Schaltungstechnik mit Halbleitern

Dipl. Ing. Mario Blunk

Buchfinkenweg 3 / 99097 Erfurt / Deutschland

http://www.blunk-electronic.de

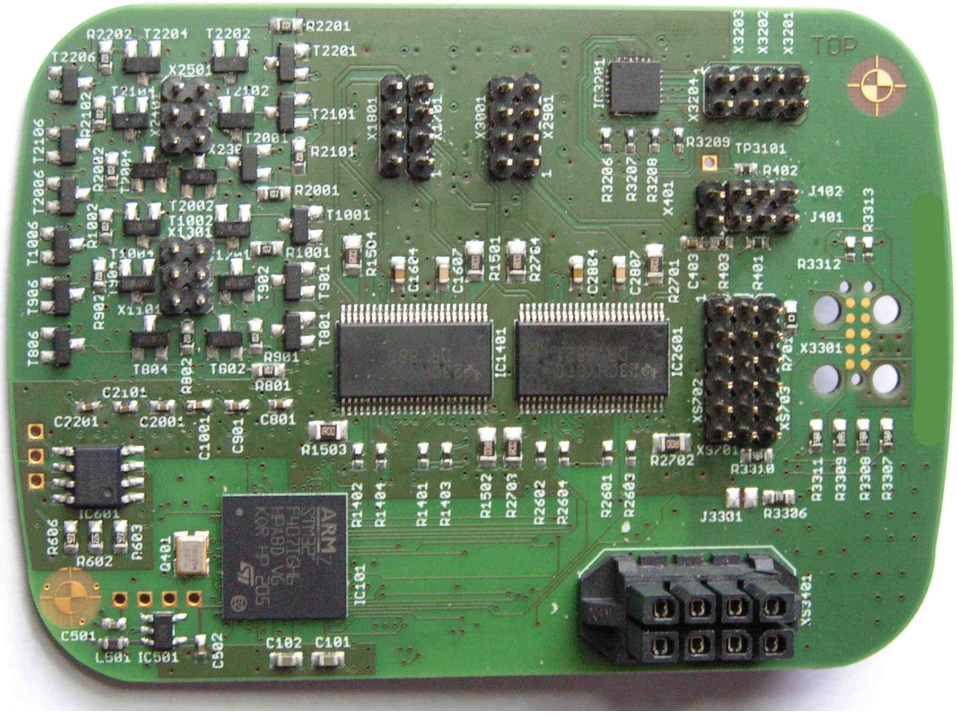
2022-11-22

Abstract

Halbleiterbauelemente sind das Rückgrat der Elektronik. Sie begegnen uns in Form von Dioden, Transitoren, Thyristoren, Diacs, Triacs und integrierte Schaltkreisen. Der Facharbeiter, Techniker oder Ingenieur braucht das Verständnis für die Arbeitsweise dieser Bauelemente. In diesem Seminar werden Schaltungen mit Halbleiterbauelementen vorgestellt und berechnet. Mit diesem Wissen ist der Teilnehmer dann in der Lage, eigenständig Schaltungen mit diesen Bauteilen zu lesen und zu entwerfen. Durch Verweise auf zahlreiche Literaturquellen ist der Teilnehmer abschließend in der Lage, sich vertiefendes Fachwissen anzueignen. Das Seminar wird durch viele Beispiele aus der realen Berufspraxis anschaulich und verständlich gehalten.

Ziel dieses Seminars ist es außerdem, die Teilnehmer zum Eigenbau von Schaltungen zu inspirieren statt auf Fertiglösungen zu setzten. Dadurch werden Abhängigkeiten von Lieferanten reduziert und das allgegenwärtige Problem von Obsoleszenz und Lieferschwierigkeiten teilweise entschärft.

Das Ziel



Entwicklung und Fertigung von Elektronik

Achtung Manager: Elektronik macht man nicht nebenbei !!!

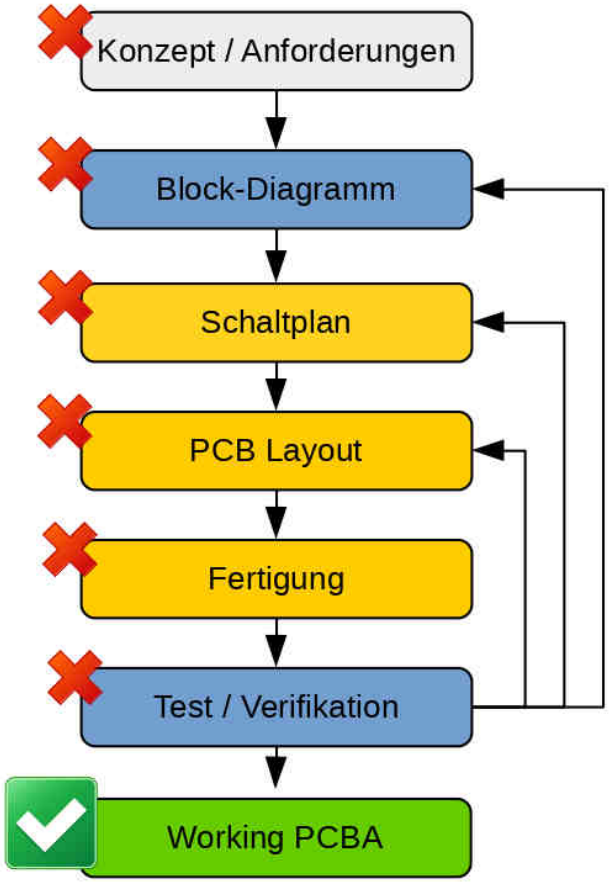


Figure 1: Entwicklung und Fertigung Ablauf

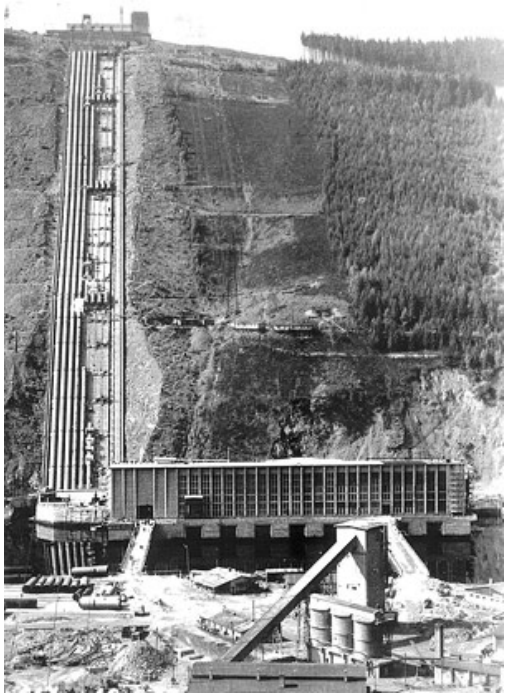
Überblick

1. Dioden allgemein
2. Z-Dioden, LED, Photodioden
3. Bipolare Transistoren (npn, pnp)
4. Feldeffekt-Transistoren (MOSFET, SFET)
5. Monostabile und astabile Schaltungen
6. Schmitt-Trigger
7. Verstärker

Überblick

1. Differenzverstärker / Operationsverstärker
2. Operationsverstärker Offsetkompensation
3. Operationsverstärker Frequenzgang
4. Stromquellen
5. Spannungsquellen
6. Timer, Gatter, Inverter, Zähler
7. AD-Wandler, DA-Wandler
8. Mikrocontroller, Mikroprozessoren
9. CPLD, FPGA

Irrtümer



https://www.gemeinde-hohenwarte.de/bilder/rohrbahnbau.jpg

1. Es gibt keine "Stromspannung" !
2. Spannung fließt nicht !

Grundlagen

Spannung, Strom und ohmscher Widerstand

1. Die Ursache für einen Stromfluß ist immer eine Spannung U.
2. Spannung besteht zwischen Objekten verschiedenen Potentials.
3. Der Strom I fließt vom höheren zum niedrigeren Potential (techn. Stromrichtung).
4. Strom ist die gerichtete Bewegung von Ladunsträgern (Elektronen, Ionen. ...).
5. Der Stromfluß wird durch den ohmschen Widerstand R behindert.
6. Das Ohmsche Gesetz bringt U, I und R mathematisch in Verbindung.

$$I = \frac{U}{R} \text{ oder } R = \frac{U}{I} \tag{1}$$

Dioden

Symbole und Bauformen

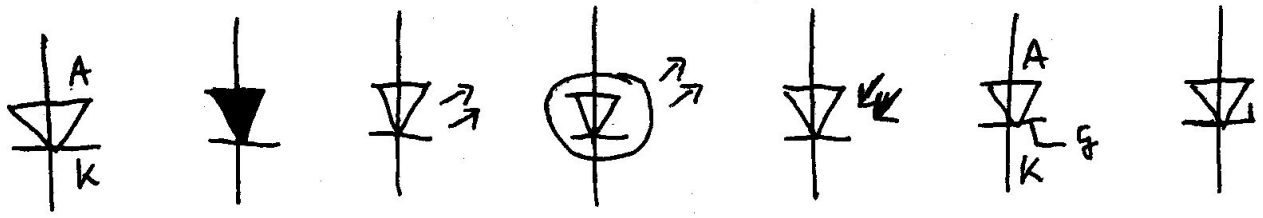


Figure 2: Symbole

1. Eine Diode erlaubt Stromfluß in nur einer Richtung.
2. Mindestspannung / Mindeststrom nötig
3. Kennlinie U vs. I nicht linear

Dioden

Bauformen

Figure 3: LED101, D101 und D102

Figure 4: Thyristor und Gleichrichterschaltung

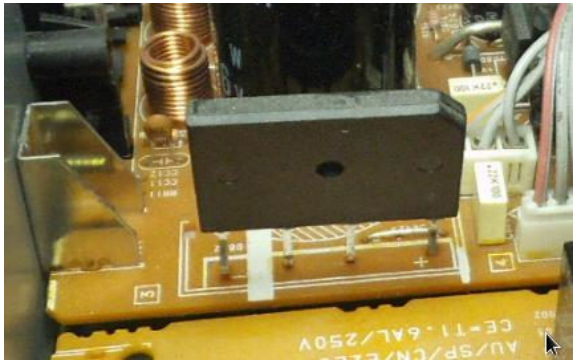


Figure 5: Brückengleichrichter

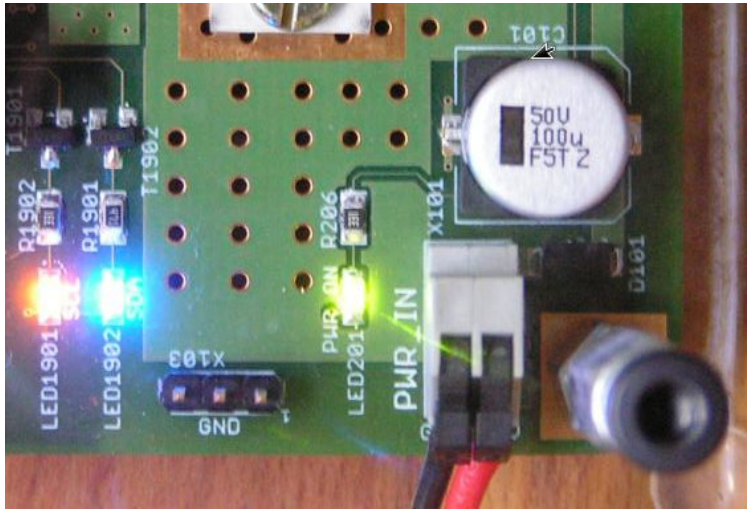


Figure 6: rote, blaue und grüne LED

Dioden

Displays

Figure 7: Symbol

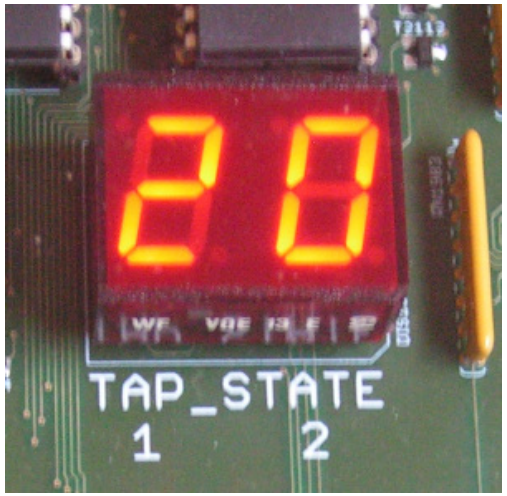


Figure 8: 7-Segment Anzeige in THT

Dioden

Kennlinien

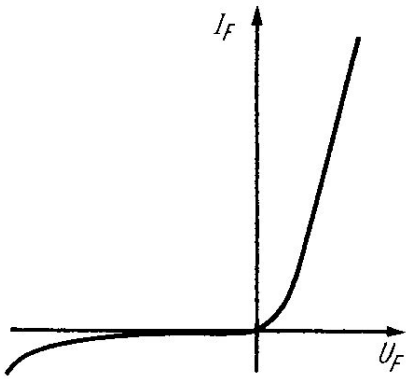


Figure 9: allgemein[6]

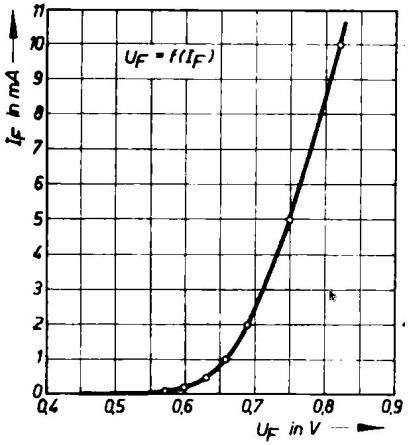


Figure 10: allgemein[7]

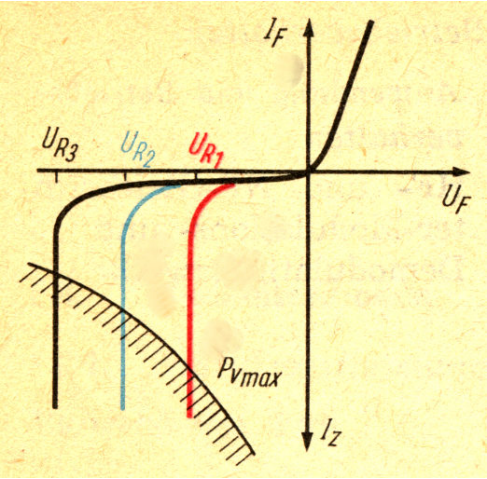


Figure 11: Z-Diode[6]

Dioden

Beispiel Durchlaß- und Sperrichtung

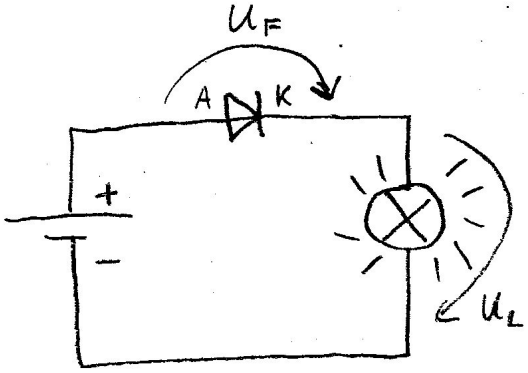


Figure 12: Durchlaß- oder Vorwärtsbetrieb

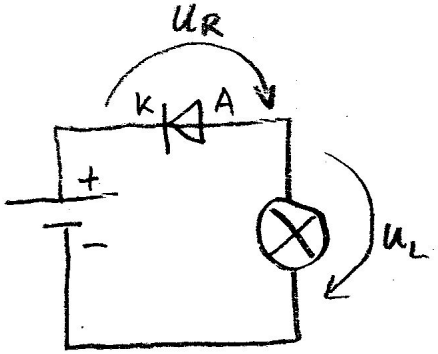


Figure 13: Sperr- oder Rückwärtsbetrieb

Transistoren

1. Ein Transistor ist ein Verstärker.
2. Verwendung als Schalter (Digitaltechnik)
3. Verwendung als Signalverstärker (Analogtechnik)
4. Handhabung Bipolar-Transistor unkompliziert
5. Handhabung SFET/MOSFET aufwendig wg. ESD
6. Ansteuerung SFET/MOSFET fast leistungslos

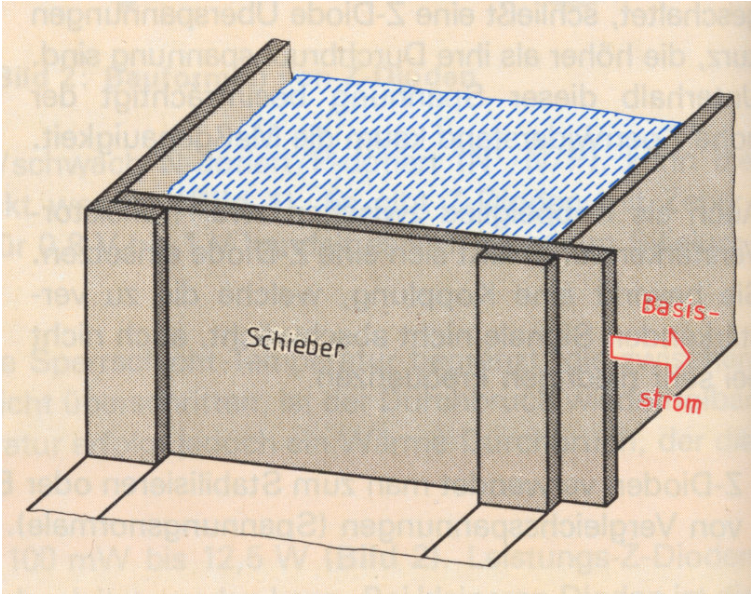


Figure 14: Transistoren[1]

Transistoren

Typen

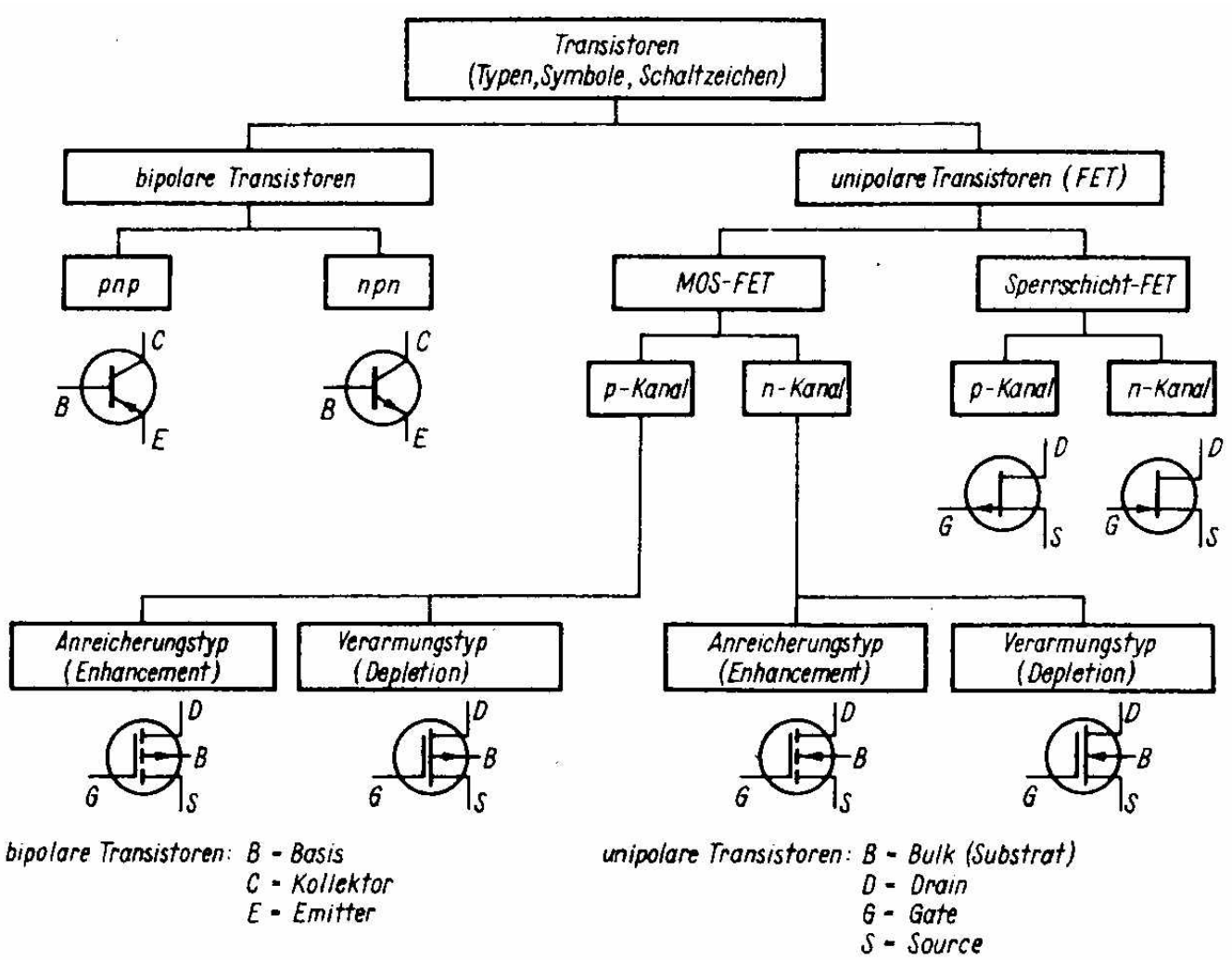


Figure 15: Transistoren[20]

Transistoren

Bauformen

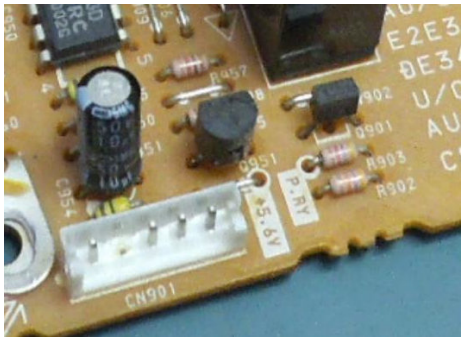


Figure 16: THT in TO92

Figure 17: THT in TO247-3

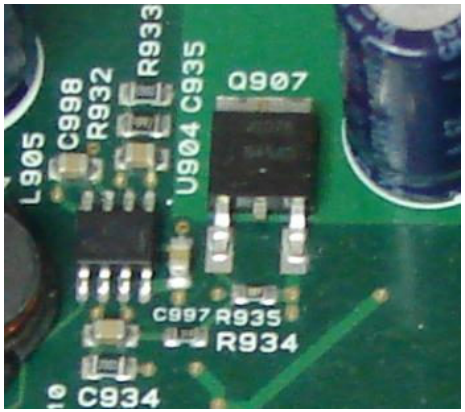


Figure 18: SMT in DPAK

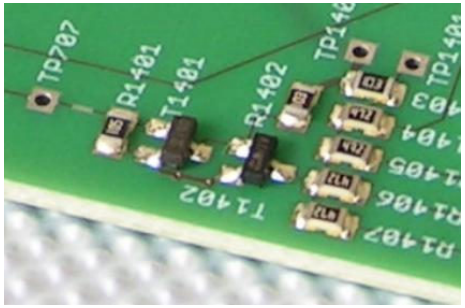


Figure 19: SMT in SOT23

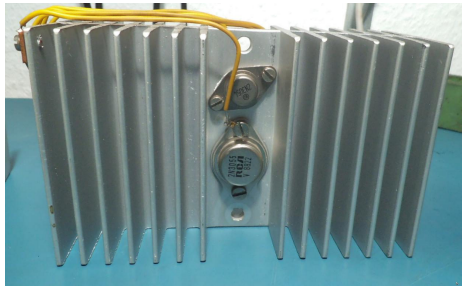


Figure 20: THT in TO3

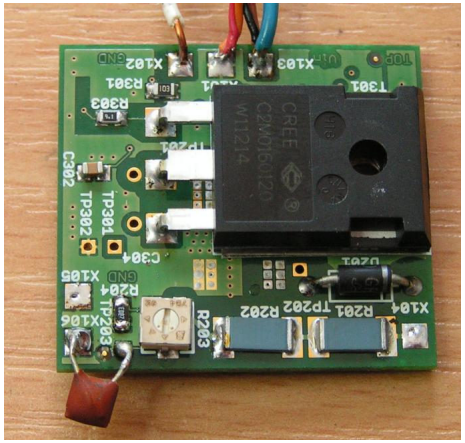


Figure 21: THT in TO247-3

Transistoren

Kennlinien Bipolartransistor

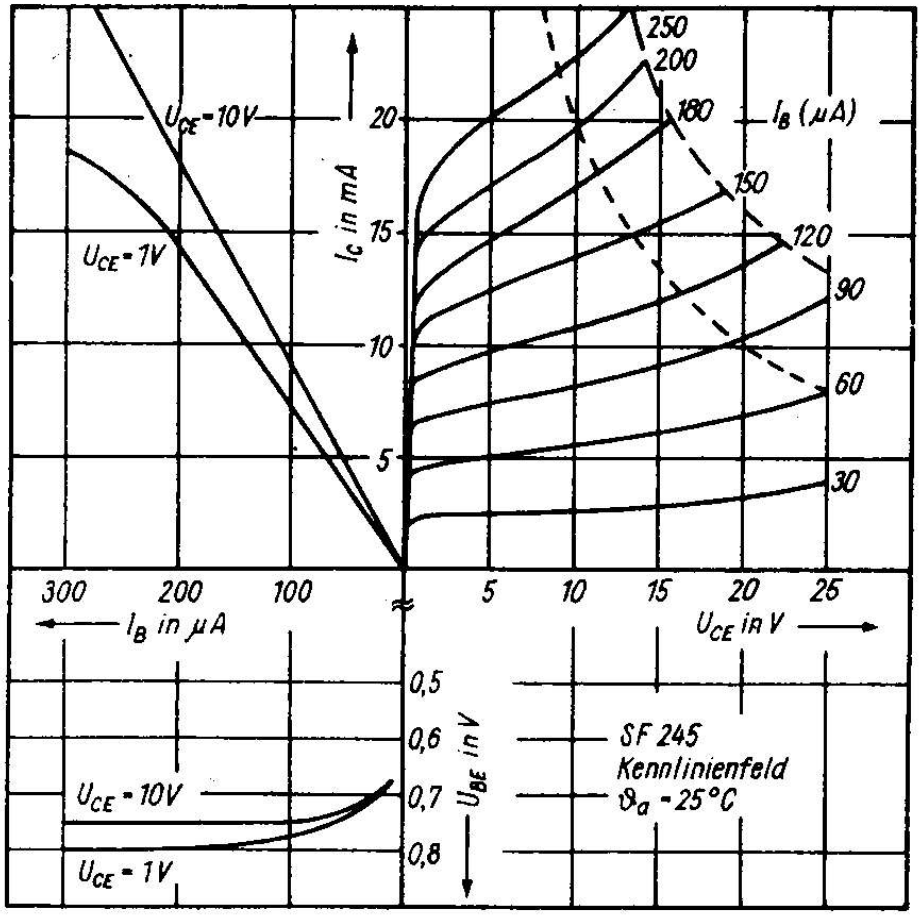


Figure 22: Kennlinienfeld Bipolartransistor[20]

Transistoren

Kennlinien Feldeffektransistor

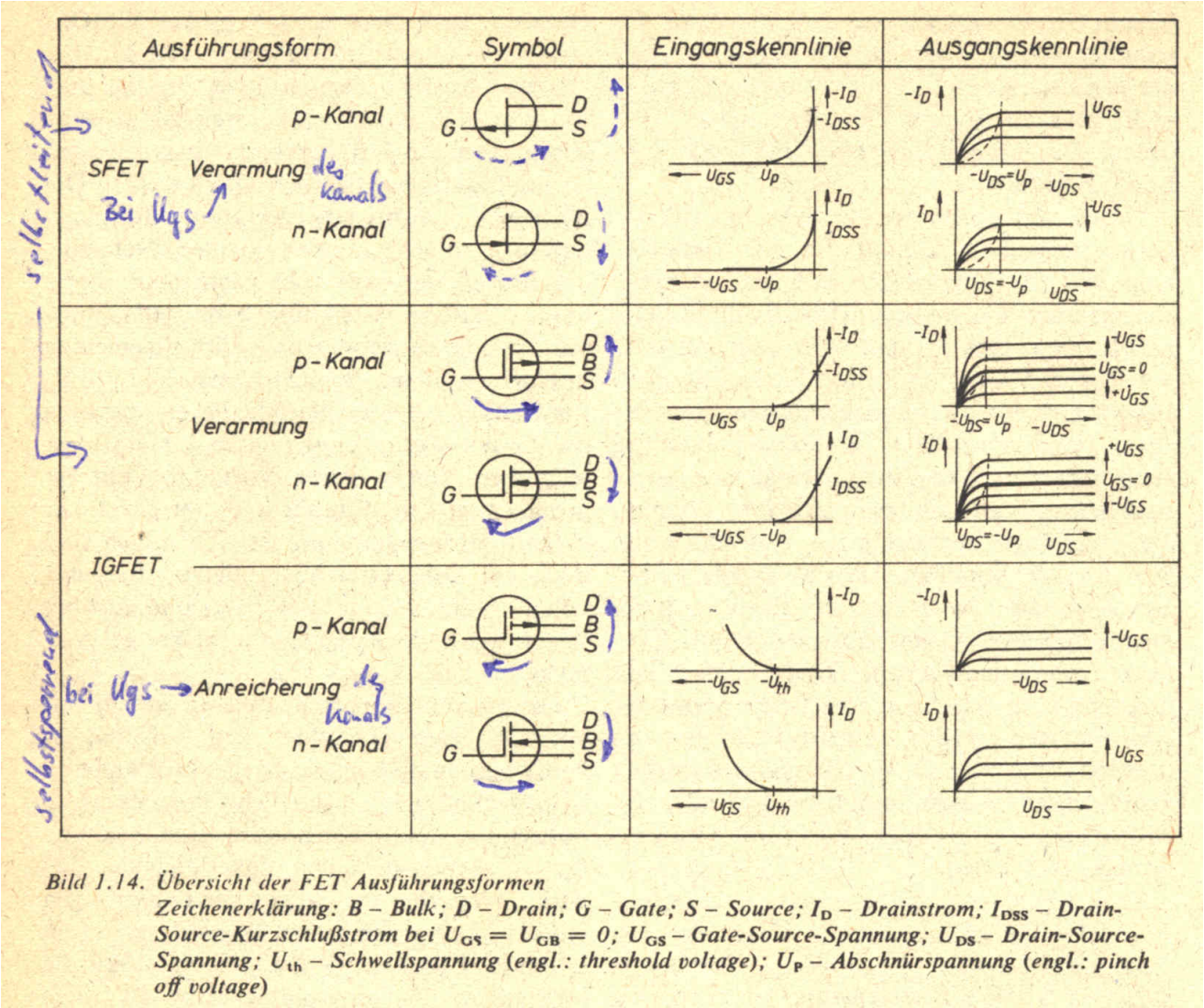


Bild 1.14. Übersicht der FET Ausführungsformen
Zeichenerklärung: B – Bulk; D – Drain; G – Gate; S – Source; I_D – Drainstrom; I_{DSS} – Drain-Source-Kurzschlußstrom bei $U_{GS} = U_{GB} = 0$; U_{GS} – Gate-Source-Spannung; U_{DS} – Drain-Source-Spannung; U_{th} – Schwellspannung (engl.: threshold voltage); U_P – Abschnürspannung (engl.: pinch off voltage)

Figure 23: Kennlinien von Feldeffektransistoren[33]

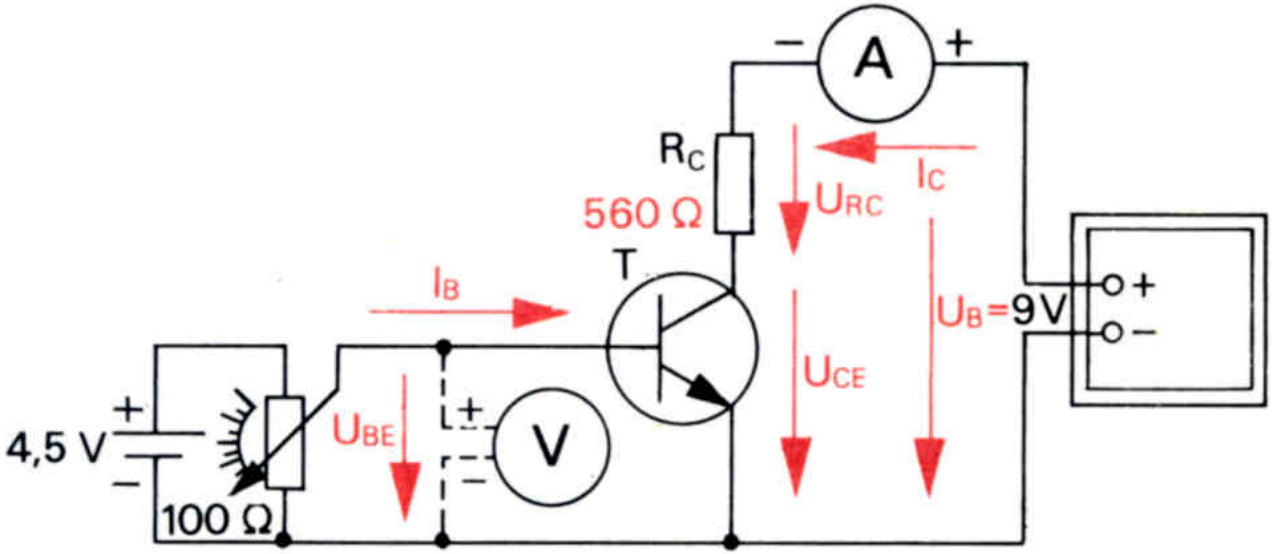


Figure 24: Testschaltung [15]

Achtung !

Versuch beginnen mit Potentiometer am unteren Anschlag ! U_{BE} max. 0,8V ! Evtl. Basistrom überwachen !

