungsprogramm

Datum	Thema
17.09	Organisation und Einführung in die digitale Welt
24.09	Logische Verknüpfungen
01.10	CMOS Schaltungen
08.10	Schaltalgebra (Bool'sche Algebra)
15.10	Schaltungssynthese
22.10	Zahlen und Codes
29.10	Rechenschaltungen und Datenpfadkomponenten
05.11	Latches und Flipflops I
12.11	Latches und Flipflops II
19.11	Automaten I: Grundlagen
26.11	Automaten II: Vertiefung
03.12	Automaten III: Zähler und Frequenzteiler
10.12	Speicher und Mikroprozessoren I
17.12	Mikroprozessoren II und Zusammenfassung

ETF E1
Mittwoch
10:15-12:00 Vorlesung

Aufgezeichnete Files
<https://video.ethz.ch/lectures.html>

Vorlesungsmaterial

- **Vorlesungsfolien:**

Die entsprechenden PDF-Files können jede Woche von der Vorlesungs-
webseite heruntergeladen werden

<https://moodle-app2.let.ethz.ch/mod/page/view.php?id=1232563>

Der Link kann auch dort gefunden werden: <http://www.vvz.ethz.ch>

- **Empfohlenes Textbuch:**

“Digitaltechnik und Digitale Systeme”

(5. Auflage) von *Jürgen Reichardt*, De Gruyter
Studium, Berlin/Boston, 2021

Ist bei der Polybuchhandlung erhältlich

Ist auch online verfügbar

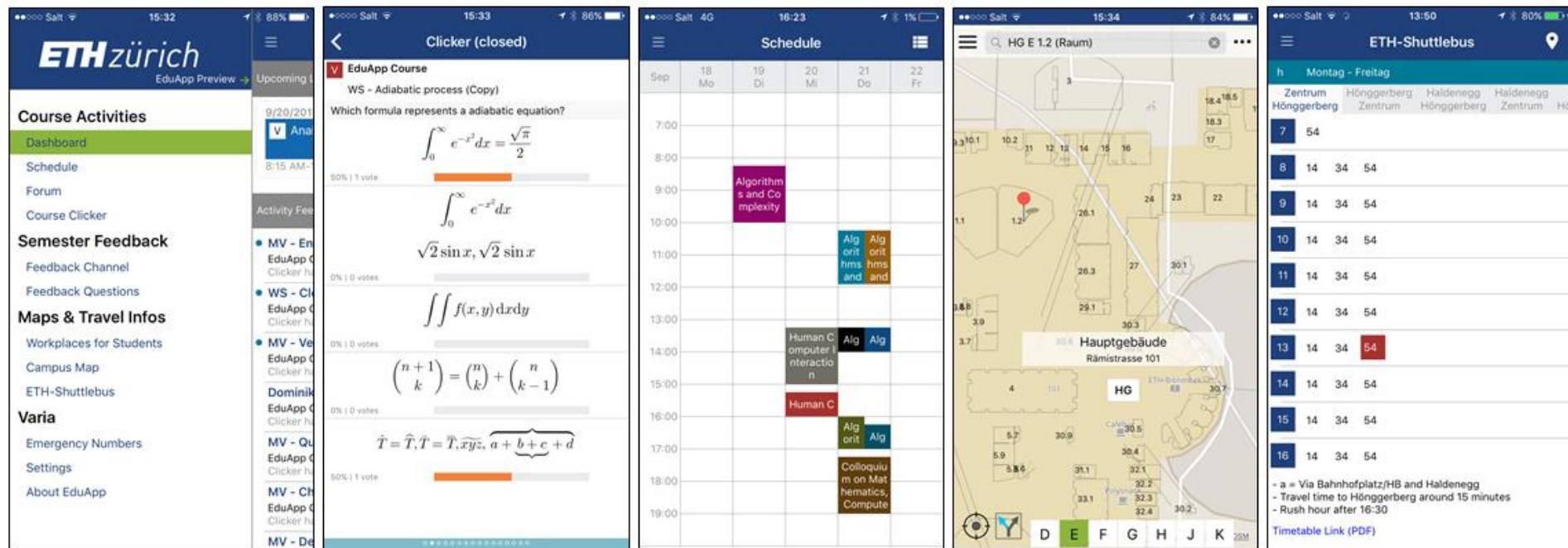


- **Kein Skript:**

Es wird auf die relevanten Kapitel vom Textbuch hingewiesen

Clickerfragen

Installieren Sie bitte die EduApp Applikation!



EduApp wird in der Digitaltechnik Vorlesung benutzt werden, um auf **Clickerfragen** zu antworten. Die erste Frage kommt schon in einer Woche.

<https://eduapp-app1.ethz.ch>

Was wird von Ihnen erwartet:

- Digitaltechnik ist eine Vorlesung, wo fast **keine Vorkenntnisse** nötig sind: neuer Stoff.
- Nur zwei physikalische Begriffe aus der Mittelschule sind wichtig: **Strom** und **Spannung**
- Es wird empfohlen, einige **Notizen** zu nehmen
- Notizen über die Beispiele, die in der Vorlesung vorgestellt werden, werden verteilt (online)
- Bitte **stellen Sie Fragen**, wenn etwas unklar ist oder wenn Sie Zweifel haben!

