

# Embedded Systems / Eingebettete Systeme

BSc-Studiengang Informatik  
Campus Minden

Matthias König

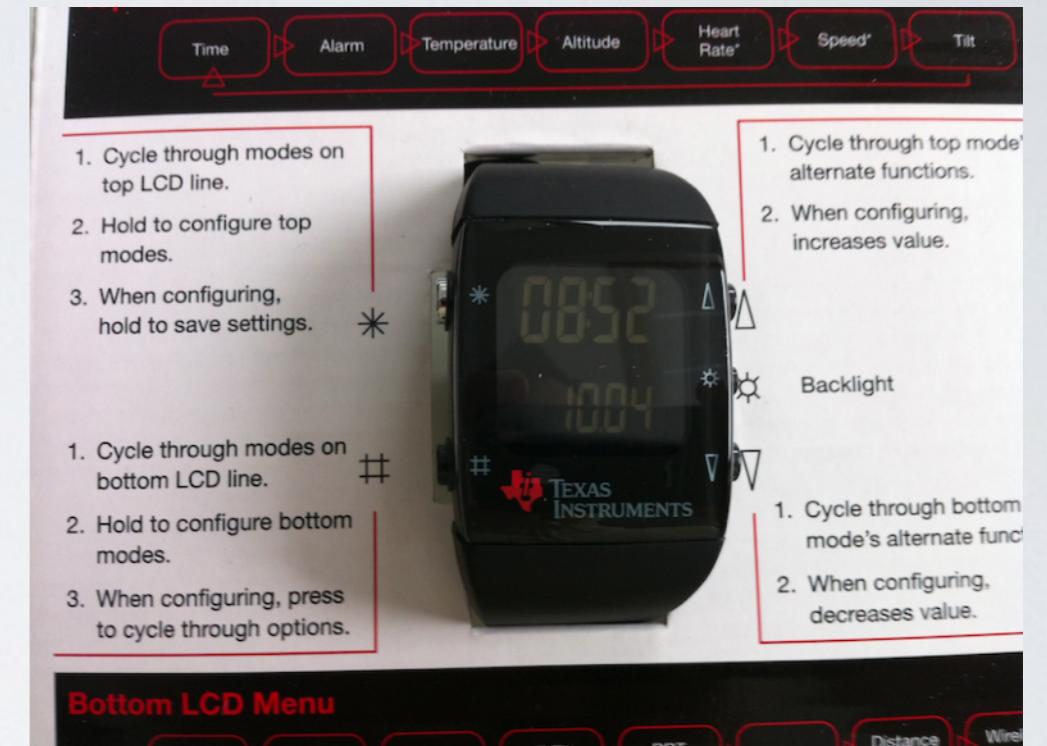


**FH Bielefeld**  
University of  
Applied Sciences

# Beispiel einer Anwendung: Programmierbare Uhren

- Armbanduhren mit Software Development Kits (SDK)
- Programmierbare Anwendungen (Apps) mit Zugriff auf Funkschnittstelle
- Kommunikation mit anderen Geräten und ggf. Steuerung
- Energieverbrauch gering (z.B. durch E-Paper-Anzeige)

## 2009: TI EZ430-Chronos



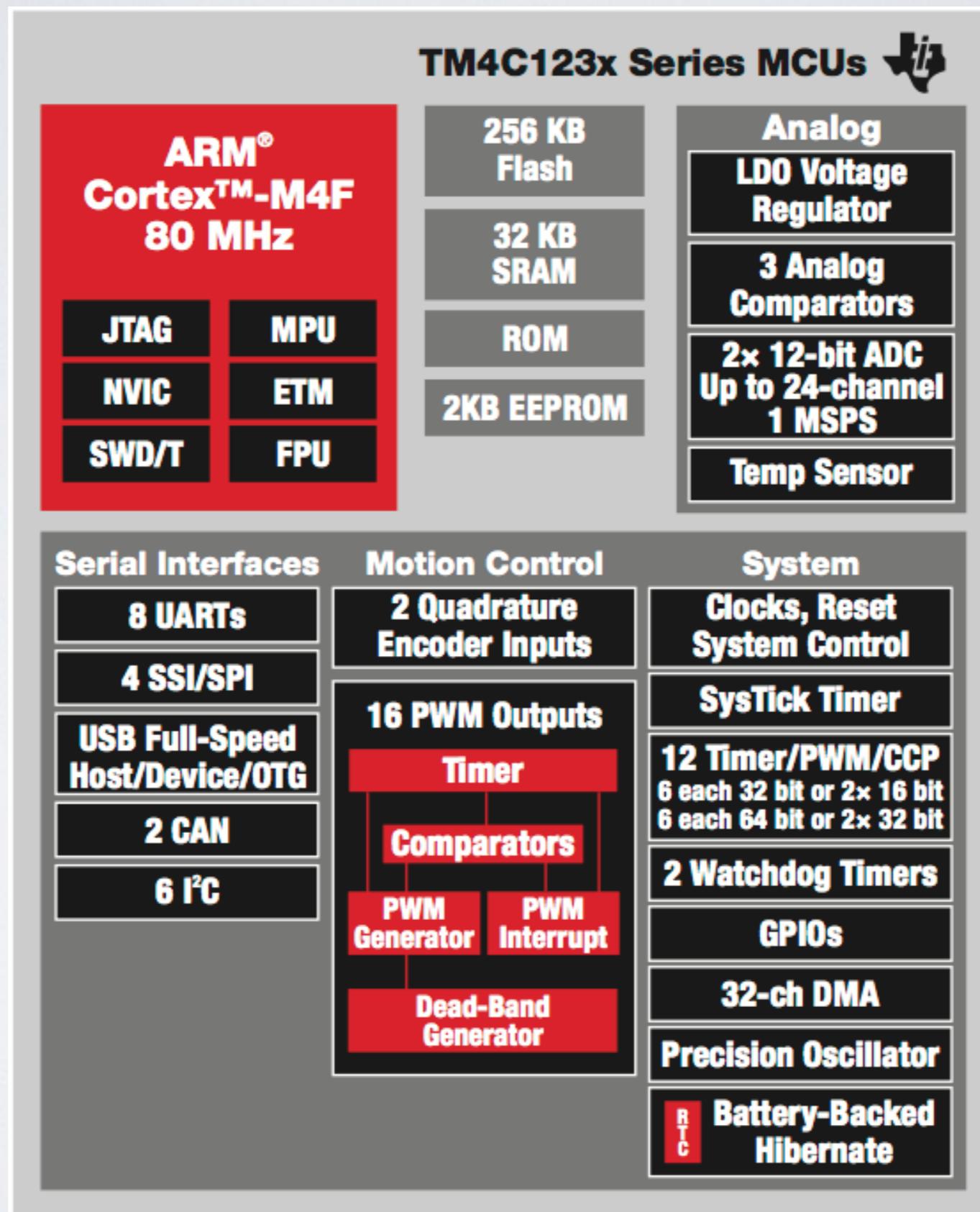
Beispiel einer programmierbaren Digitaluhr mit Funkschnittstelle

2012: Pepple

2015: Apple Watch etc.

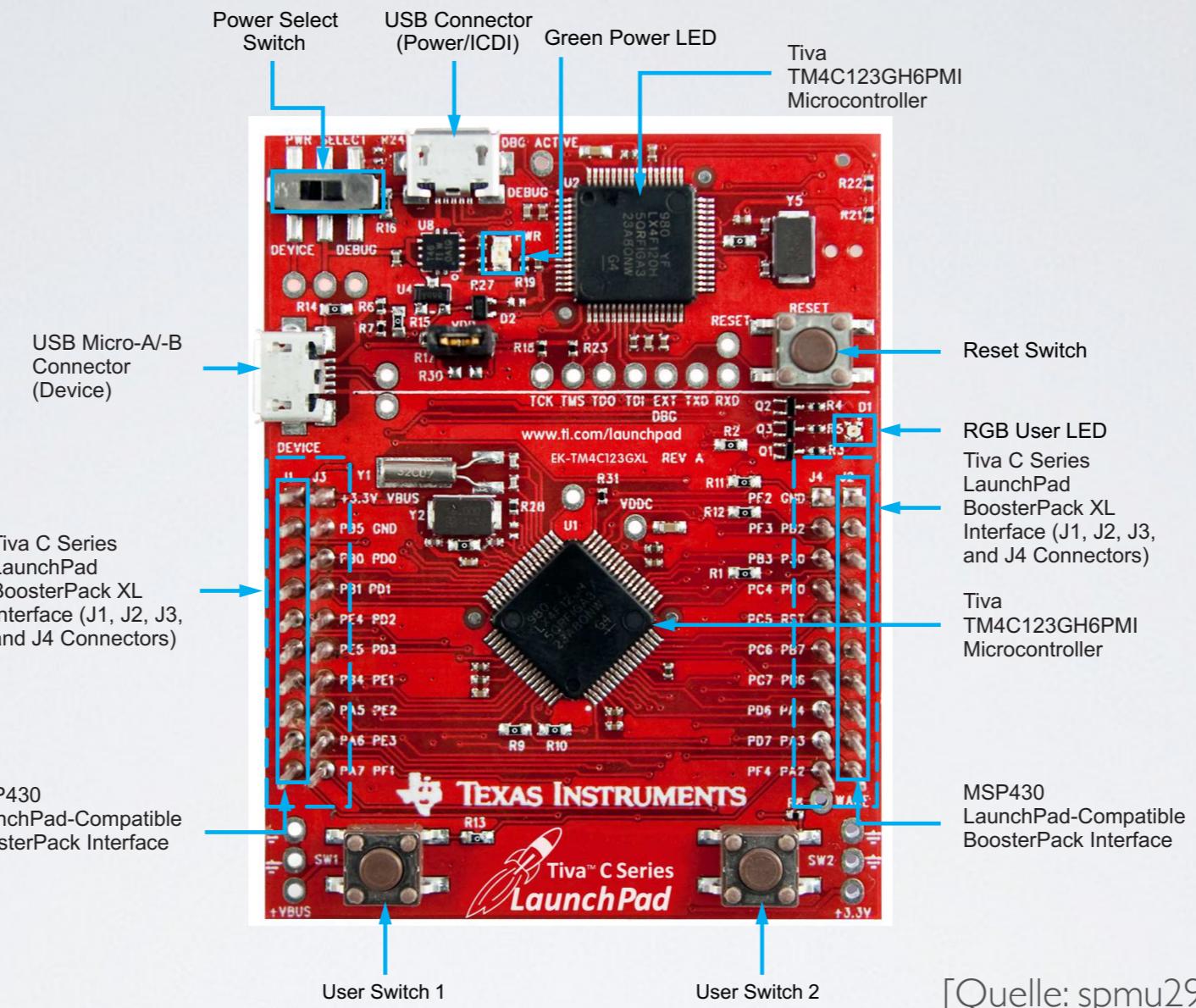
# Hardware eingebetteter Systeme

# Tiva C Series Blockdiagramm



[Quelle: [spmy010.pdf](#)]

# Tiva C Series (TM4C123G)

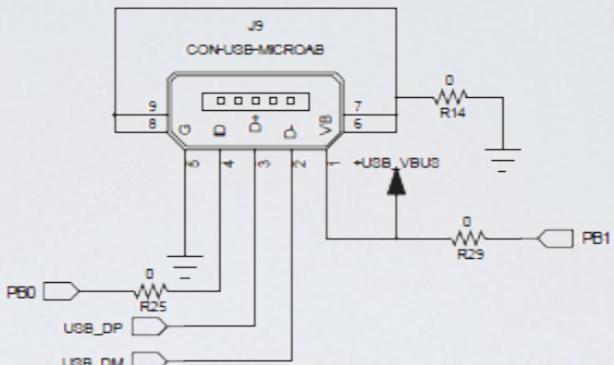
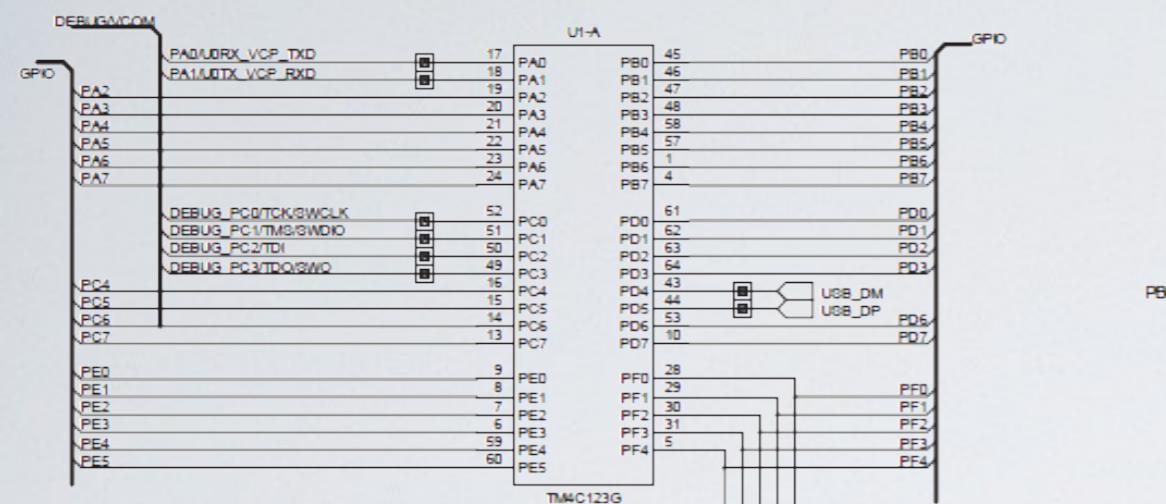


[Quelle: [spmu296.pdf](#)]