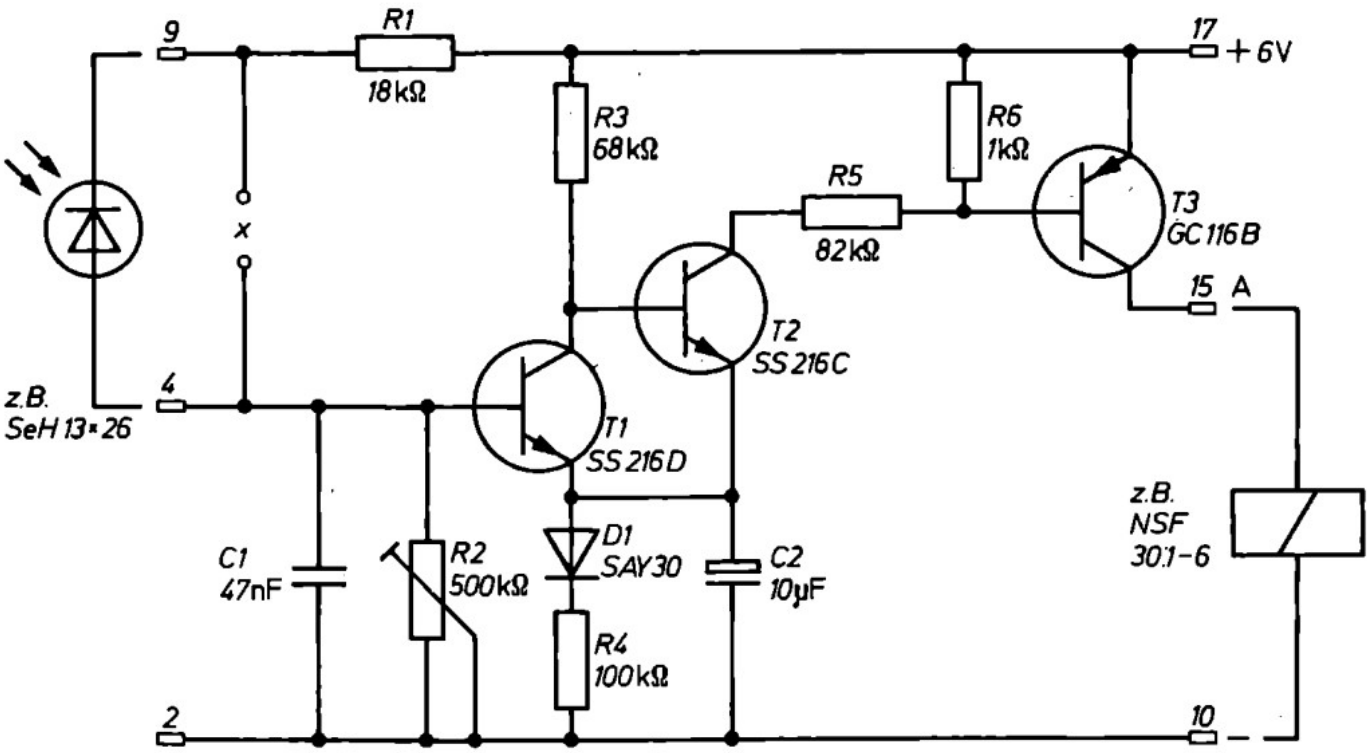


Figure 25: Beispiel lichtempfindlicher Schalter mit Schmitt-Trigger[32]

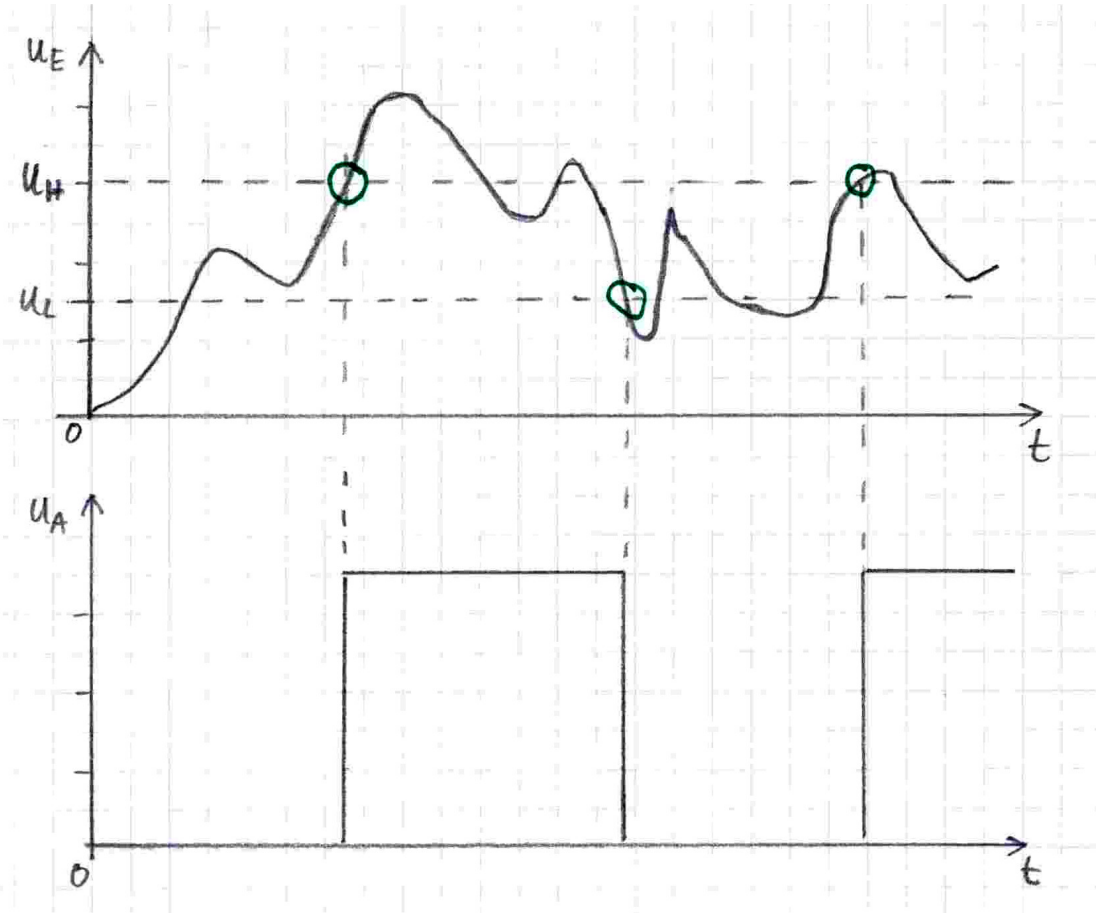


Figure 26: Kennlinie eines Schmitt-Triggers

Transistoren

Astabile Kippstufe

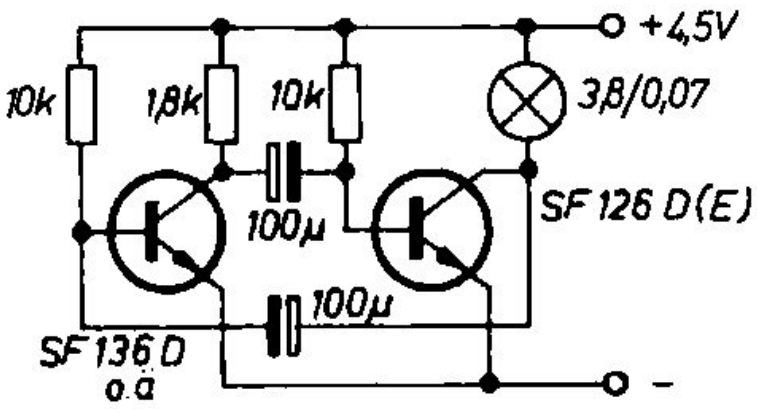


Figure 27: Beispiel Blinklicht[35]

Transistoren

Monostabile Kippstufe

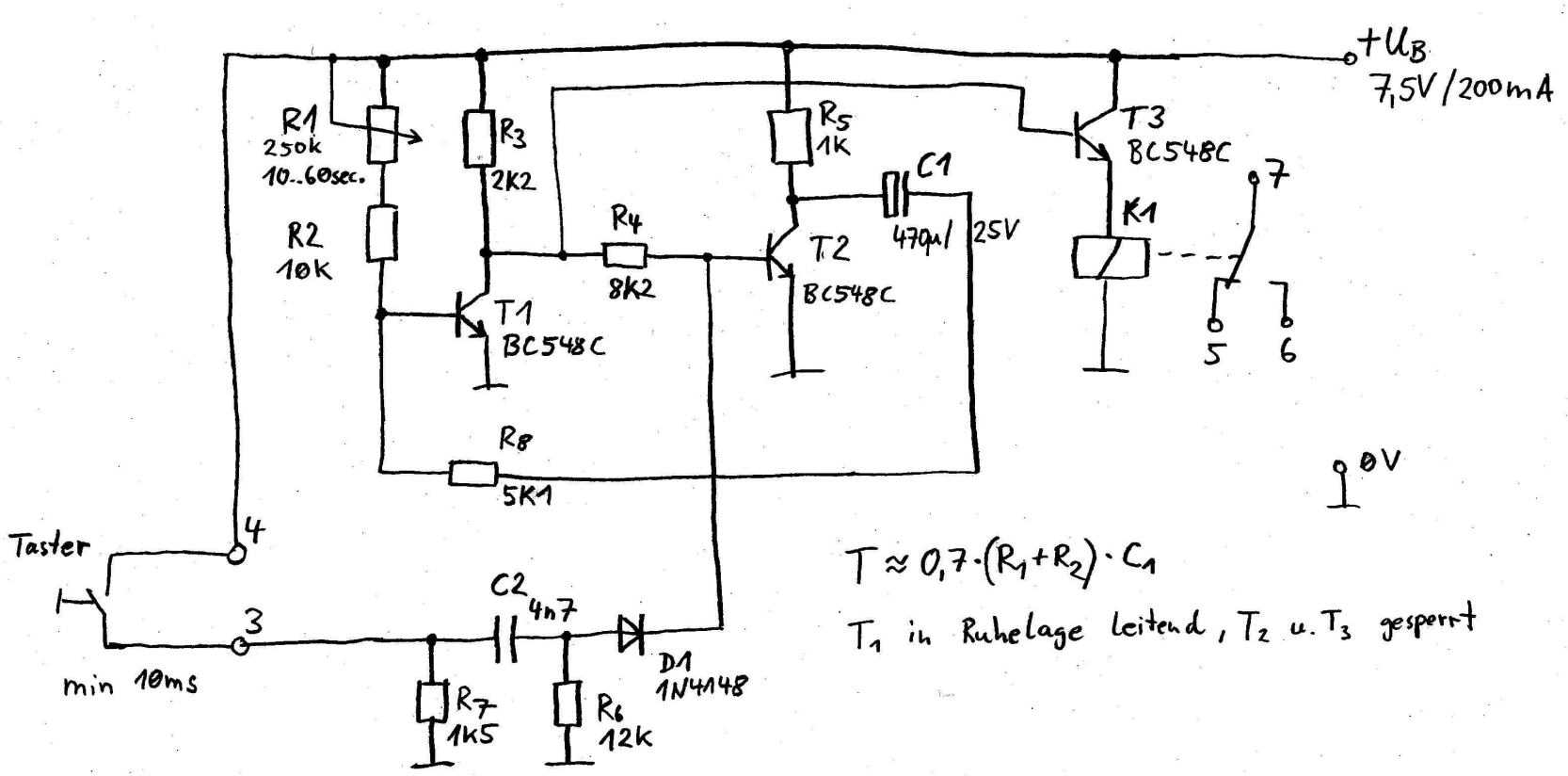


Figure 28: Beispiel Treppenlichtautomat

Transistoren

Verstärker

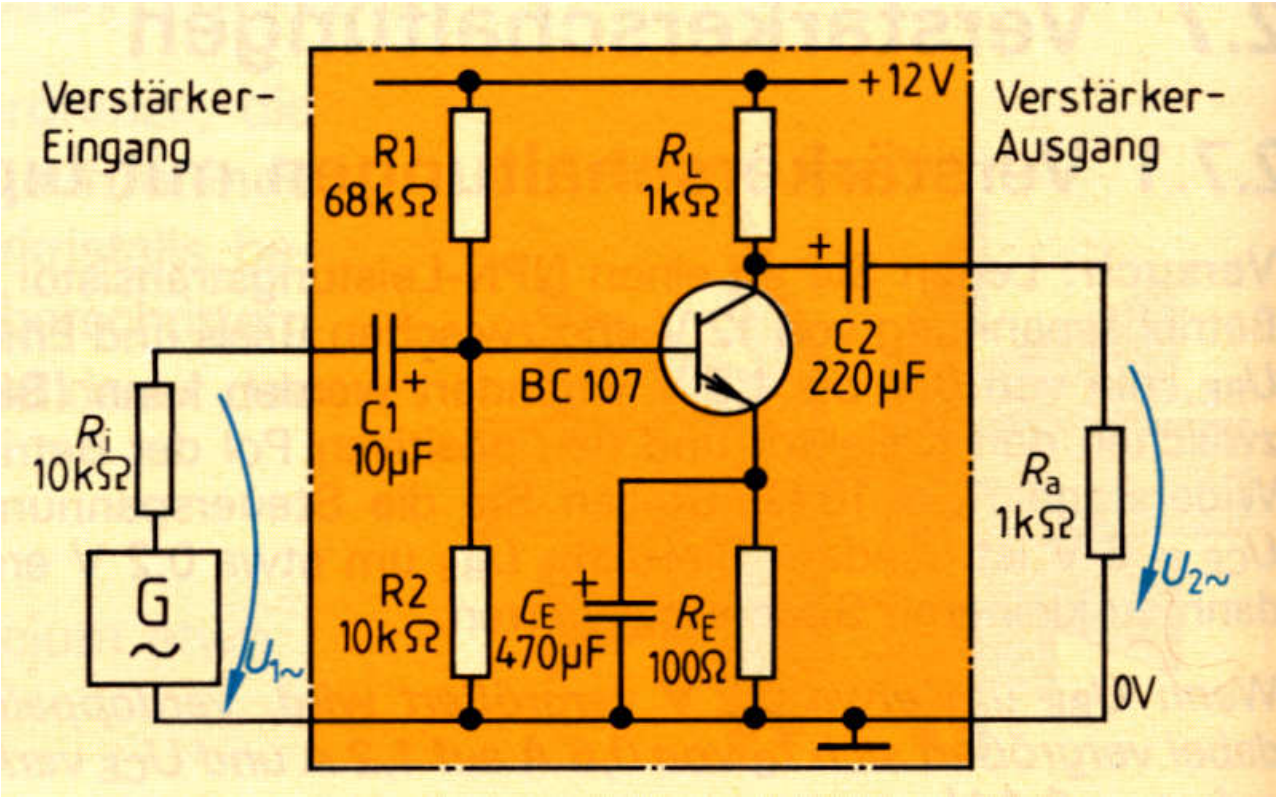


Figure 29: Beispiel NF-Verstärker[2]

Transistoren

Verstärker

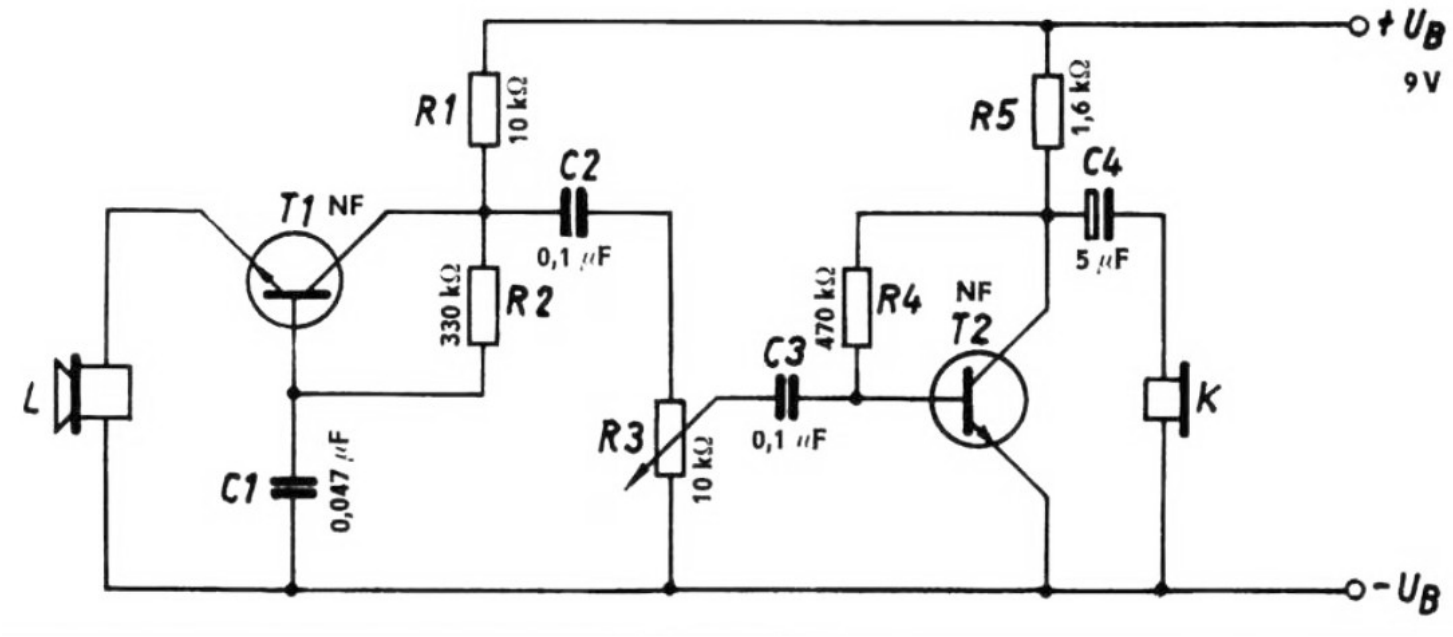


Figure 30: Beispiel Mikrofon-Verstärker[34]

Operationsverstärker (OPV)

1. Ein OPV verstärkt die Spannung zwischen + und - Eingang
2. + nichtinvertierend, - invertierender Eingang
3. Spannungsversorgung symmetrisch oder unsymmetrisch

Verwendung als:

1. Komparator (Vergleicher)
2. Signalverstärker (z.B. Audiotechnik)
3. Schmitt-Trigger (z.B. Straßenbeleuchtung)
4. Rechner (addieren, subtrahieren, ...)
5. Signalaufbereitung vor AD-Wandlern
6. Signalaufbereitung nach DA-Wandlern

Operationsverstärker

Spannungsversorgung vereinfacht

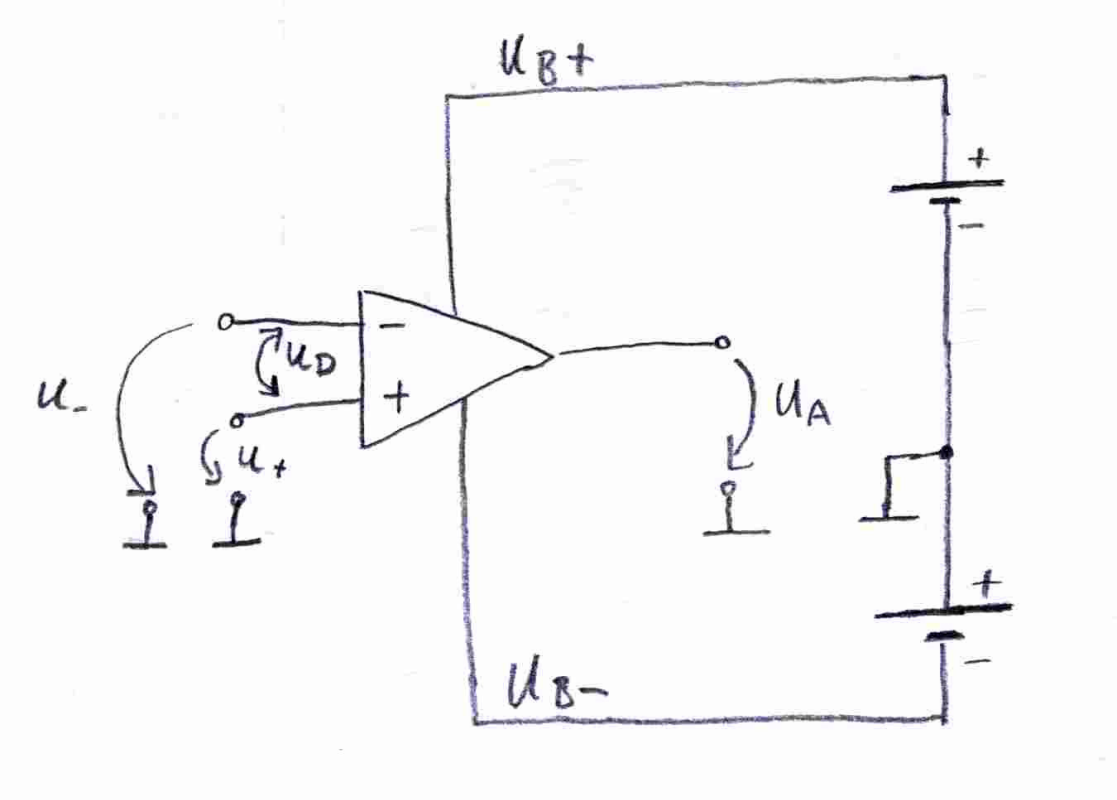


Figure 31: Spannungsversorgung

Operationsverstärker

in diskreter Bauweise

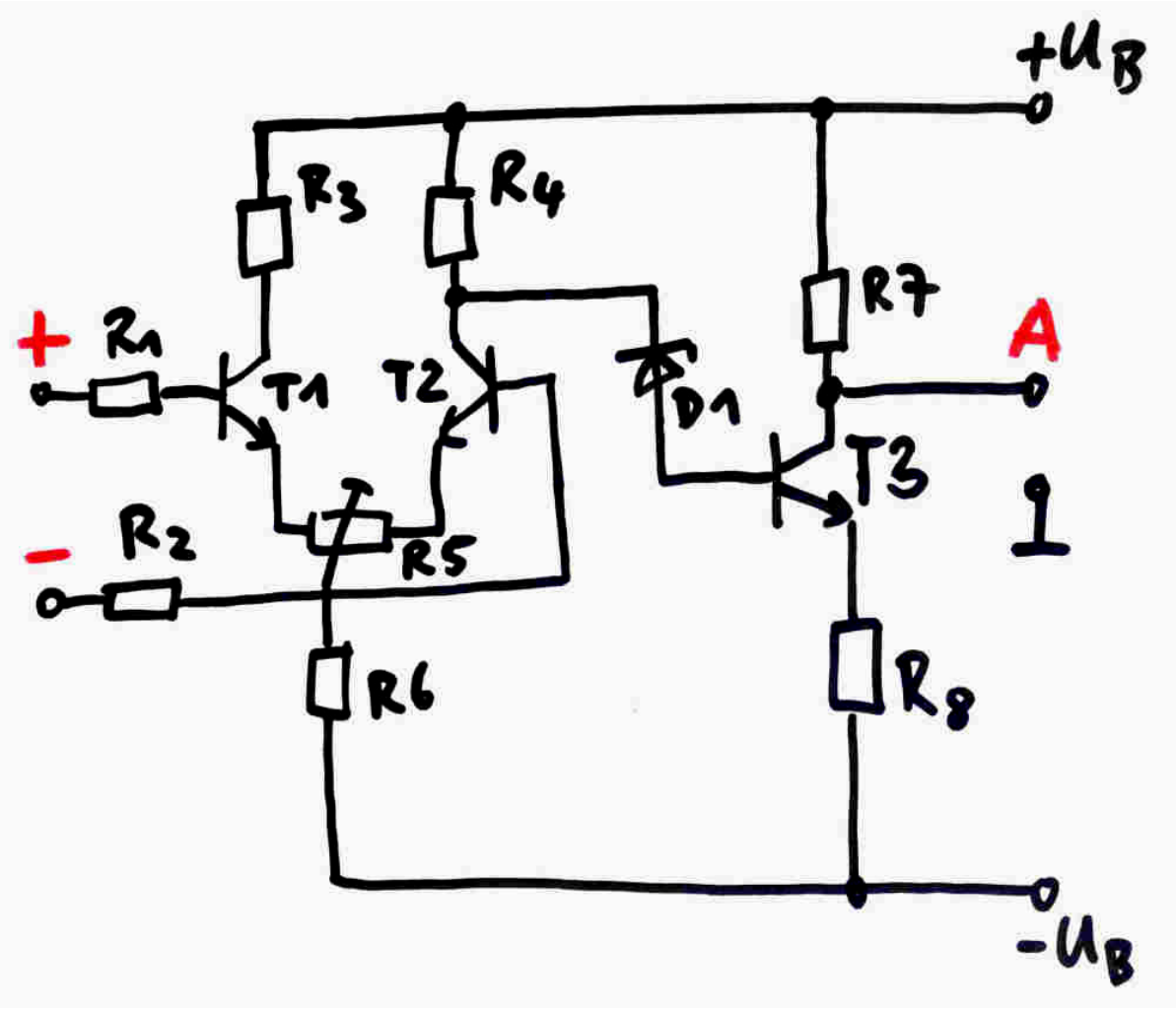


Figure 32: diskret aufgebaut (+ und - Eingang tauschen)

Operationsverstärker

Integriert UA741

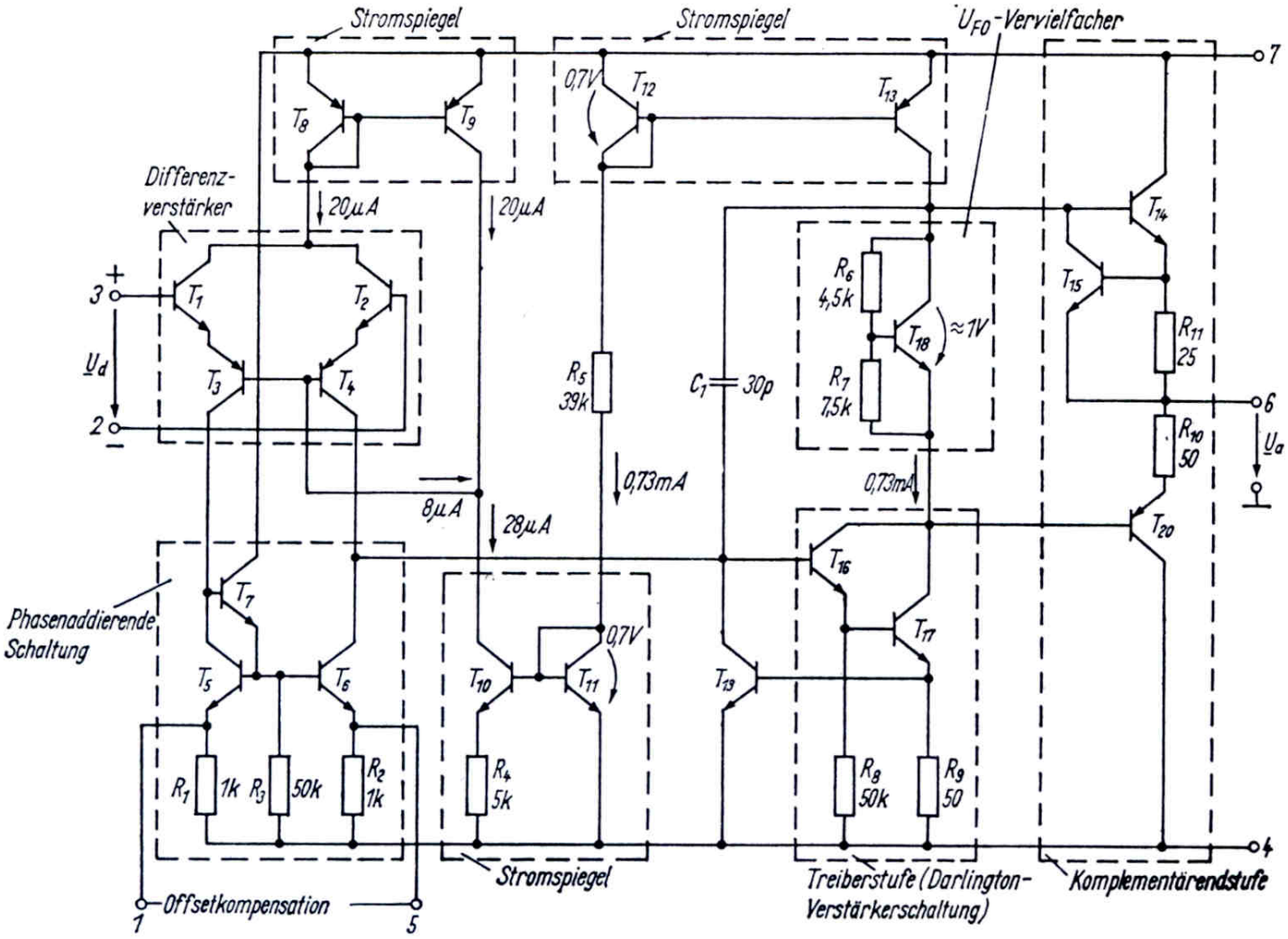


Figure 33: OPV integriert [9]

Operationsverstärker

Integriert CA3130

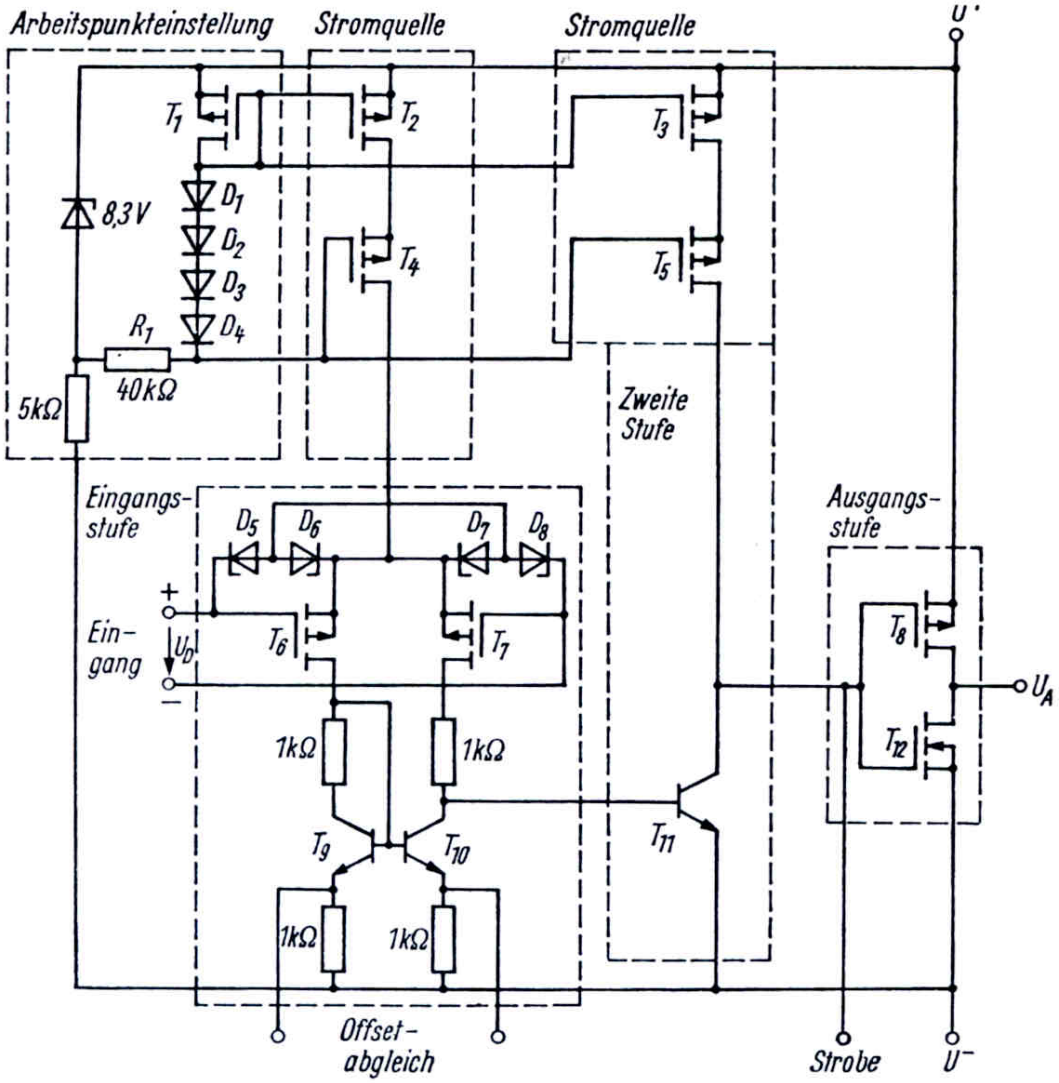


Figure 34: OPV integriert [9]

Operationsverstärker

Komparator

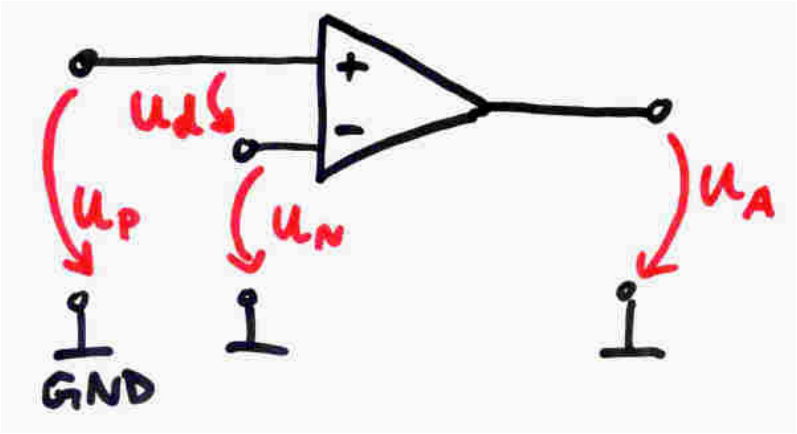


Figure 35: Komparator

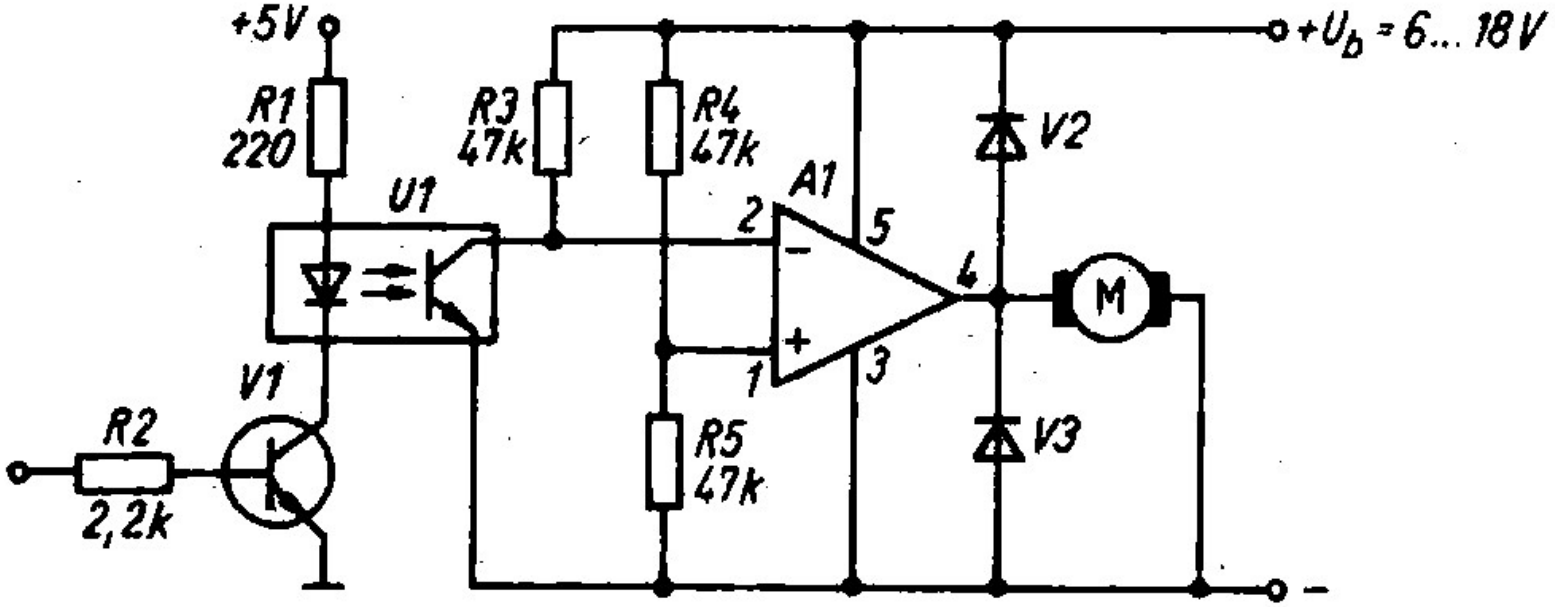


Figure 36: Beispiel Motor-Treiber mit Schnell-Stop[24]

Für A1 TDA2030 oder L165 verwendbar.