Übungsprogramm

Datum	Thema
18.09	Keine Übung
25.09	Übung 1: Analog-Digital
02.10	Übung 2: Gatter, CMOS Schaltungen
09.10	Übung 3: Digitalschaltung, Schaltalgebra
16.10	Test 1
23.10	Übung 4: Synthese, Besprechung Test 1
30.10	Übung 5: Zahlen, Codierung
06.11	Übung 6: Sequentielle Schaltungen
13.11	Übung 7: Flipflops
20.11	Test 2
27.11	Übung 8: Automaten, Besprechung Test 2
04.12	Übung 9: Zähler
11.12	Test 3
18.12	Besprechung Test 3

Verschiedene Räume
10 Gruppen
Donnerstag
14:15-16:00 Übung

Bemerkungen über die Übungen

- **Ziel der Übungen:**

Sie ermöglichen den Studenten, den in der Vorlesung vorgestellten Stoff anzuwenden und zu vertiefen.

- **Aufgabenblätter und Musterlösungen:**

Sie können von der Vorlesungswebseite heruntergeladen werden

<https://moodle-app2.let.ethz.ch/mod/page/view.php?id=1232570>

- **Gruppeneinteilung vs. Räume:**

Diese Information wird auf der Vorlesungswebseite bekannt gegeben

- **Leistungselemente:**

Wenn Sie mindestens 7 Übungsserien sinnvoll **bearbeiten** und **einreichen** (**elektronisch**) und wenn Sie an 2 Zwischentests teilnehmen, wird die in der Sessionsprüfung erworbene Note um 0.25 Notenpunkte erhöht

- **Tests:**

Drei ungefähr wie die Prüfung schwierigen Tests (Wochen 5, 10 und 13) werden vorgeschlagen und entsprechend korrigiert.

- **Betreuer:**

Alexander Maeder (almaeder@iis.ee.ethz.ch)

Praktikumsprogramm

Datum	Thema
17.09-19.09	Kein Versuch
24.09-26.09	Kein Versuch
01.10-03.10	Kein Versuch
08.10-10.10	Kein Versuch
15.10-17.10	Kein Versuch
22.10-24.10	Versuch 1: Gruppen 1 bis 4
29.10-31.10	Versuch 1: Gruppen 5 bis 8
05.11-07.11	Versuch 2: Gruppen 1 bis 4
12.11-14.11	Versuch 2: Gruppen 5 bis 8
19.11-21.11	Versuch 3: Gruppen 1 bis 4
26.11-28.11	Versuch 3: Gruppen 5 bis 8
03.12-05.12	Versuch 4: Gruppen 1 bis 4
10.12-12.12	Versuch 4: Gruppen 5 bis 8
17.12-19.12	Wiederholung von fehlenden Versuchen

ETZ C96 und C99
8 Gruppen
Mittwoch
14:15-18:00 Praktikum
Freitag
14:15-18:00 Praktikum

Bemerkungen über das Praktikum

- **Praktikumsorganisation:**

Das Praktikum besteht aus **vier Versuchen**, die alle obligatorisch sind. Zwei Gruppen pro Nachmittag werden beteiligt sein, eine im ETZ C96, die andere im ETZ C99. Aus Organisationsgründen sind Terminverschiebungen nur nach Absprache mit dem Praktikumsbetreuer gestattet. Fehlende Versuche müssen nachträglich absolviert werden.

- **Skript zum Praktikum:**

Es kann von der Praktikumswebseite heruntergeladen werden

<https://moodle-app2.let.ethz.ch/mod/page/view.php?id=1232571>

- **Gruppeneinteilung und Räume:**

Sie wird auf der Praktikumswebseite bekannt gegeben

<https://moodle-app2.let.ethz.ch/mod/page/view.php?id=1232571>

- **Betreuer:**

Dr. Alexandros Emboras (emboras@iis.ee.ethz.ch)

Study Center

Alle Vorlesungen, die **im Block A geprüft** werden, organisieren ein wöchentliches **Study Center**. Studierende können dort Fragen über diese Vorlesungen und/oder Übungen stellen. Hilfsassistenten stehen Ihnen zur Verfügung, um diese Fragen zu beantworten.



Wann:

Dienstag, 16:00-18:00

Wo:

GLC E34.1/2 (und GLC E29.1/2)

Die erste Veranstaltung findet am 23. September statt

Ein paar nützliche Empfehlungen:

- Schauen Sie Sich die Vorlesungsunterlagen nach der Vorlesung zu Hause an. Das hilft sehr!
- Lösen Sie regelmässig die Übungsserien
- Stellen Sie Fragen während der Vorlesung oder nachher per e-mail (mluisier@iis.ee.ethz.ch)
- **Sprechstunden:** können per e-mail vereinbart werden, allein oder in Gruppen

Digitaltechnik Prüfung:

Sie wird im Januar/Februar 2026 oder im August 2026 stattfinden.

- Warum Digitaltechnik?
Elektronische Schaltungen
- Vorlesung, Übung, Praktikum
Organisation
- **Grundlagen der Elektronik**
Analog vs. Digital
Strom und Spannung
Transistoren
- Zusammenfassung

Reichardt Kapitel 1.2 und 1.3

Was ist eigentlich Elektronik?

Die **Elektronik** ist ein Teilgebiet der Elektrotechnik, in dem aktive Bauelemente (Transistoren, Spulen, Kondensatoren, Drähte...) und Entwurfsmethoden zum Einsatz kommen, um spezifische elektrische Funktionalitäten zu realisieren: schalten, speichern, rechnen, verstärken, umwandeln...