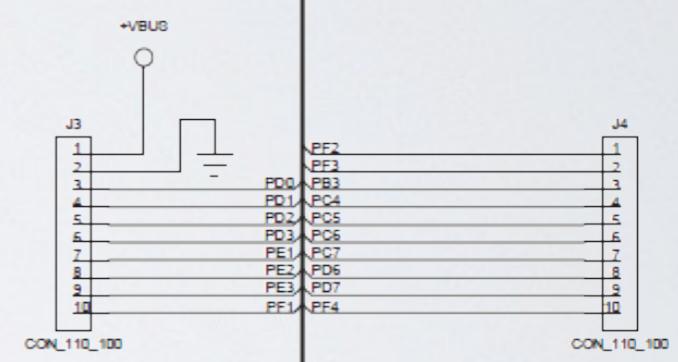
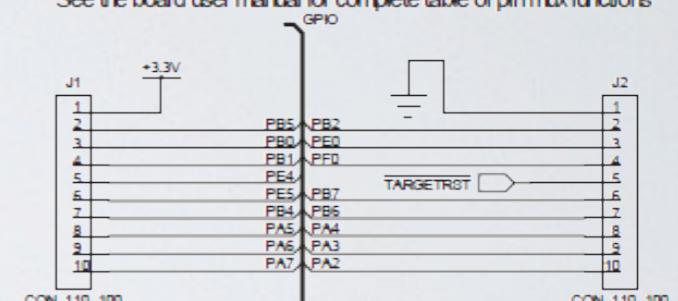
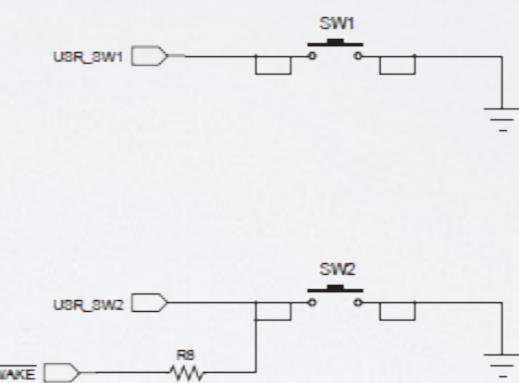
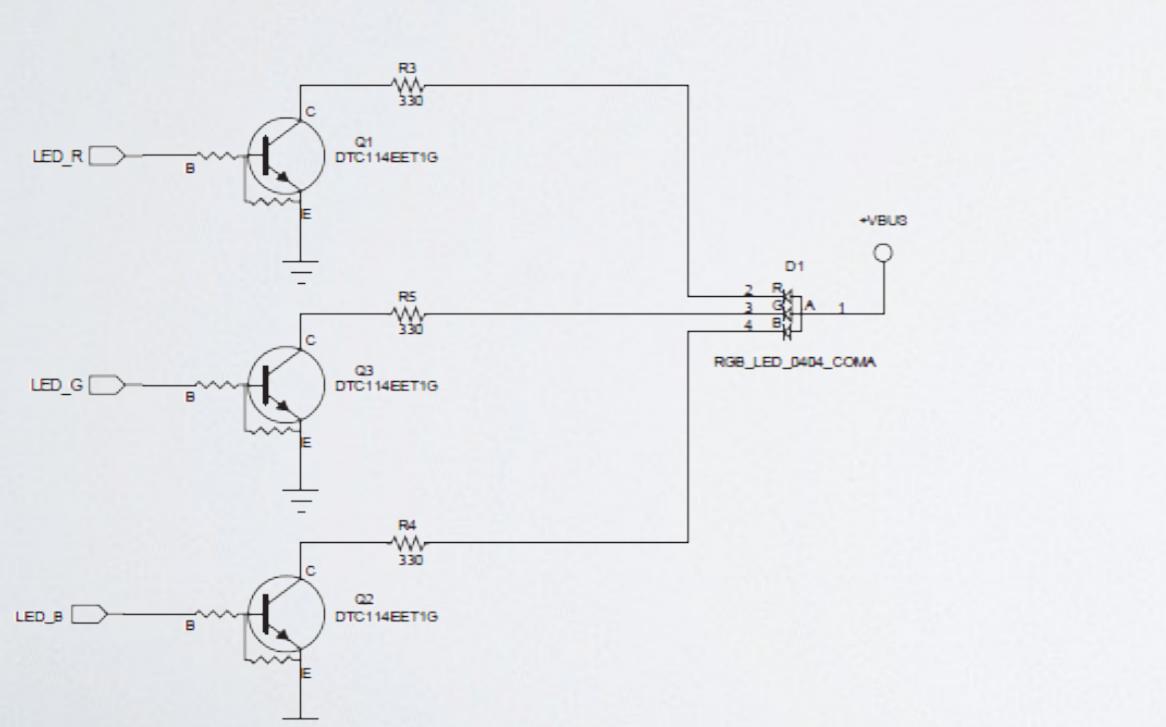
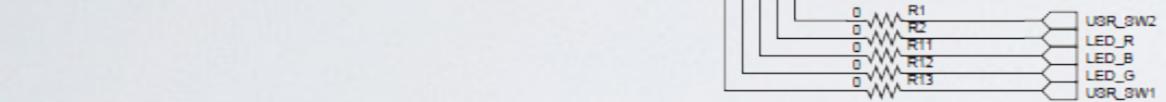
- 32 Bit Mikrocontroller TM4C123GH6PM, 80 MHz
- 32 Kbytes SRAM, 256 Kbytes Flash, 2 Kbyte EEPROM
- Bis zu 43 I/O Pins (Konfigurationsabhängig)

# Tiva C Schaltbild

Quelle: spms296.pdf



J1 and J2 provide compatibility with Booster Packs designed for MSP430 Launchpad. J3 and J4 sit 100 mils inside J1 and J2 to provide extended functions specific to this board. See the board user manual for complete table of pin mux functions.

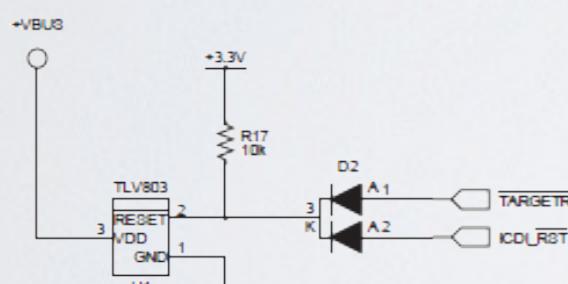
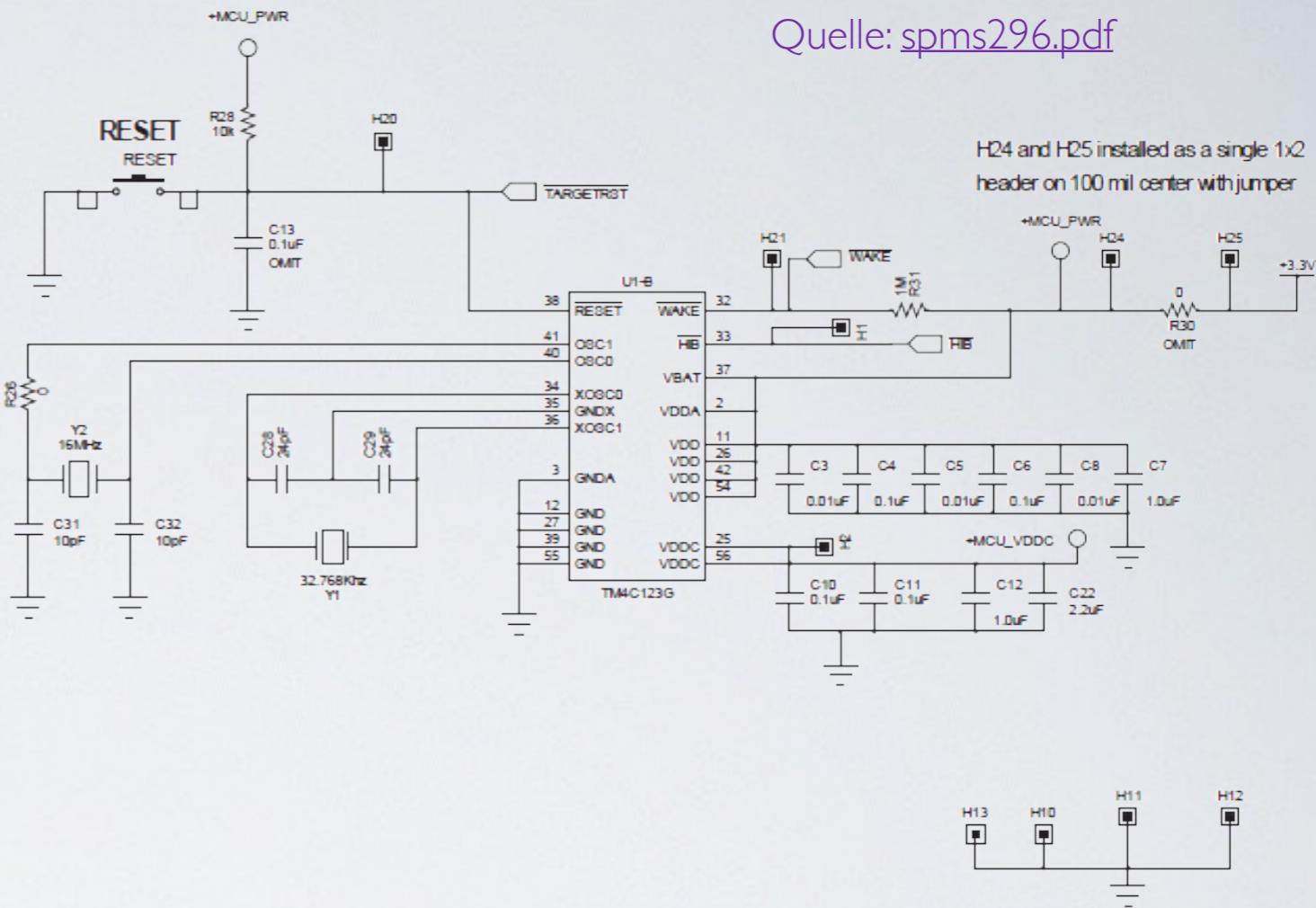
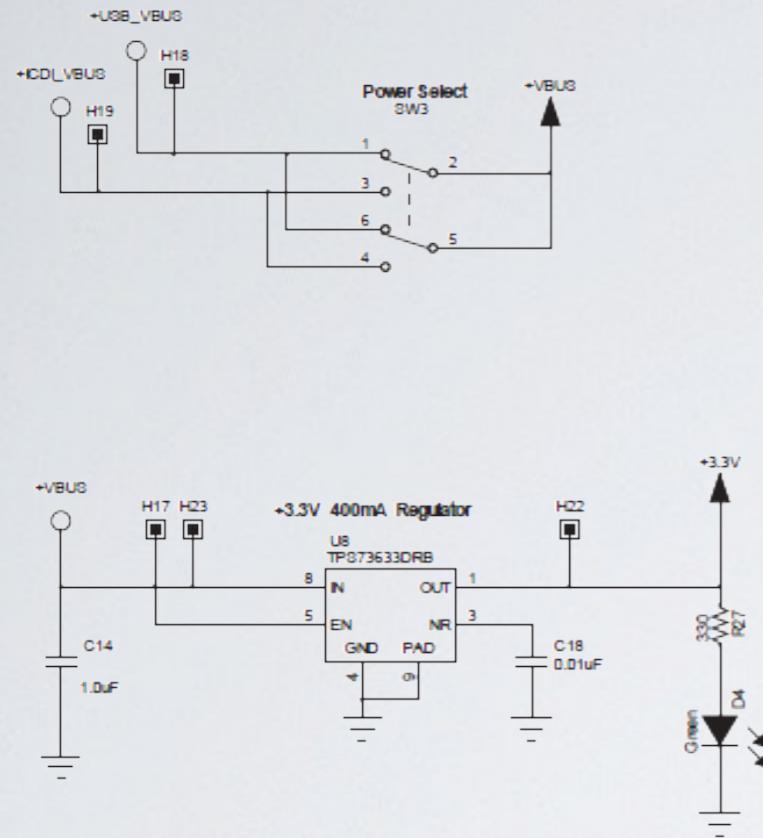


DESIGNER	REVISION	DATE
DGT	0.3	2/20/2013
<b>PROJECT</b>		
Tiva TM4C123G LaunchPad		
<b>DESCRIPTION</b>		
Microcontroller, USB, Expansion, Buttons and LED		
<b>FILENAME</b>		
EK-TM4C123GXL Rev A.sch		

TEXAS INSTRUMENTS	
©	TIVA MICROCONTROLLERS
108 WILD BASIN ROAD, SUITE 350	AUSTIN TX, 78746
www.ti.com	
PART NO.	EK-TM4C123GXL
SHEET	1 OF 3

# Tiva C Schaltbild

Quelle: spms296.pdf



OMIT this SVS Section for Tiva. Errata Fixed

DESIGNER DGT	REVISION 0.3	DATE 2/20/2013
PROJECT Tiva Launchpad		
DESCRIPTION Power Management		
FILENAME EK-TM4C123GXL Rev A.sch		
PART NO. EK-TM4C123GXL	SHEET 2 OF 3	