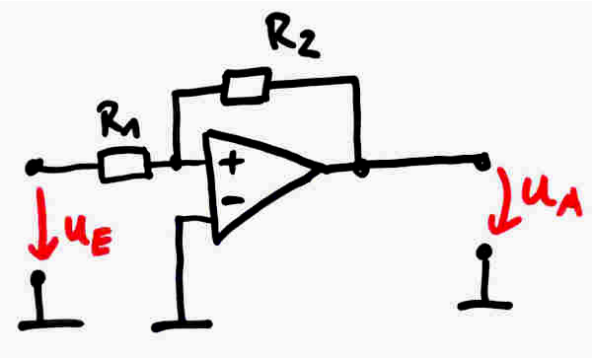


Figure 37: Schmitt-Trigger nicht invertierend

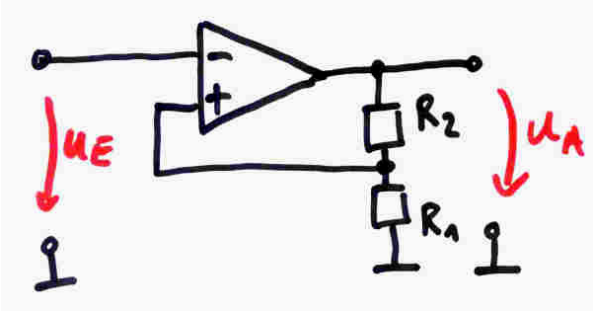


Figure 38: Schmitt-Trigger invertierend

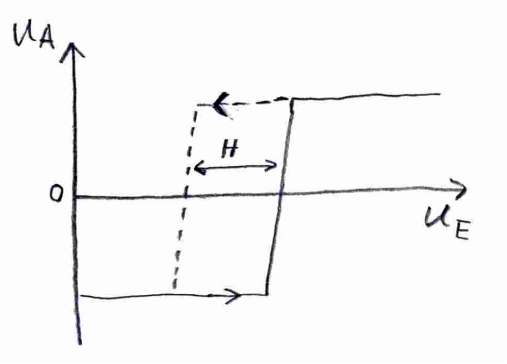
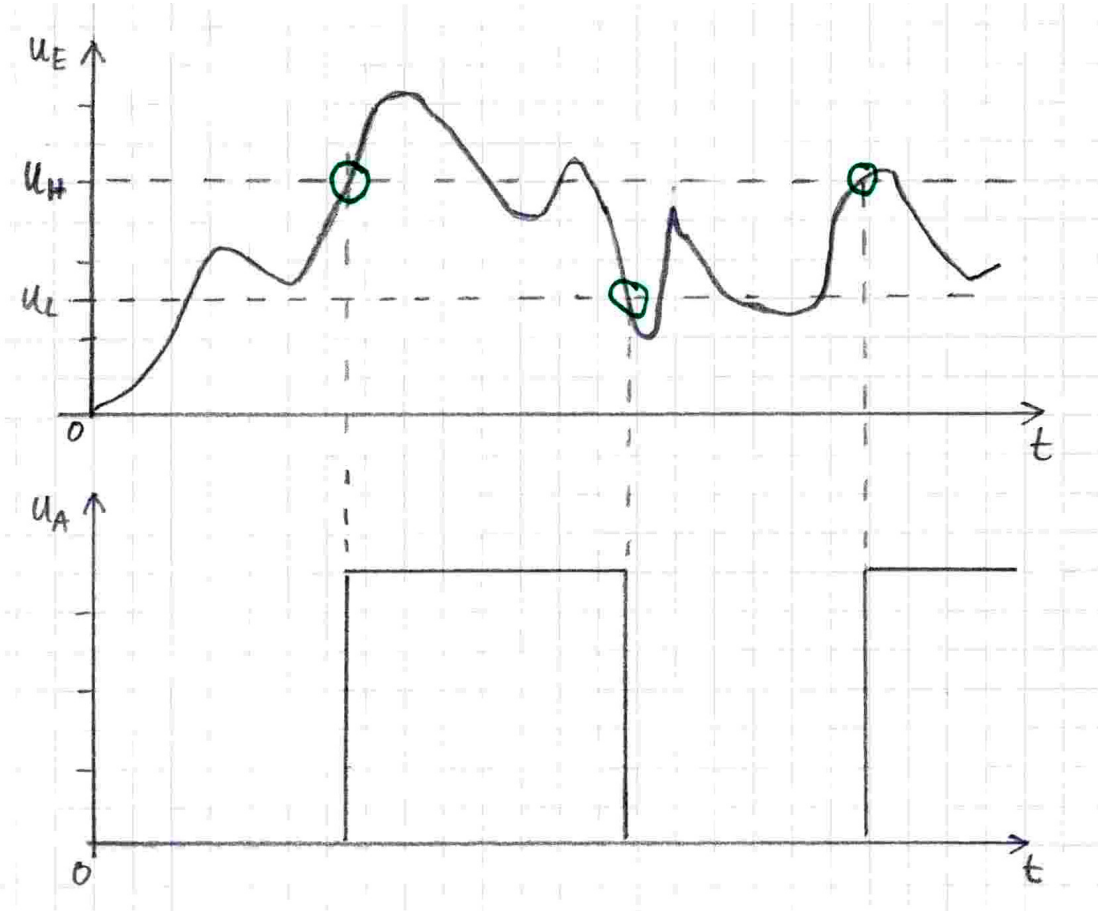


Figure 39: Hysteresekurve

Operationsverstärker

Schmitt-Trigger



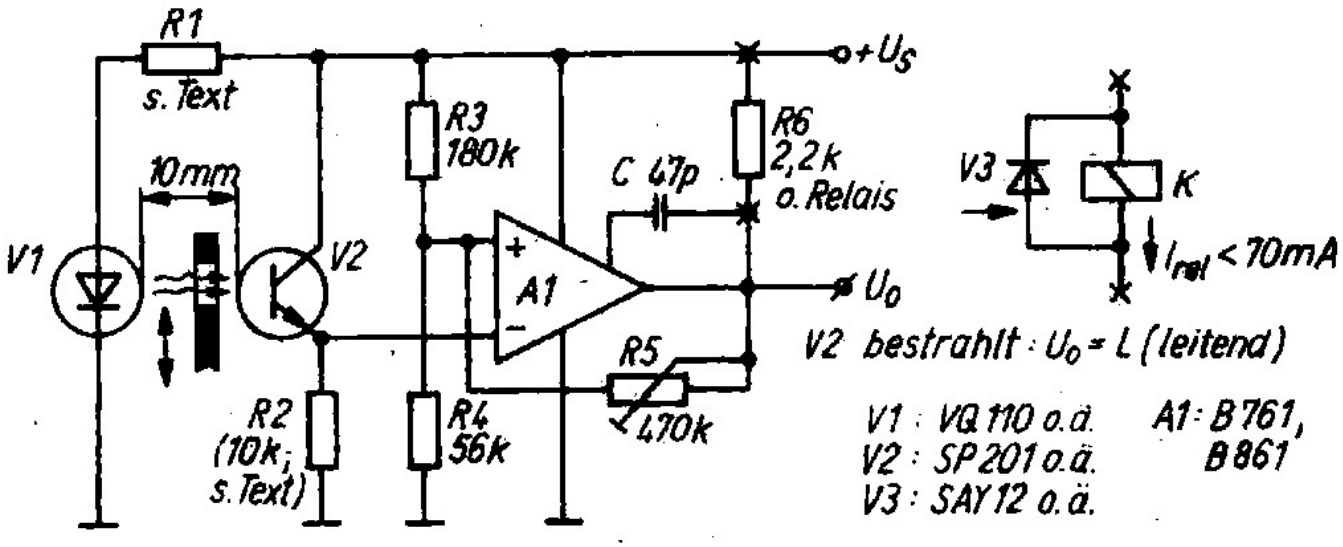


Figure 40: Beispiel: Lichtschranke[24]

Operationsverstärker

Rechenschaltungen

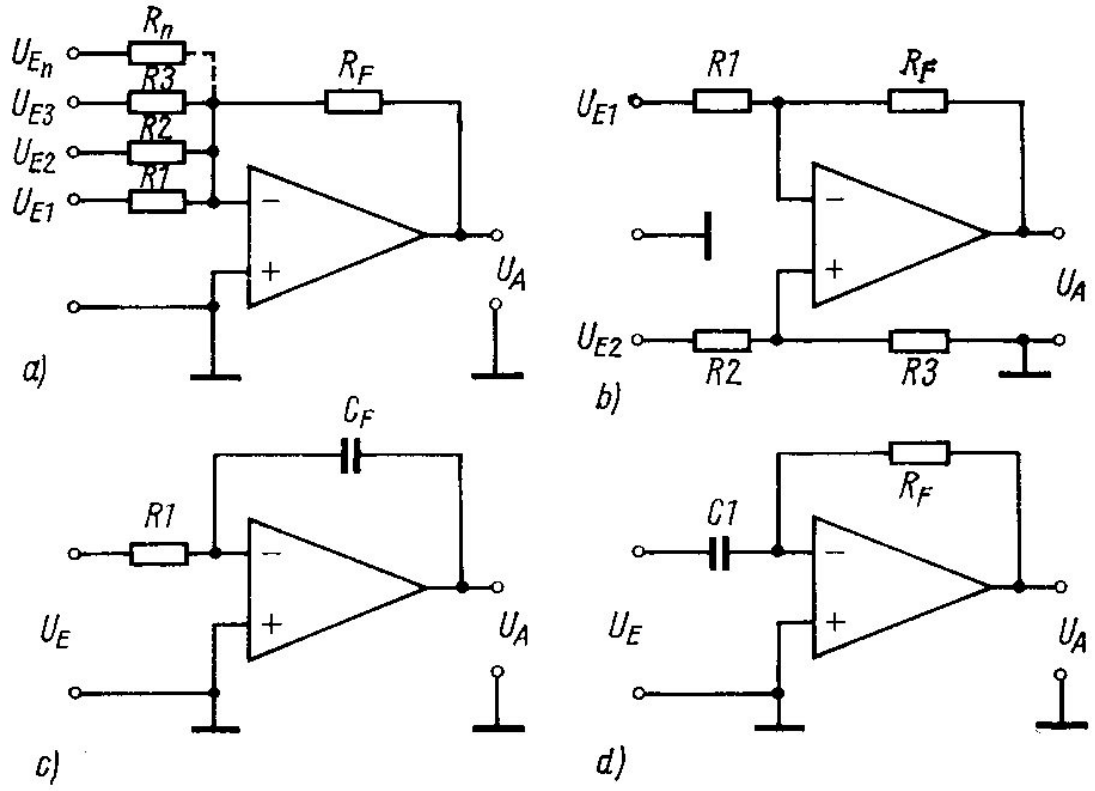


Bild 6 ***Grundschaltungen von Operationsverstärkern;***

a — Summierverstärker, ***b — Differenzverstärker,***

c — Integrierverstärker, ***d — Differenzierverstärker***

Figure 41: Rechenschaltungen[3]

Operationsverstärker

Invertierender und nicht-invertierender Betrieb

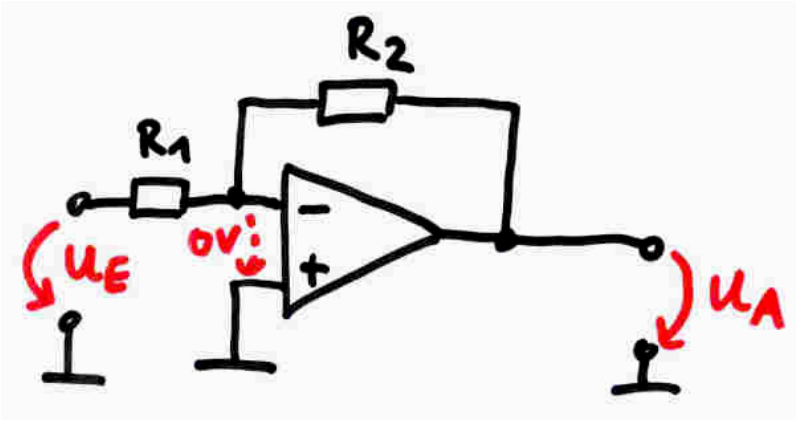


Figure 42: invertierender OPV

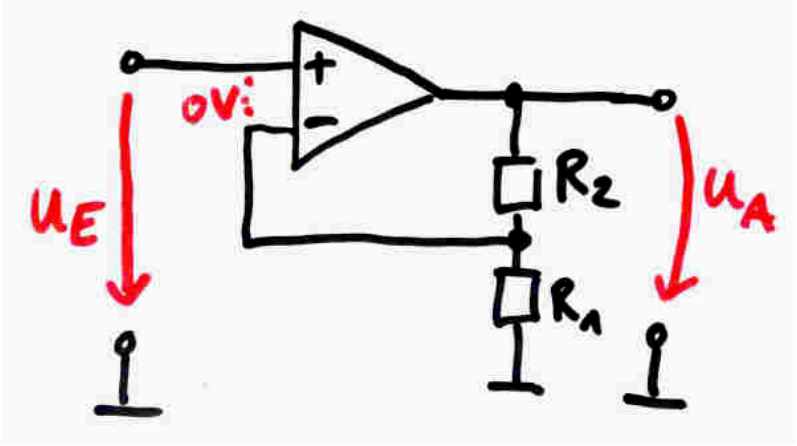


Figure 43: nicht-invertierender OPV

Operationsverstärker

NF-Verstärker

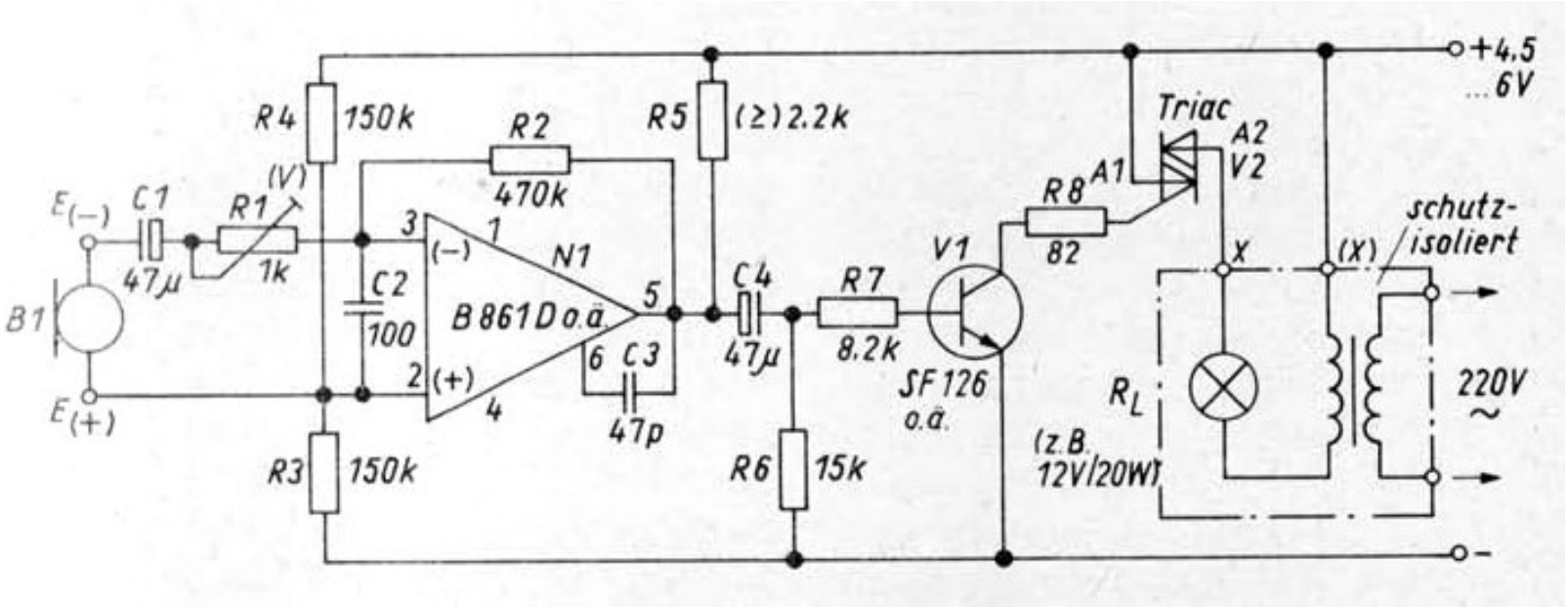


Figure 44: Beispiel Schallgesteuerte Lampe (Licht-Orgel)[36]

Operationsverstärker

NF-Verstärker

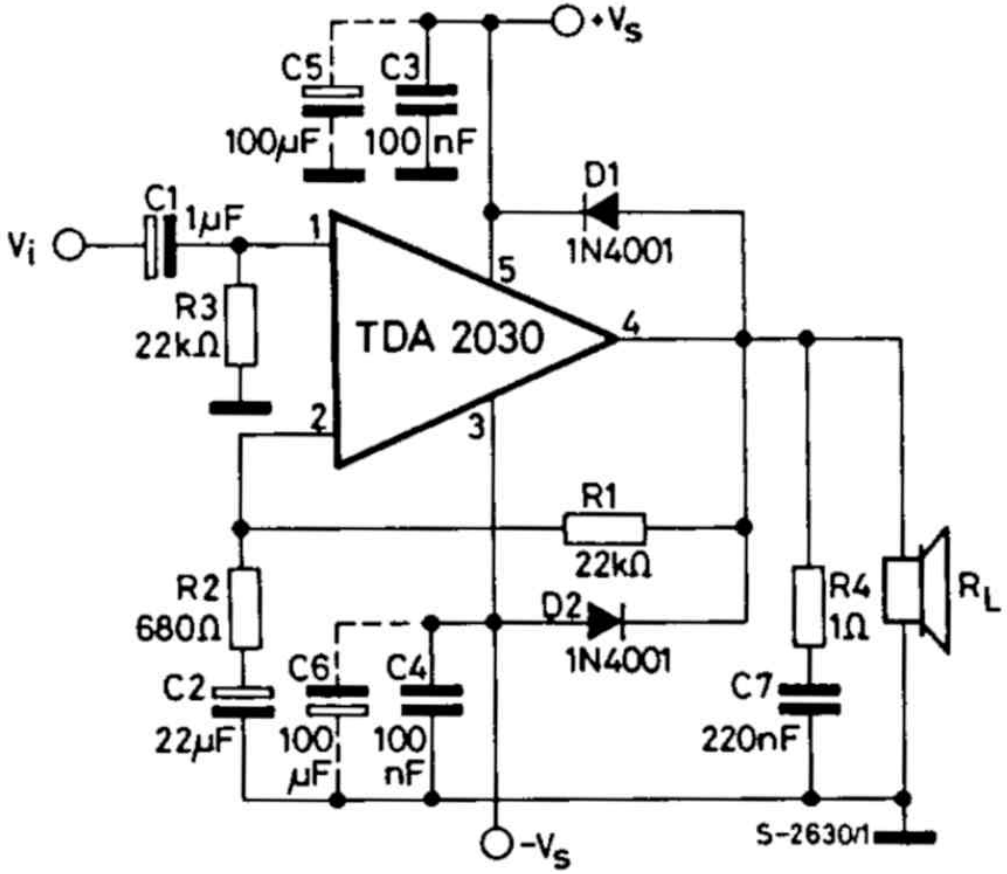


Figure 45: Beispiel NF-Verstärker[12]

Operationsverstärker

Addition und Subtraktion

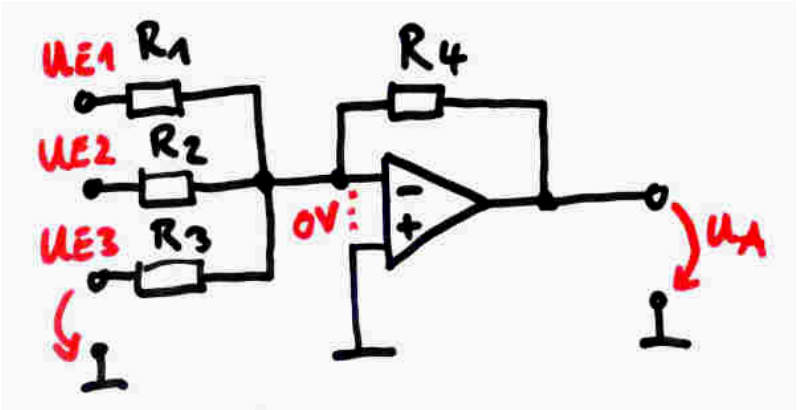


Figure 46: Addierer

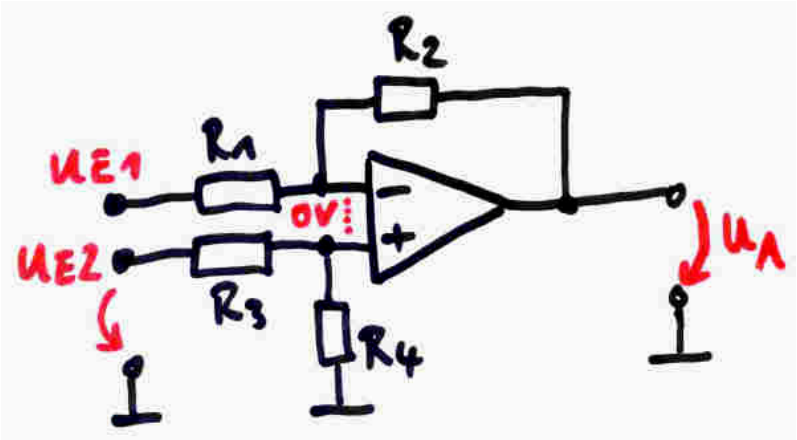


Figure 47: Subtrahierer

Operationsverstärker

Addierer

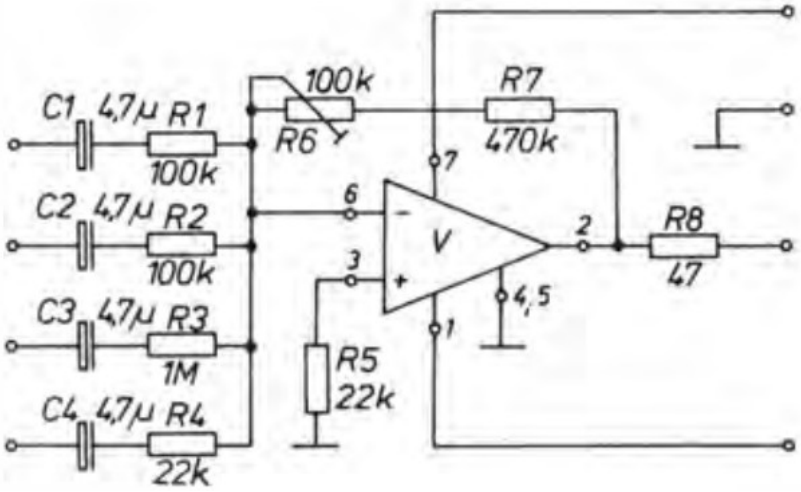


Figure 48: Beispiel Mischer für Audio-Signale[33]

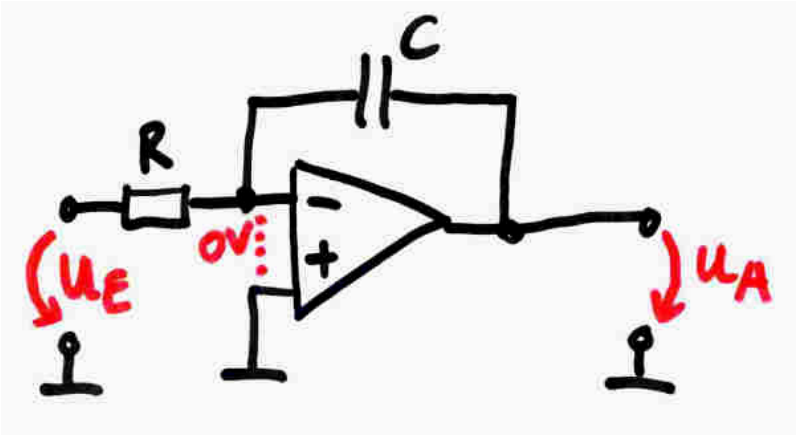


Figure 49: Integrator

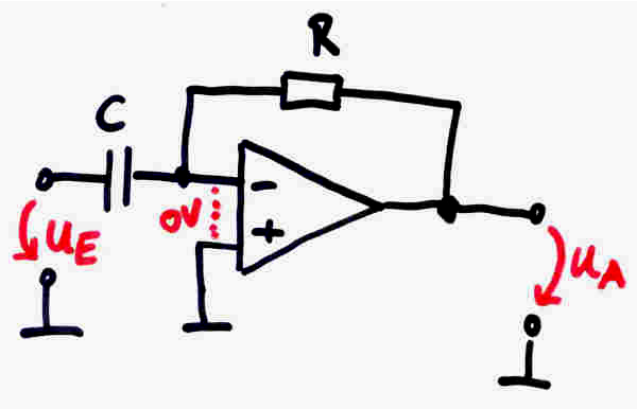


Figure 50: Differenzierer

Operationsverstärker

Integration und Differentiation

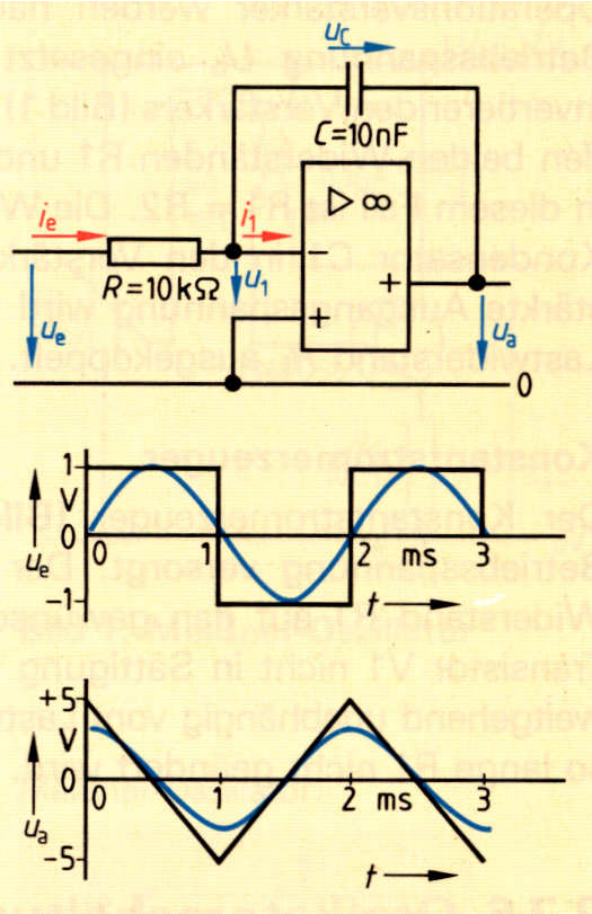


Figure 51: Integrator[2]

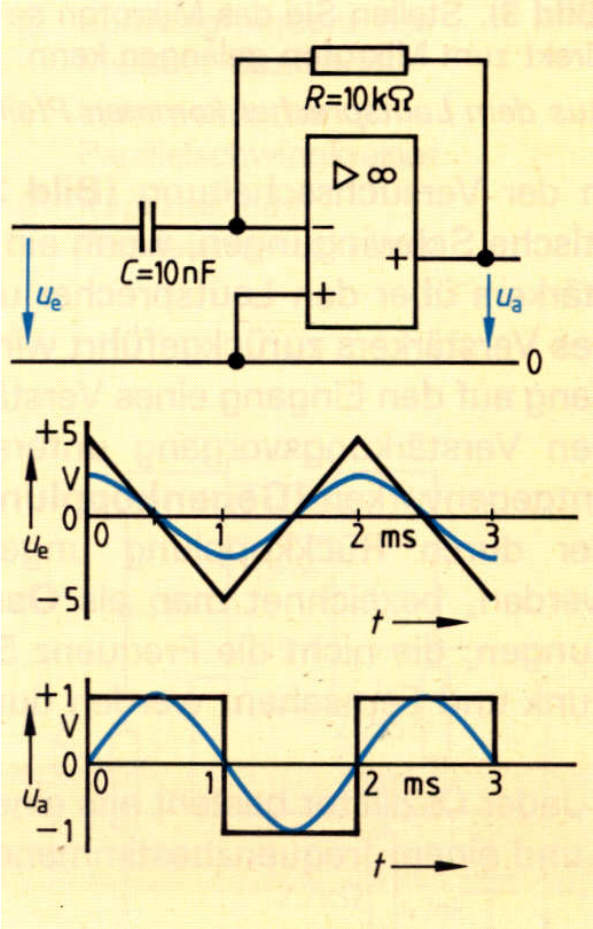


Figure 52: Differenzierer[2]

Operationsverstärker

weitere Rechenoperationen

1. Multiplikation
2. Division
3. Logarithmieren
4. Potenzieren
5. Siehe [23]

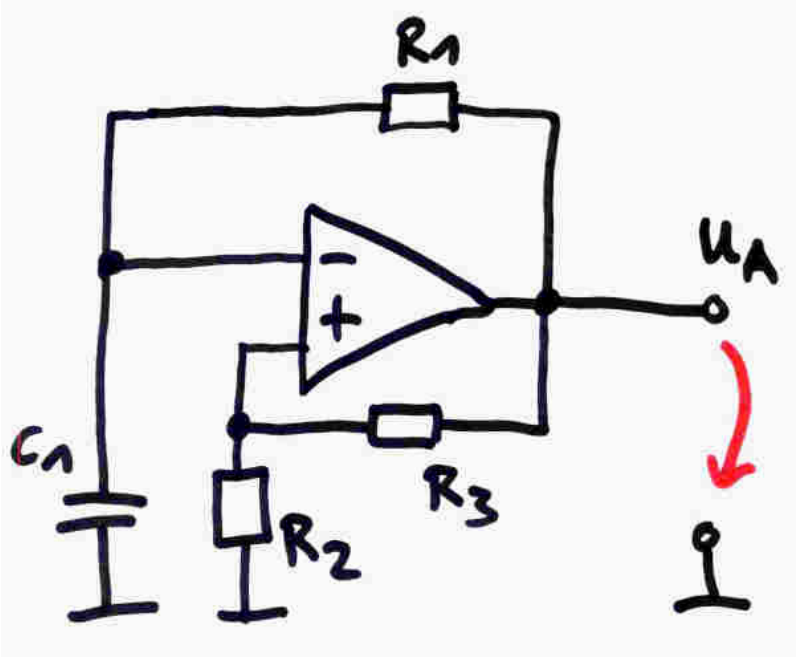


Figure 53: Rechteckgenerator

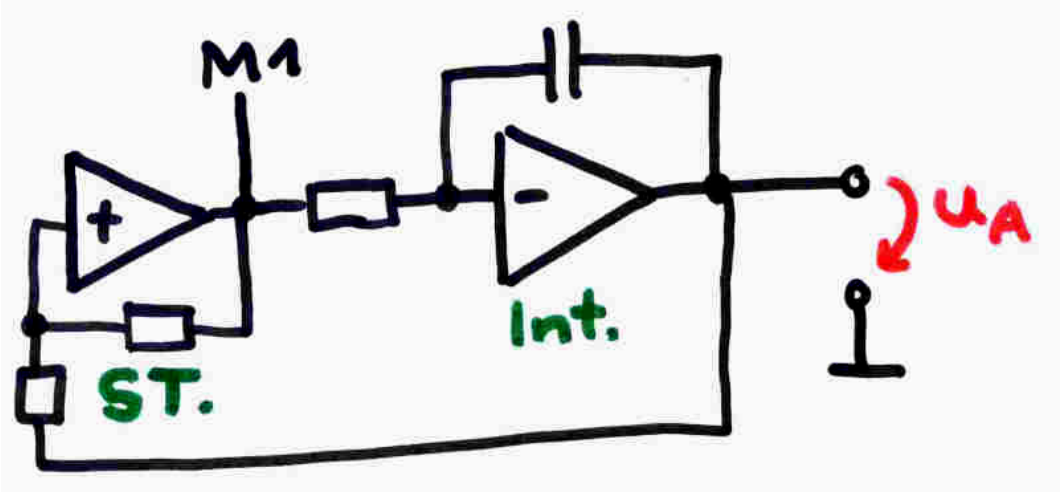


Figure 54: Dreieckgenerator

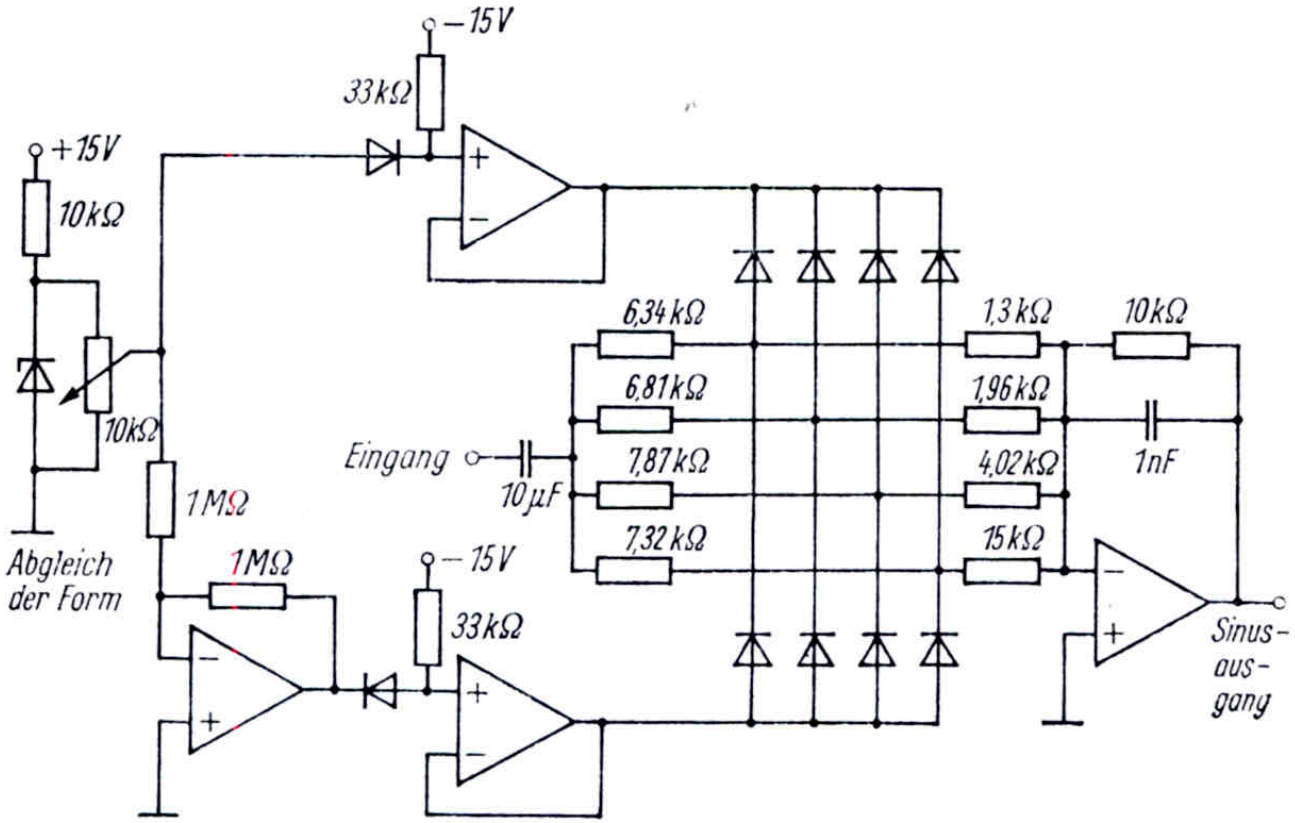


Figure 55: Sinusgenerator mit Diodennetzwerk [9]