Die **Elektronik** wird als Basistechnologie für viele Bereiche der *Elektrotechnik*, der *Informatik*, des *Maschinenbaus* und der *Verfahrenstechnik* genutzt.

Nachrichtentechnik

- Smartphones
- Internet
- Satelliten
- Kommunikation

Signalverarbeitung

- Sender
- Empfänger
- Robotik
- Verkehr

Energietechnik

- E-Mobilität
- Solar und Wind Produktion
- Smart Grids

Medizintechnik

- Bio-sensoren
- MRI
- Gentechnik
- Pacemaker



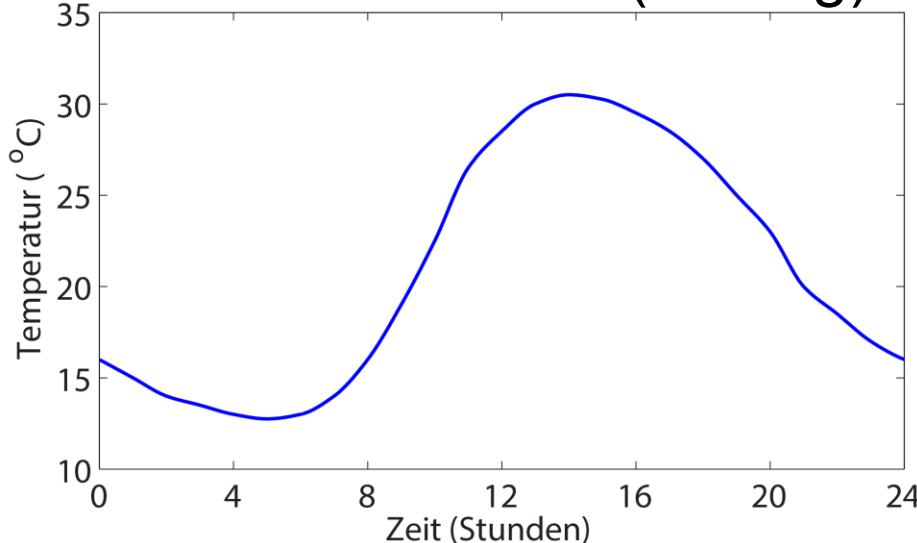
Elektronik (analog, digital, gemischt)

Bauelemente, Integrationstechnologien, Schaltungstechnik, Fabrikation

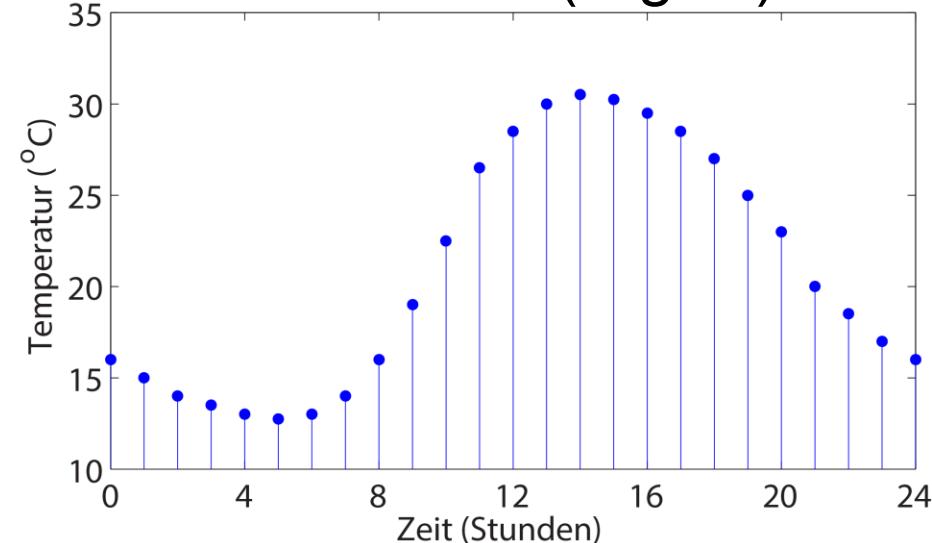
Analog vs. Digital

Beispiel: Temperaturverlauf an einem gewissen Tag in Zürich

Zeitkontinuierlich (Analog)



Zeitdiskret (Digital)