TEXAS INSTRUMENTS

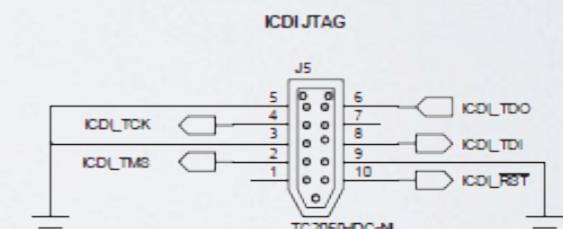
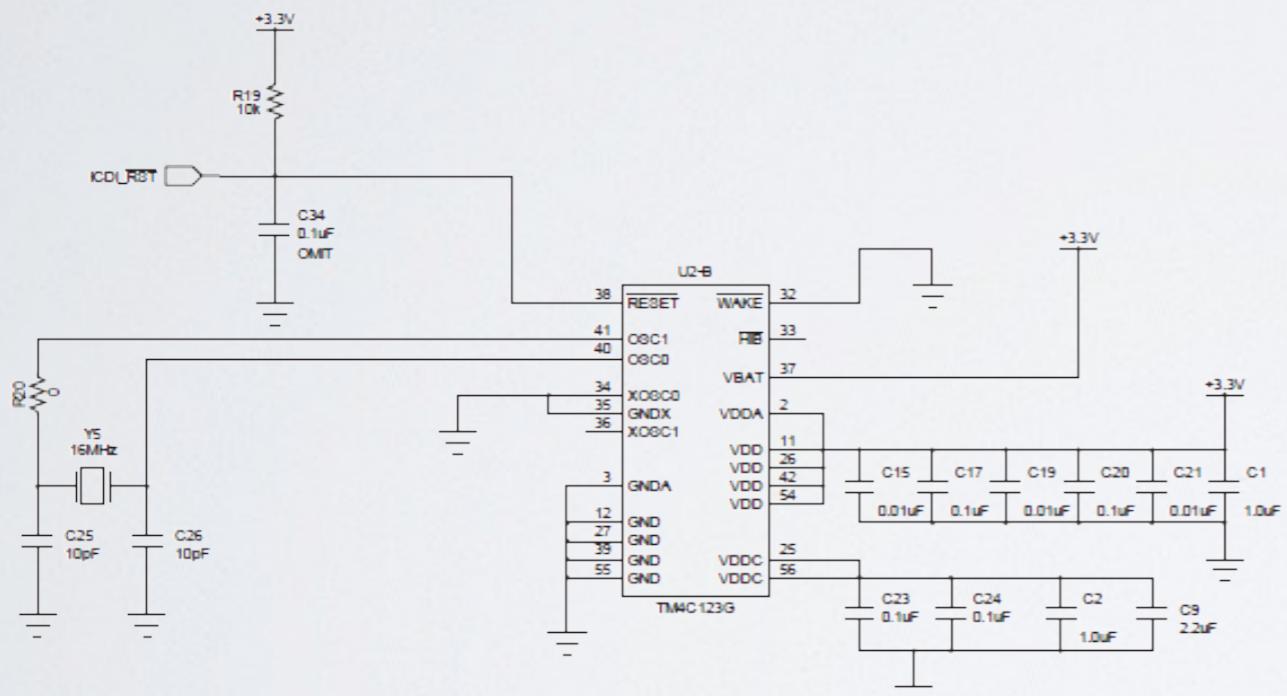
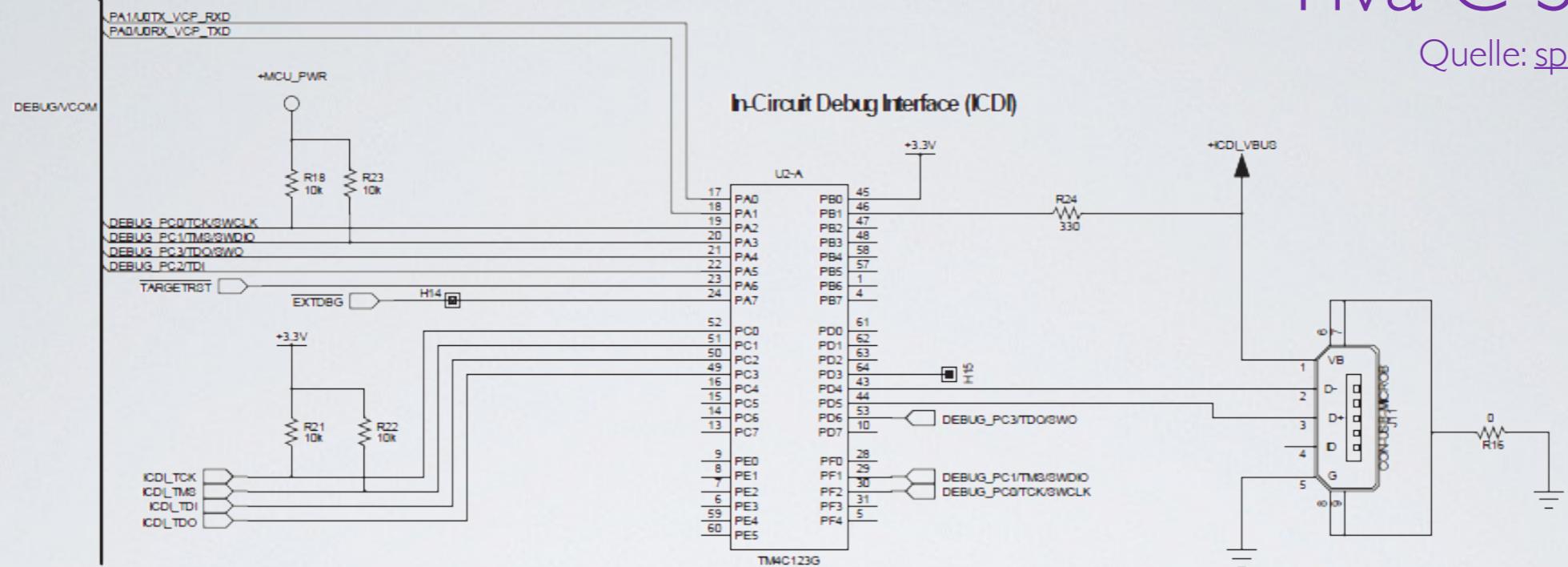
®  
TIVA MICROCONTROLLERS

108 WILD BASIN ROAD, SUITE 350  
AUSTIN TX, 78746

www.ti.com

# Tiva C Schaltbild

Quelle: spms296.pdf



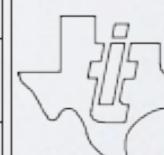
DESIGNER	REVISION	DATE
DGT	0.3	2/20/2013
PROJECT		
Tiva TM4C123G LaunchPad		
DESCRIPTION		
In Circuit Debug Interface		
FILENAME		
EK-TM4C123GXL Rev A.sch		
PART NO.		EK-TM4C123GXL
SHEET		3 OF 3

TEXAS INSTRUMENTS

TIVA MICROCONTROLLERS

108 WILD BASIN ROAD, SUITE 350  
AUSTIN TX, 78746

www.ti.com



# Tiva C Bill of Material

Quelle: [spmu296.pdf](#)

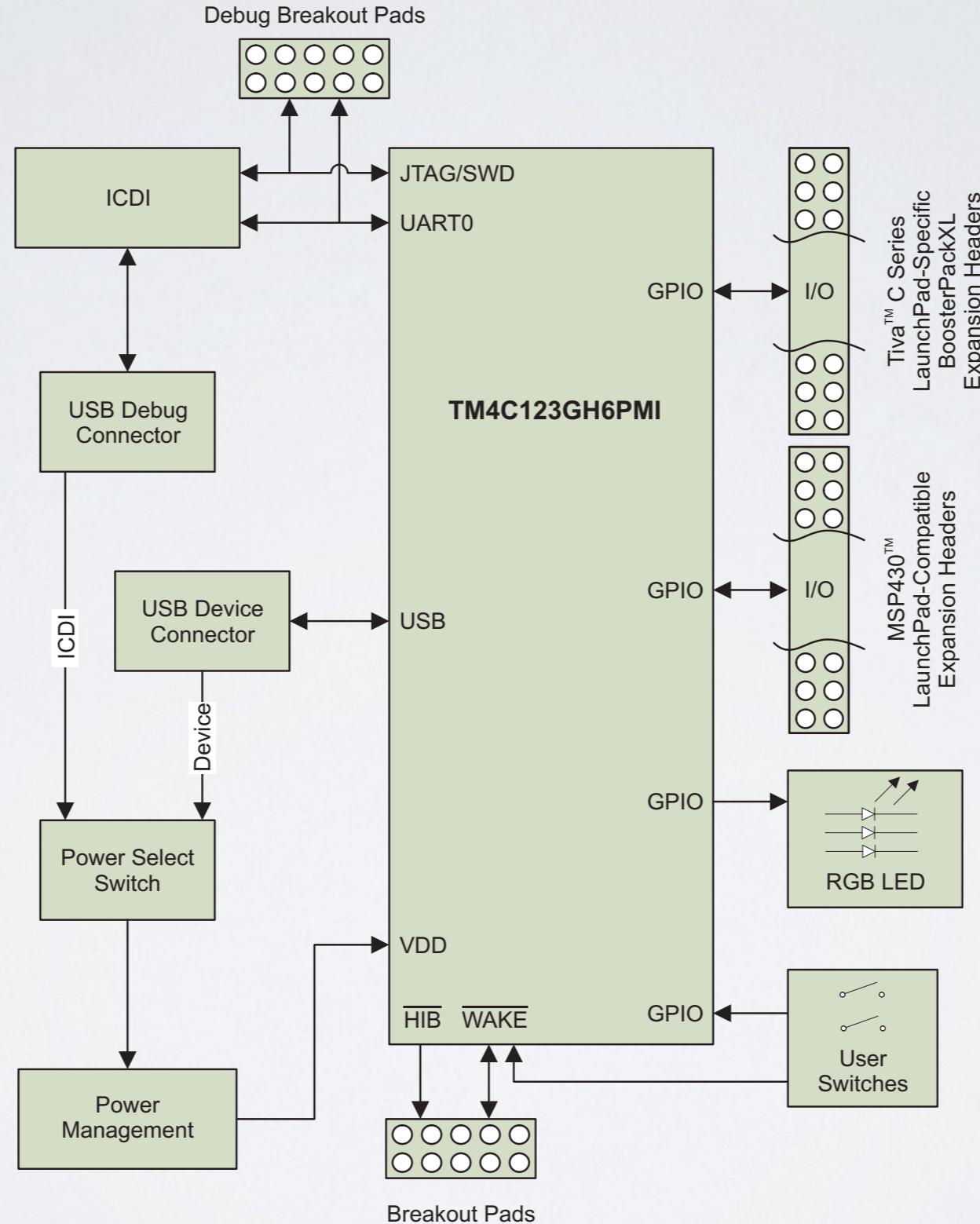
Item	Ref Des	Qty	Description	Manufacturer	Manufacturer Part No
1	C1-2, C7, C12, C14	5	Capacitor, 0402, X5R, 10 V, Low ESR	Johanson Dielectrics Inc	100R07X105KV4T
2	C25-26, C31-32	4	Capacitor, 10 pF, 50 V, 5%,	Murata	GRM1555C1H100JZ01D
			NPO/COG, 0402		
3	C28-29	2	Capacitor, 24 pF, 50 V, 5%,	TDK	C1005C0G1H240J
			NPO/COG, 0402		
4	C3, C5, C8, C15, C18-19, C21	7	Capacitor, 0.01 µF 25 V, 10%	Taiyo Yuden	TMK105B7103KV-F
			0402 X7R		
5	C4, C6, C10-11, C17, C20, C23-24	8	Capacitor, 0.1 µF 16 V, 10% 0402 X7R	Taiyo Yuden	EMK105B7104KV-F
6	C9, C22	2	Capacitor, 2.2 µF, 16 V, 10%,	Murata	GRM188R61C225KE15D
			0603, X5R		
7	D1	1	LED, Tri-Color RGB, 0404 SMD	Everlight	18-038/RSGHBHC1-S02/2T
			Common Anode		
8	D4	1	LED, Green 565 nm, Clear 0805 SMD	Lite-On	LTST-C171GKT
9	H24	1	Header, 1x2, 0.100, T-Hole, Vertical Unshrouded, 0.220 Mate	3M	961102-6404-AR
				FCI	68001-102HLF
10	H25	1	Jumper, 0.100, Gold, Black, Closed	Sullins	SPC02SYAN
11	J1, J3	2	Header, 2x10, T-Hole Vertical unshrouded stacking	Samtec	SSW-110-23-S-D
16	R1-2, R9-16, R20, R26	12	Resistor, 0 0 1/10W 0603 SMD	Panasonic	ERJ-3GEY0R00V
17	R18-19, R21-23, R28	6	Resistor, 10 kΩ, 1/10W, 5%, 0402 Thick Film	Yageo	RC0402FR-0710KL
18	R3-5, R8, R27	5	Resistor, 330 Ω, 1/10W, 5%, 0402	Yageo	RC0402FR-07330RL
19	R31	1	Resistor, 1 MΩ 1/10W, 5%, 0402	Rohm	MCR01MRTF1004
20	RESET SW1, SW2	3	Switch, Tact 6 mm SMT, 160gf	Omron	B3S-1000
21	SW3	1	Switch, DPDT, SMT 300 mA × 2 at 6 V	C K Components	JS202011SCQN
22	U1, U2	2	Tiva C Series MCU TM4C123GH6PM	Texas Instruments	TM4C123GH6PMI
23	U8	1	Regulator, 3.3 V, 400 mA, LDO	Texas Instruments	TPS73633DRBT
24	Y1	1	Crystal, 32.768 kHz Radial Can	Abracan	AB26TRB-32.768KHZ- T
25	Y2, Y5	2	Crystal, 16.00 MHz 5.0x3.2mm SMT	NDK	NX5032GA-16.000000 MHz
				Abracan	ABM3-16.000 MHz-B2- T
PCB Do Not Populate List (Shown for information only)					
26	C31, C34	2	Capacitor, 0.1 µF 16 V, 10% 0402 X7R	Taiyo Yuden	EMK105B7104KV-F
27	D2	1	Diode, Dual Schottky, SC70, BAS70 Common Cathode	Diodes Inc	BAS70W-05-7-F
28	R17	1	Resistor, 10 kΩ 1/10W 5%, 0402 Thick Film	Yageo	RC0402FR-0710KL
29	R24	1	Resistor, 330 Ω, 1/10W, 5%, 0402	Yageo	RC0402FR-07330RL
30	R25, R29-30	3	Resistor, 0 0, 1/10W 0603	Panasonic	ERJ-3GEY0R00V
31	U4	1	IC, Single Voltage Supervisor, 5V, DBV	Texas Instruments	TLV803MDBZR