Operationsverstärker

Offset- und Frequenzgangkompensation

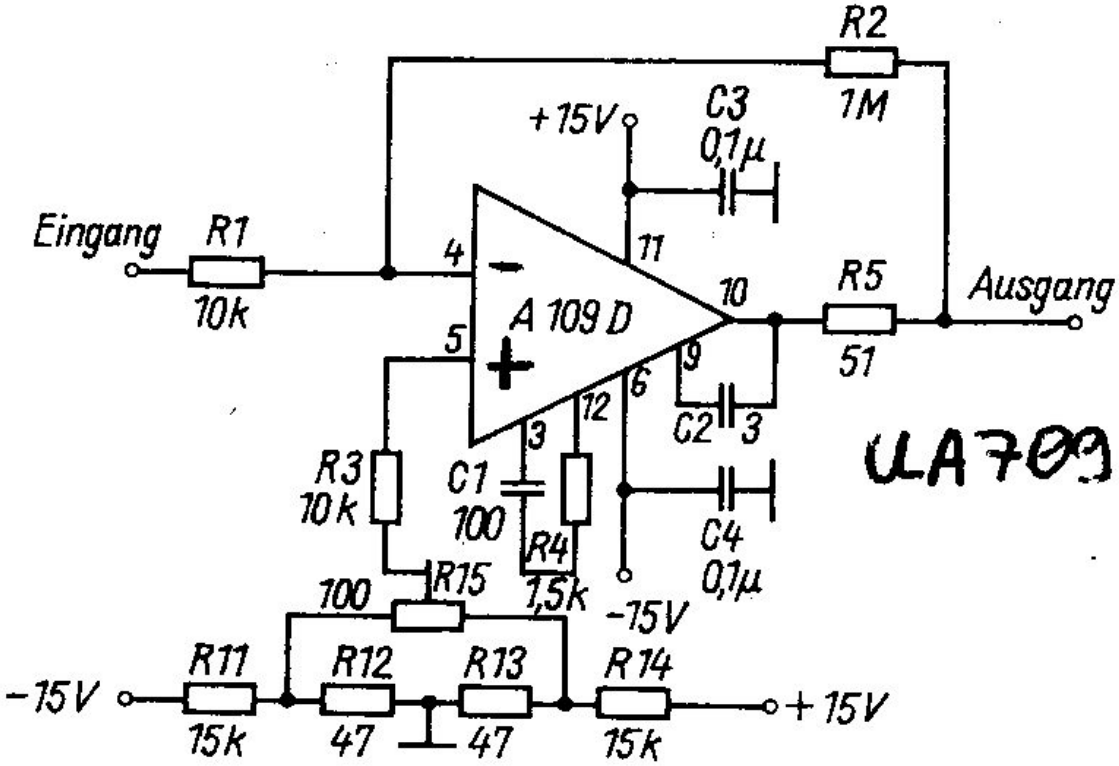


Figure 56: UA709[4]

Operationsverstärker

Offset- und Frequenzgangkompensation

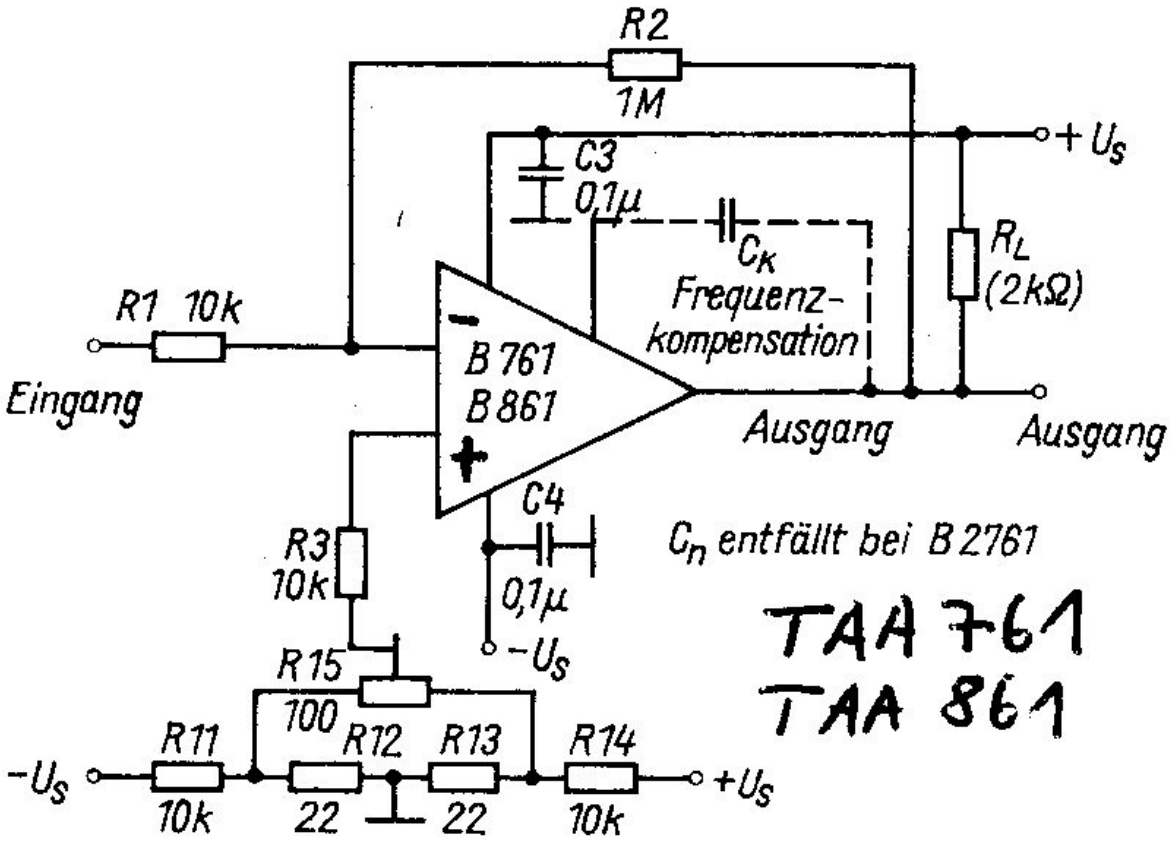


Figure 57: TAA761[4]

Operationsverstärker

Offsetkompensation

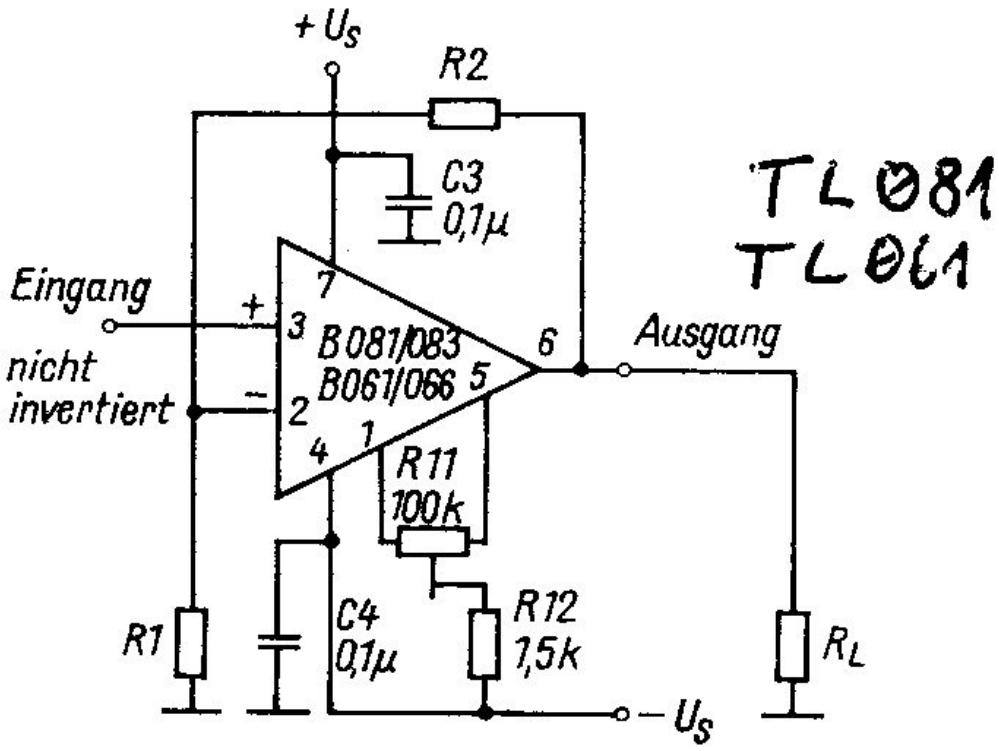


Figure 58: TL081[4]

Interne Frequenzgangkompensation !

Operationsverstärker

Offsetkompensation

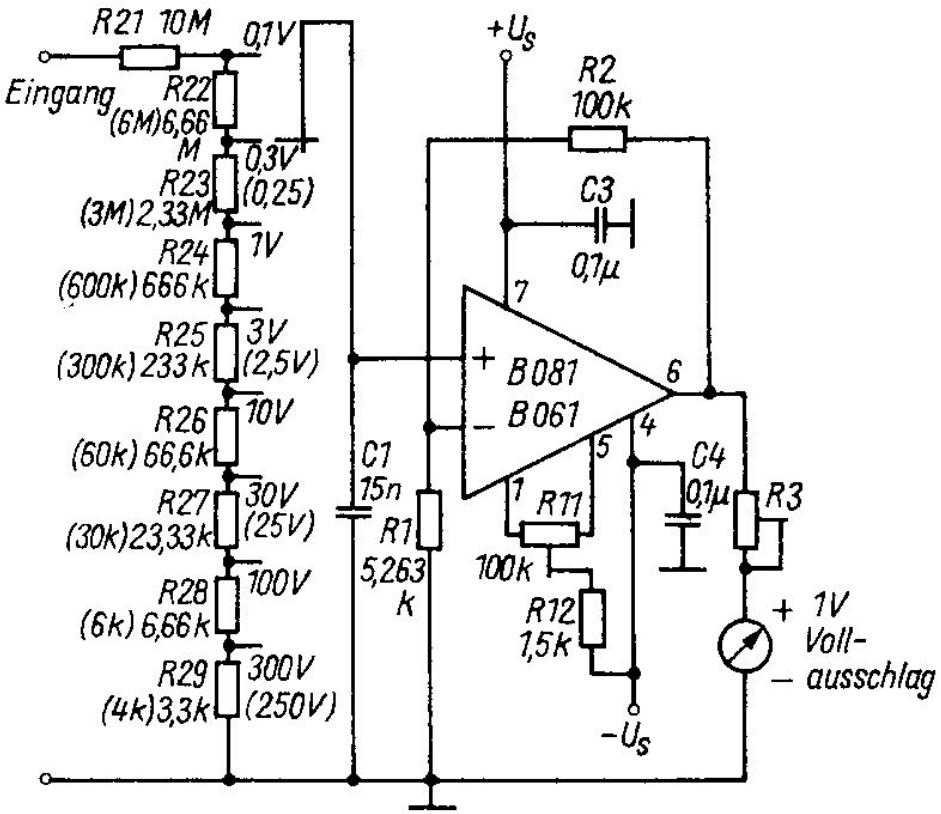


Figure 59: Voltmeter[4]

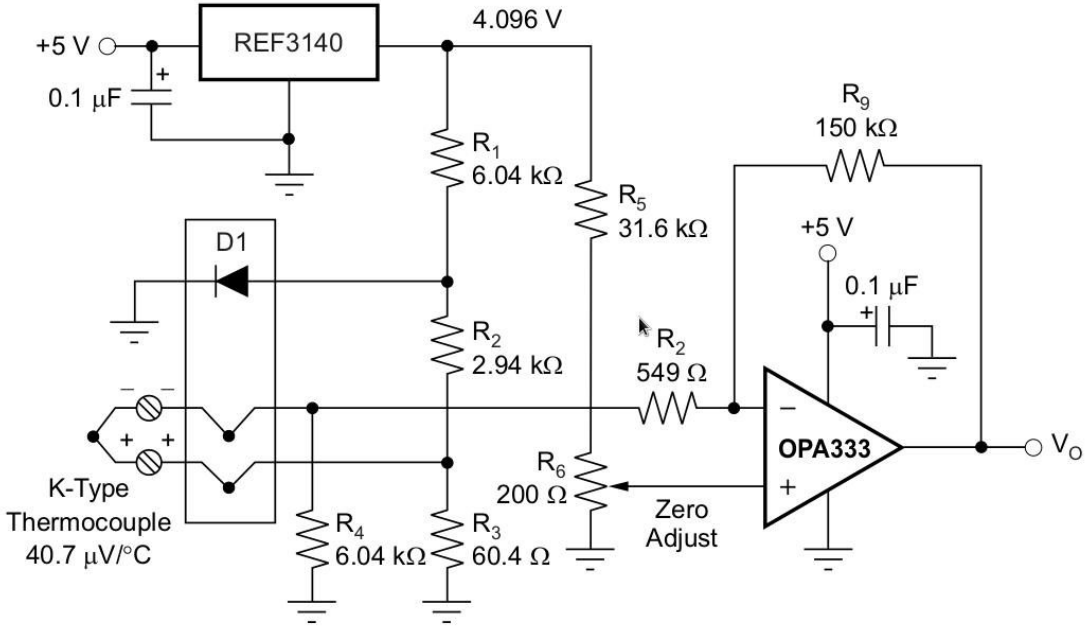


Figure 60: Thermometer mit OPA333[11]

Offsetspannung lt. Datenblatt max 10µV

Operationsverstärker

Frequenzgang

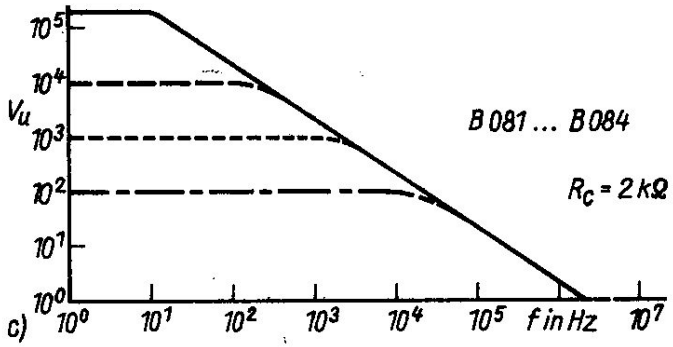


Figure 61: TL081[4]

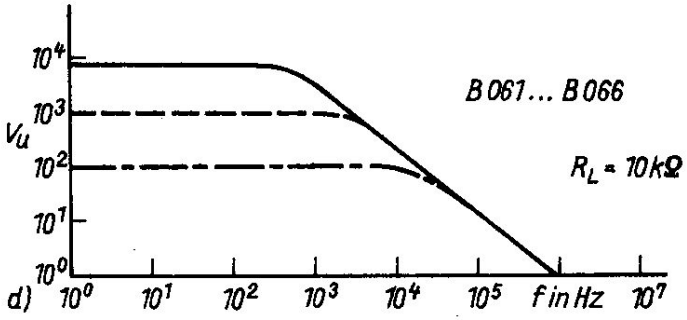


Figure 62: TL061[4]

Energieversorgung

1. Spannungsquellen
2. Stromquellen
3. Gleichrichtung
4. Lineare Regler
5. Schaltregler
6. Abblockung / Layout

Energieversorgung

Lineares geregeltes Netzeil: Blockschaltung

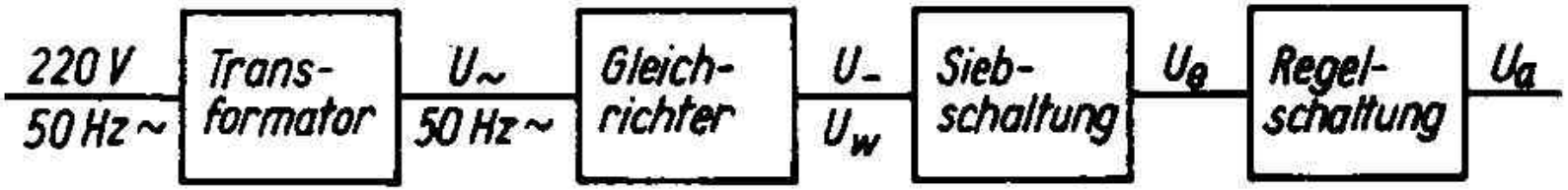


Figure 63: Blockschaltung [16]

Energieversorgung

Geregeltes Schalt-Netzeil: Blockschaltung

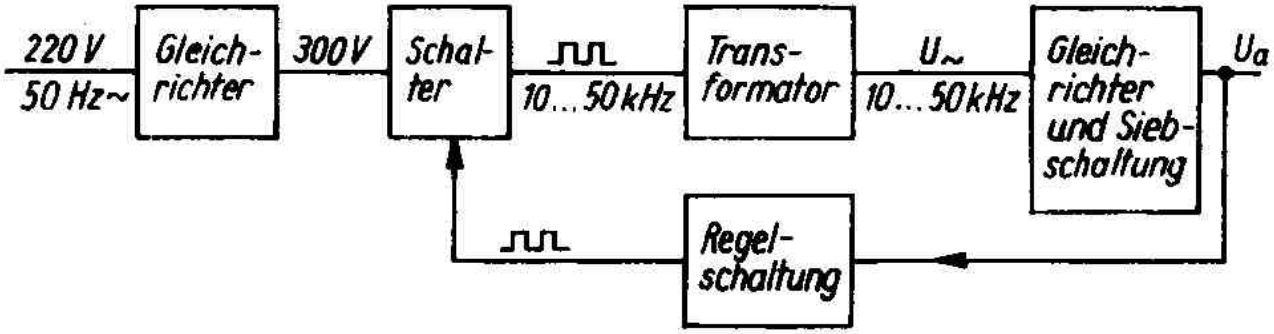


Figure 64: Blockschaltung [16]

Energieversorgung

Einweg-Gleichrichtung

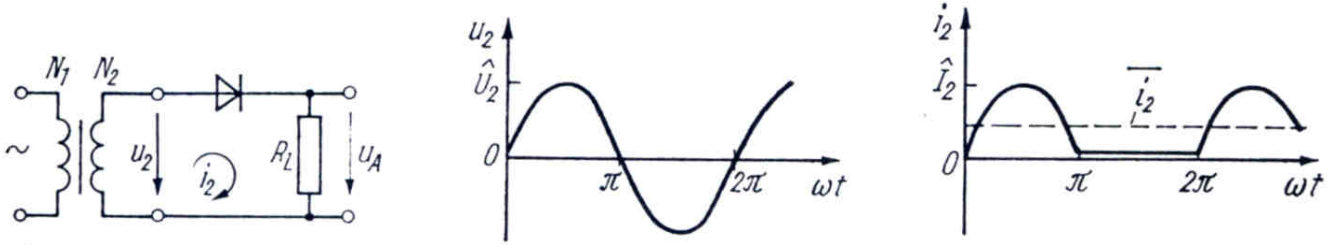


Figure 65: Transformator und Diode [9]

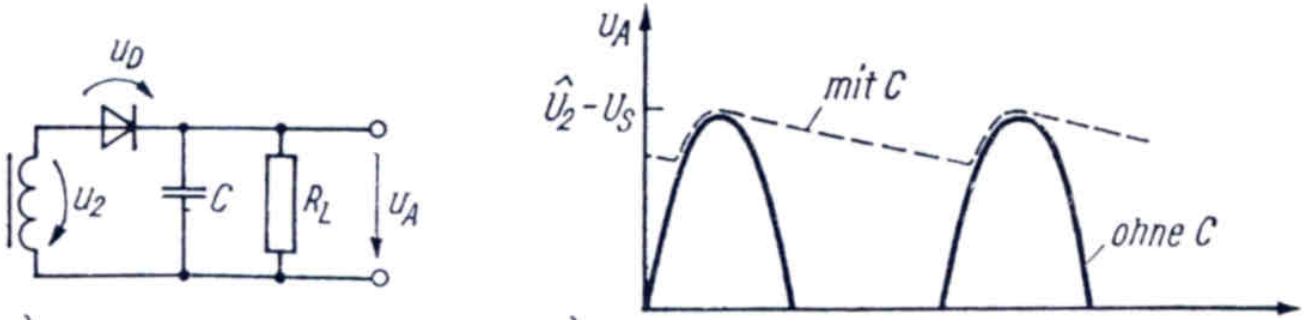


Figure 66: mit Kondensator [9]

Zur Dimensionierung siehe [20].

Energieversorgung

Zweiweg-Gleichrichtung

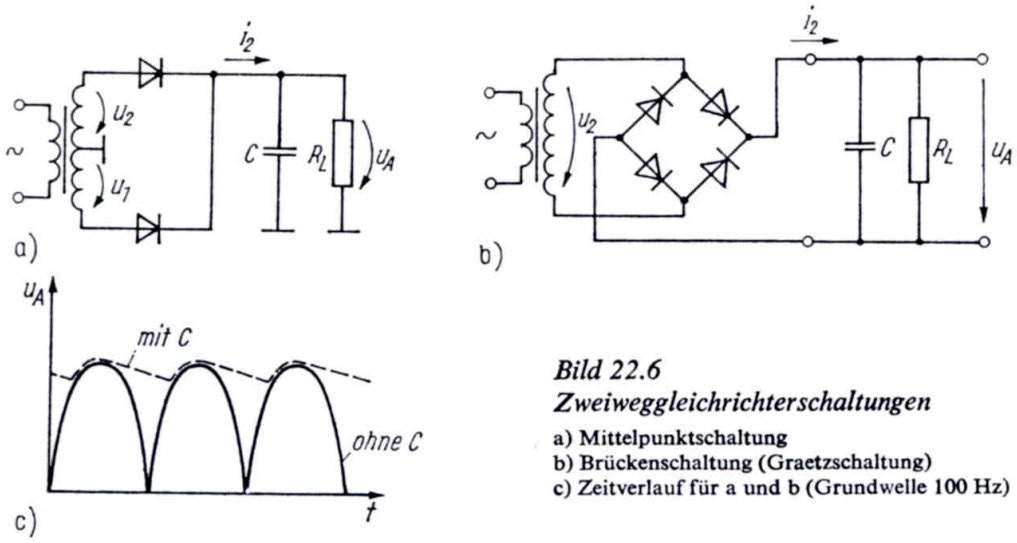


Figure 67: Brücke [9]

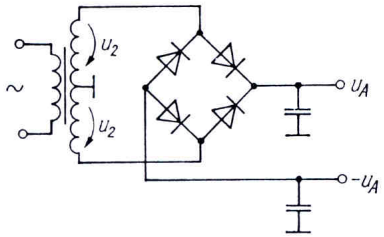


Figure 68: symmetrisch [9]

Zur Dimensionierung siehe [20].

Energieversorgung

Spannungsstabilisierung - einfach und robust

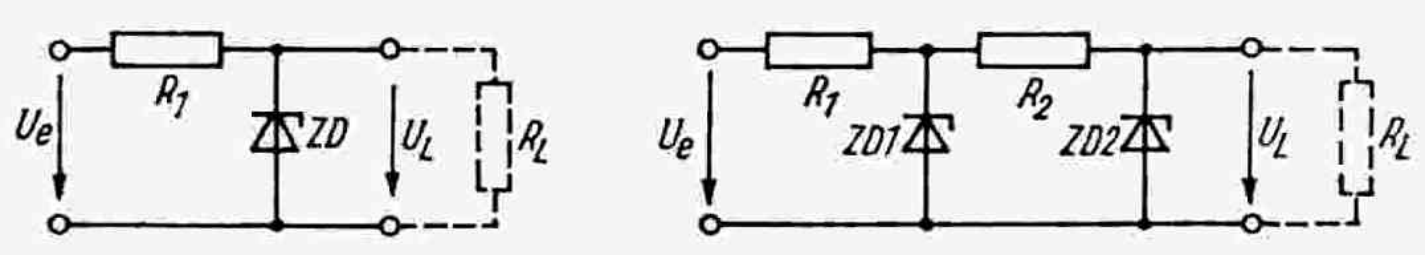


Figure 69: Z-Diode [9]

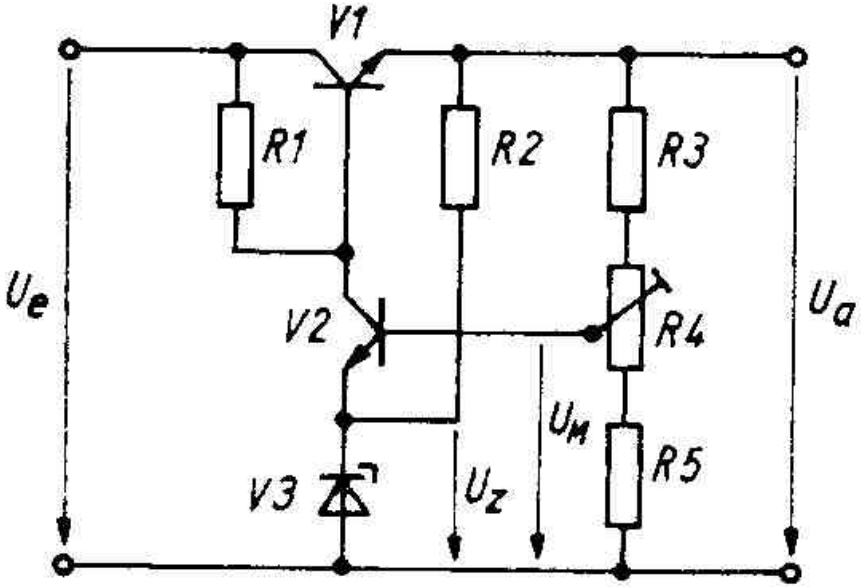
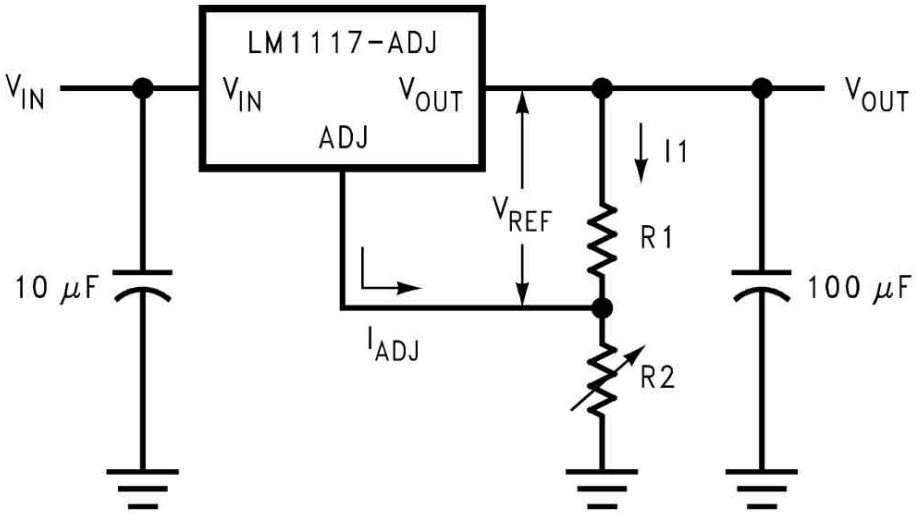


Figure 70: diskret [16]

1. Bei hohen Eingangsspannungen Alternative zu integriertem Regler.
2. als Vorregler verwendbar



$$V_{OUT} = V_{REF}\left(1 + \frac{R2}{R1}\right) + I_{ADJ}\,R2$$

Figure 71: integiert [13]

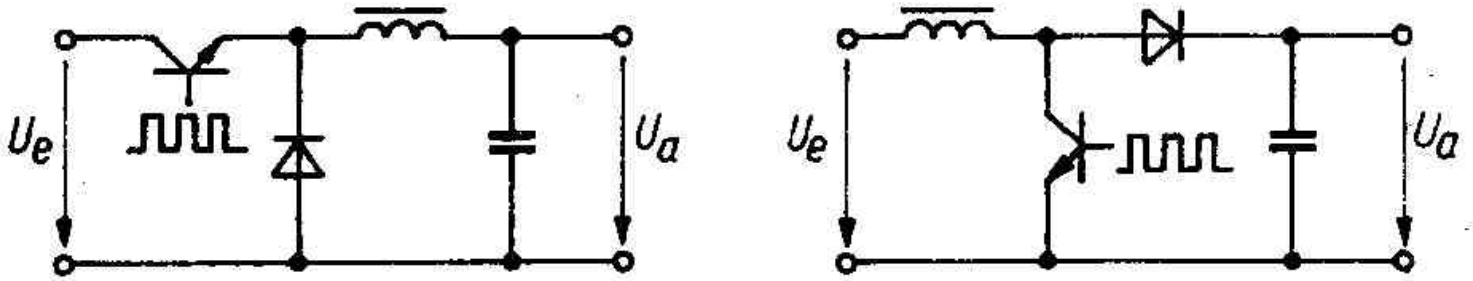


Figure 72: Abwärts- und Aufwärtsregler[16]

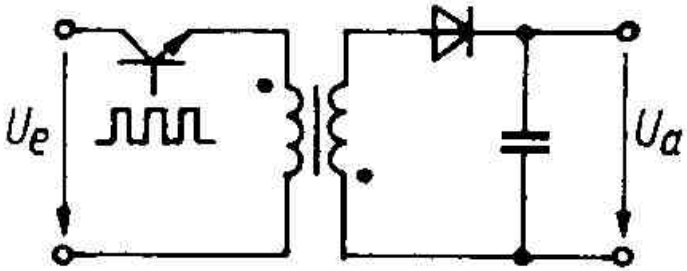


Figure 73: mit Transformator/Übertrager [16]

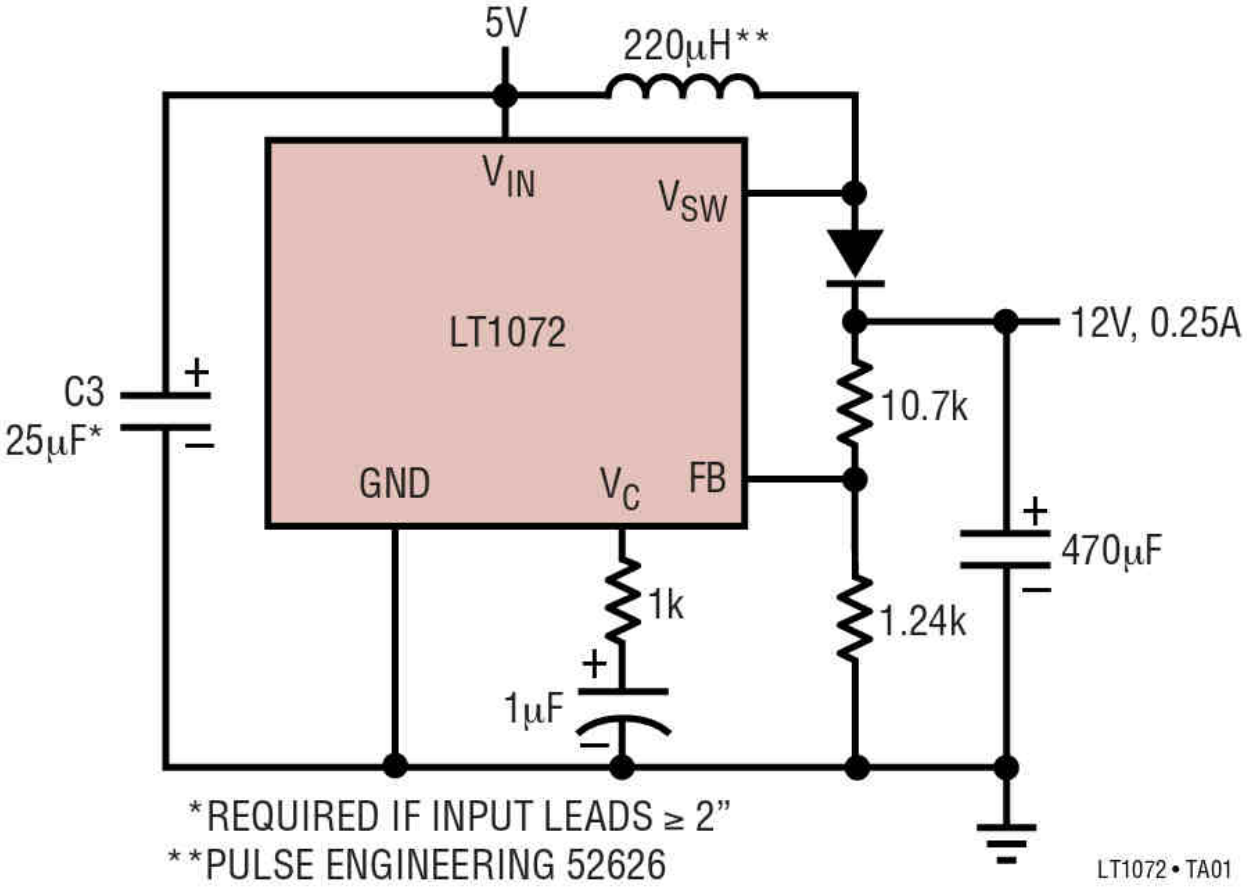


Figure 74: Schaltregler [14]

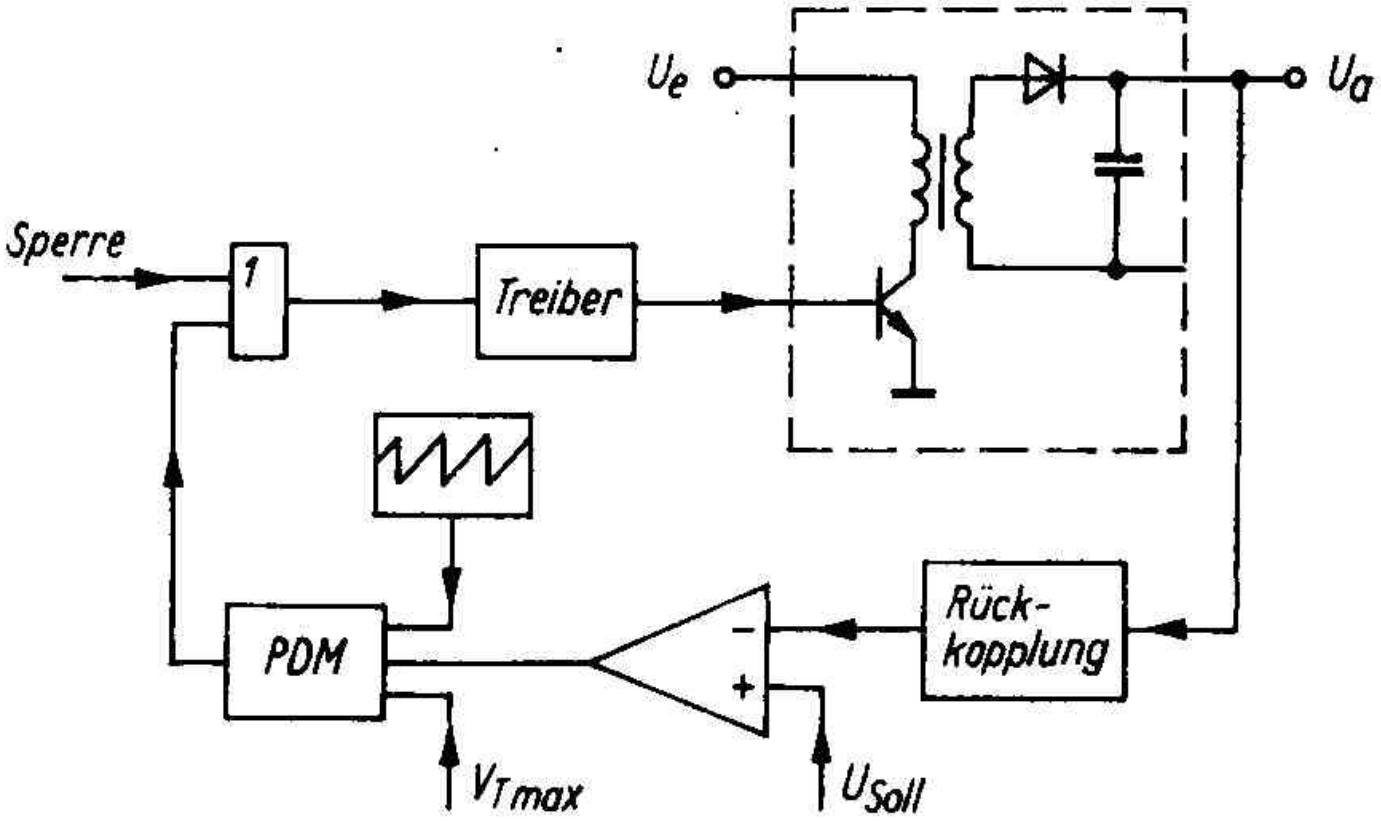


Figure 75: Regelkreis [16]