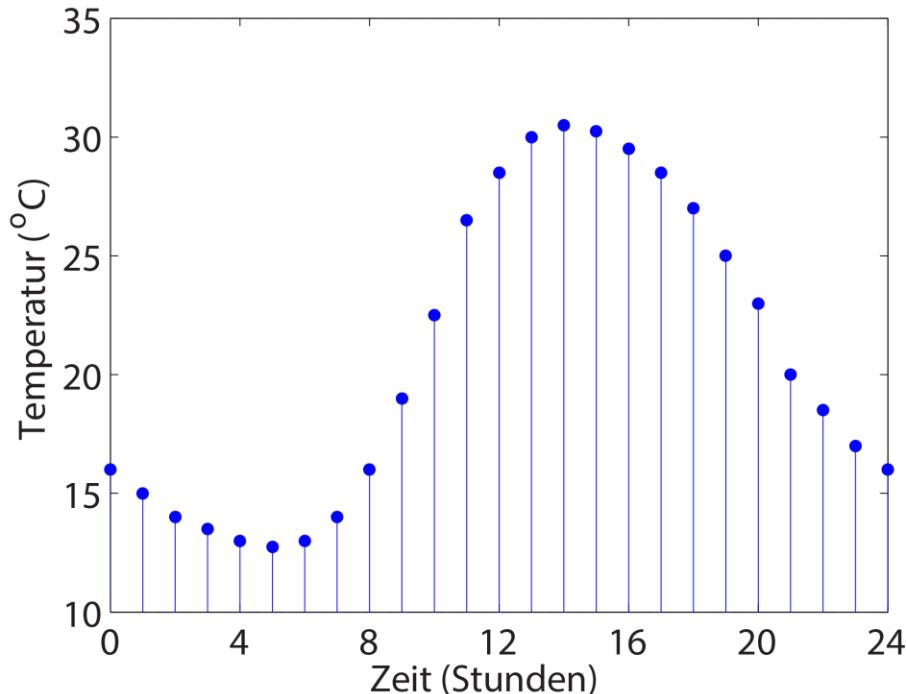


Analoge Signale haben kontinuierliche Werte und liefern deshalb unendlich genaue Informationen

Digitale Signale bestehen aus diskreten Werten und hängen von der Betrachtungsart ab

Wie werden diskrete Werte dargestellt?

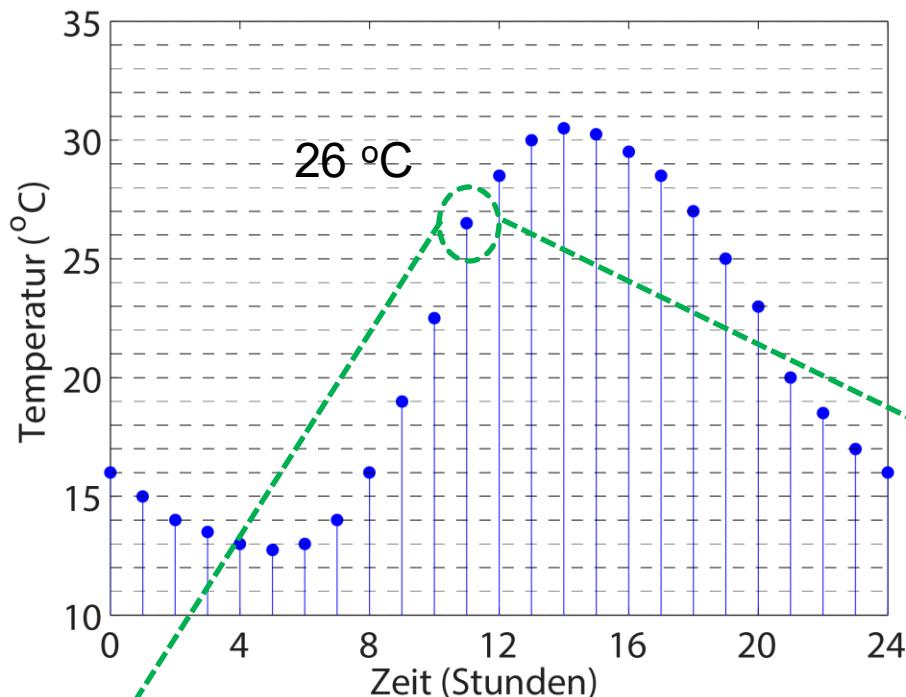
Diskrete Werte



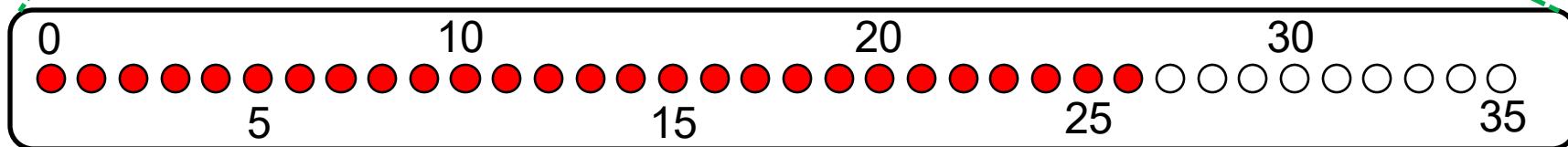
Ziel: Entwurf eines Thermometers mit diskreten Werten

- Welche Auflösung wird gebraucht? Welche Rolle spielt die Anwendung?
- Wie wird die Temperatur praktisch dargestellt?

Diskrete Werte



Digitales Thermometer



Annahme:

Eine Auflösung von einem Grad Celsius zwischen 0 und 35°C reicht (**diskrete Amplitude**)

Wie sieht dann das diskrete Thermometer aus?

Prinzip: eine rote Leuchtdiode schaltet ein, wenn die gemessene Temperatur grösser/gleich dem zur Diode passenden Wert ist.

Darstellung der Zustände

Das **Thermometer** besitzt **36 Zustände** zwischen 0 und 35 °C und besteht aus 36 Leuchtdioden.

Jede **Leuchtdiode** kann nur **zwei Zustände** annehmen, entweder ein- oder aus- geschaltet.

Ein **Bit** (binäre Stelle, englisch: Binary digit) kann verwendet werden, um die beiden Zustände der Leuchtdioden darzustellen

Leuchtdiode eingeschaltet: 1, Leuchtdiode ausgeschaltet: 0

Mögliche Codierung der Temperatur T mit 36 Bits X_i :

$$T = X_{35}X_{34}X_{33} \cdot \cdot \cdot X_{i+1}X_iX_{i-1} \cdot \cdot \cdot X_3X_2X_1X_0$$

mit **$X_i=0$** (Leuchtdiode ausgeschaltet) oder **$X_i=1$** (eingeschaltet)

X_{35} wird oft „most significant bit“ (MSB, höchstes Gewicht) und X_0 „least significant bit“ (LSB, niedrigstes Gewicht) genannt.