# Beispiel: Preise/Varianten TM4C123Gx

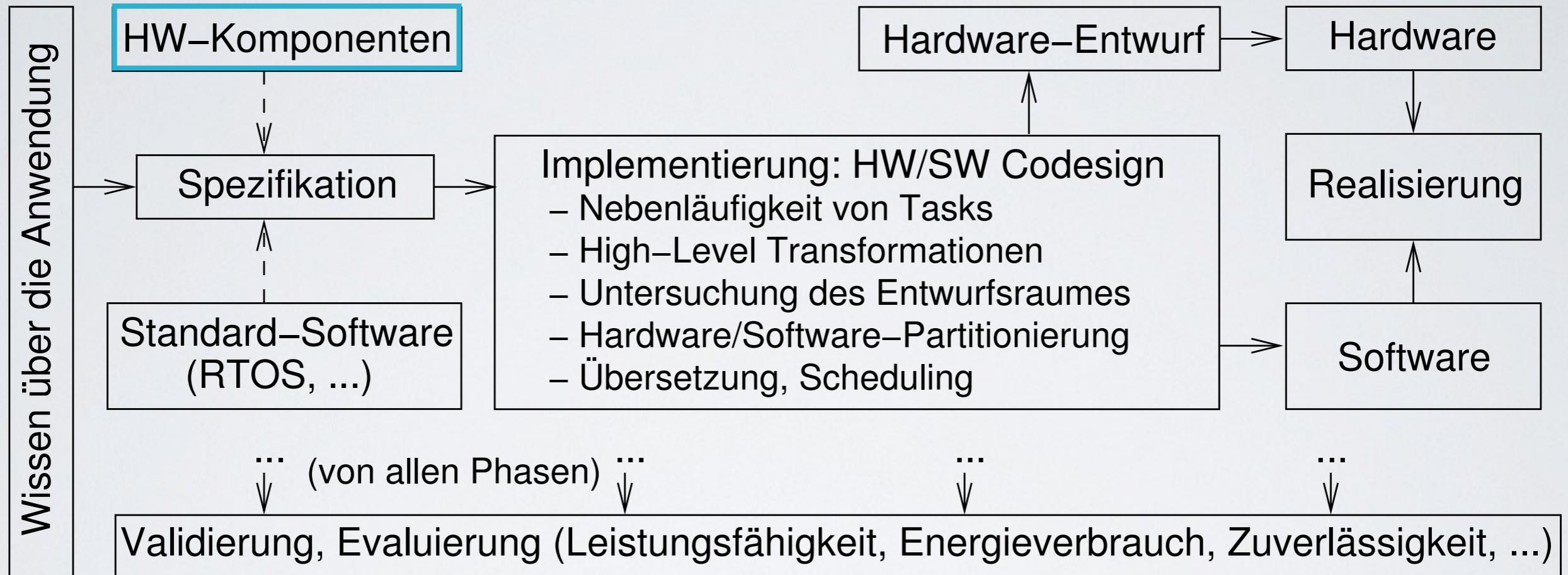
Bestellnummer	Hersteller-Teilenr.	Hersteller / Beschreibung	Verfüg	Preiseinheit:	Menge
<input type="checkbox"/> 2428912	TM4C123GH6PMI	<b>TEXAS INSTRUMENTS</b> <b>32-Bit-Mikrocontroller, Tiva, ARM Cortex-M4F, 80 MHz, 256 KB, 32 KB, 64 Pin(s), LQFP</b>  <span style="color: #ccc;">(0)</span> <p>Architektur <b>ARM Cortex-M4F</b>  CPU-Geschwindigkeit <b>80MHz</b>  Programmspeichergröße <b>256KB</b>  <a href="#">+ Alle Produktinformationen anzeigen</a></p>	<b>487</b> Produkt vorrätig  Verfügbarkeit und Lieferzeiten abfragen	Stück  1+ <b>9,11 €</b> 10+ <b>7,08 €</b> 25+ <b>7,01 €</b> <a href="#">Mehr</a>	<input type="text" value="1"/>  <b>Kaufen</b>
<input type="checkbox"/> 2334315	TM4C123GH6PZT	<b>TEXAS INSTRUMENTS</b> <b>32-Bit-Mikrocontroller, Tiva, ARM Cortex-M4F, 80 MHz, 256 KB, 32 KB, 100 Pin(s), LQFP</b>  <span style="color: #ccc;">(0)</span> <p>Architektur <b>ARM Cortex-M4F</b>  CPU-Geschwindigkeit <b>80MHz</b>  Programmspeichergröße <b>256KB</b>  <a href="#">+ Alle Produktinformationen anzeigen</a></p>	<b>117</b> Produkt vorrätig  Verfügbarkeit und Lieferzeiten abfragen	Stück  1+ <b>8,42 €</b> 10+ <b>7,88 €</b> 25+ <b>7,34 €</b> <a href="#">Mehr</a>	<input type="text" value="1"/>  <b>Kaufen</b>
<input type="checkbox"/> 2334314	TM4C123GH6PGET	<b>TEXAS INSTRUMENTS</b> <b>32-Bit-Mikrocontroller, Tiva, ARM Cortex-M4F, 80 MHz, 256 KB, 2 KB, 144 Pin(s), LQFP</b>  <span style="color: #ccc;">(0)</span> <p>Architektur <b>ARM Cortex-M4F</b>  CPU-Geschwindigkeit <b>80MHz</b>  Programmspeichergröße <b>256KB</b>  <a href="#">+ Alle Produktinformationen anzeigen</a></p>	<b>85</b> Produkt vorrätig  Verfügbarkeit und Lieferzeiten abfragen	Stück  1+ <b>8,9009 €</b> 10+ <b>8,1889 €</b> 25+ <b>7,5337 €</b> <a href="#">Mehr</a>	<input type="text" value="1"/>  <b>Kaufen</b>
<input type="checkbox"/> 2428913	TM4C123GH6PMT	<b>TEXAS INSTRUMENTS</b> <b>32-Bit-Mikrocontroller, Tiva, ARM Cortex-M4F, 80 MHz, 256 KB, 32 KB, 64 Pin(s), LQFP</b>  <span style="color: #ccc;">(0)</span> <p>Architektur <b>ARM Cortex-M4F</b>  CPU-Geschwindigkeit <b>80MHz</b>  Programmspeichergröße <b>256KB</b>  <a href="#">+ Alle Produktinformationen anzeigen</a></p>	<b>26</b> Produkt vorrätig  Verfügbarkeit und Lieferzeiten abfragen	Stück  1+ <b>9,43 €</b> 10+ <b>7,33 €</b> 25+ <b>6,63 €</b> <a href="#">Mehr</a>	<input type="text" value="1"/>  <b>Kaufen</b>
<input type="checkbox"/> 2428914	TM4C123GH6PZI	<b>TEXAS INSTRUMENTS</b> <b>32-Bit-Mikrocontroller, Tiva, ARM Cortex-M4F, 80 MHz, 256 KB, 32 KB, 100 Pin(s), LQFP</b>  <span style="color: #ccc;">(0)</span> <p>Architektur <b>ARM Cortex-M4F</b>  CPU-Geschwindigkeit <b>80MHz</b>  Programmspeichergröße <b>256KB</b>  <a href="#">+ Alle Produktinformationen anzeigen</a></p>	<b>20</b> Produkt vorrätig  Verfügbarkeit und Lieferzeiten abfragen	Stück  1+ <b>9,55 €</b> 10+ <b>7,42 €</b> 25+ <b>6,71 €</b> <a href="#">Mehr</a>	<input type="text" value="1"/>  <b>Kaufen</b>

# Einfaches Schaltbild

Figure 2-1. Tiva C Series LaunchPad Evaluation Board Block Diagram



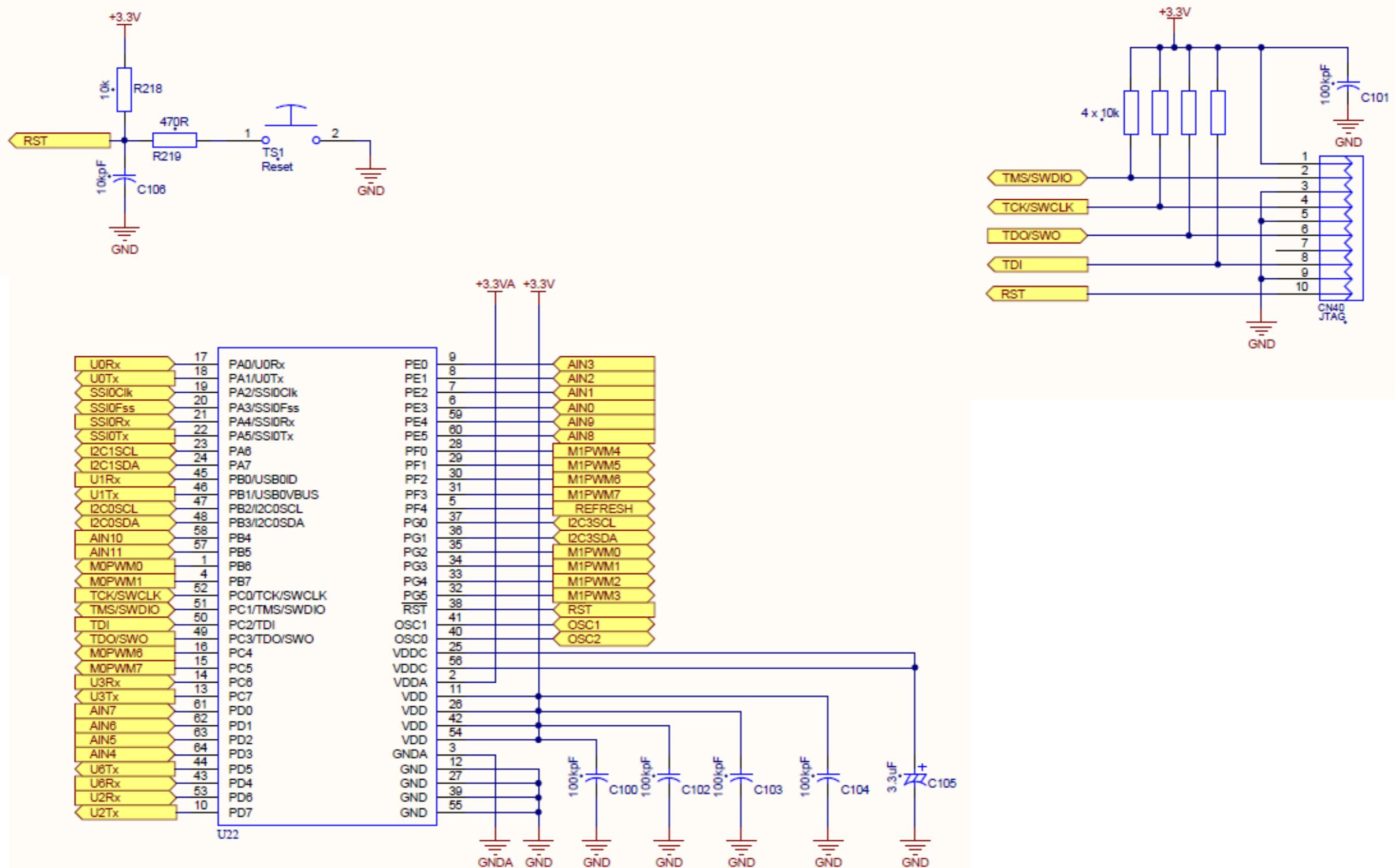
# Hardware/Software Codedesign



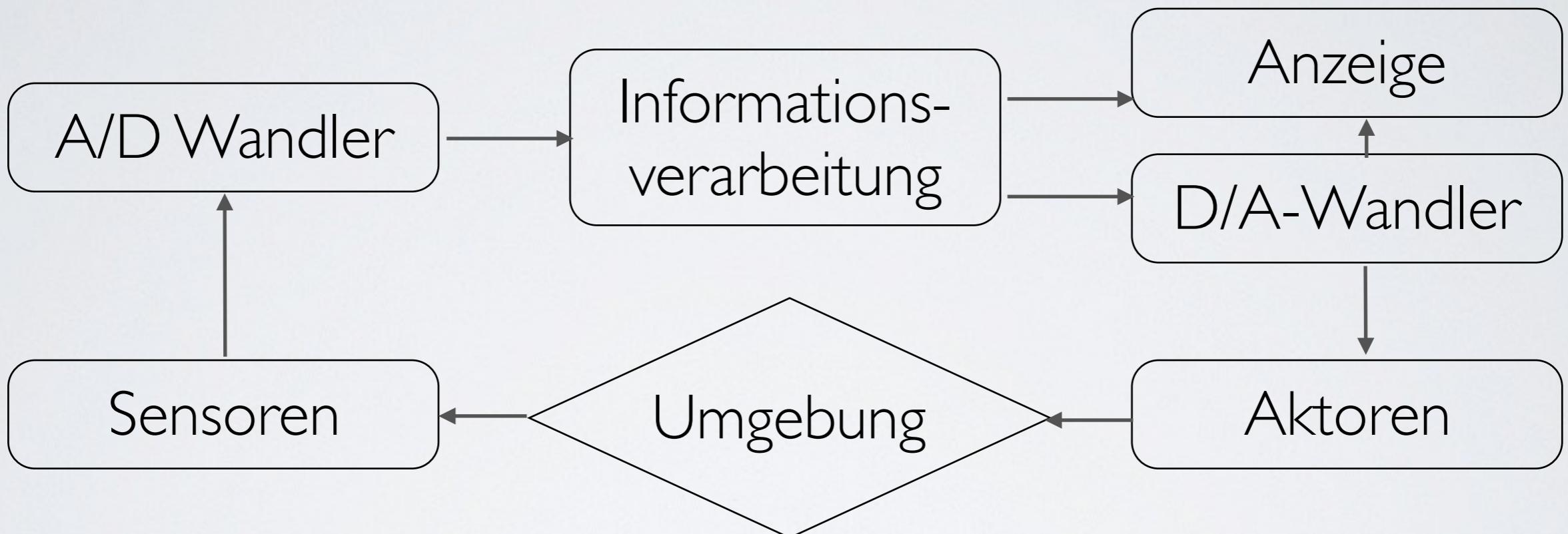
Entwurf Eingebetteter Systeme (nach Marwedel)

[Quelle: Marwedel, Eingebettete Systeme]

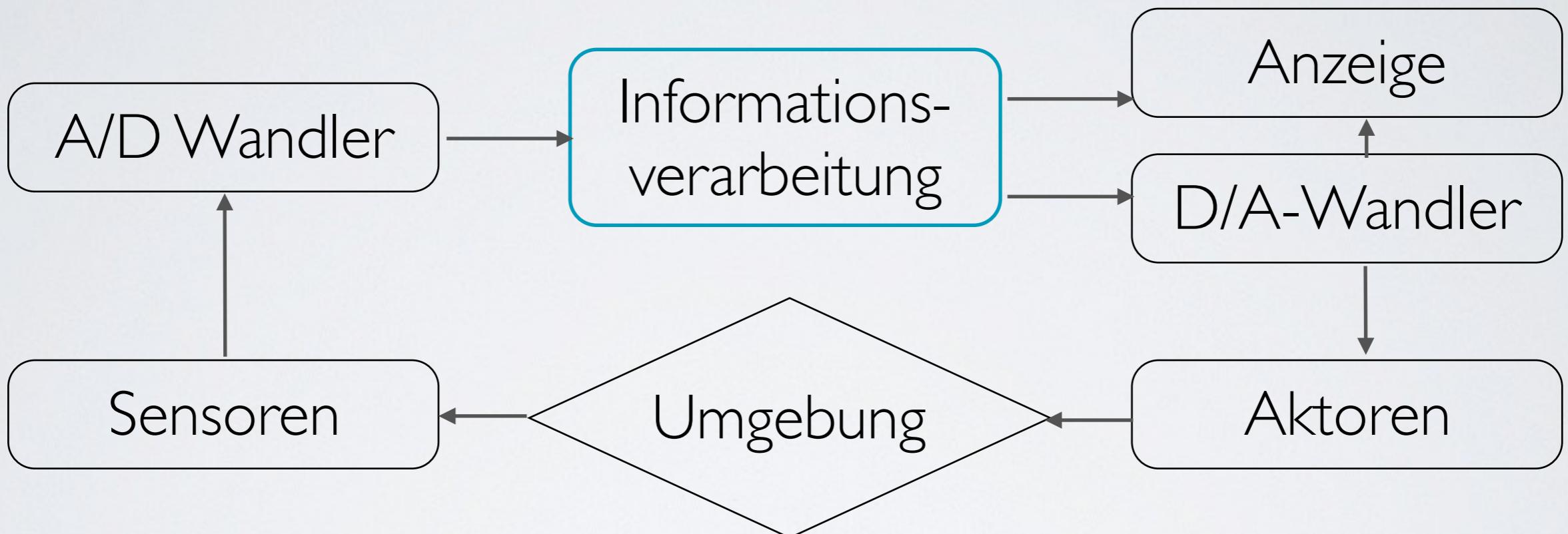
# TM4C123G6PM Pin Mapping



# Hardware in a loop



# Hardware in a loop



# Verarbeitungseinheiten

- Application-Specific Integrated Circuits ASICs
  - speziell entworfene Schaltkreise, lohnt erst bei hoher Stückzahl
- Field Programmable Gate Arrays FPGAs
  - (re)konfigurierbare Logik, programmierbare Verbindungsstruktur (z.B. mit VHDL)
- Mikroprozessoren