Energieversorgung

Lineare vs. Schaltregler

Linear-Regler	Schaltregler
HF-freie Ausgangsspannung (keine Filter nötig)	wenig Verlustleistung, hoher Wirkungsgrad
Aufwand an Schaltungstechnik minimal	Aufwand für Kühlung minimal
schnelle Reaktion auf Lastschwankungen	Platzbedarf minimal

Energieversorgung

Negative Hilfsspannungen

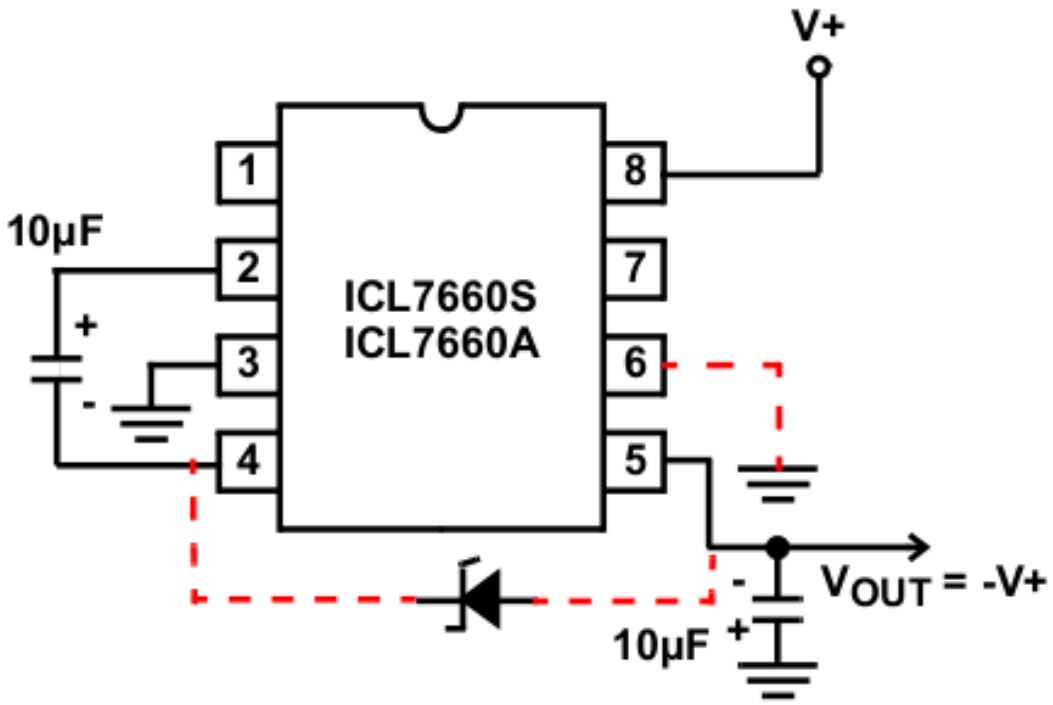


Figure 76: ICL7660[29]

Stromquellen

sehr einfach, diskret und robust

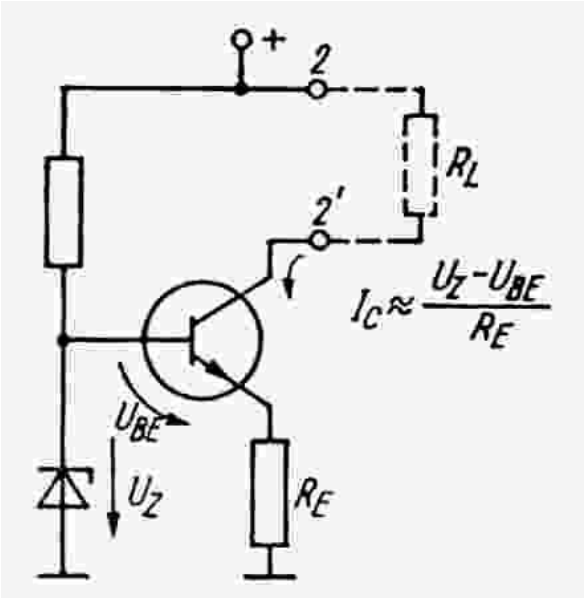


Figure 77: Z-Diode und Transistor [9]

Stromquellen
mit OPV

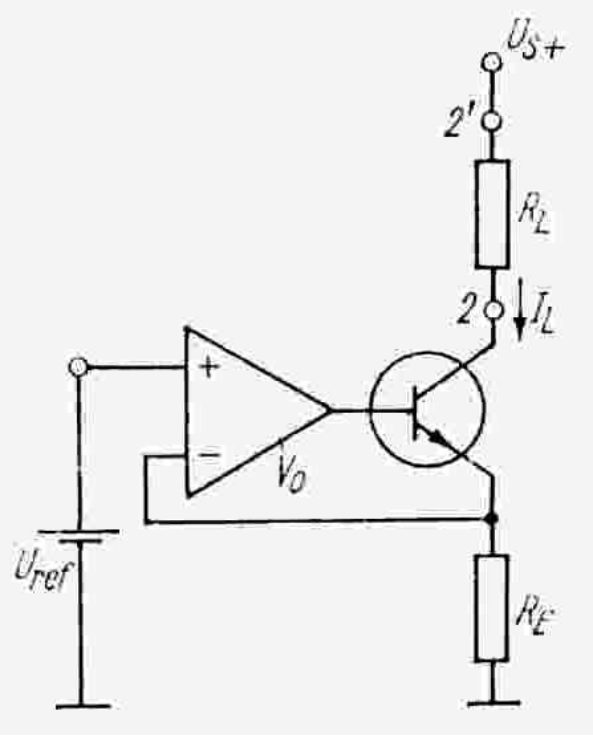


Figure 78: OPV und Transistor [9]

Energieversorgung
Abblockung

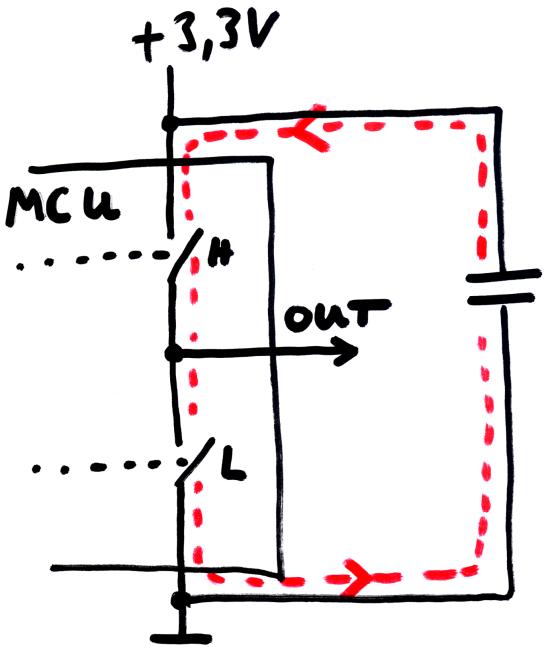


Figure 79: Abblockung nahe am IC

siehe[30]

Energieversorgung

Abblockung

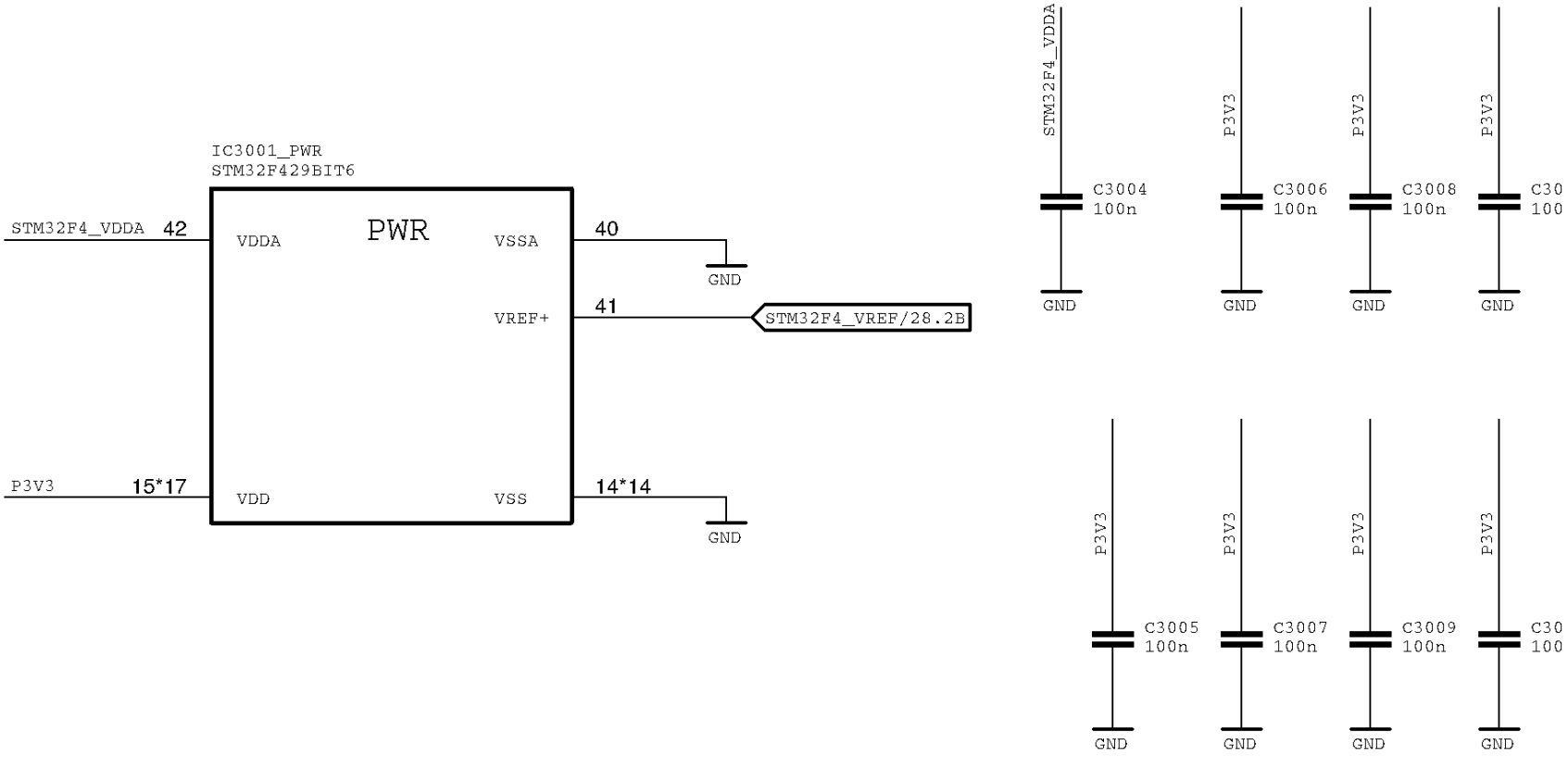


Figure 80: Abblockung nahe am IC

Energieversorgung

Abblockung

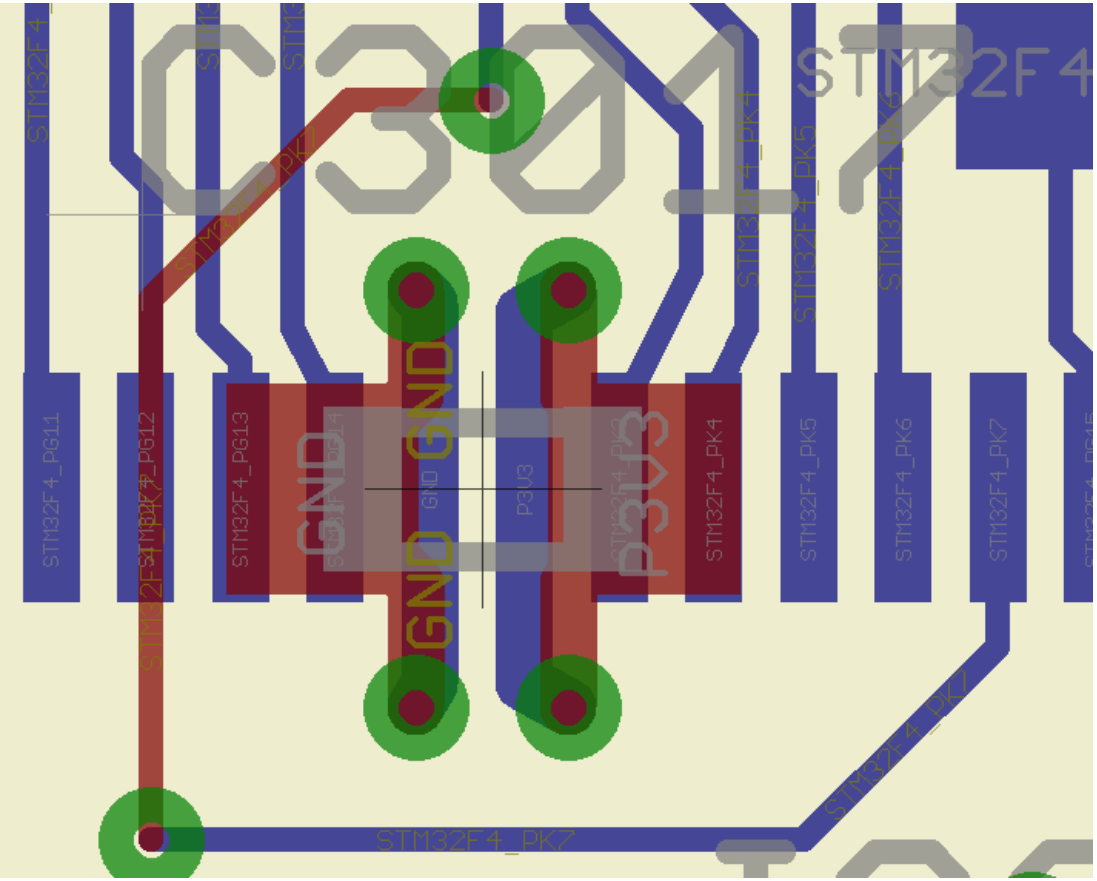


Figure 81: Abblockung nahe am IC

Energieversorgung

Abblockung

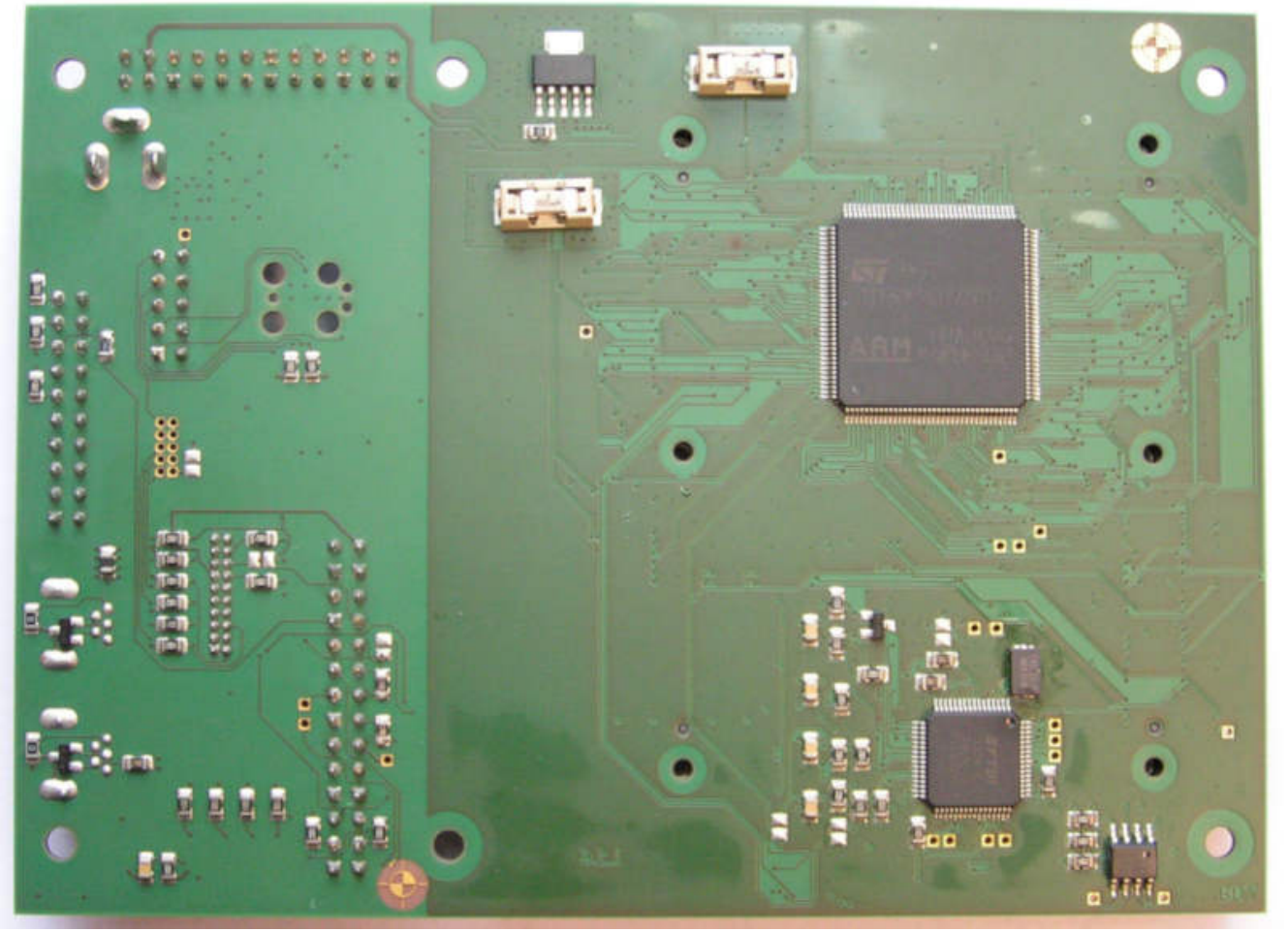


Figure 82: MCU auf Unterseite

Energieversorgung
Abblockung

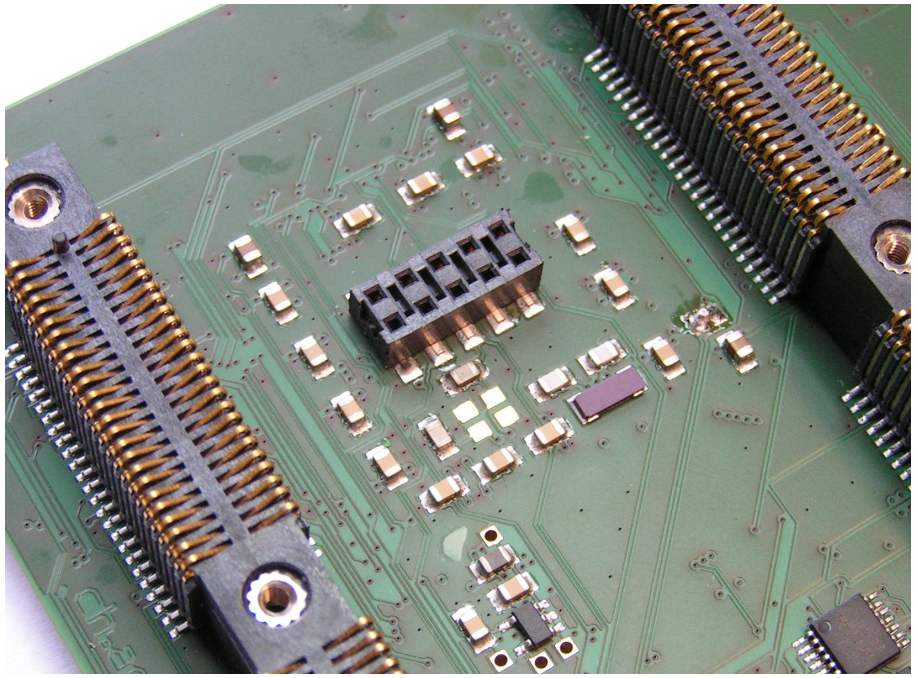


Figure 83: Abblockung auf Oberseite

Timer 555

Innenschaltung

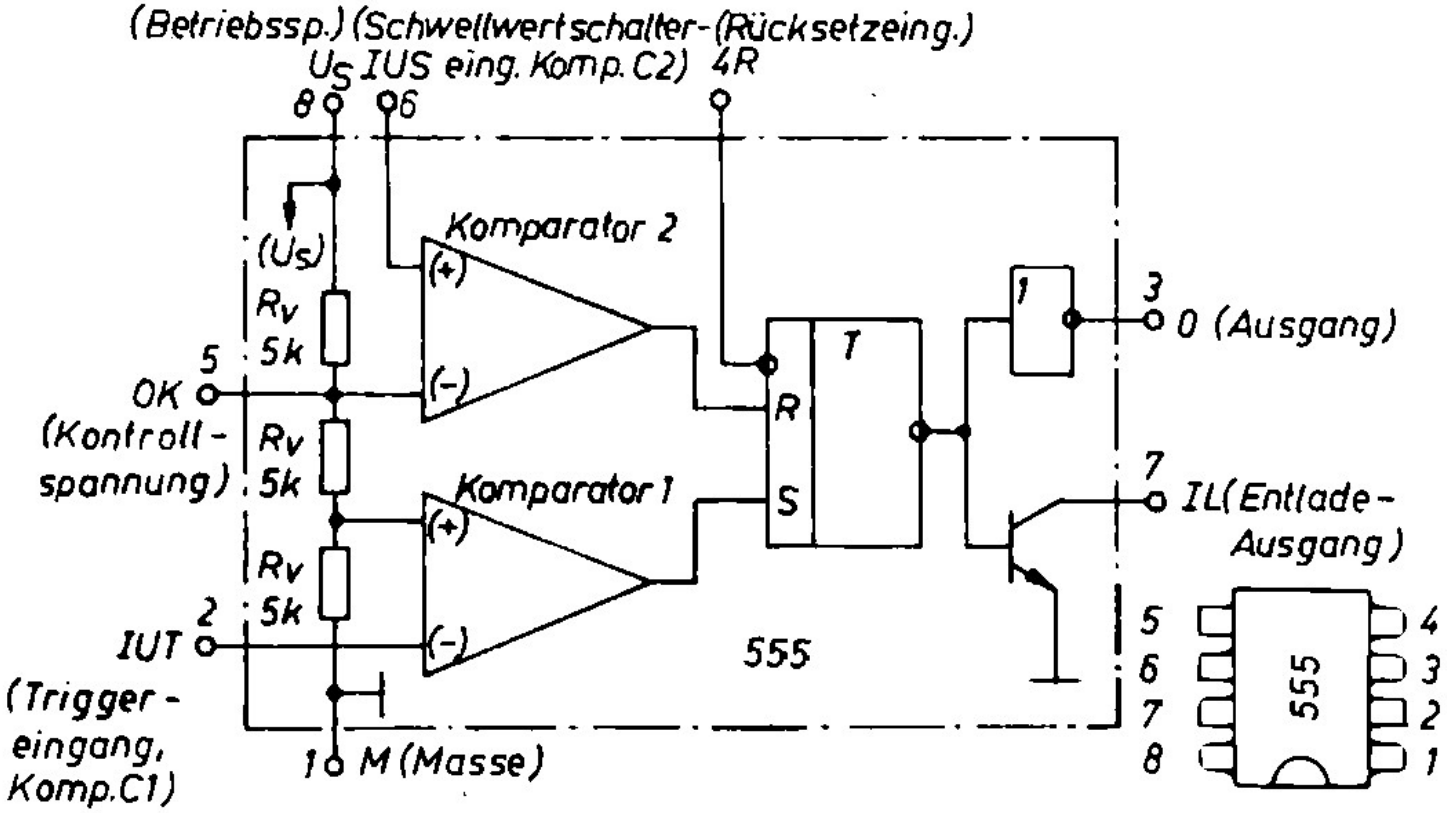


Figure 84: Innenschaltung[35]

Timer 555

Astabiler Betrieb

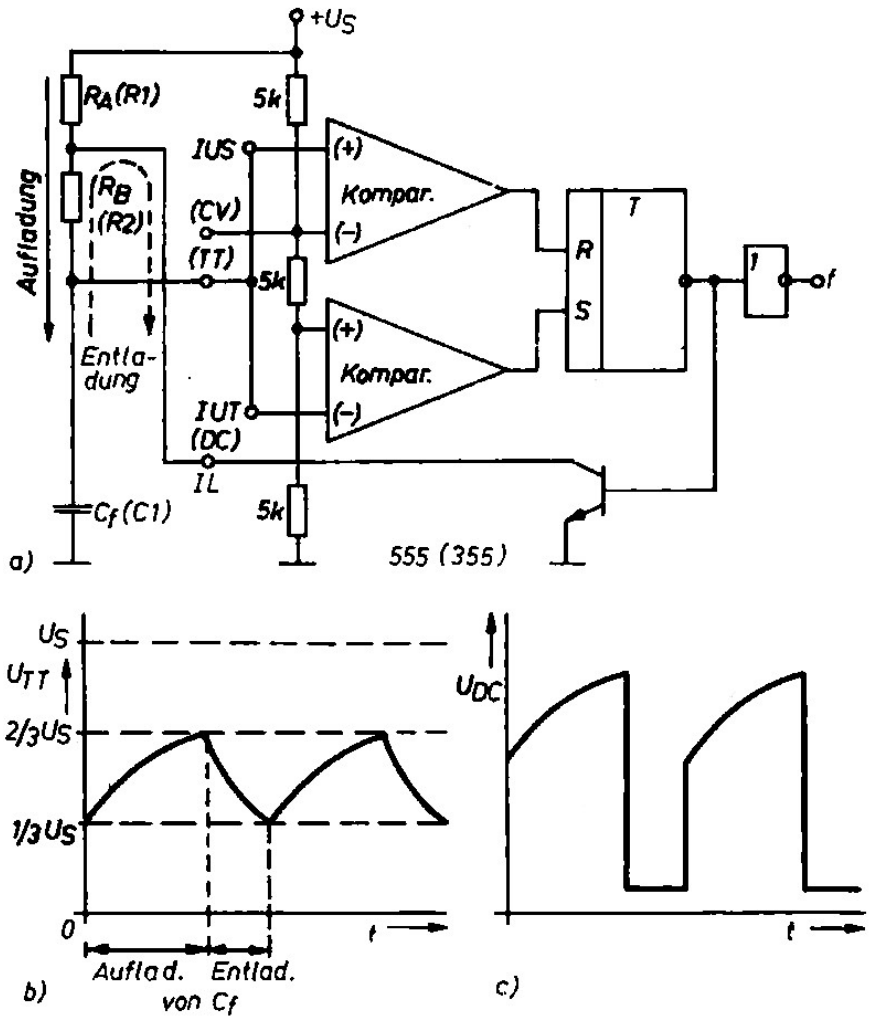
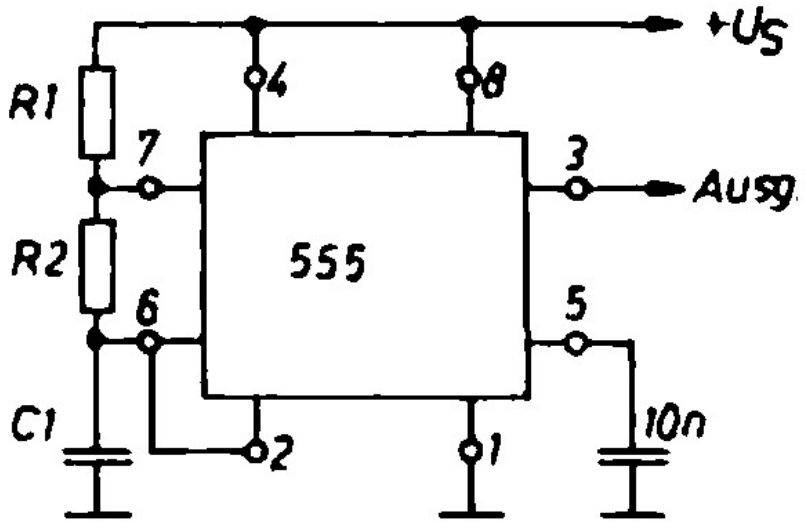


Figure 85: Astabiler Multivibrator[35]

Timer 555

Astabiler Betrieb



Ein-Zeit: $t1 = 0{,}693\,(R1 + R2)\,C1$

Aus-Zeit: $t2 = 0{,}693 \cdot R1 \cdot C1$

Periode: $T = t1 + t2$

Frequenz: $f = \frac{1}{T} = \frac{1{,}44}{(R1+2R2)C1}$

Figure 86: Astabiler Multivibrator[35]

Timer 555

Monostabiler Betrieb

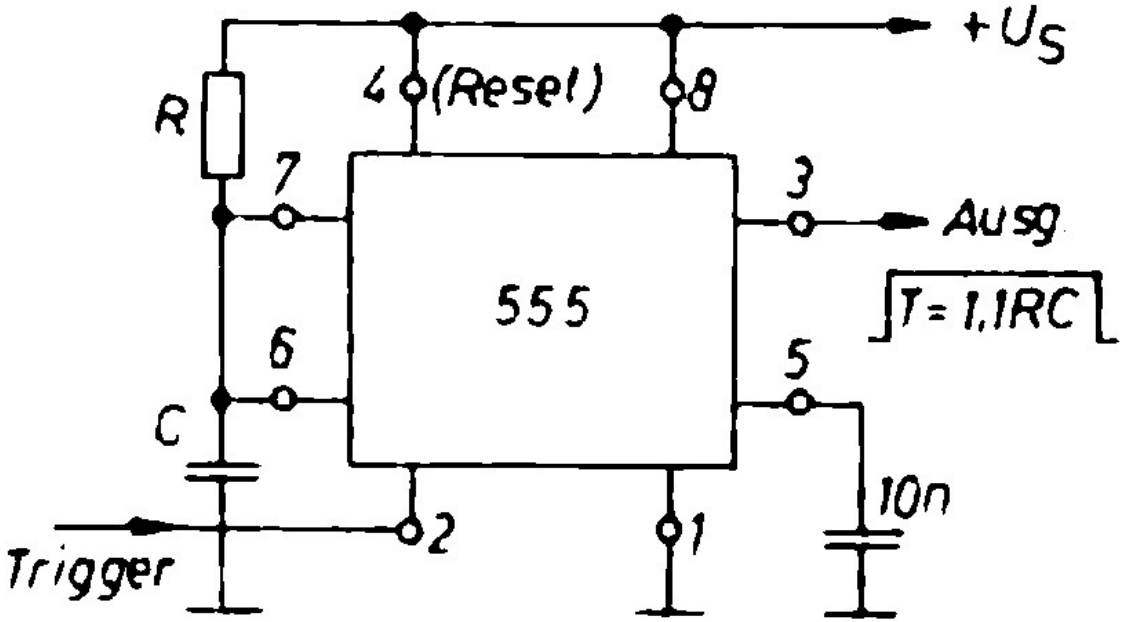


Figure 87: Monostabiler Betrieb[35]

Gemischte Schaltungen / mixed Signal

Kriterien ADC und DAC

1. Geschwindigkeit (Umsetzzeit)
2. Bereich für Eingangs/Ausgangsspannung/Strom
3. Auflösung (Zahl der Bits)
4. Lineariät
5. Abhängigkeit von Temperatur
6. Leistungsaufnahme, Betriebsspannung
7. Schnittstellen (I2C, SPI, parallel, ...)
8. Kosten

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

Blockschaltung

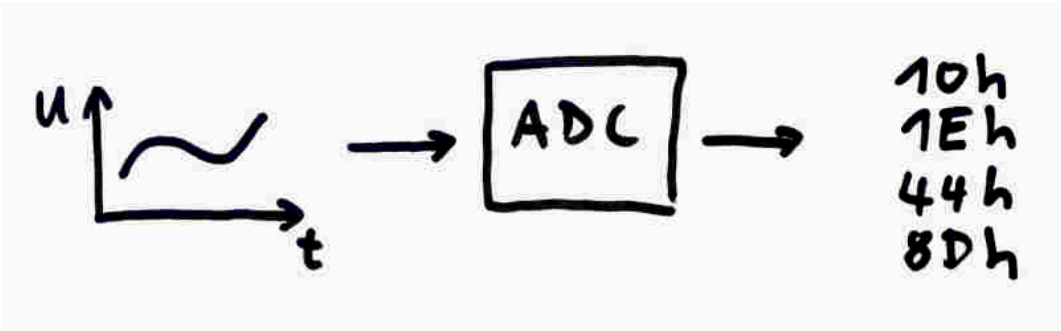


Figure 88: Prinzip

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

Verfahren der Umsetzung

1. Parallelumsetzer
2. Wägeverfahren (sukzessive Approximation)
3. Zählverfahren (serielle Wandler)

siehe [9]

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

im Mikrocontroller

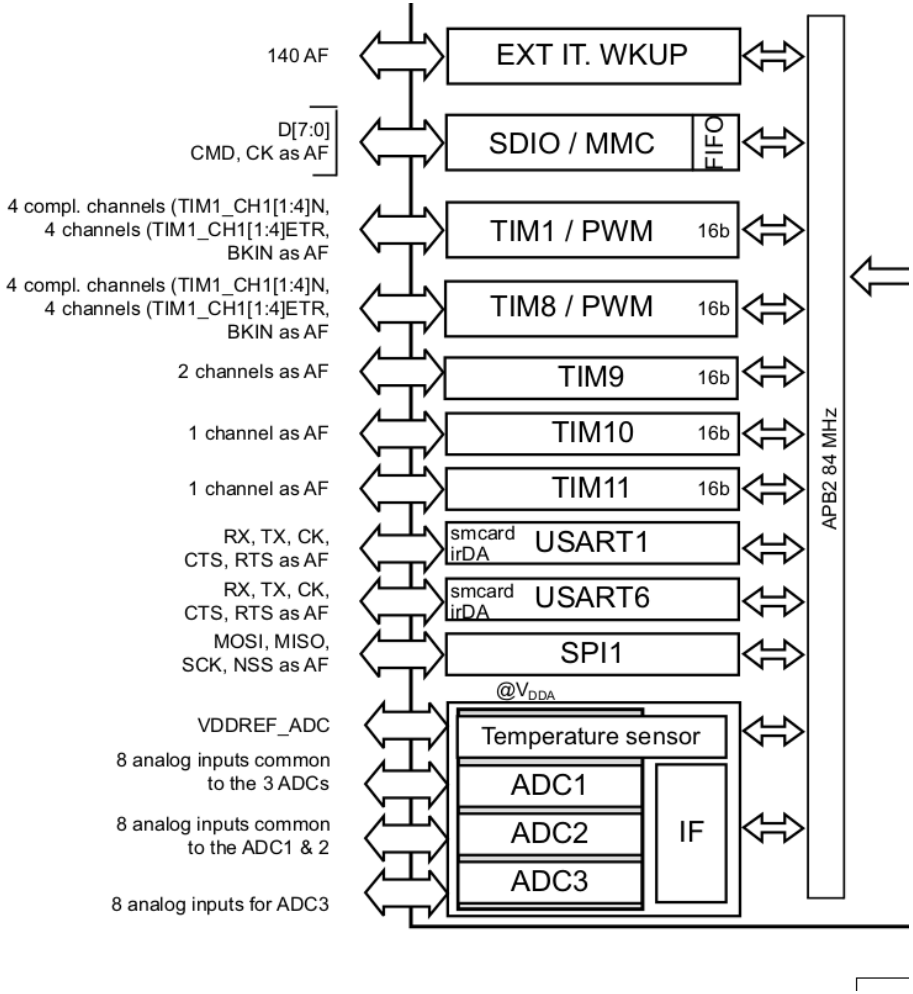


Figure 89: ADC im MCU[12]

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

Beispiel

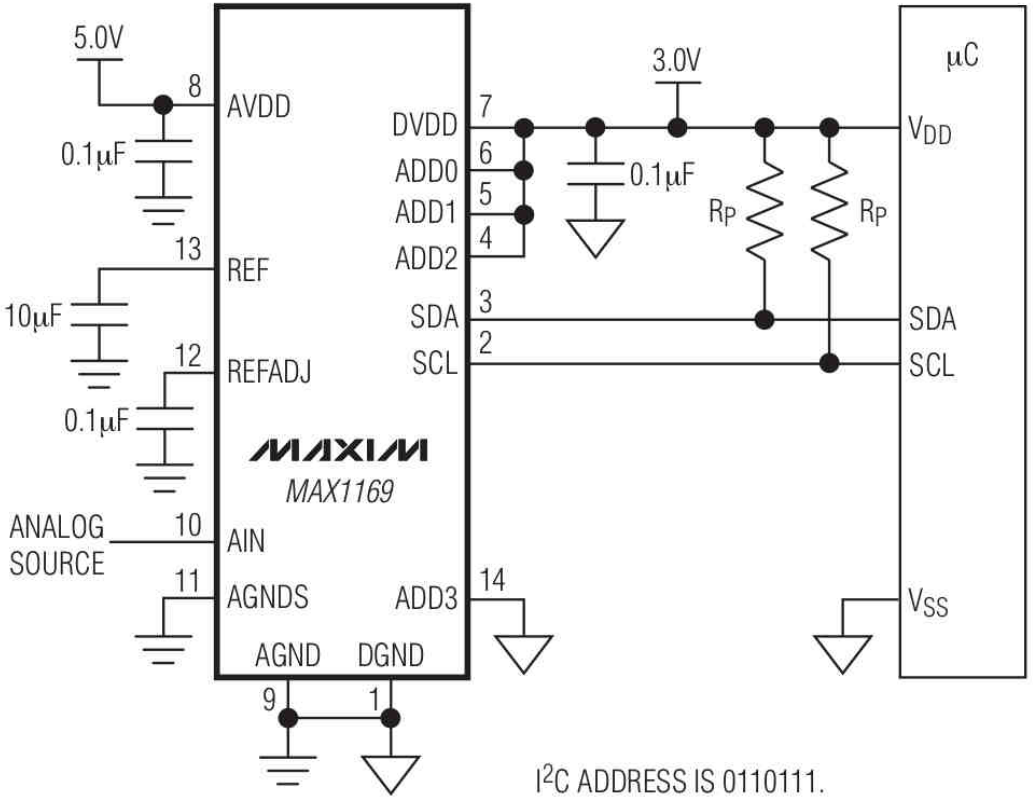


Figure 90: Quelle Datenblatt MAXIM MAX1169

AGND und DGND treffen sich an der Spannungsversorgung !