Temperatur Beispiele

Fehler:

- Für ganzzahlige Temperaturen T zwischen 0 und 35 °C, kein Fehler
 - Für Fliesskommatemperaturen T zwischen 0 und 35 °C, Fehler = $T \bmod 1$ (Modulo)
 - Für Temperaturen $T > 35$ °C, Fehler = $T - 35$
 - Für Temperaturen $T < 0$ °C, Fehler = $\text{abs}(T)$

Mit 36 Bits kann man eigentlich viel genauer werden

Zweiwertige Logik

In der zweiwertigen Logik, wo ein Bit zwei Zustände beschreiben kann, können **n** Bits

$$z=2^n$$

Zustände unterscheiden

n Bit	z Zustände
1	2
2	4
3	8
...	...
5	32
6	64
...	...
16	65536

Für die Codierung des Thermometers sind nur **6 Bits nötig**, wenn die Auflösung 1 Grad Celsius sein muss

Zweiwertige Logik

In der zweiwertigen Logik, wo ein Bit zwei Zustände beschreiben kann, können **n** Bits

$$z=2^n$$

Zustände unterscheiden

Temperatur (°C)	Code
0	000000
1	000001
2	000010
...	...
15	001111
16	010000
...	...
35	100011

Für die Codierung des Thermometers sind nur **6 Bits nötig**, wenn die Auflösung 1 Grad Celsius sein muss

Mit 36 Bits könnte theoretisch eine **Auflösung von $1/2^{30}$ °C** erreicht werden (nur mit positiven Temperaturen)

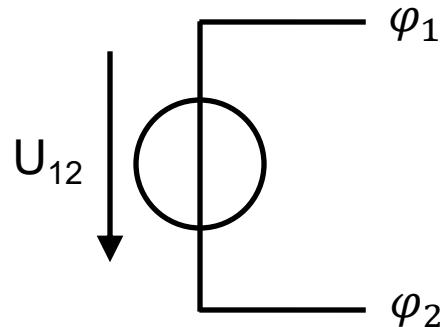
Wie werden diese binären Zustände praktisch realisiert?

- Warum Digitaltechnik?
Elektronische Schaltungen
- Vorlesung, Übung, Praktikum
Organisation
- **Grundlagen der Elektronik**
Analog vs. Digital
Strom und Spannung
Transistoren
- Zusammenfassung

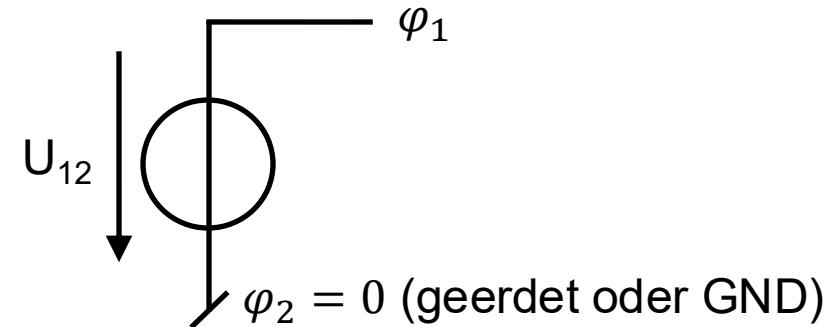
Einfache Schaltung mit Spannungsquelle

Eine **Spannung U_{12}** ist zwischen zwei elektrischen Potentialen φ_1 und φ_2 definiert

Spannungsquelle
Generator
Batterie

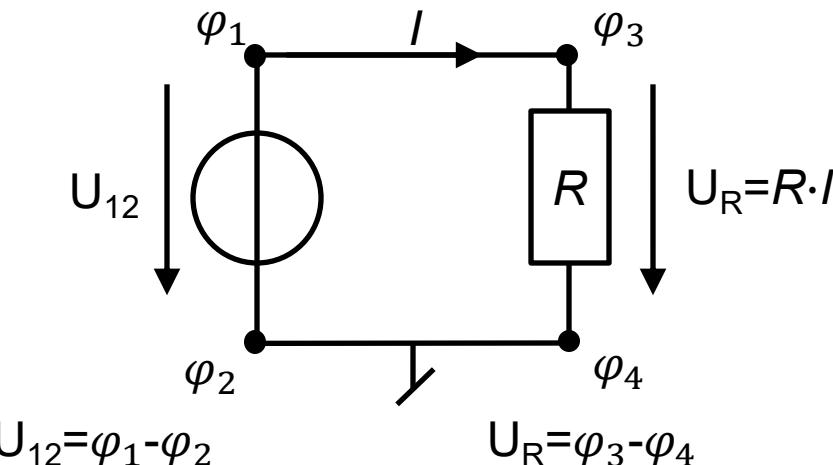


$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$



$$U_{12} = \varphi_1$$

Zwei mit **einem metallischen Draht** gebundene Punkte haben das gleiche Potential