# Mikroprozessoren: Schaltungskonzepte

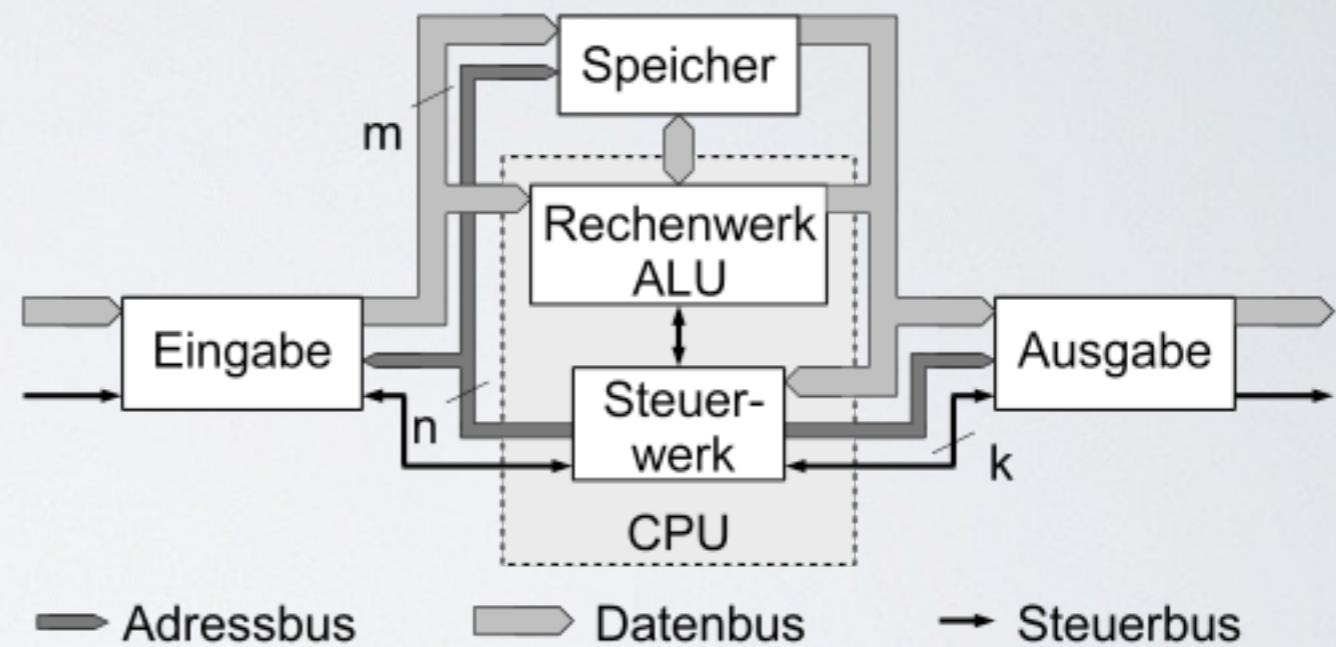
- Harvard-Architektur
  - Programm- und Datenspeicher sind getrennt.
  - Programmcode kann nicht überschrieben werden.
- von-Neumann-Architektur
  - gemeinsamer Speicher für Daten und Programmcode.

# Mikroprozessoren

- Complex Instruction Set Computer CISC
  - mächtiger Befehlsumfang, wenig Register, unterschiedliche Befehlslängen
- Reduced Instruction Set Computer RISC
  - nur notwendige Befehle gleicher Befehlslängen, mehr Register
- Mikrocontroller
  - Mikroprozessor plus Speicher und I/O

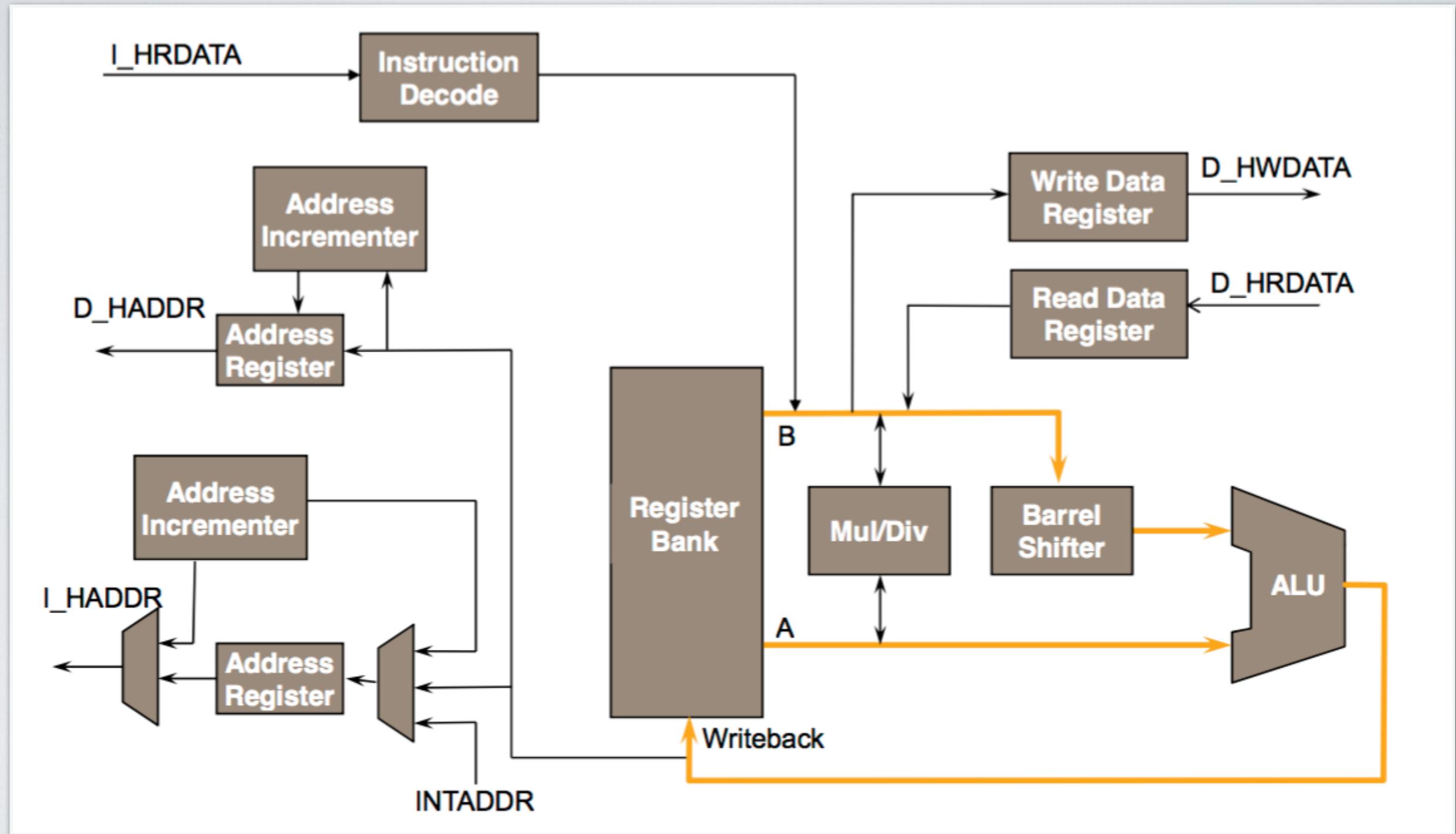
# Mikroprozessor/-controller: Aufbau

- Steuerwerk (control unit)
- Rechenwert (arithmetic logic unit, alu)
- Speicher (memory)
- Ein- und Ausgabe (i/o)
- Bus



[Quelle: Wikipedia (Medvedev): [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:%22von\\_Neumann%22\\_Architektur\\_de.svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:%22von_Neumann%22_Architektur_de.svg)]

# Mikrocontroller: Beispiel Cortex-M3

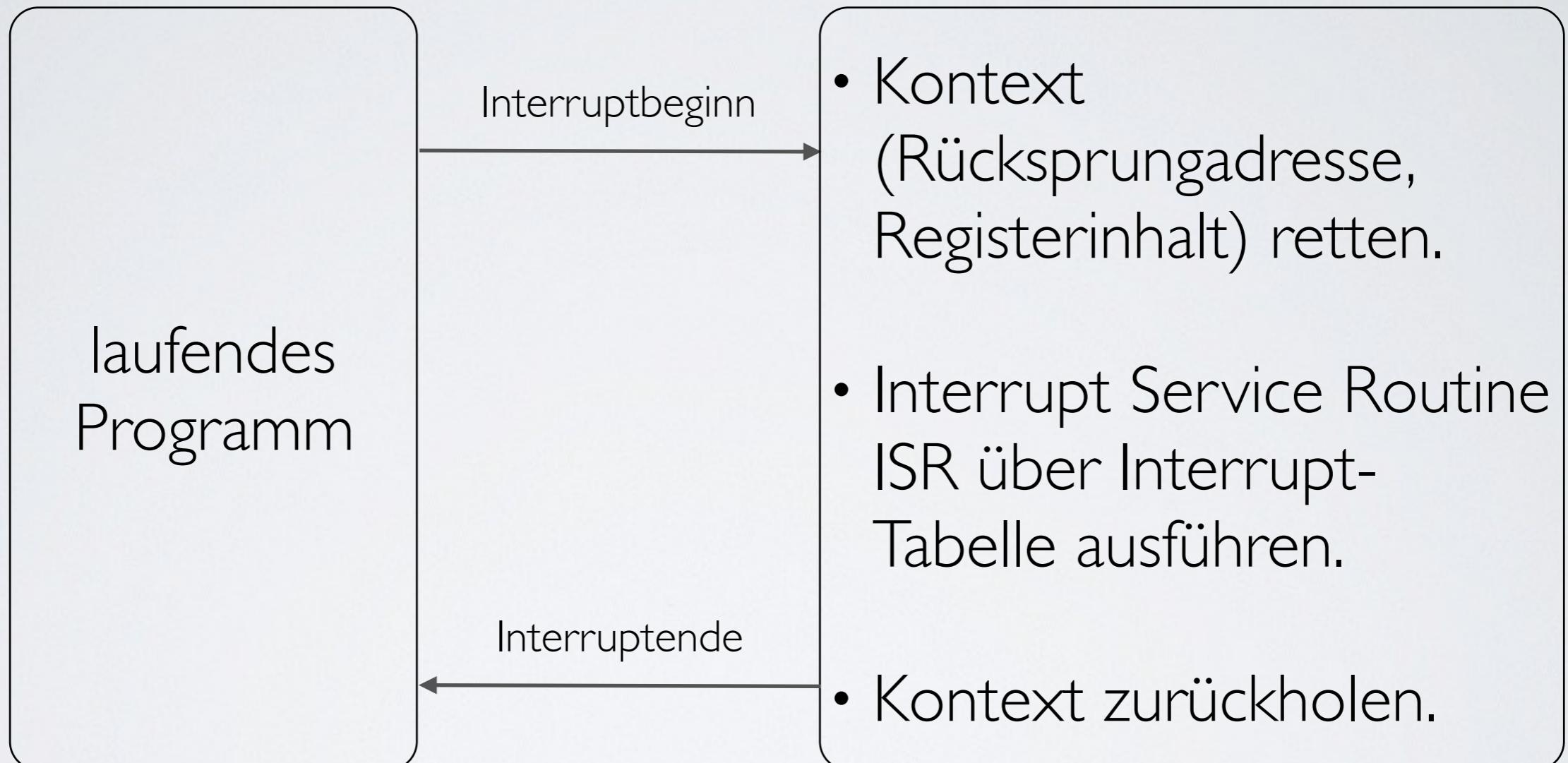


[Quelle: [https://www.arm.com/files/pdf/CortexM3\\_Uni\\_Intro.pdf](https://www.arm.com/files/pdf/CortexM3_Uni_Intro.pdf), Zugriff 04.05.16]

# Befehlswort (opcode)- Beispiel Cortex-M

- LDR: Load register with word, immediate offset (Thumb mode)
- Syntax und Operation (o ist Offset):
  - $LDR\ Rd, [Rn, \#o]$        $0 \leq d \leq 7; 0 \leq n \leq 7; 0 \leq o \leq 31$
  - $Rd \leftarrow (Rn + o * 4), \quad PC \leftarrow PC + I$
- Opcode:
  - 0110 1ooo oonn nddd
  - Beispiel:  $LDR\ r1,[r0, \#0]$  ist 0110 1000 0000 0001 (0x6801)

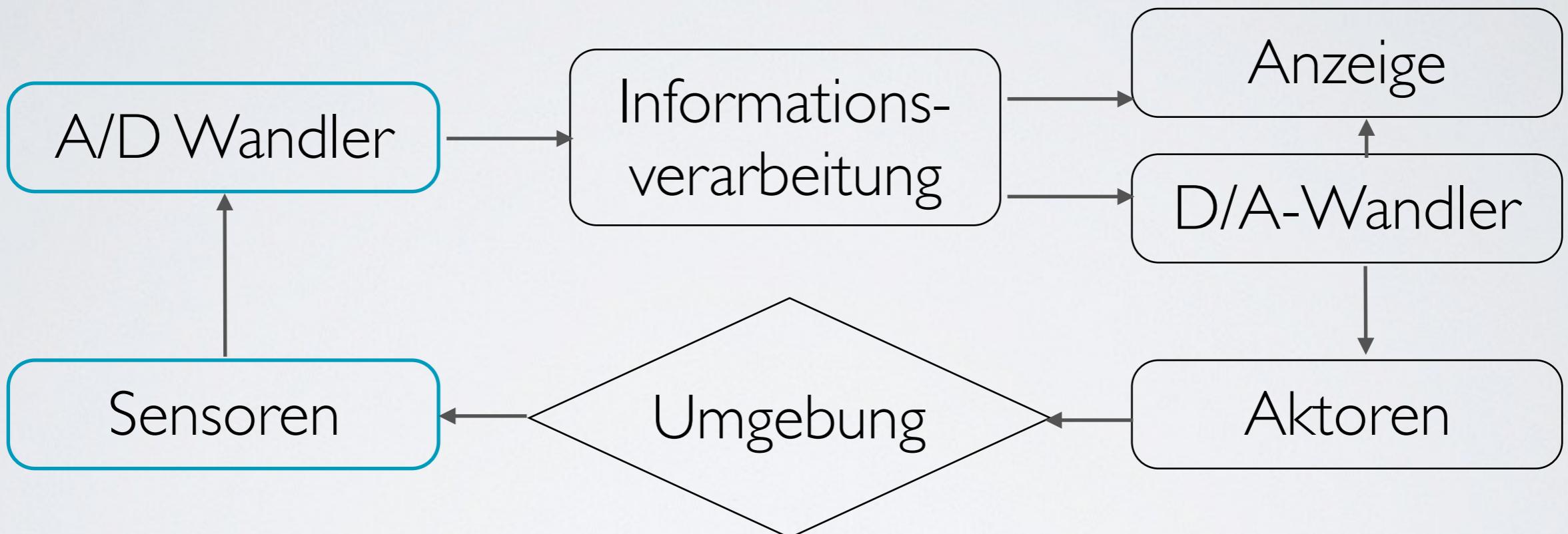
# Mikroprozessoren: Interrupts



# Mikrocontroller: Watchdog

- Watchdog / Wachhund
  - Verhindern eines Absturz / Aufhängen des Mikrocontrollers
  - Startet einen Timer, der bei Ablauf Reset ausführt.
  - Laufendes (nicht abgestürztes) Programm muss den Watchdog regelmäßig zurücksetzen.