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

Analog GND und digital GND

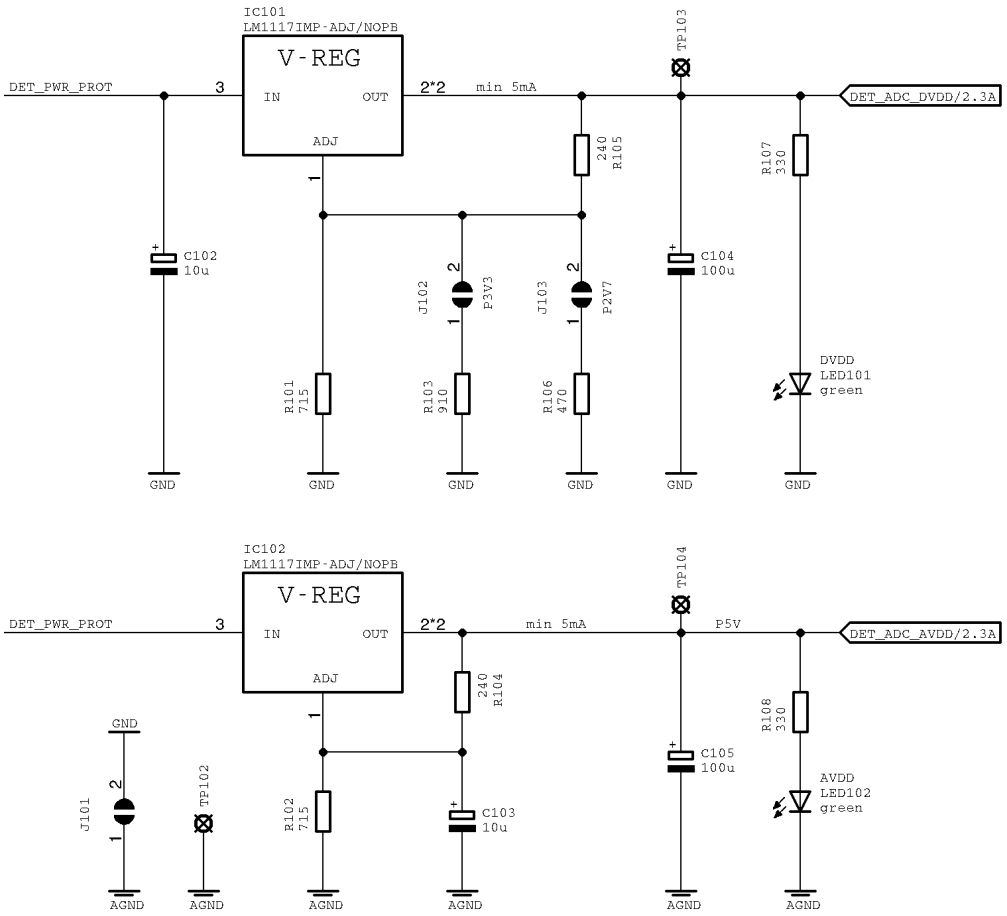


Figure 91: AGND und DGND treffen sich in Spannungsversorgung !

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

Analog Masse vs. digital Masse

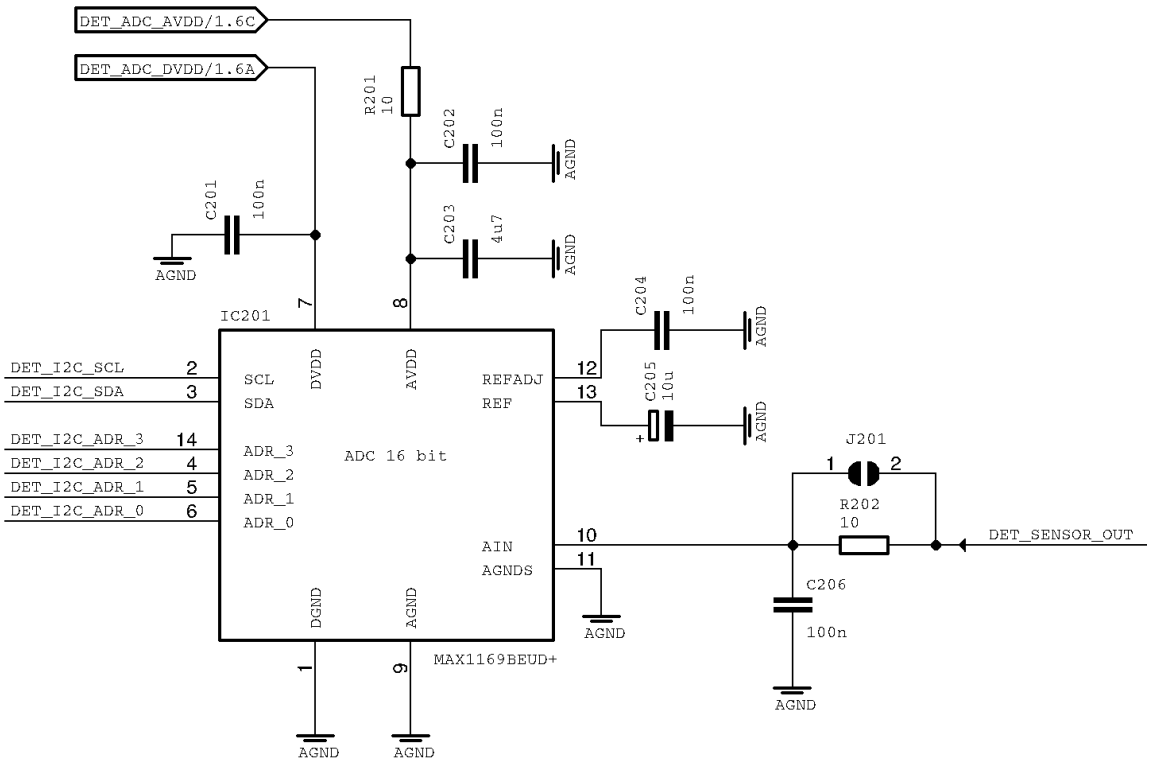


Figure 92: nur AGND verwendet

siehe [27]

Gemischte Schaltungen: Analog-Digital-Wandler (ADC)

Analog GND und digital GND

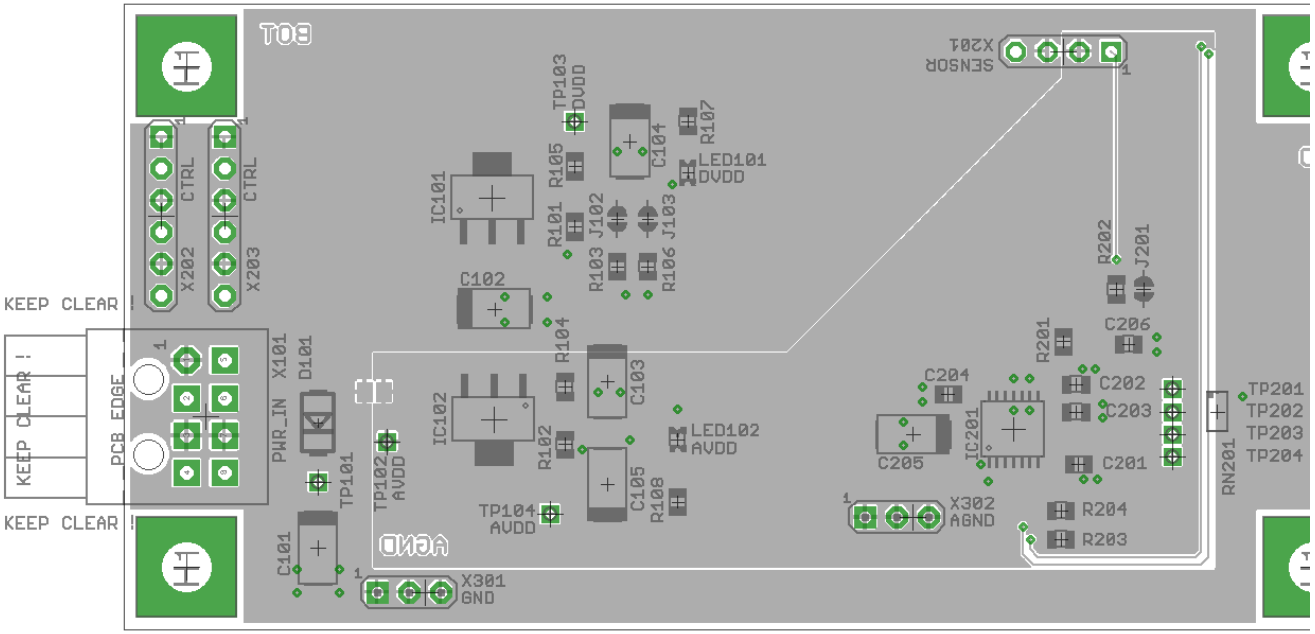


Figure 93: AGND und DGND im Layout

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

Blockschaltung

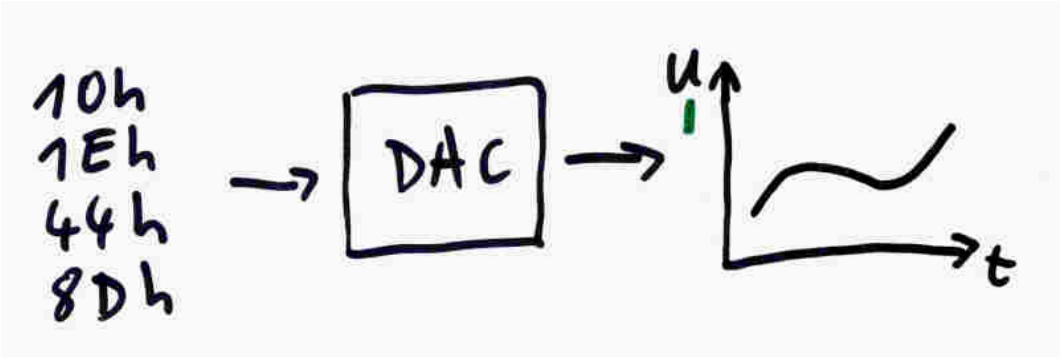


Figure 94: Prinzip

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

Verfahren der Umsetzung

1. Parallelumsetzer
2. Puls-Weite-Modulation (PWM)

siehe [9]

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

Gewichtete Widerstände

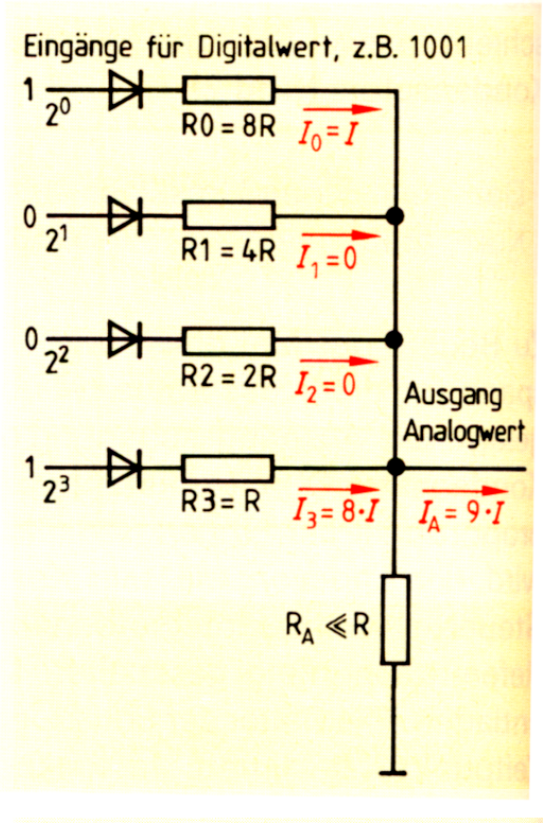


Figure 95: 4 Bit DAC[2]

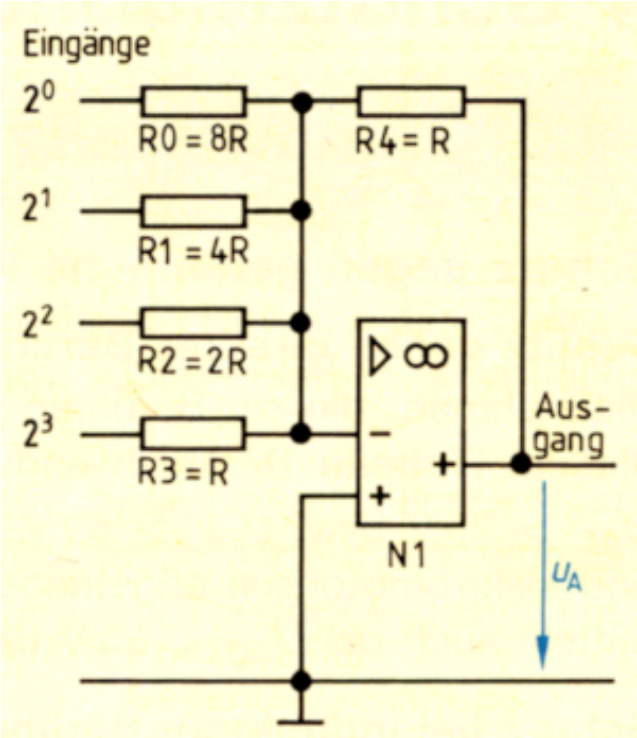


Figure 96: 4 Bit DAC[2]

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

Gewichtete Widerstände zur Steuerung eines Spannungsreglers

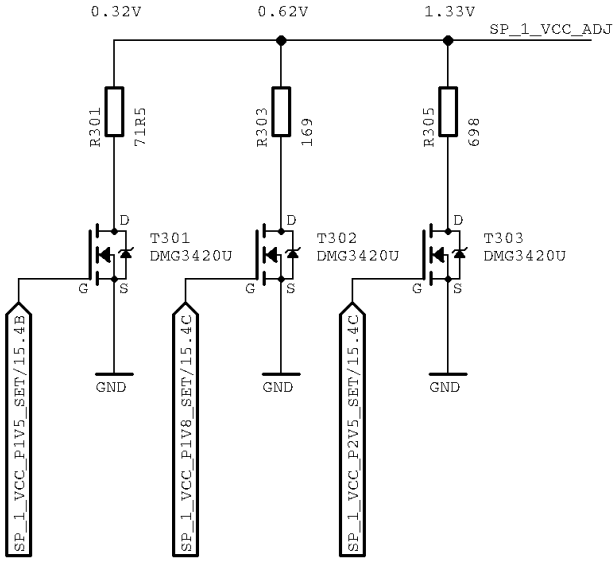


Figure 97: MOSFETs

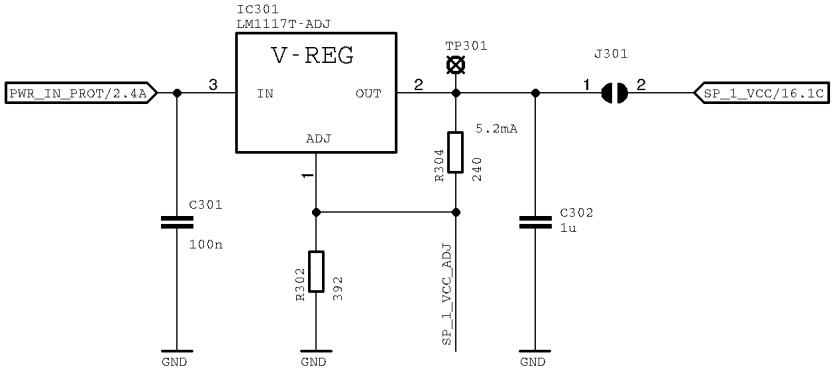


Figure 98: Spannungsregler

Zustand der Steuerleitungen im Reset, Ein-und Ausschalten beachten ! Pull-Widerstände vorsehen.

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

Beispiel

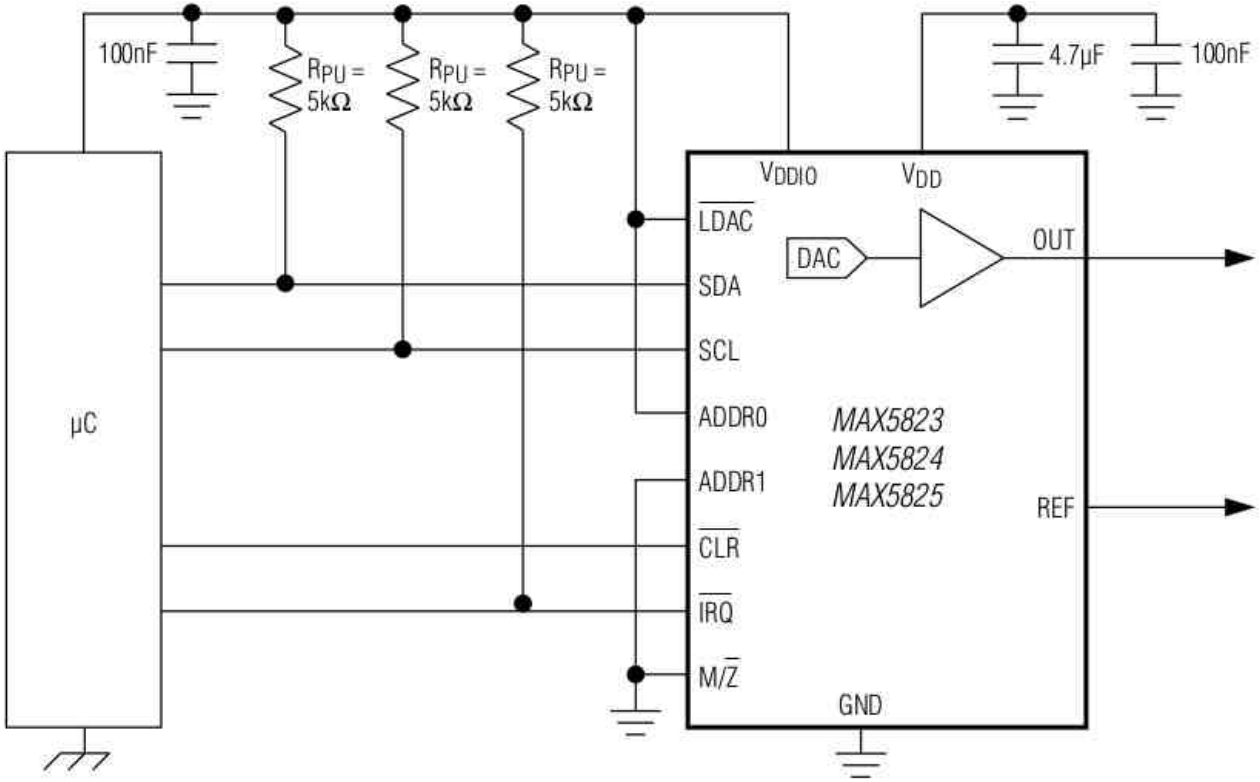


Figure 99: Quelle Datenblatt MAXIM MAX5823

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

Beispiel eines 8-fach DAC

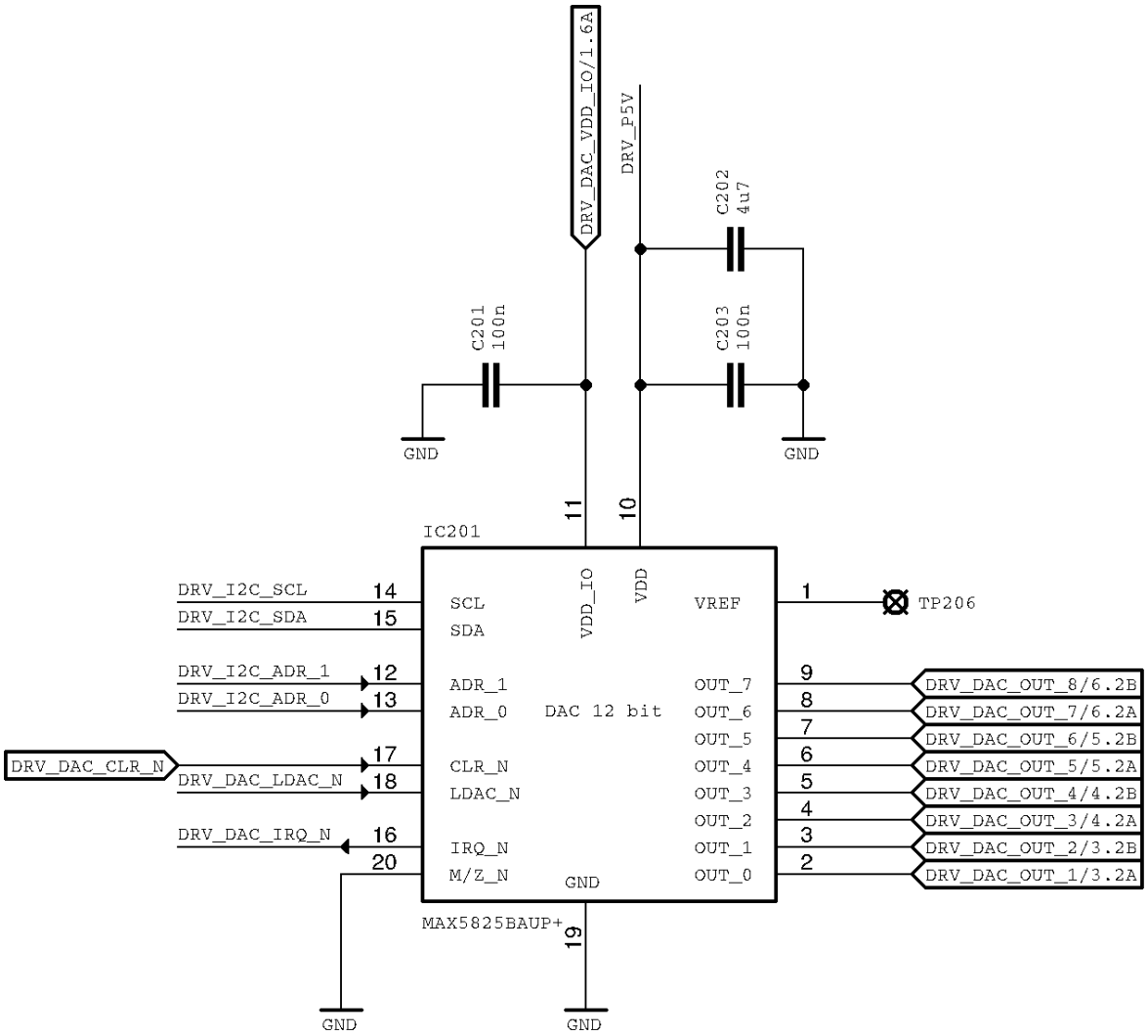


Figure 100: MAX5825

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

via Puls-Weite-Modulation (PWM)

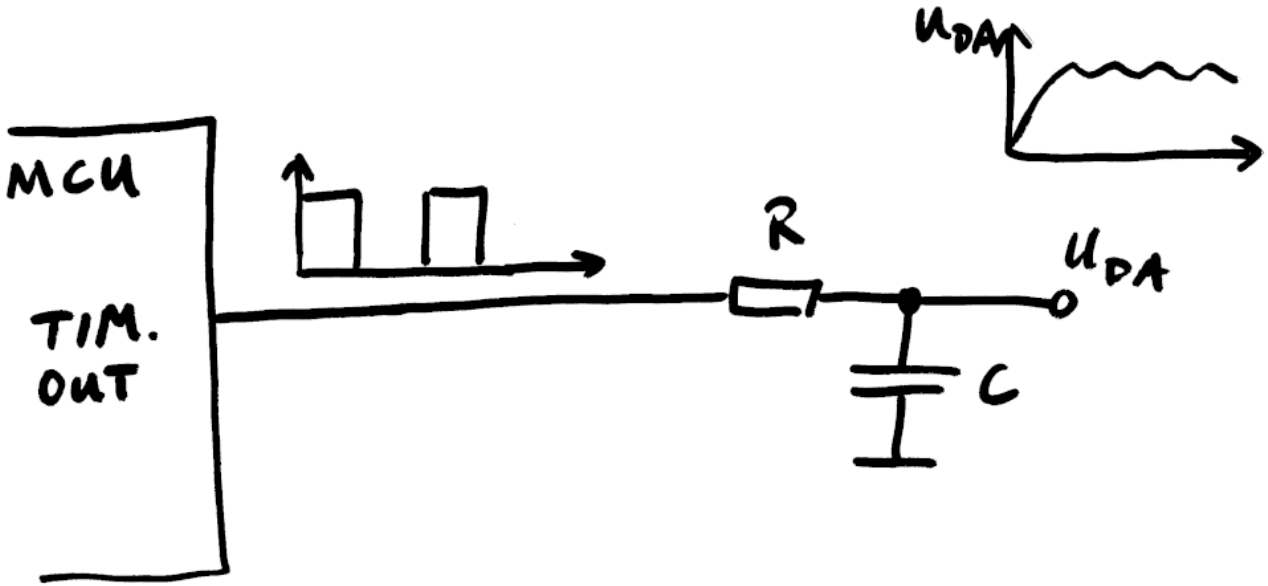


Figure 101: Glättung des PWM-Signals

$$\tau_{RC} > 10 \cdot T_{TIM} \tag{2}$$

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

PWM

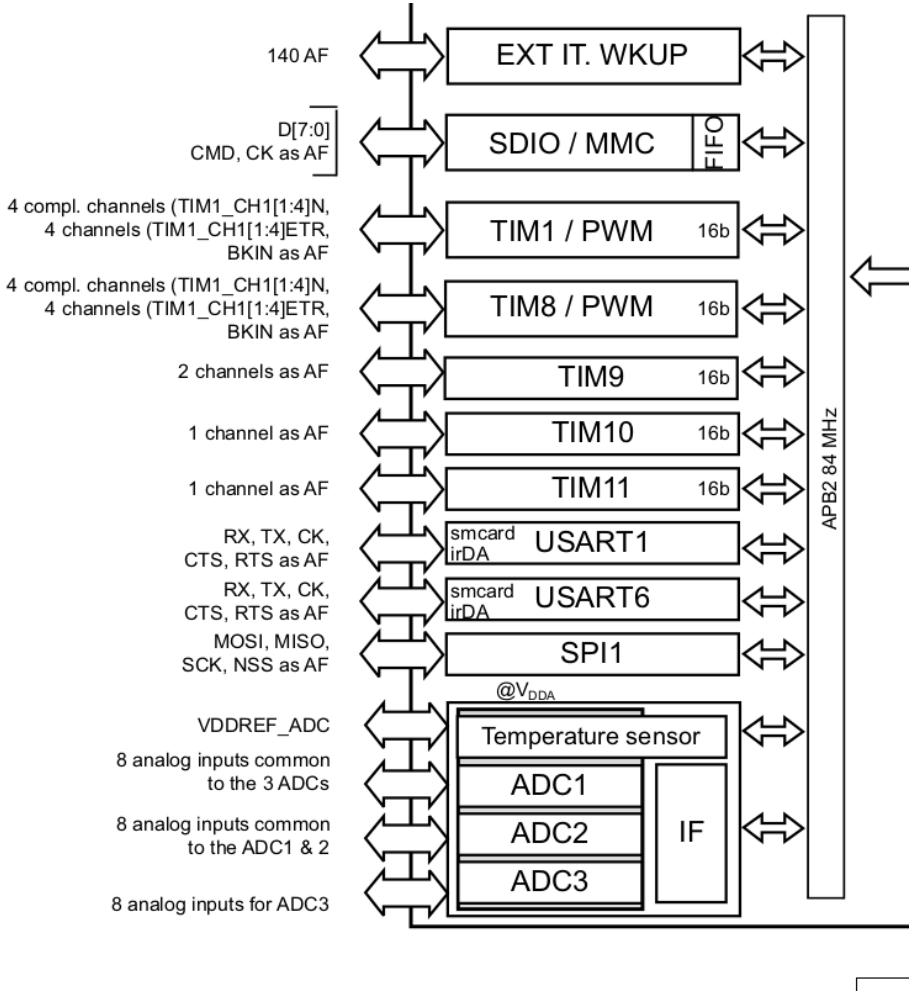


Figure 102: Timer im MCU[12]

Gemischte Schaltungen: Digital-Analog-Wandler (DAC)

PWM

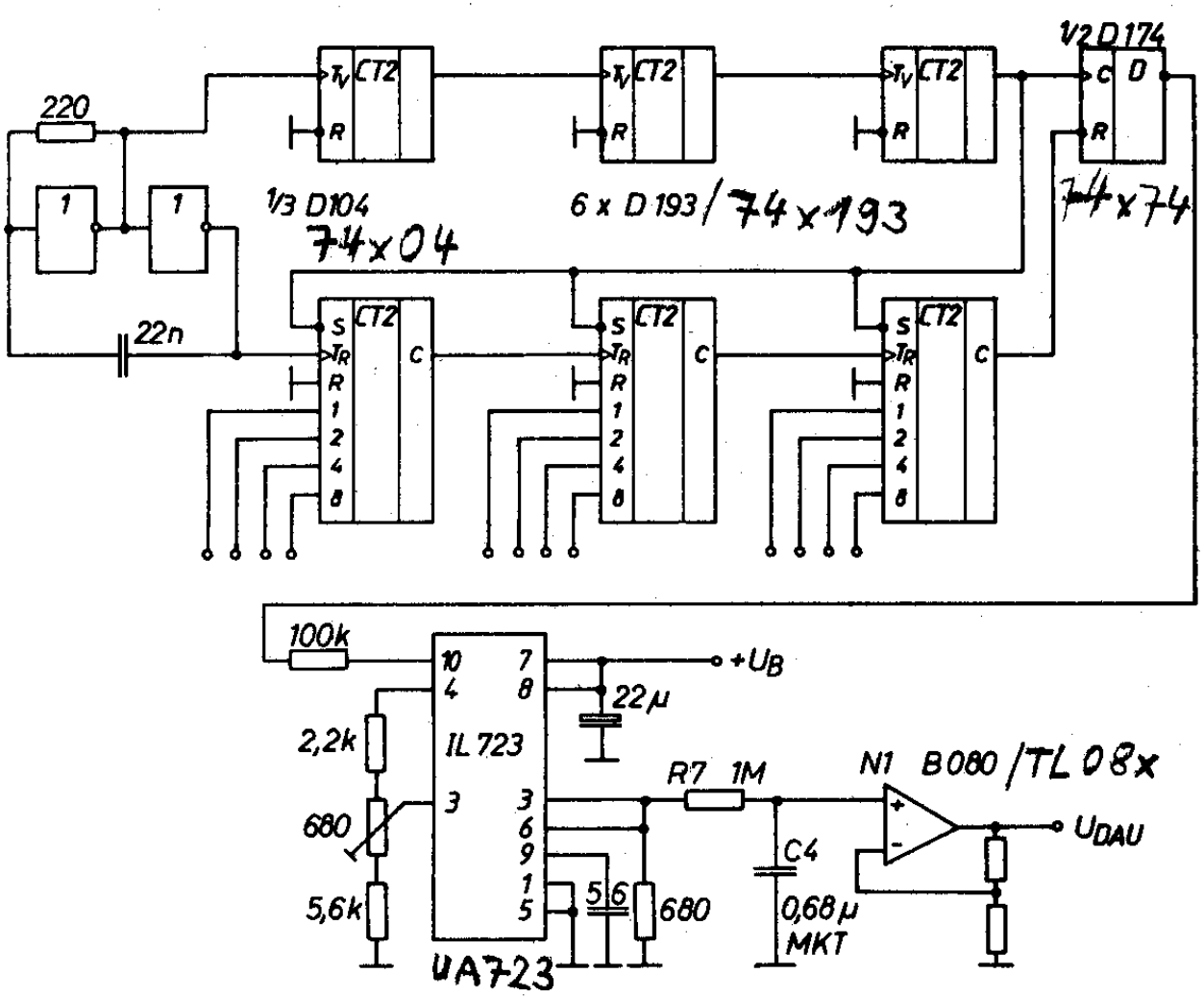


Figure 103: 12 Bit DAC mit diskreter Logik[15]

Gemischte Schaltungen: Signalsynthese

Direkte Signalsynthese (DSS)

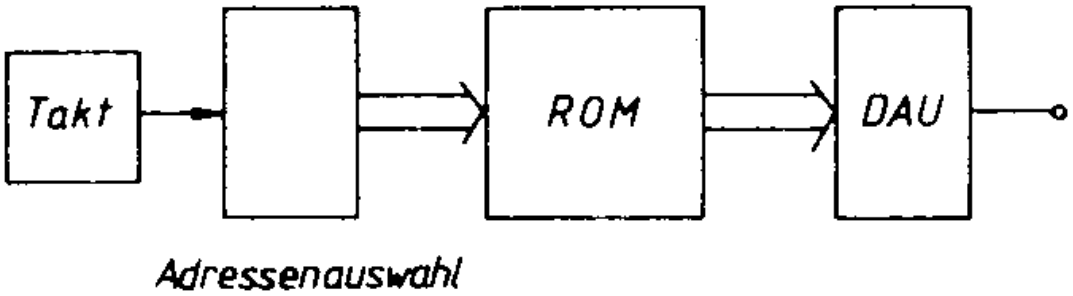


Figure 104: Prinzip eines ROM-basierten Funktionsgenerators[22]