Schaltung mit Widerstand R und Strom I :

$$\varphi_3 = \varphi_1 \text{ (gebunden)}$$

$$\varphi_4 = \varphi_2 = 0 \text{ (gebunden+geerdet)}$$

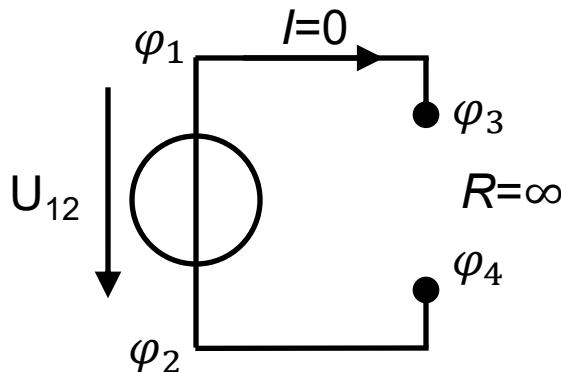
$$\rightarrow U_R = R \cdot I = \varphi_3 - \varphi_4 = \varphi_1 - \varphi_2 = U_{12}$$

$$\rightarrow I = U_{12} / R \text{ (Ohm'sches Gesetz)}$$

Kurzschluss und Leerlauf

Leerlauf ($R = \infty$): es fliessst kein Strom

Spannungsquelle
Generator
Batterie



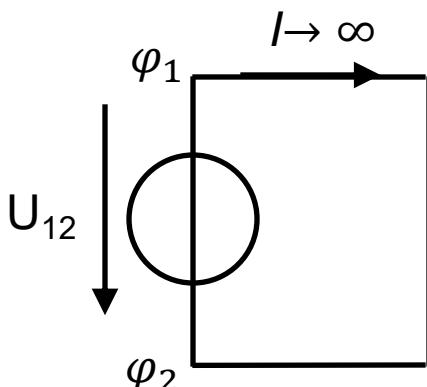
Der Strom verschwindet, da der Widerstand R unendlich hoch ist

$$I = U_{12}/\infty = 0$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad U_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = U_{12}$$

Kurzschluss ($R = 0$): es fliessst ein unendlich hoher Strom

Spannungsquelle
Generator
Batterie



Der Strom wird unendlich gross, weil der Widerstand $R=0$

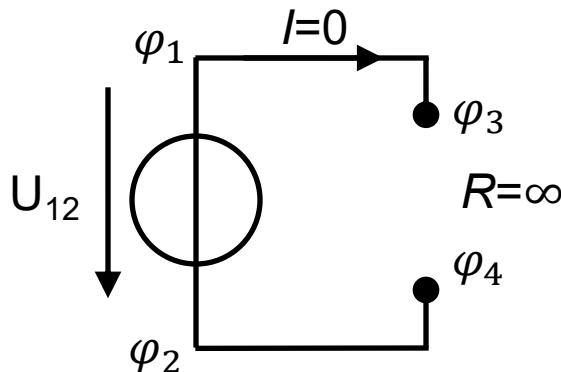
$$I = U_{12}/0 = \infty$$

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ und } \varphi_1 = \varphi_2 \quad ??$$

Kurzschluss und Leerlauf

Leerlauf: es fliessst kein Strom

Spannungsquelle
Generator
Batterie

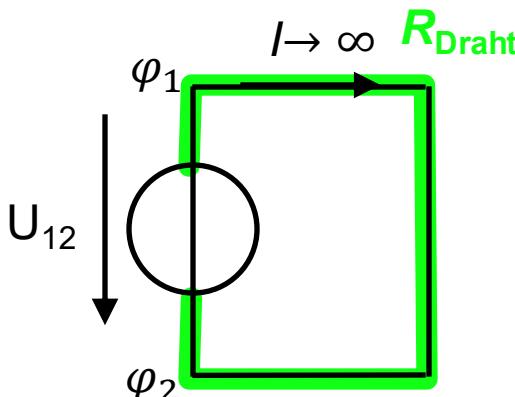


Der Strom verschwindet, da der Widerstand R unendlich hoch ist

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \quad U_{34} = \varphi_3 - \varphi_4 = U_{12}$$

Kurzschluss: es fliessst ein unendlich hoher Strom

Spannungsquelle
Generator
Batterie



Der metallische Draht, der φ_1 und φ_2 verknüpft, hat eigentlich einen kleinen Widerstand R_{Draht} so dass $I = U_{12}/R_{\text{Draht}}$ statt $U_{12}/0$. Der Wert von R_{Draht} ist aber sehr klein. Deshalb ist der Strom I riesig

⇒ **Kurzschluss:** Solche Lagen sind zu vermeiden, weil sie Schaltungen perpetuell beschädigen können

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 \text{ und } \varphi_1 = \varphi_2$$

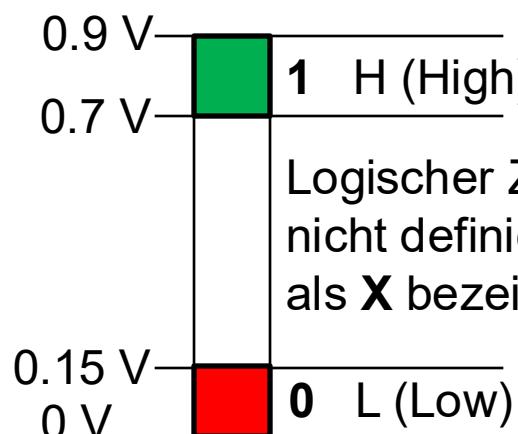
Logische Zustände und physikalische Zuordnung

Die binären Zustände müssen zu einer **physikalischen Grösse** zugeordnet werden. Diese kann beliebig gewählt werden. Konventionen wurden definiert.