# Hardware in a loop



# Eingabe/Sensoren

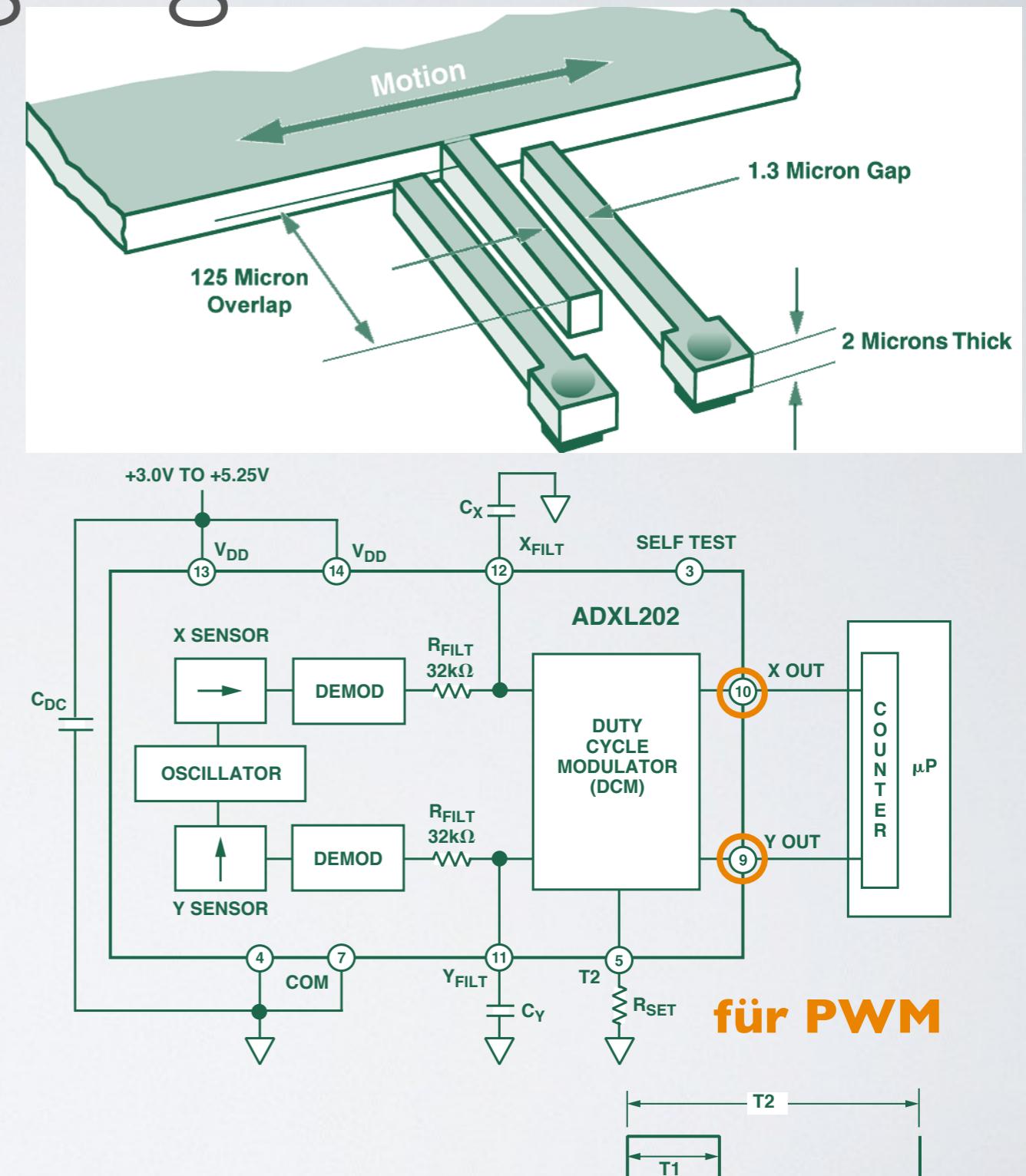
- Große Vielfalt an Sensoren für Informationen aus (physikalischen) Umgebung, z.B. für
  - Gewicht, Beschleunigung, Spannung, Temperatur
- unter Nutzung unterschiedlichster physikalischen Effekte, z.B.
  - Leitfähigkeit
  - Induktion
  - Photoeffekt

# Bildsensor / Kamera

- Gitterförmig Anordnung von Lichtsensoren:
  - Complementary metal-oxide-semiconductor CMOS:
    - Photodetektor und Schaltkreis für jeden Pixel
    - geringer Stromverbrauch, geringe Baugröße, hohe Bildrate
  - Charge-coupled device CCD:
    - Schrittweise Weitergabe der gesammelten Ladung (Potentialtopf-Prinzip) über Nachbarpixel zum Auslesen an Seite des Gitters
    - hohe Bildqualität, lichtempfindlicher, robuster Bauweise
  - CMOS günstiger als CCD

# Beschleunigungssensor

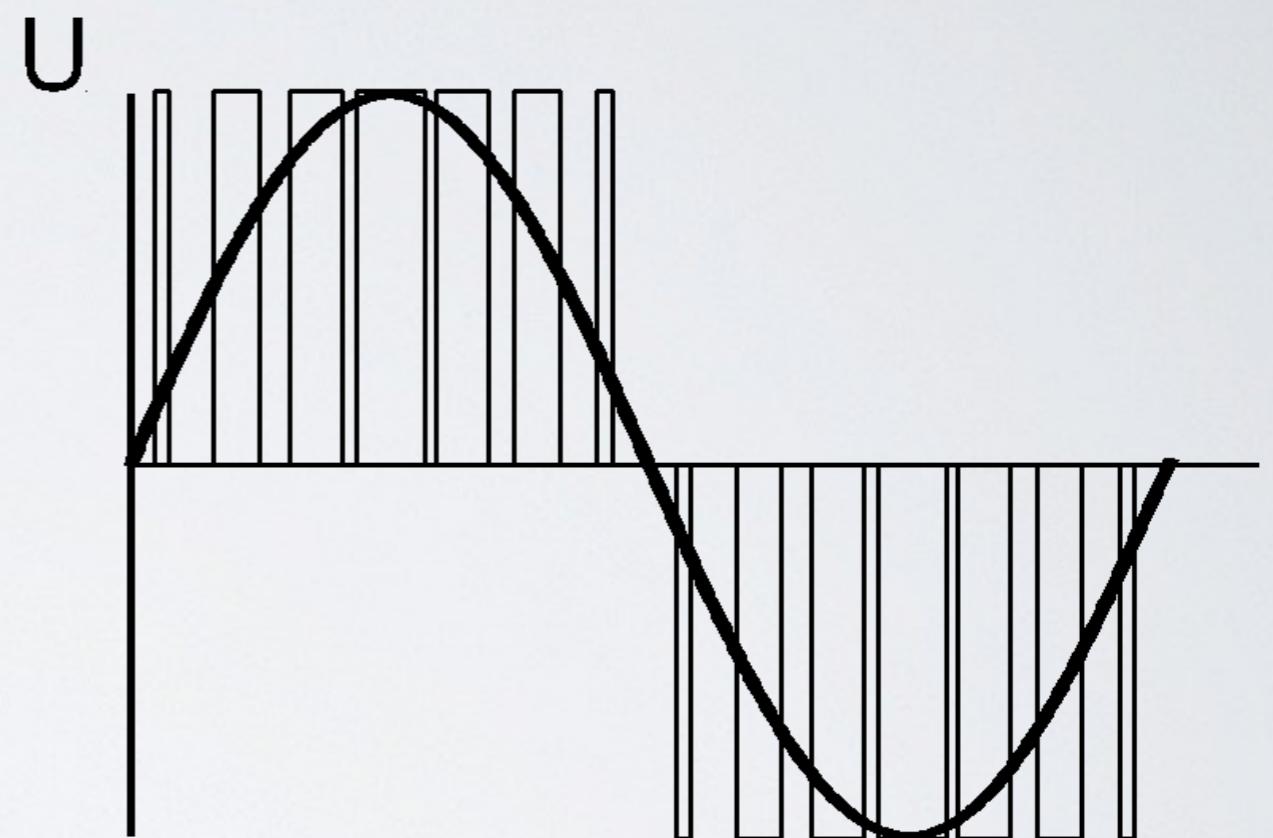
- Beispiel: Kapazitiver MEMS-Beschleunigungssensor
- Micro-Electro-Mechanical-System (MEMS): Zusammenspiel von Elektronik und Mechanik
- Bewegung einer Masse bewirkt Kapazitätsänderung
- Umwandlung der Änderung in Schaltung in bspw. PWM



[Quelle: Weinberg, Dual Axis, Low g, Fully Integrated Accelerometers, Analog Dialog 33-1, 1999]

# Pulsweitenmodulation (PWM)

- Umwandlung einer technischen Größe in eine Signalfolge von Pulsen unterschiedlicher Breite.
- Frequenz des modulierten Signals dabei konstant
- *Duty Cycle:* Anteil von Anzustände an Gesamtintervall
- Vergleich: Ofen auf Temperatur heizen mit An-/Ausschalten



[Quelle: Wikipedia (Autor: WolfgangS):  
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pulsweitenmodulation.png>]

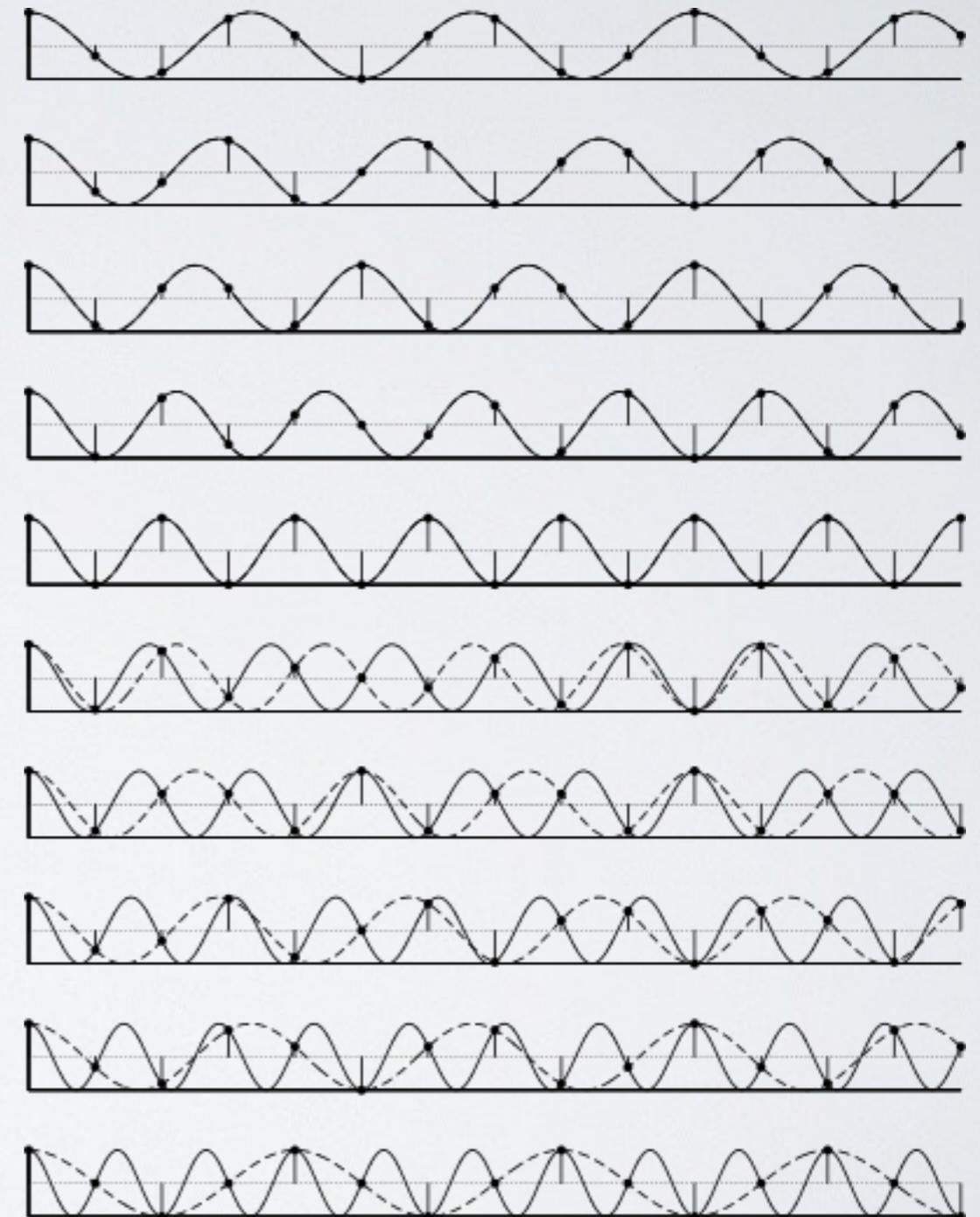
# Abtasttheorem

Nach Shannon-Nyquist:

- Abtastfrequenz  $f_{\text{abtast}}$  für Rekonstruktion des abgetasteten Signals  $f$ :