1. beliebige Signalform bis in GHz-Bereich erzeugbar
2. Ausgangsfrequenz sehr stabil und fein abstimmbar
3. Ausgangsfrequenz per MCU oder CPU steuerbar

Digitale Schaltungen

1. Diskrete Logik (Gatter, Zähler, Multiplexer)
2. Schaltkreisfamilen (TTL, LVTTL, CMOS, ECL, ...)
3. Programmierbare Logik (CPLD, FPGA)
4. Speicher
5. Mikrocontroller (MCU), CPU, DSP
6. Anzeigeelemente (LED, Displays)
7. Datenübertragung (Signalintegrität, EMV)

Digitale Schaltungen

Logikelemente und Symbole

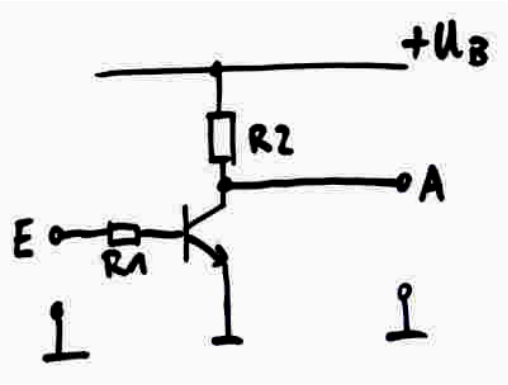


Figure 105: Negation

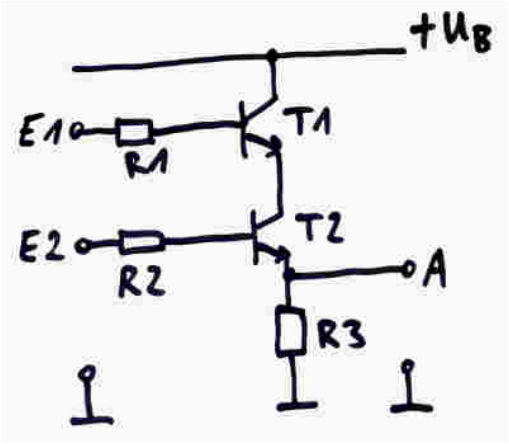


Figure 106: UND

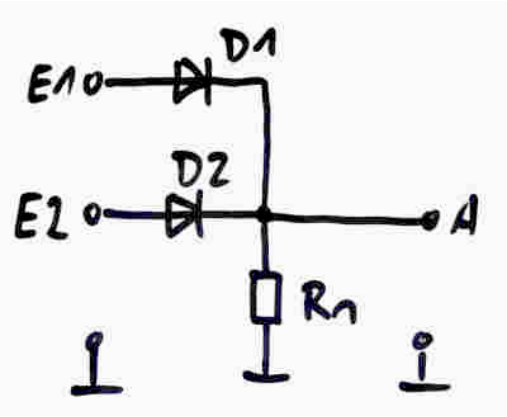


Figure 107: ODER

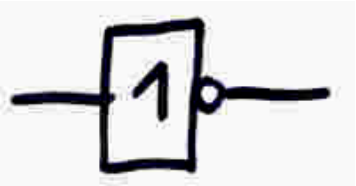


Figure 108: Negation

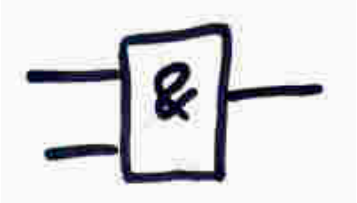


Figure 109: UND

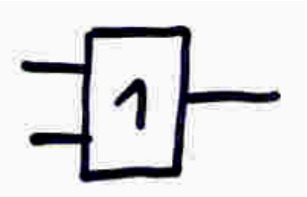


Figure 110: ODER

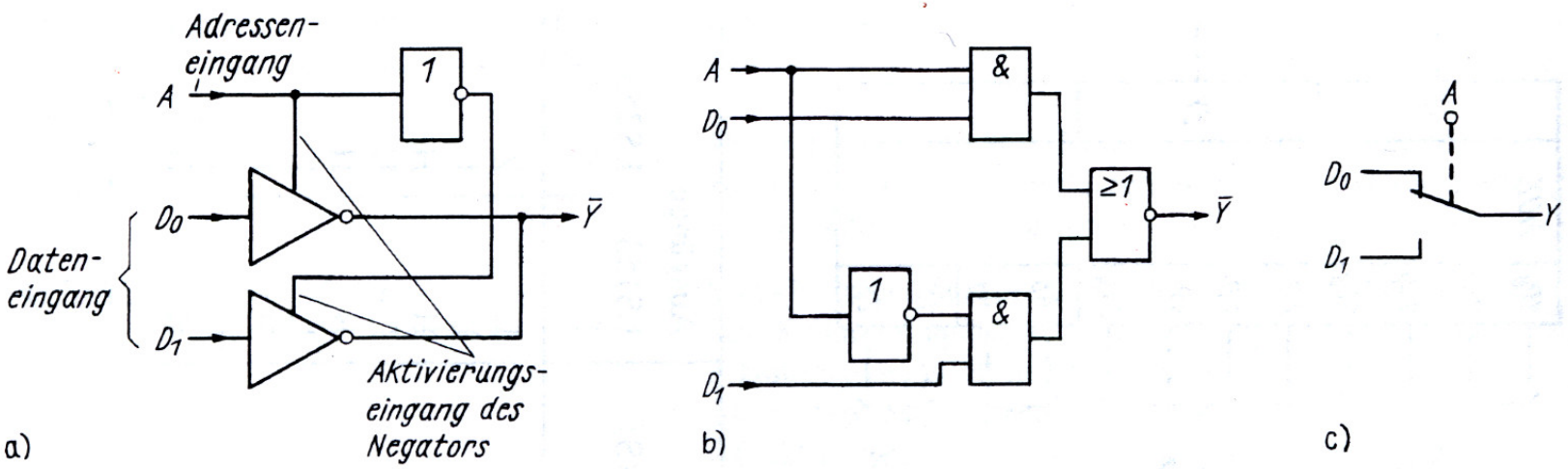


Bild 6.9 Umschalter

a) mit Dreizustands-Invertern; b) mit Gattern ohne Dreizustands-Eigenschaften; c) äquivalenter mechanischer Umschalter

Figure 111: Multiplexer mit Einzel-Gattern[8]

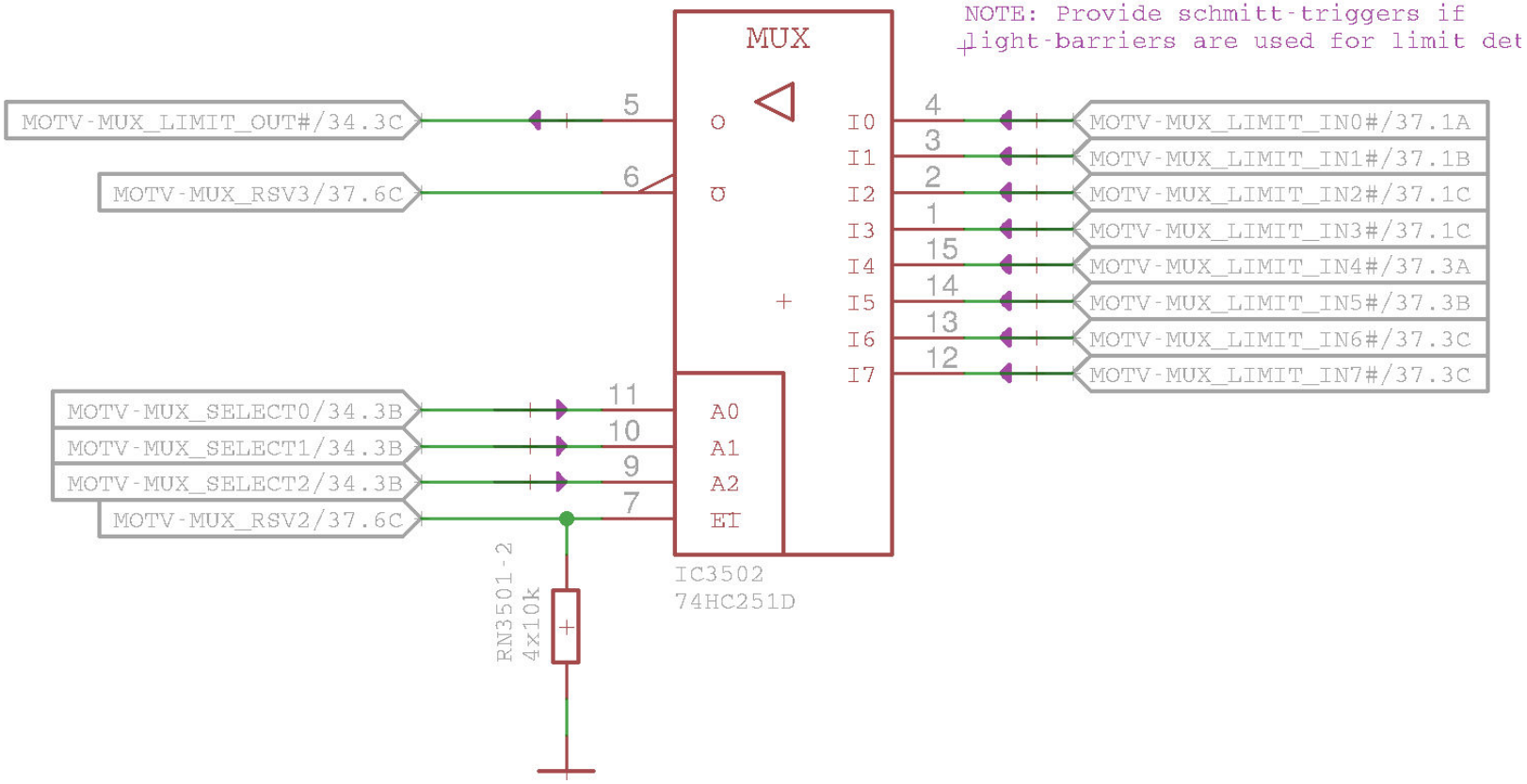


Figure 112: Beispiel

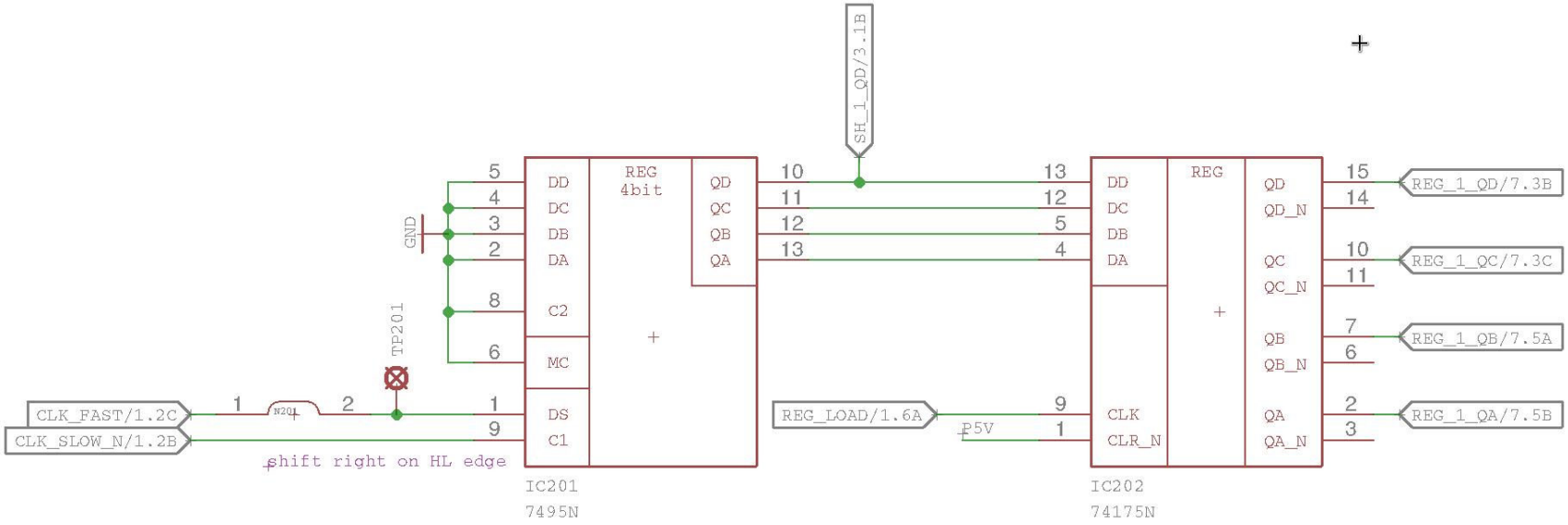
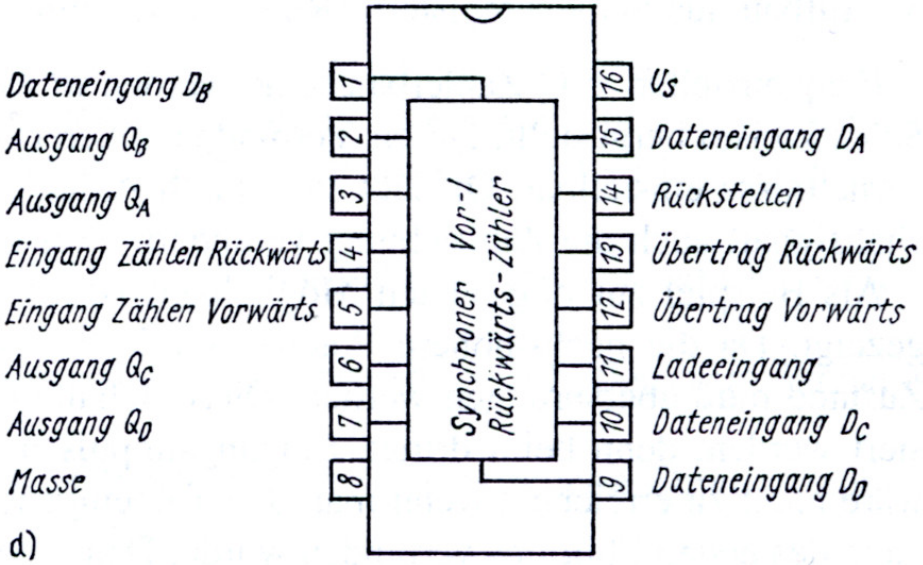


Figure 113: Schieberegister und Parallelregister

	Q_D	Q_C	Q_B	Q_A
0	L	L	L	L
1	L	L	L	H
2	L	L	H	L
3	L	L	H	H
4	L	H	L	L
5	L	H	L	H
6	L	H	H	L
7	L	H	H	H
8	H	L	L	L
9	H	L	L	H
10	H	L	H	L
11	H	L	H	H
12	H	H	L	L
13	H	H	L	H
14	H	H	H	L
15	H	H	H	H
0	L	L	L	L

c)



d)

Figure 114: Binär-Tabelle 4-Bit-Zähler[8]

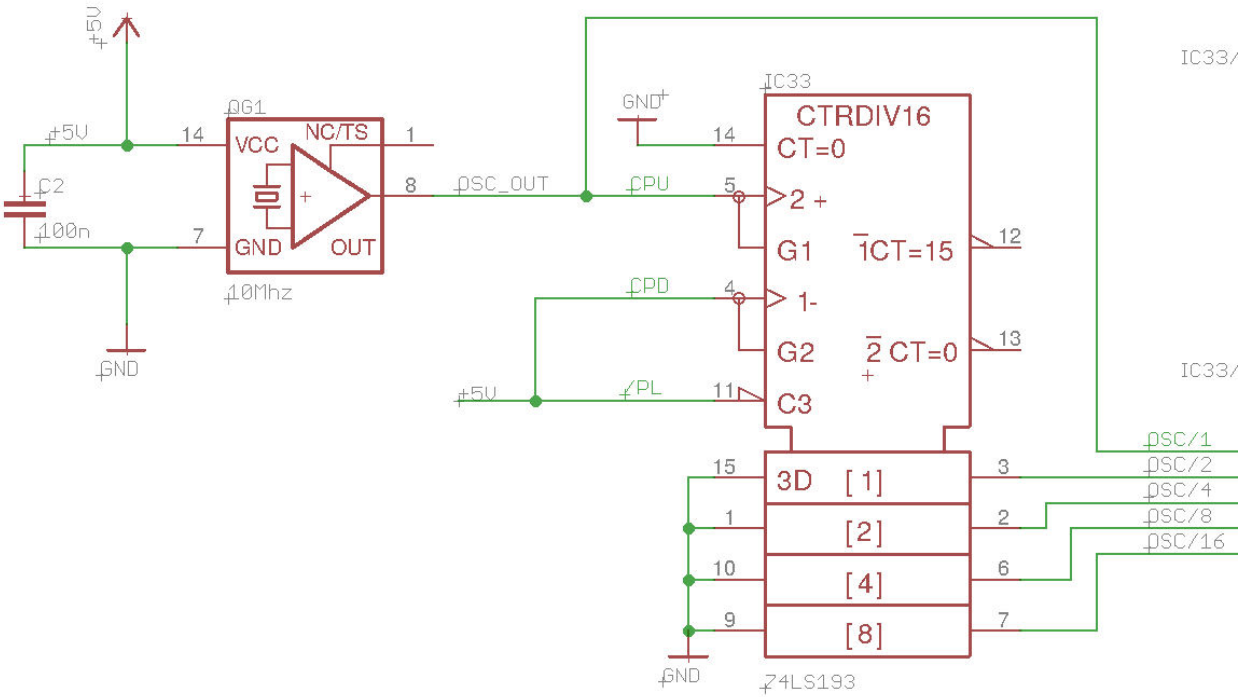


Figure 115: Frequenzteiler

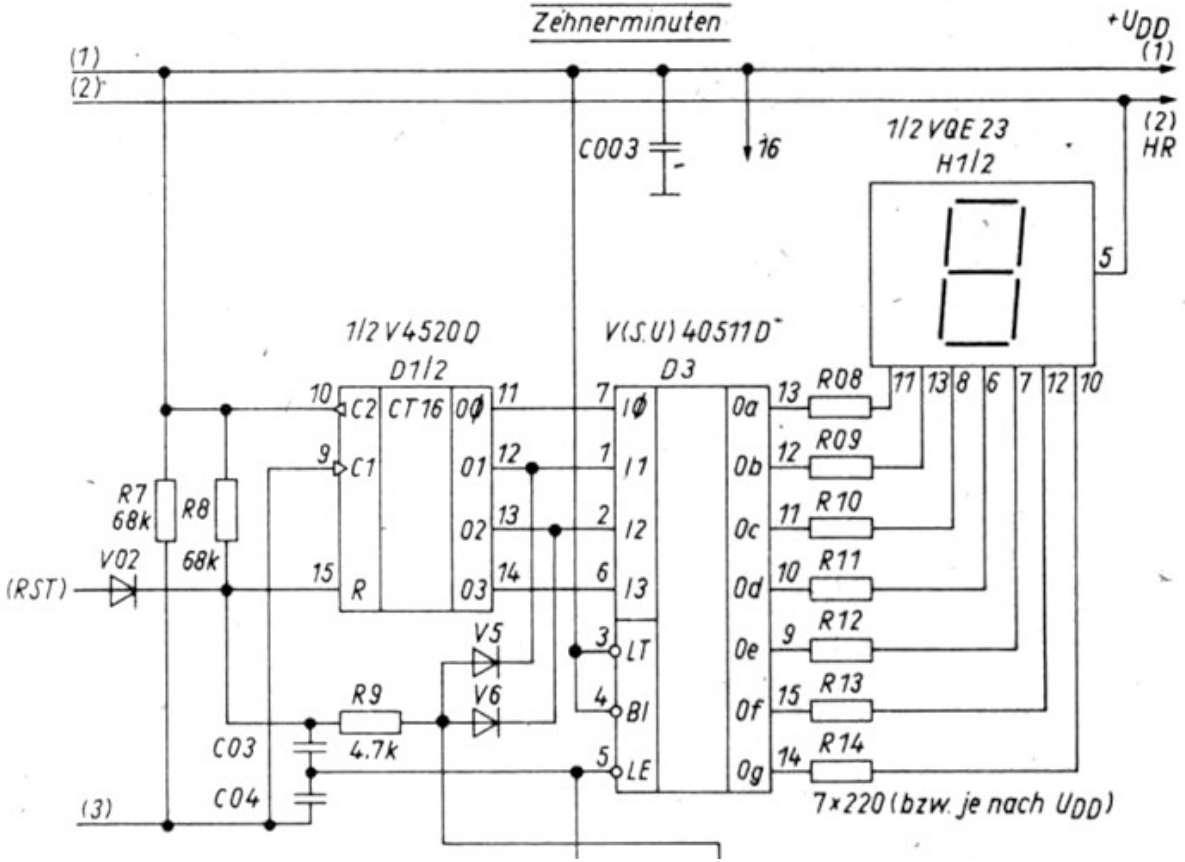


Figure 116: Ansteuerung 7-Segment-Anzeige[36]

Digitale Schaltungen

Schaltkreisfamilen: TTL, LVTTL, CMOS, ECL, ...

1. Betriebsspannung
2. Stromaufnahme / Leistungsaufnahme
3. Spannungen für H/L Pegel
4. Schaltgeschwindigkeit

Schaltkreisfamilen

Schaltkreisfamilen: H/L-Pegel

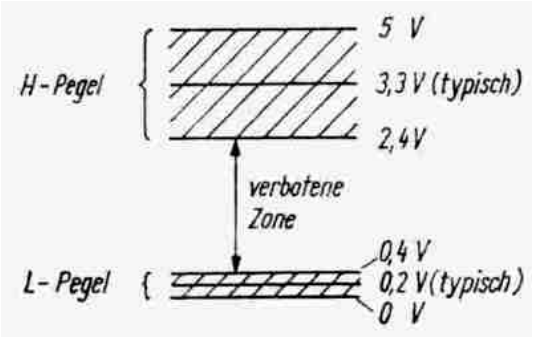


Figure 117: Pegel TTL [8]

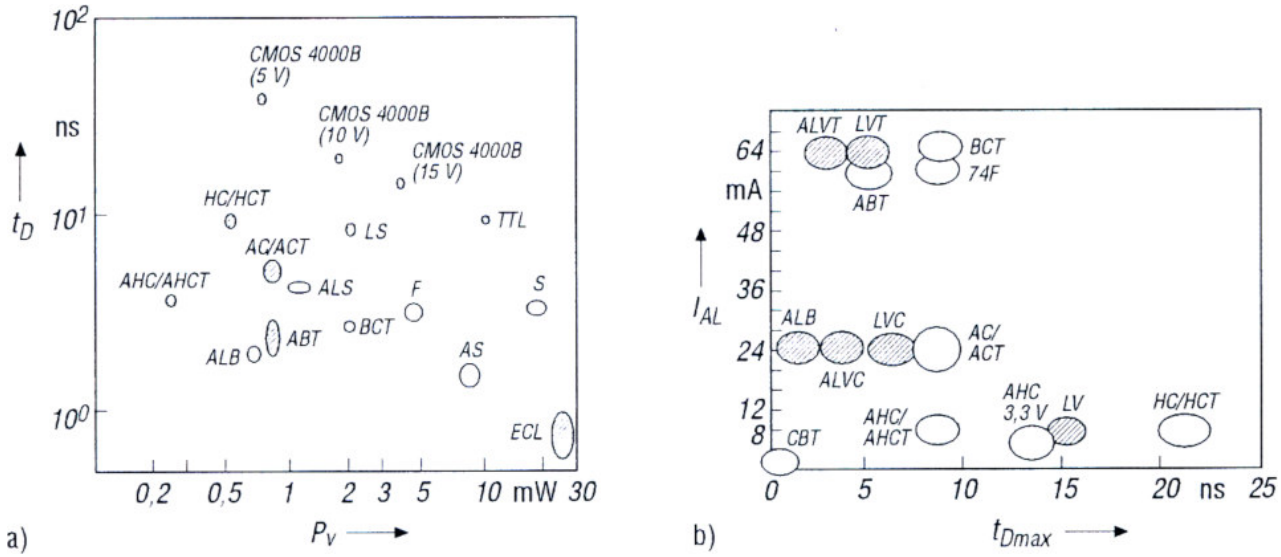


Figure 118: Leistungsaufnahme, Schaltzeiten, Ausgangsstrom [8]

Programmierbare Logik

Logiksynthese: Konzept

1. Problem 1 der diskreten Logik: Änderungen kaum/nicht möglich !
2. Problem 2 der diskreten Logik: Simulation aufwändig !
3. Lösung: programmierbare Universal-ICs !!
4. HW wird am Rechner mittels "Programmiersprache" (HDL) modelliert
5. Nachteil 1: SW und Programmier-Equipment nötig
6. Nachteil 2: Einarbeitung, Schulung nötig
7. Nachteil 3: Bindung an Hersteller

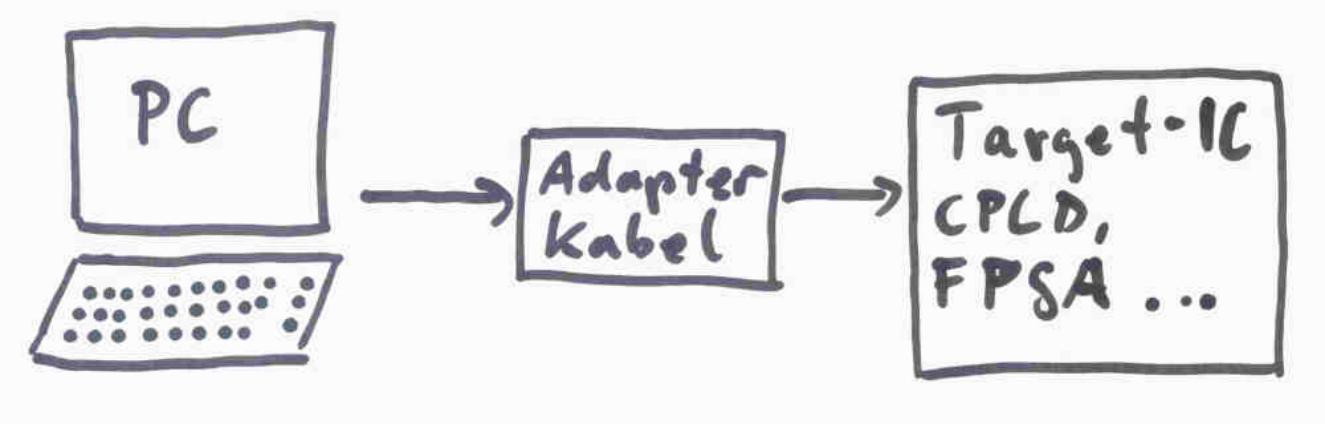


Figure 119: System

Programmierbare Logik

Sprachen: VHDL, Verilog, ...

```
library IEEE;
use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;

entity and_or_top is
    Port ( INA1 : in  STD_LOGIC;     -- AND gate input
           INA2 : in  STD_LOGIC;     -- AND gate input
           OA   : out STD_LOGIC;     -- AND gate output
end and_or_top;

architecture Behavioral of and_or_top is
begin
    OA <= INA1 and INA2;     -- 2 input AND gate
end Behavioral;
```

Figure 120: VHDL Beispiel [17]

```
/* A simple AND gate
File: and.v                    */

module andgate (a, b, y);
input a, b;
output y;

assign y = a & b;

endmodule
```

Figure 121: Verilog Beispiel [18]

Programmierbare Logik

CPLD, FPGA, ...

1. Der zu programierende IC wird als Target (Ziel) bezeichnet.
2. CPLD: Complex Programmable Logic Device
3. FPGA: Field Programmable Grid Array
4. SoC: System On Chip
5. IP Cores

Programmierbare Logik

Beispiel: Beschaltung eines FPGA

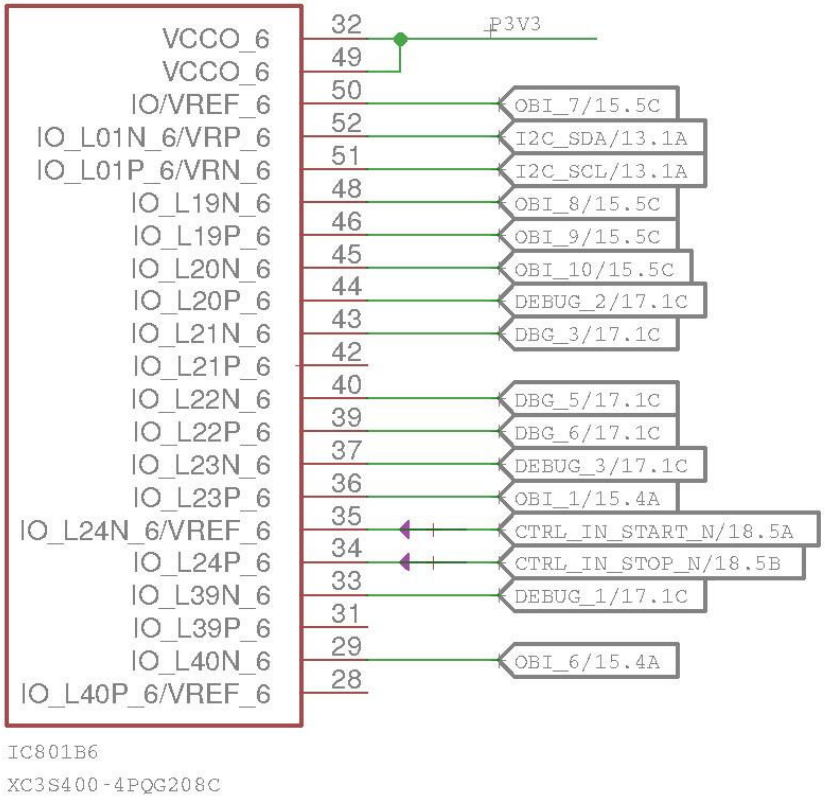


Figure 122: FPGA-seitig

Das Innenleben, die innere Logik, ist nicht erkennbar ! Nur der VHDL- oder Verilog-Code gibt über die Funktionen Aufschluß !

Programmierbare Logik

Beispiel: Beschaltung eines FPGA

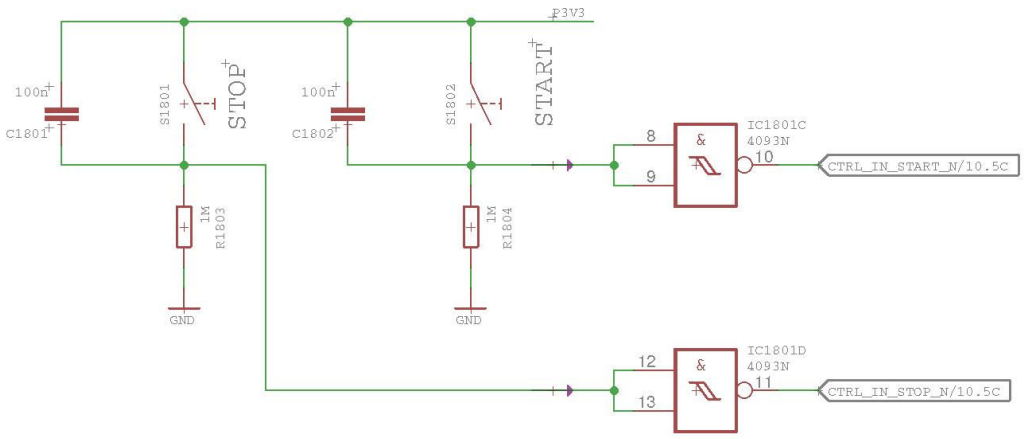


Figure 123: Peripherie für Tastenentprellung

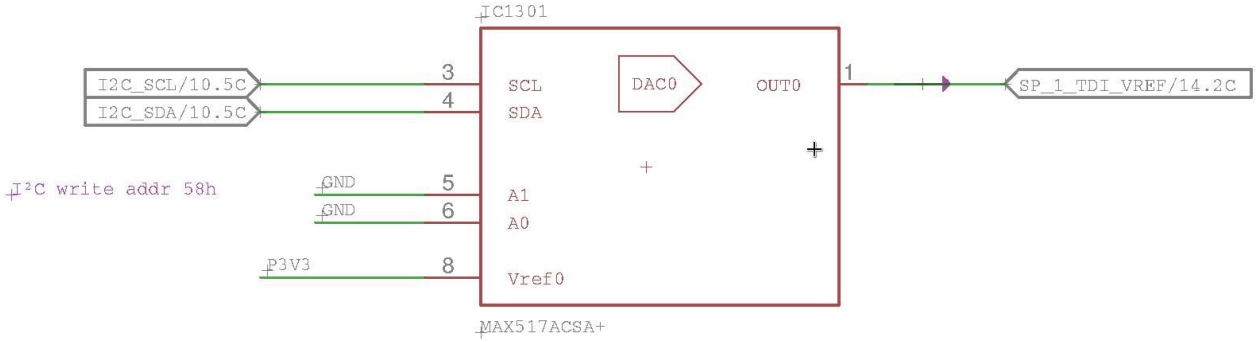


Figure 124: DA-Wandler in Peripherie

Programmierbare Logik

Beispiel: Beschaltung eines FPGA

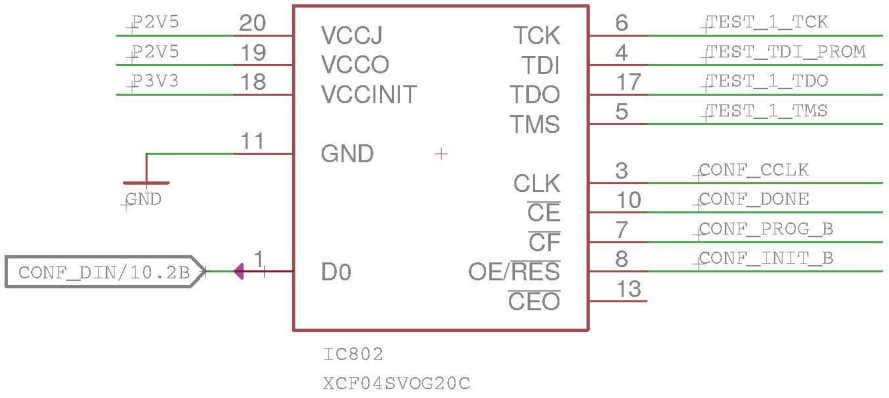


Figure 125: Anschlüsse für Programmierung und Test / Boundary Scan

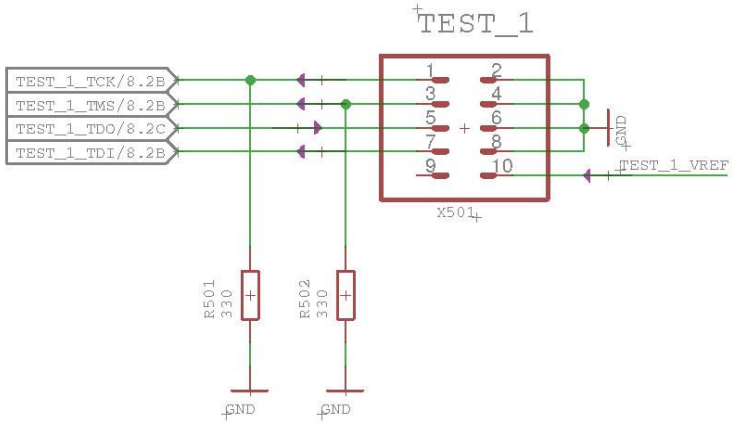


Figure 126: Anschlüsse für Programmierung und Test / Boundary Scan

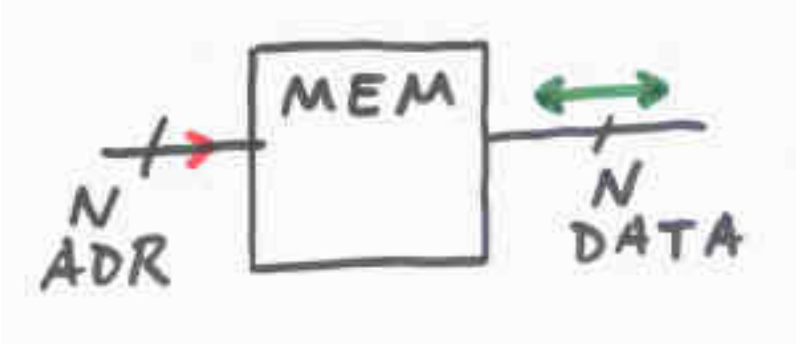


Figure 127: Beispiel

1. Programmcode, Prozessdaten, Anwenderdaten
2. 1024 x 1 Bit, 512k x 16 Bit, ...
3. Adresse A[15:0], Daten D[7:0] $\rightarrow$ 64k x 8 Bit
4. Speicherbänke werden via MMU (Memory Managment Unit) adressiert.