Binäre Zustände	Logische Zustände	Physikalische Zuordnung
0,1	Low (L), High (H) Wahr, Falsch	Spannungen: (0V, 0.8V) Schalter: (auf, zu)

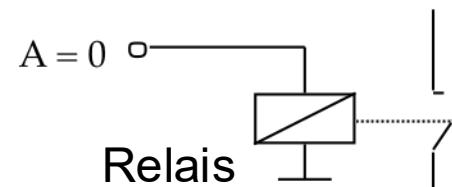
Spannung (elektrisch)

0=L=0 V (Masse)
1=H=0.8 V (Speisespannung)

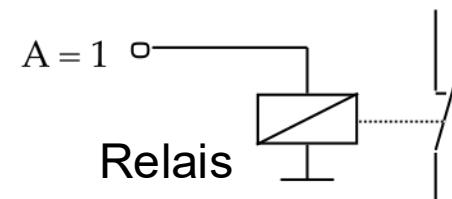


Positive Logik

Schalter (mechanisch)



Schalter auf (A=0)



Schalter zu (A=1)

Schalterlogik:

Schalter wird geschlossen wenn eine 1 am Eingang liegt, wird geöffnet, wenn eine 0 anliegt („Schliesserprinzip“)

Toleranzschema für die 0.8V-Technologie

- Warum Digitaltechnik?
Elektronische Schaltungen
- Vorlesung, Übung, Praktikum
Organisation
- **Grundlagen der Elektronik**
Analog vs. Digital
Strom und Spannung
Transistoren
- Zusammenfassung

Vertiefung in der 3. Woche

Woher stammte der erste Transistor?



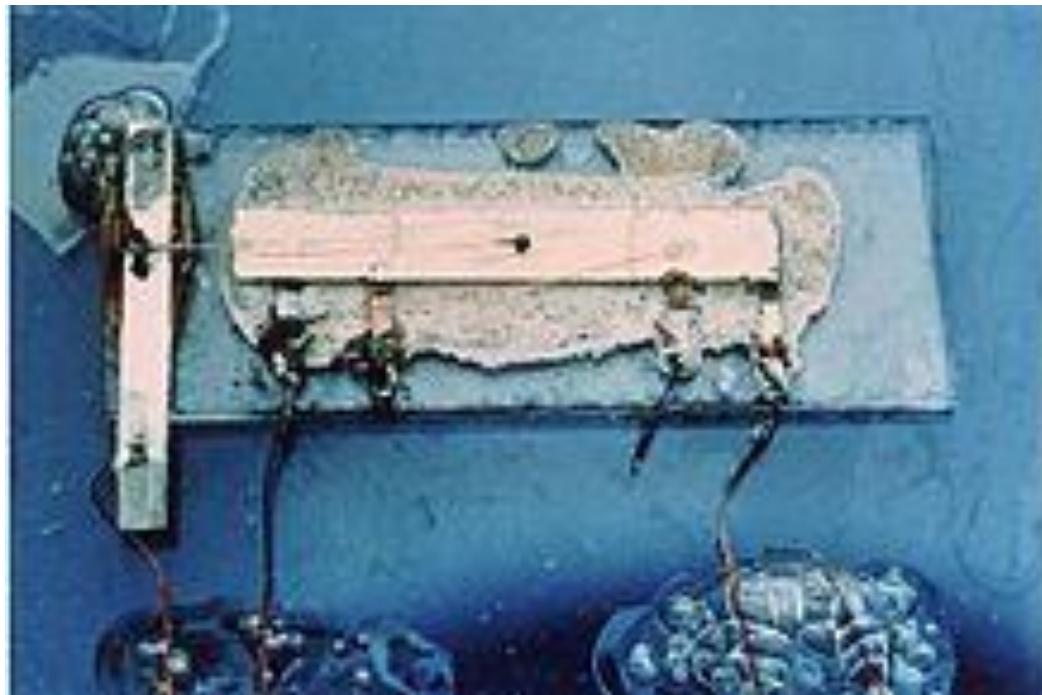
Der Transistor wurde 1947 von John Bardeen (links), William Shockley (Mitte) und Walter Brattain (rechts) in den **Bell Laboratories** erfunden. Für diese Erfindung erhielten sie 1956 den Nobelpreis für Physik.

Genaue Nachbildung des ersten Transistors, der 1947 bei den Bell Laboratories hergestellt und im selben Jahr patentiert wurde.



Erfindung der integrierten Schaltung

Zehn Jahre nach der Erfindung des Transistors fabrizierte 1958 **Jack Kilby**, damals bei Texas Instrument (TI), die erste integrierte Schaltung. Die Idee bestand darin, mehrere Transistoren nicht mit Kabeln zu vernetzen, sondern mit dem gemeinsamen Substrat, auf dem sie hergestellt wurden. Dafür wurde er 2000 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet. **Robert Noyce**, einer der beiden Intel Mitgründer, kam unabhängig zur selben Schlussfolgerung, starb jedoch zu früh (1990), um den Nobelpreis zu erhalten.



Jack Kilbys ursprüngliche integrierte Schaltung, die 1958 hergestellt wurde.

Das Moore'sche Gesetz

Dieses Gesetz behauptet, dass sich die Anzahl Transistoren pro integrierte Schaltung alle 18 bis 24 Monate verdoppelt. Es wurde 1965 von **Gordon Moore**, dem zweiten Gründer von Intel, formuliert und in der Zeitschrift *Electronics* veröffentlicht.