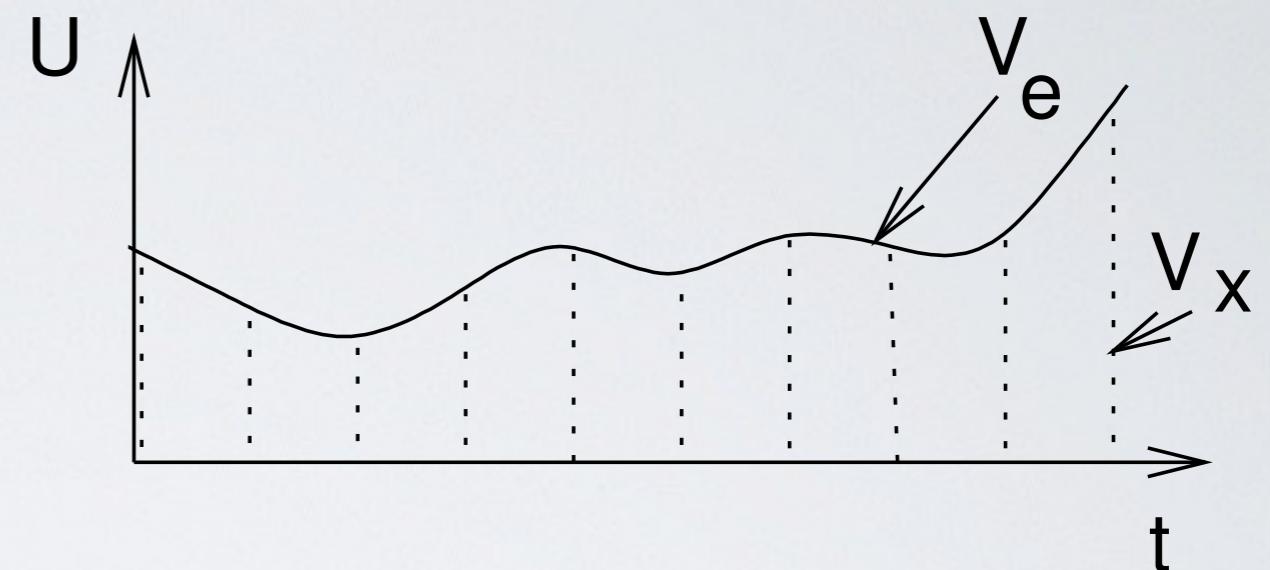
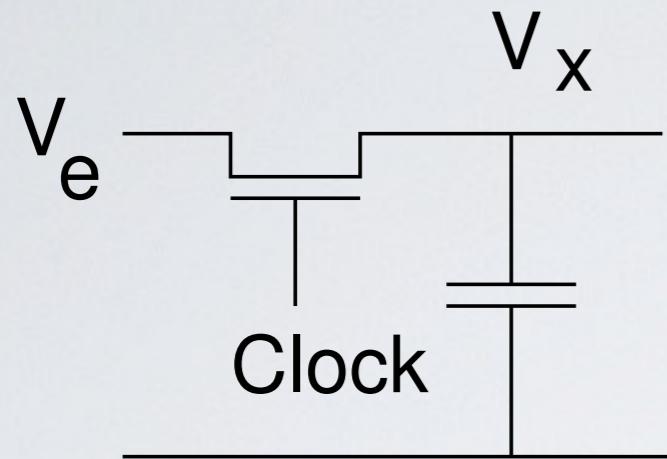
$$f_{\text{abtast}} > 2 (f_{\max} - f_{\min}), \text{ mit}$$

$f_{\min}$  minmale und  $f_{\max}$  maximale Frequenz von  $f$



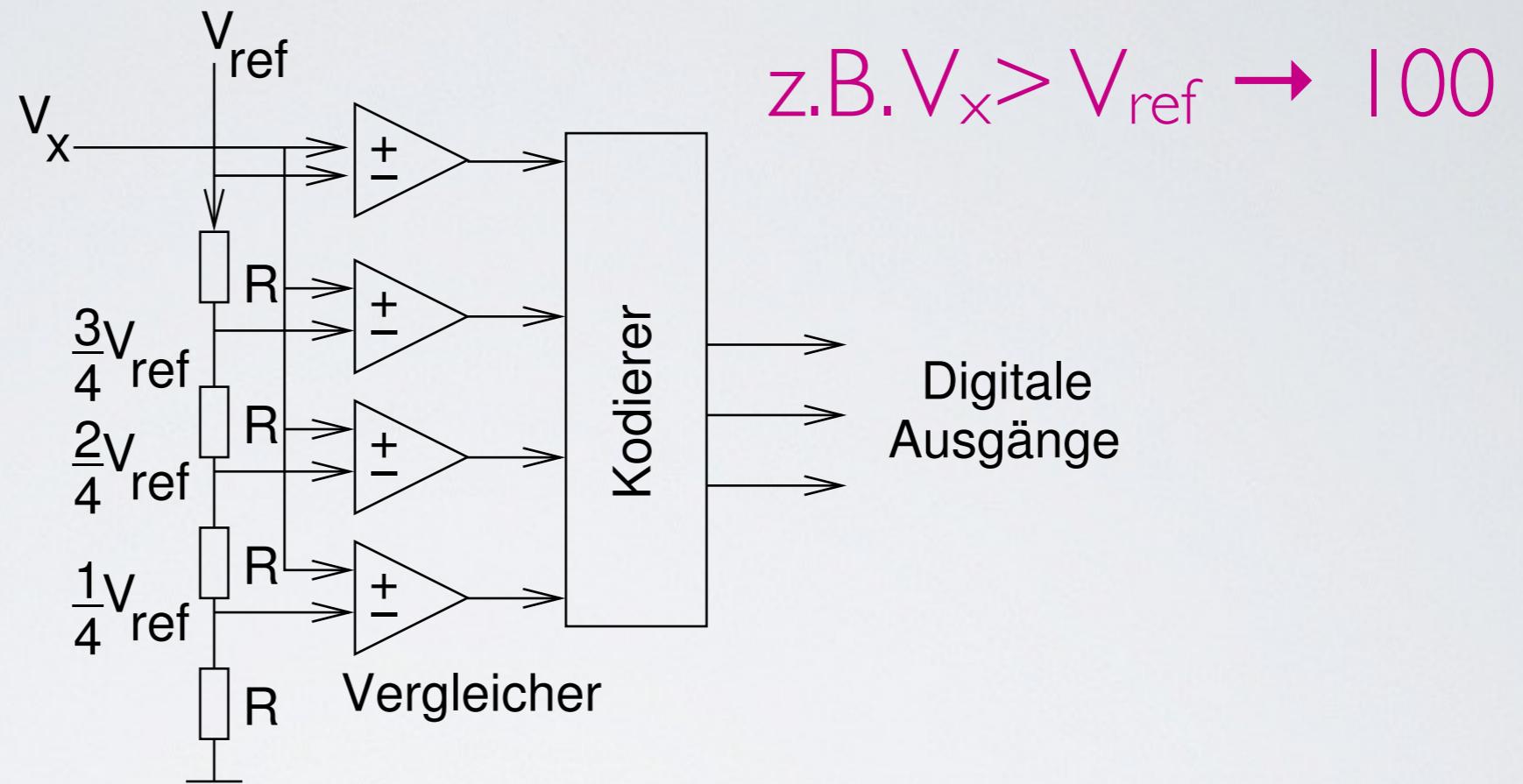
[Quelle: Wikipedia (Peterpall): [http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nyquist\\_Aliasing.svg](http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Nyquist_Aliasing.svg)]

# A/D-Wandlung I



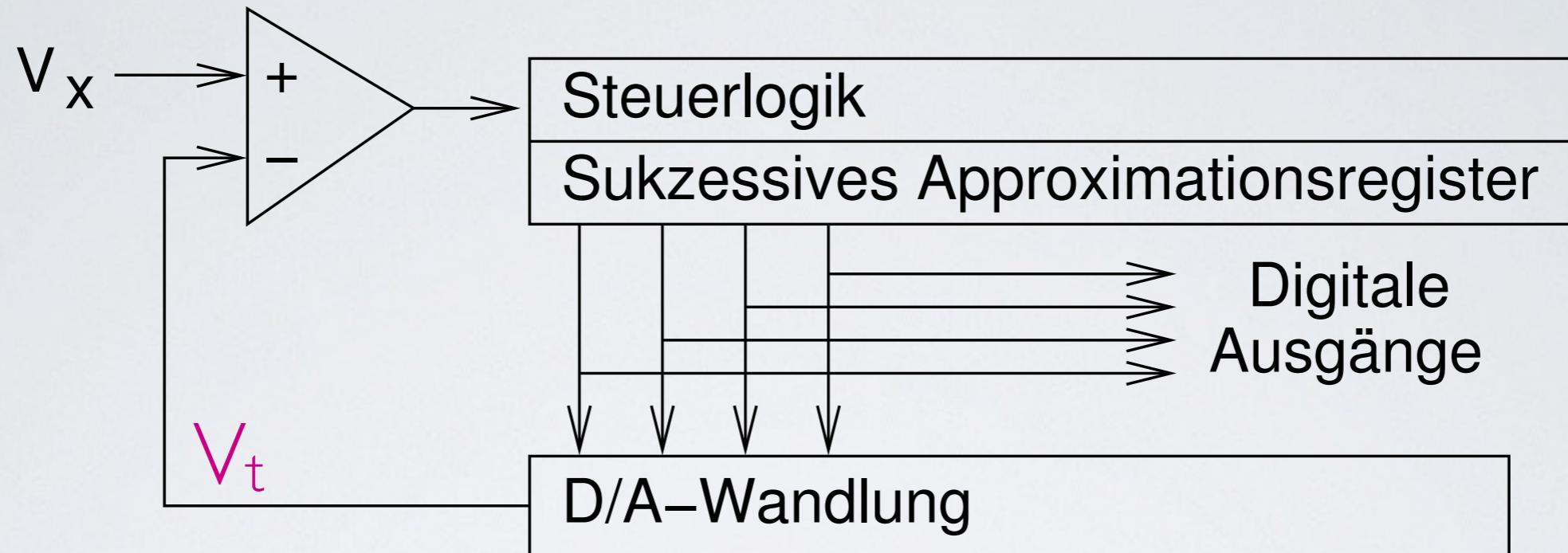
- Sample-and-Hold-Schaltungen:
  - getakteter Transistor und Kondensator
  - Laden des Kondensators mit Eingangsspannung  $V_e$  ergibt diskrete Folge von Werten  $V_x$

# A/D-Wandlung 2



- Quantisierung mittels Flash A/D-Wandlers:
  - Vergleicher testet, ob Spannung an + größer als an -. Ausgabe entsprechend 0 oder 1. Kodierer bildet Ergebnis.

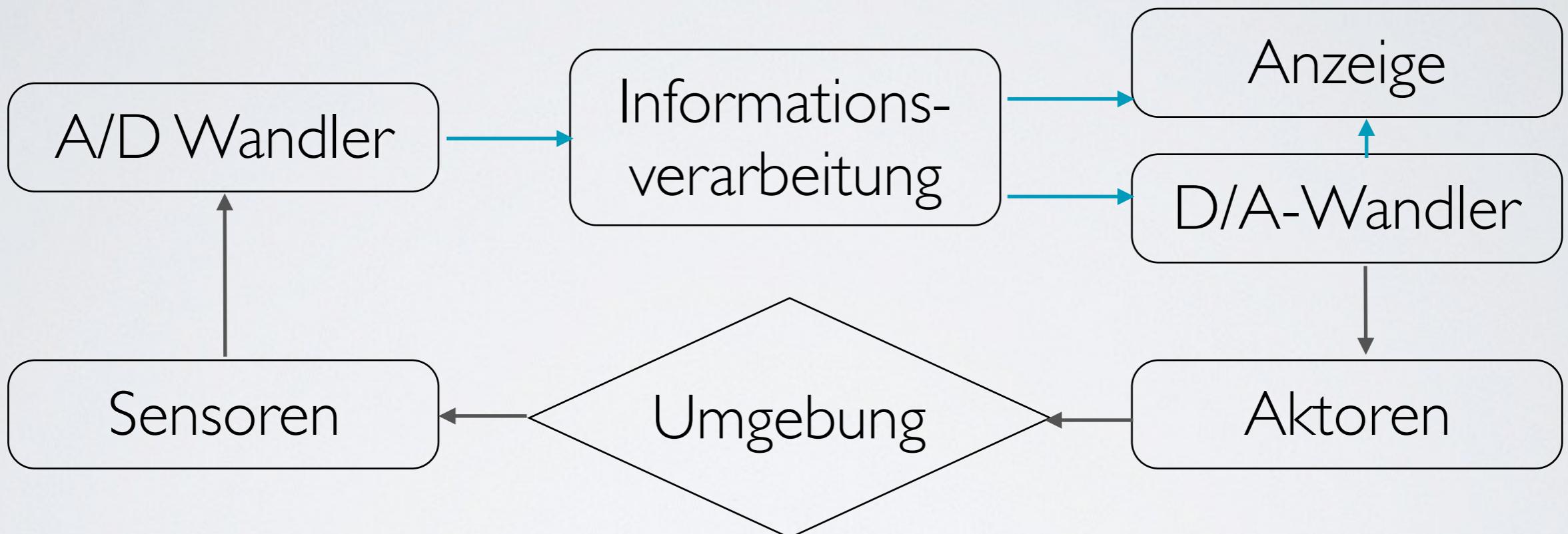
# A/D-Wandlung 3



z.B.  $V_x > V_1 = 0,5 \text{ V} \rightarrow 1xxx, V_x < V_2 = 0,75 \text{ V} \rightarrow 10xx\dots$

- Sukzessive Approximation:
  - Strategie der binären Suche ( $O(\log_2(n))$ ).
  - Start mit 0,5 max. Eingangsspannung.