Speicher

Organisation Speicheradressen

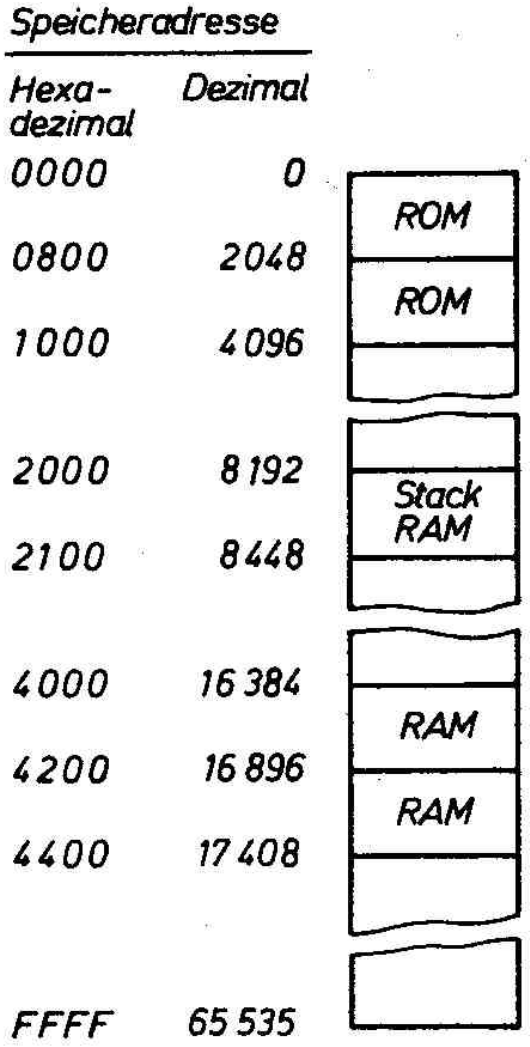


Figure 128: Beispiel [21]

Speicher

Organisation Speicherbank

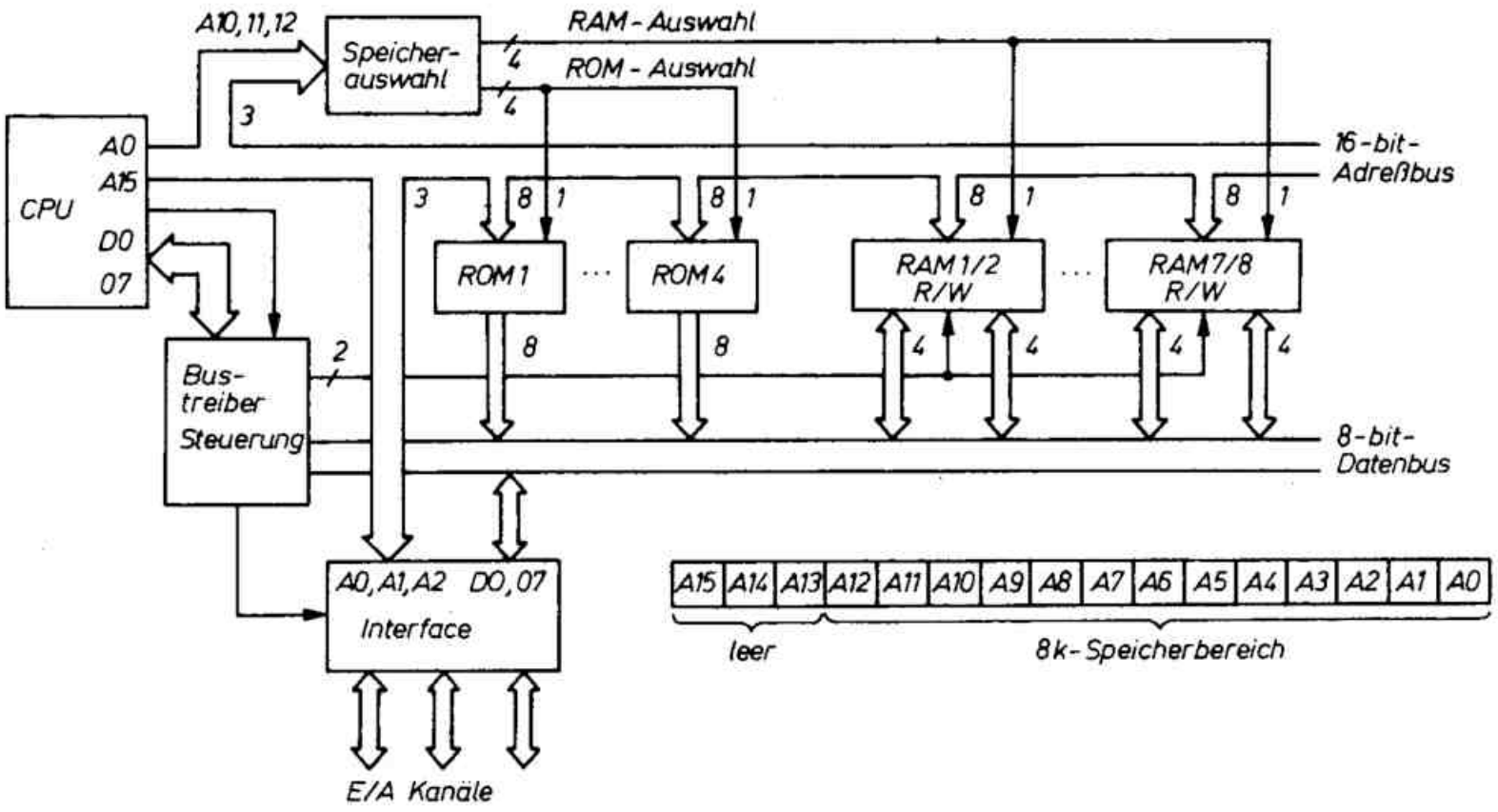


Figure 129: Beispiel [21]

Speicher

Flüchtige: RAM, SRAM, SDRAM, DDRRAM, ...

1. Technologie statisch: Information wird per Flip-Flop gehalten
2. Technologie dynamisch: Information wird in Kondensatoren gehalten
3. SDRAM, DDRRAM: Datentransfer synchron zu Taktsignal (CLK)
4. evtl. anspruchsvolles PCB-Layout (SI, Laufzeiten, Leitungslängen, ...)
5. asyncron: via Ports WE und OE
6. synchron: zu CLOCK Signal (positive, negative oder beide Flanken)
7. ggf. aufwändiger Controller nötig

Speicher

Beispiel SDRAM

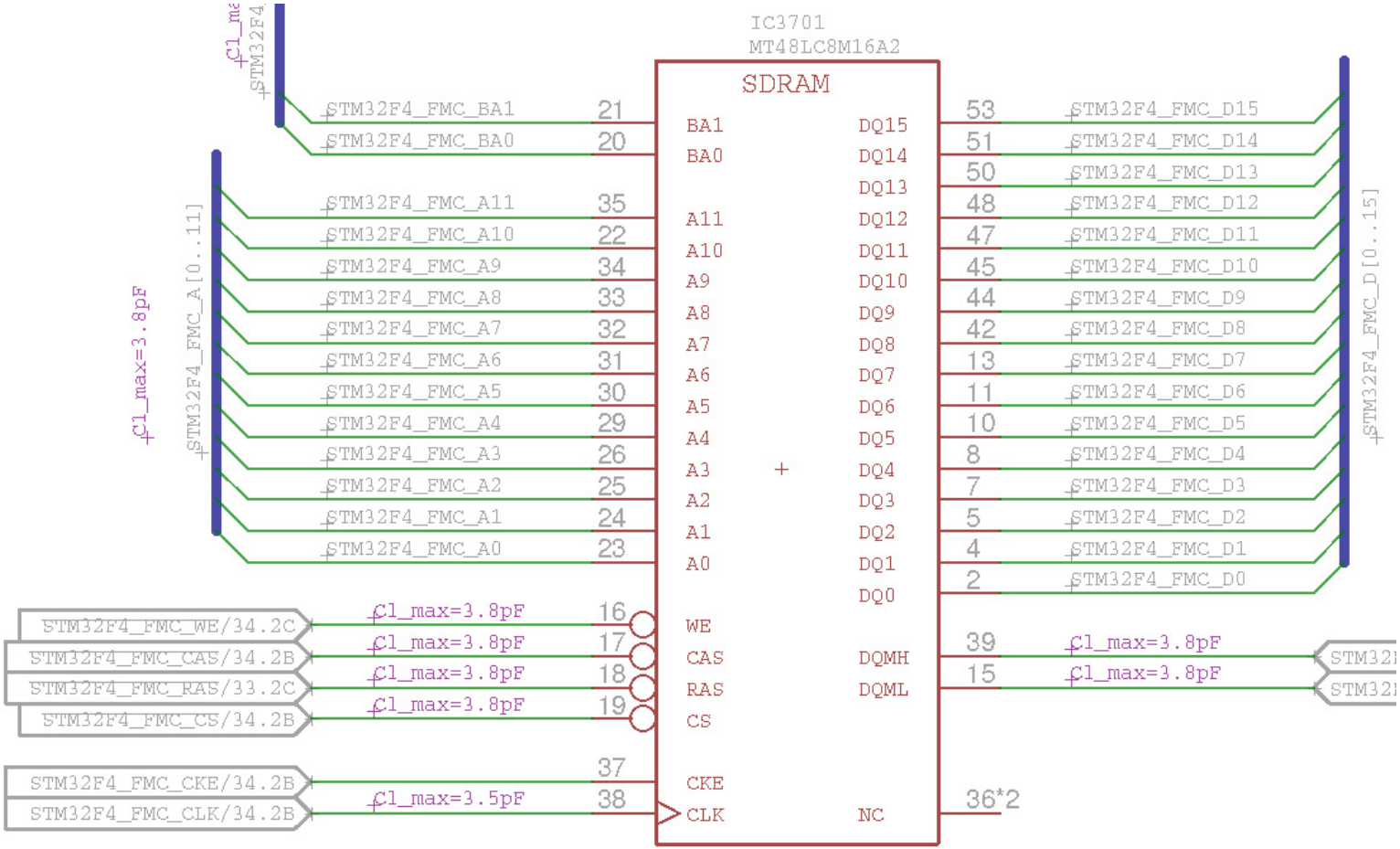


Figure 130: Beispiel Ansteuerung SDRAM

Speicher

Nicht-flüchtige: ROM, OTP, EPROM, FLASH, ...

1. Technologieen: Fuse, Antifuse, ...
2. ggf. Programmier-Equipment nötig
3. Daten über Jahrzehnte stabil (Gewährleistung ?!)

Prozessoren

Das Konzept

1. Problem der diskreten Logik: Änderungen kaum/nicht möglich !
2. Lösung: CPU (Central Proessing Unit) !!
3. Programmablauf wird per Programmiersprache festgelegt
4. Compiler/Assembler übersetzt in Maschinencode
5. Maschinencode wird in Speicher geladen und vom Prozessor ausgeführt
6. Adaption an verschiedenste Aufgaben möglich
7. Nachteil 1: Einarbeitung, Schulung nötig
8. Nachteil 2: Bindung an Hersteller
9. Nachteil 3: Programmier-Equipment nötig
10. Nachteil 4: Aufwand für Dokumentation

Prozessoren

Das System: CPU, ROM, RAM, ...

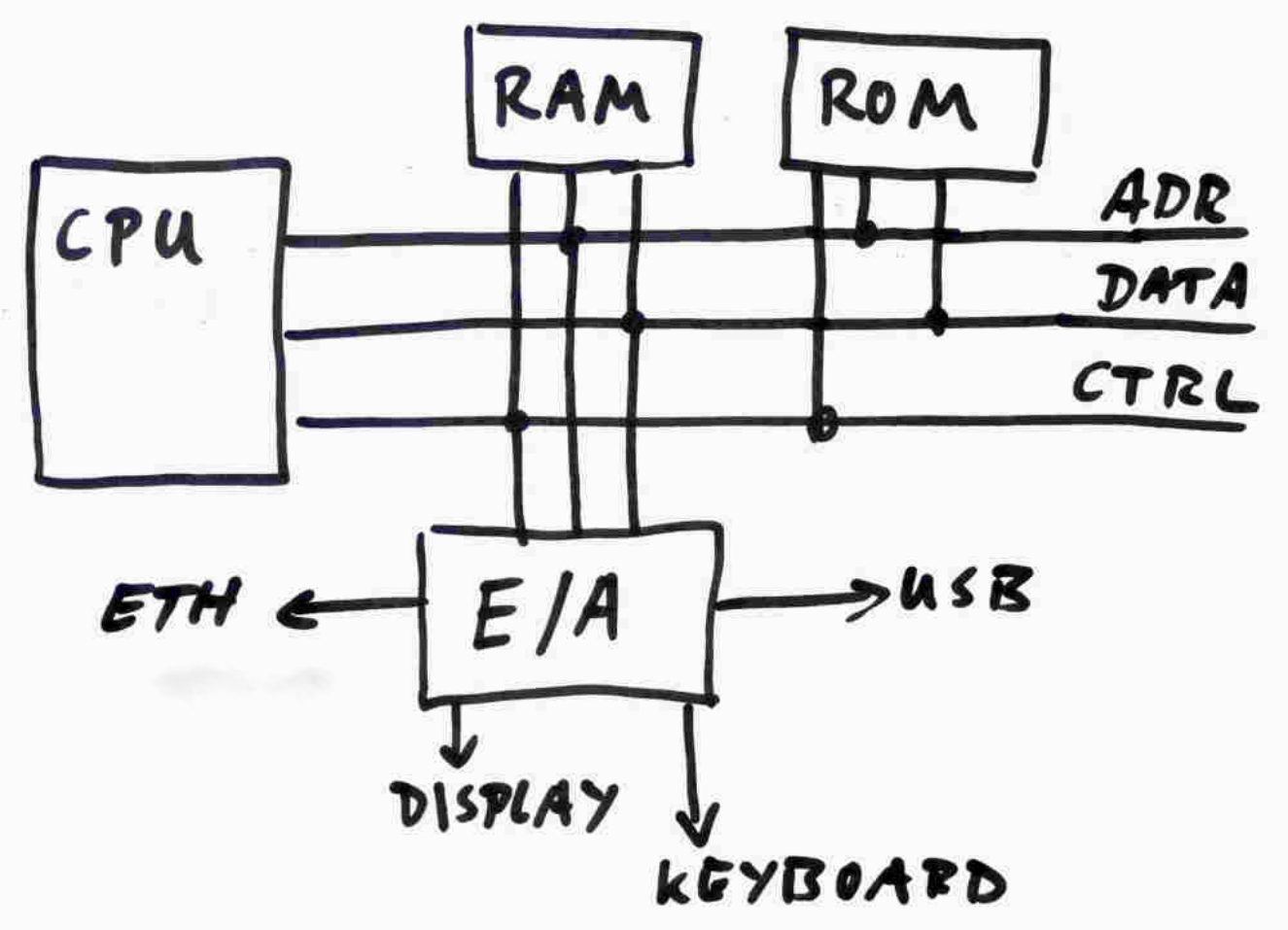


Figure 131: System

Prozessoren

CPU intern

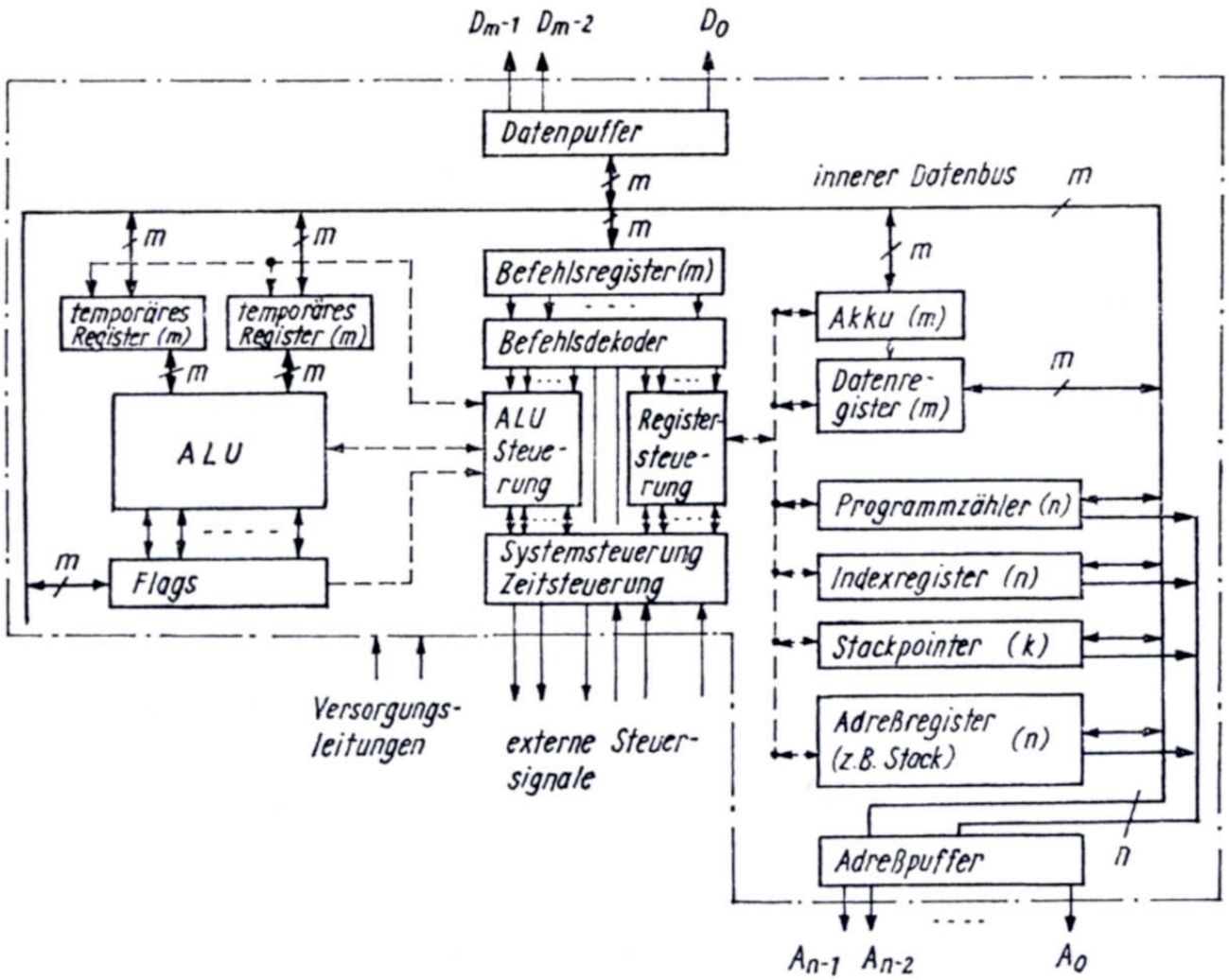


Figure 132: CPU intern [8]

Prozessoren

Beispiele

1. Z80, I486, Intel i9-7980XE, ...
2. Motorola 68000, PowerPC G4 CPU, ...
3. synthetisiert in VHDL: SPARC-V8 LEON, ...
4. IP-Cores

Prozessoren

Sprachen: Maschinencode, Assembler, C, Ada, ...

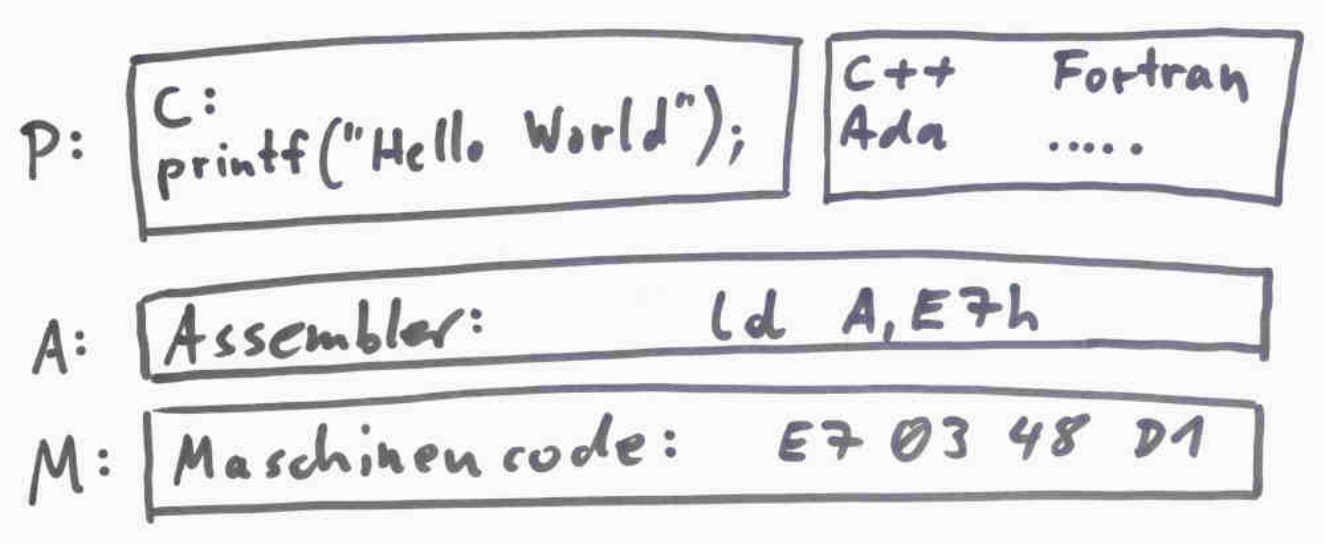


Figure 133: System-Level

Mikrocontroller

Das Konzept

1. Komponenten des gesamten Prozessor-Systems auf einem Chip
2. CPU, RAM, FLASH-ROM
3. Schnittstellen: USB, UART, ...
4. Programmier-Equipment nötig ...
5. Beispiele 8051, 80C166, STM32F407, ...

Mikrocontroller

Blockschaltbild Baugruppe mit MCU

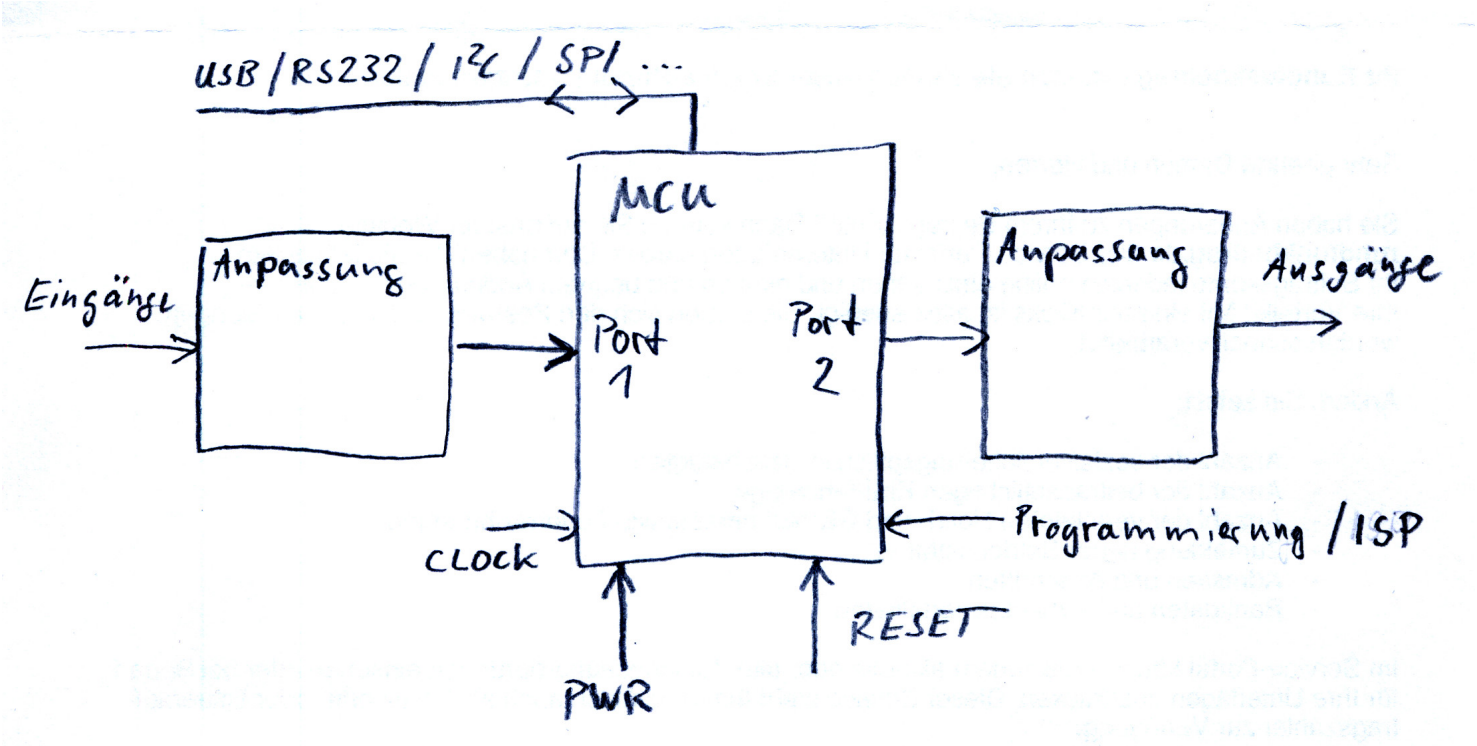
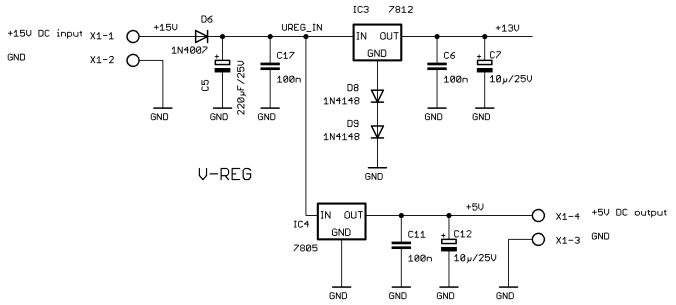
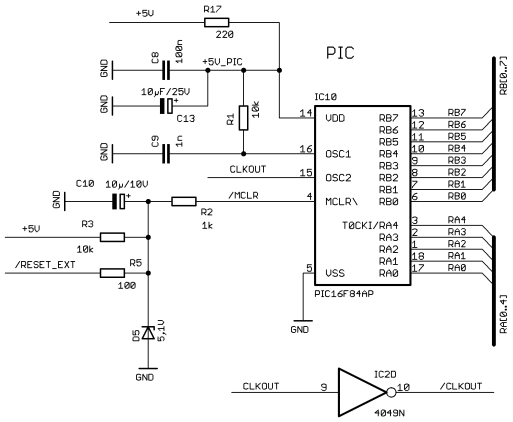


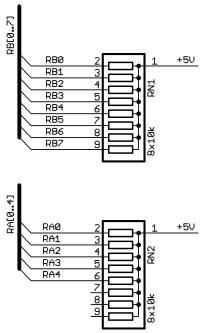
Figure 134: allgemeine Beschaltung

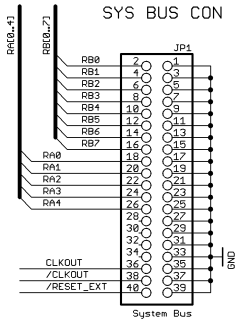
Mikrocontroller

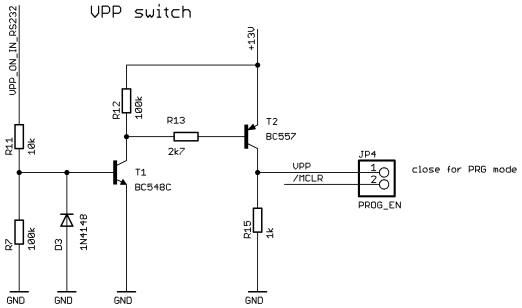
Beispiel: Schaltplan MCU-V21

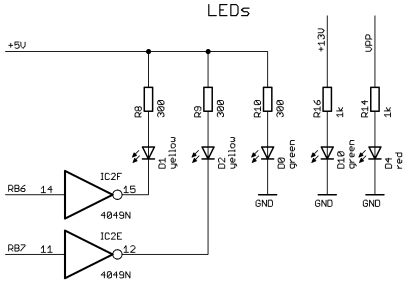


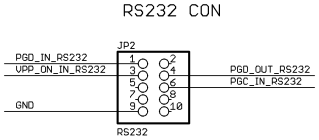


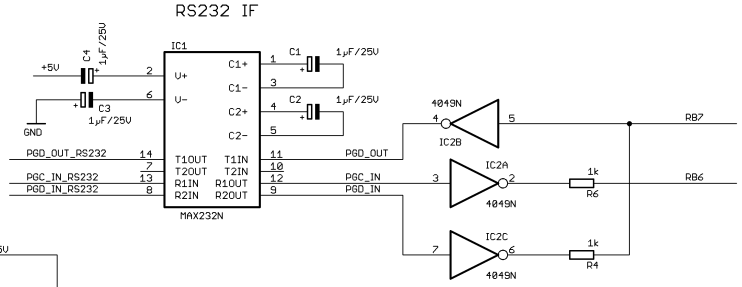


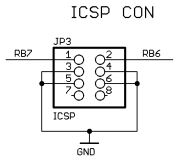


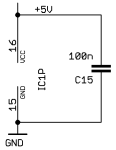


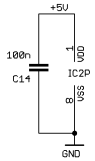












Literaturquellen I

[1] Elektrotechnik Grundbildung *Elektrotechnik Grundbildung*. Verlag EUROPA-Lehrmittel

[2] *Elektrotechnik Fachbildung*. Verlag EUROPA-Lehrmittel

[3] Karl-Heinz Schubert *Elektronisches Jahrbuch 1974*. Militärverlag 1973

[4] Karl-Heinz Schubert *Elektronisches Jahrbuch 1987*. Militärverlag 1986

[5] H. Löbig / G. Schöne *Grundkenntnisse der Elektrotechnik*. Verlag Technik Berlin, 1967

[6] H. Semrad / w. Otto *Grundlagen der Elektronik*. Verlag Technik Berlin, 1970

[7] H. Prochnow *Ermittlung der charakteristischen statischen Kennwerte von Si-Dioden in Durchlaß- und Sperrichtung*. Radio Fernsehen Elektronik 1975/12, Seiten 394-396

[8] Seifart/Beikirch *Digitale Schaltungen*. Verlag Technik Berlin, 1998

[9] Seifart *Analoge Schaltungen*. Verlag Technik Berlin, 1996

[10] Texas Instruments *Datenblatt UA741*. 2015

[11] Texas Instruments *Datenblatt OPA333*. 2013

[12] STMicroelectronics *Datenblatt Leistungs-OPV TDA2030*.

[13] Texas Instruments *Datenblatt LM1117x*. Datenblatt Spannungsregler LM1117x

[14] Analog / Linear Technology *Datenblatt LT1072*. Datenblatt Spannungsregler LT1072

[15] Lothar König *Rundfunktechnik selbst erlebt*. Urania Verlag, 1988

[16] Günter Kurz *Electronica 201: Grundlagen und Schaltungsbeispiele der Stromversorgung*. Militärverlag, 1982

[17] Startling Electronics *VHDL-CPLD course*
`https://startingelectronics.org/software/VHDL-CPLD-course/tut2-AND-and-OR-gates`

Literaturquellen II

[18] Electrosofts *Verilog course* `http://electrosofts.com/verilog/introduction.html`

[19] National Semiconductor *Op Amp Circuit Collection*. Application Note 31, February 1978

[20] Hans Joachim Fischer / Wolfgang E. Schlegel *Transistor- und Schaltkreistechnik*. Militärverlag, 1988

[21] Gerd Thiele *Electronica 229: Digitale Halbleiterspeicher*. Militärverlag, 1986

[22] Claus Kühnel *Electronica 232: AD- und DA-Umsetzer für den Amateur*. Militärverlag, 1986

[23] Claus Kühnel *Electronica 199: Lineare und nichtlineare Analogschaltungen mit OPV*. Militärverlag, 1982

[24] Winfried Müller *Optoelektronische Sender, Empfänger und Koppler*. Militärverlag, 1985

[25] Jiri Dostal *Operationsverstärker*. Verlag Technik Berlin, 1986

[26] V. Lakshminarayanan *Electronic Circuit Design Ideas*. Butterworth-Heinemann Ltd 1995

[27] Walt Kester, James Bryant, Mike Byrne / Analog Devices *Grounding Data Converters and Solving the Mystery of "AGND" and "DGND"*.

[28] Analog Devices *Datenblatt PWG AD9833*

[29] Intersil *Datenblatt Spannungskonverter ICL7660*

[30] Mark I. Montrose *Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance*. IEEE 2000

[31] H.J.Fischer / K.Schlenzig *Schaltungssammlung für den Amateur*. Militärverlag, 1969

[32] R.Burmeister / H.Hänsel / F.Höppner *Elektronik*. Verlag Volk und Wissen, 1980

[33] R.Erlekmpf / M. Kramer / H.J.Mönig *Mikroelektronik in der Amateurpraxis 2*. Militärverlag, 1984

[34] K.Schlenzig *Pikotron Anleitung*. PIKO Sonneberg, 1971

Literaturquellen III

[35] K.Schlenzig *Das Bauplan-Bastel-Buch 2*. Militärverlag, 1988

[36] K.Schlenzig *Das Bauplan-Bastel-Buch 3*. Militärverlag, 1989

[37] Mario Blunk / Blunk electronic *Design Checklist*.
http://www.blunk-electronic.de/pdf/Design_Checklist_en.pdf

[38] Mario Blunk / Blunk electronic *Boundary Scan Training Teil 1*.
http://www.blunk-electronic.de/pdf/bst_teil_1.pdf

[39] Mario Blunk / Blunk electronic *Boundary Scan Training Teil 2*.
http://www.blunk-electronic.de/pdf/bst_teil_2.pdf

[40] Mario Blunk / Blunk electronic *Angleichung der Helligkeit von Status LEDs*.
http://www.blunk-electronic.de/pdf/LED_brightness_adjustment.pdf

[41] Mario Blunk / Blunk electronic *Agile Hardware-Entwicklung*.
http://www.blunk-electronic.de/pdf/agile_HW/AgileHW-AgileSystems-2018_de.pdf