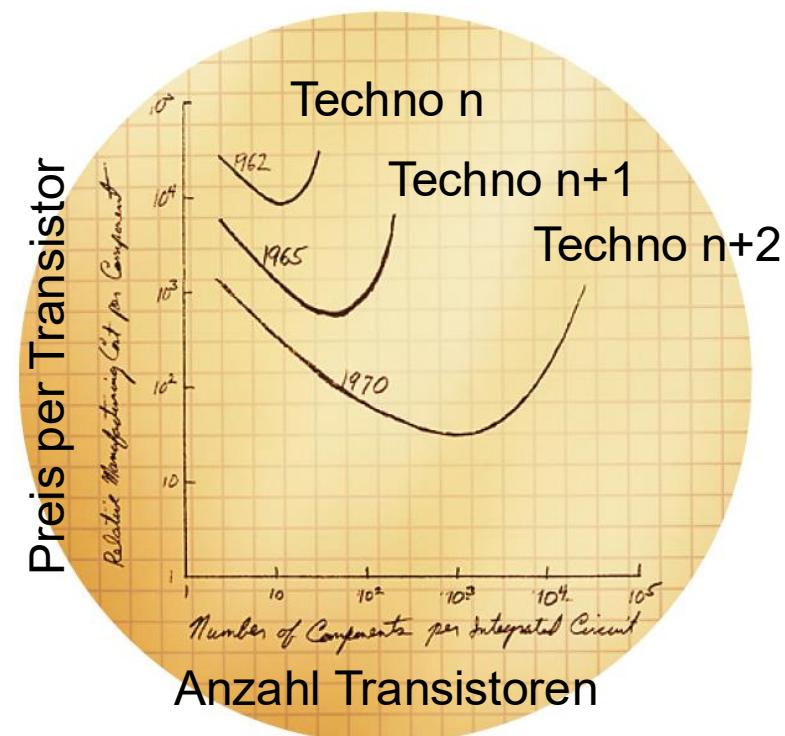
Cramming More Components onto Integrated Circuits

GORDON E. MOORE, LIFE FELLOW, IEEE

With unit cost falling as the number of components per circuit rises, by 1975 economics may dictate squeezing as many as 65 000 components on a single silicon chip.

Each approach evolved rapidly and converged so that each borrowed techniques from another. Many researchers believe the way of the future to be a combination of the

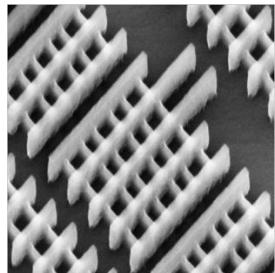
Gordon Moore beobachtete, dass sich die Anzahl der Komponenten pro integrierte Schaltung von 1958 bis 1965 alle zwei Jahre verdoppelt hatte. Er extrapolierte, dass dieser Trend **weitere 10 Jahre** dauern würde. Eigentlich gilt er noch heute (mit Beschränkungen).



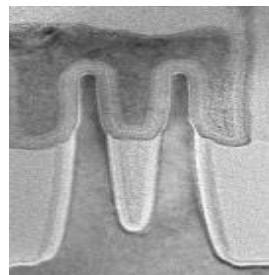
Gordon Moores ursprüngliche Skizze
Quelle: Intel

Transistor Roadmap

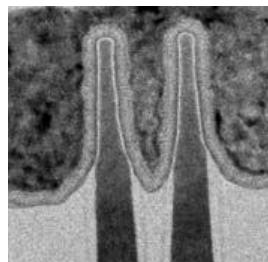
22nm (2011)



14nm (2014)

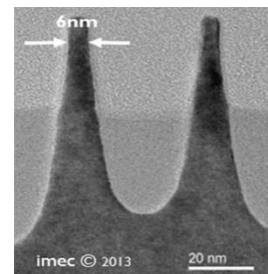


10nm (2016)

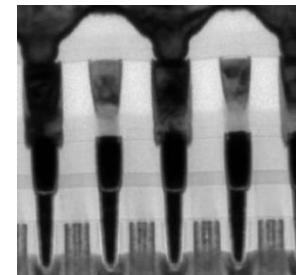


Die **Transistor Evolution**
folgt dem Moore'schen
Gesetz (nach Gordon Moore)

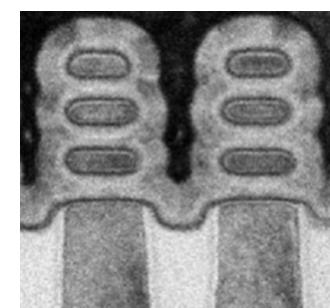
7nm (2018)



5nm (2020)



3nm (2023)



Alle 18-24 Monate wird die
Grösse von Transistoren
durch 2 dividiert.

60 Jahre drastische Redu-
zierung der Größe von
Transistoren haben zur
aktuellen Situation geführt.

Sources: Intel,
imec, TSMC,
IBM

- Warum Digitaltechnik?
Elektronische Schaltungen
- Vorlesung, Übung, Praktikum
Organisation
- Grundlagen der Elektronik
Analog vs. Digital
Strom und Spannung
Transistoren
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Organisation von Vorlesung, Übung und Praktikum
- Analoge vs. Digitale Signale (Thermometer)
- Bit (binary digit) als Codierung von Zahlen
- Wiederholung von Strom und Spannung Konzepten
- Transistor Einführung (mehr in der 3. Woche)
- **Nächste Woche:** Logische Verknüpfungen