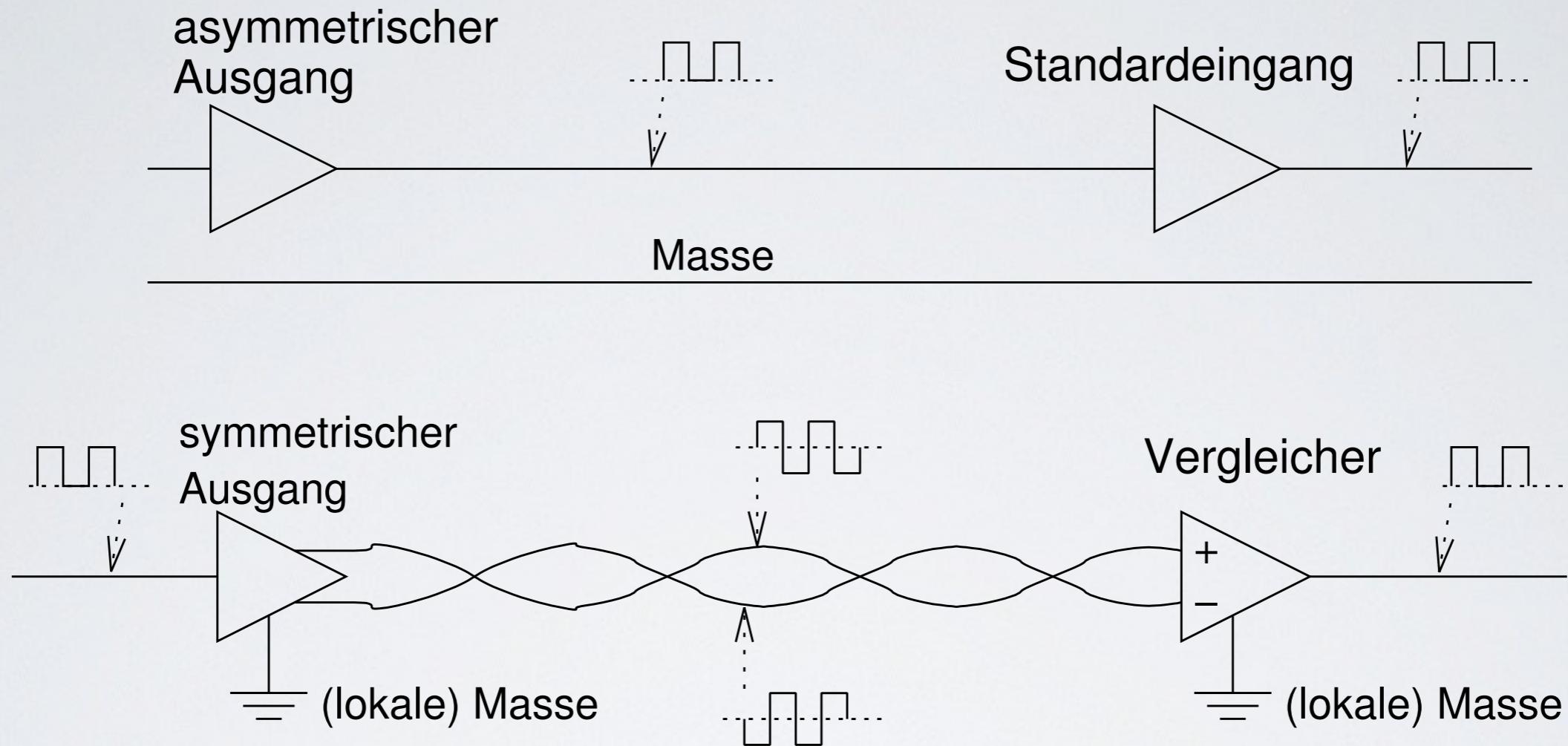
# Hardware in a loop



# Kommunikation/Bus

- Anforderungen an Kommunikationskanäle entsprechen denen an das eingebettete System:
  - Robustheit (z.B. ausgesetzten Temperaturen)
  - Echtzeit
  - Fehlertoleranz (z.B. wenn eine Nachricht nicht ankommt)
  - Effizienz (Verbauung, Kosten)
  - Bandbreite

# Elektrische Robustheit: asymmetrisch vs. symmetrisch Datenübertragung



- Bei zwei Leitungen (symmetrische Datenübertragung) gleichen sich Störungen auf beiden Leitungen aus. Masse stört nicht.

# Echtzeit / Kollisionen

- Carrier-sense multiple access

Bei gleichzeitigem Senden auf Kanal gibt es Kollisionen

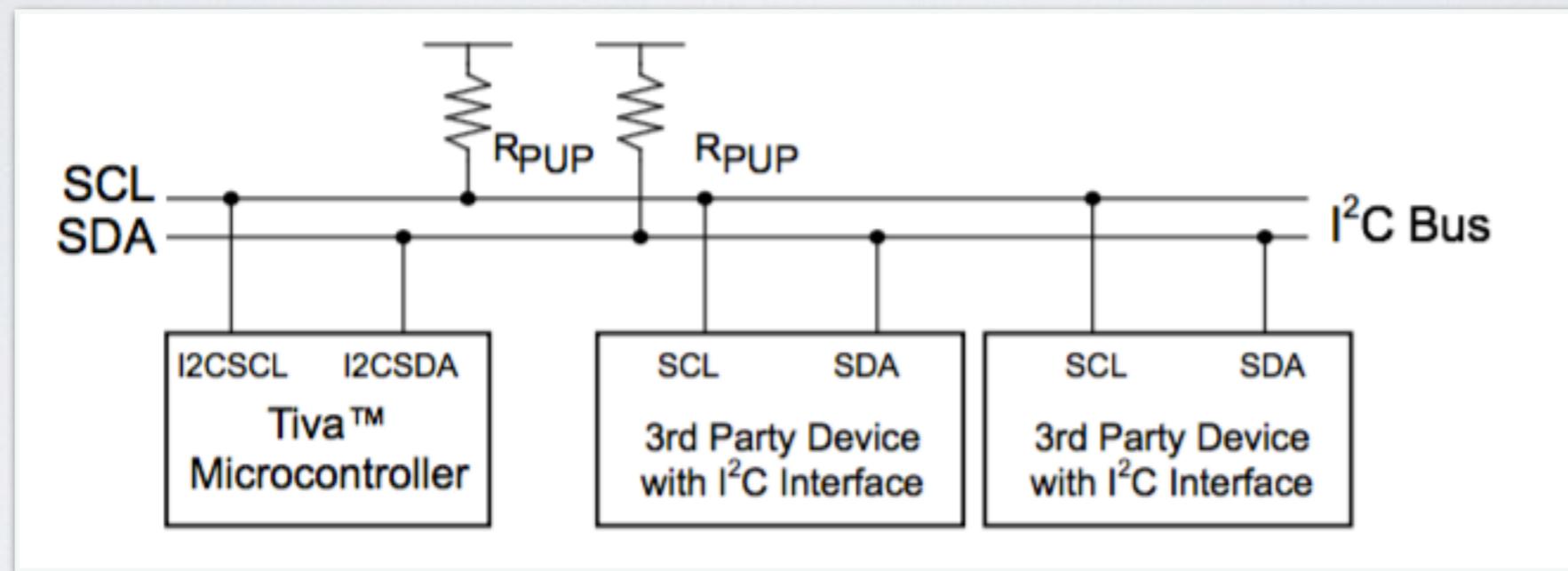
- collision detect (CSMA/CD)
  - Bei Kollision: neuer Versuch nach zufälliger Wartezeit
- collision resolution (CSMA/CR)
  - In Arbitrierung werden Teilnehmern Prioritäten zugewiesen. Bei Kollision hat höhere Priorität Vorrang.

# Beispiel: CAN-Bus

- Controller Area Network CAN
- symmetrische Signalübertragung mit twisted-pair Kabel
- Arbitrierung mit CSMA/CR
- Durchsatz von 10 kBit/s bis 1 MBit/s
- geringe Latenz (ca. 300 µs) für hochpriorisierte Signale

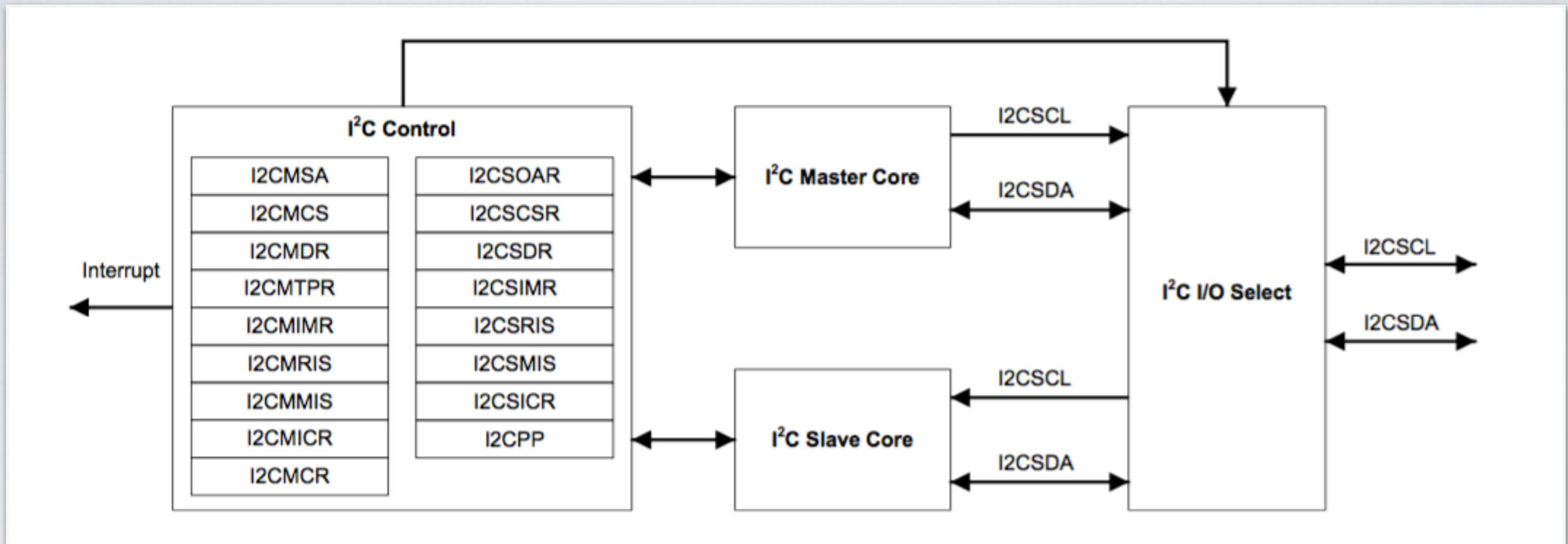
# Beispiel: Inter-Integrated Circuit I<sup>2</sup>C

- Clock (SCL) und Data (SDA) Leitungen
- Arbitrierung

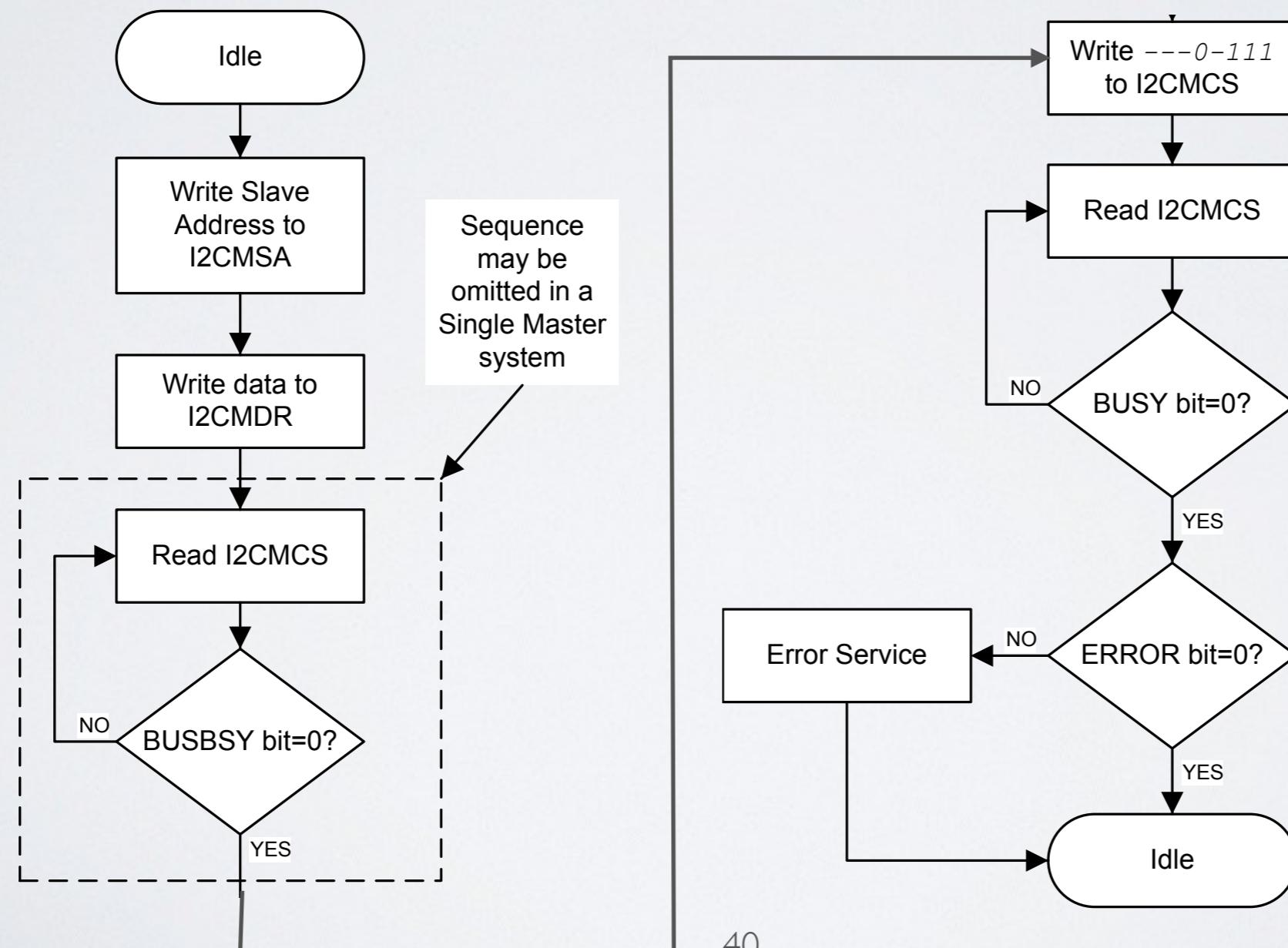
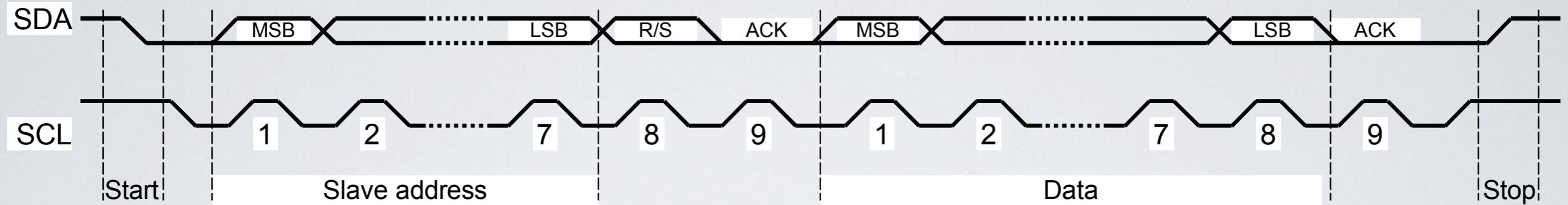


- Standard (100Kbps), Fast-mode plus (1 Mbps), High-speed mode (3.33 Mbps)

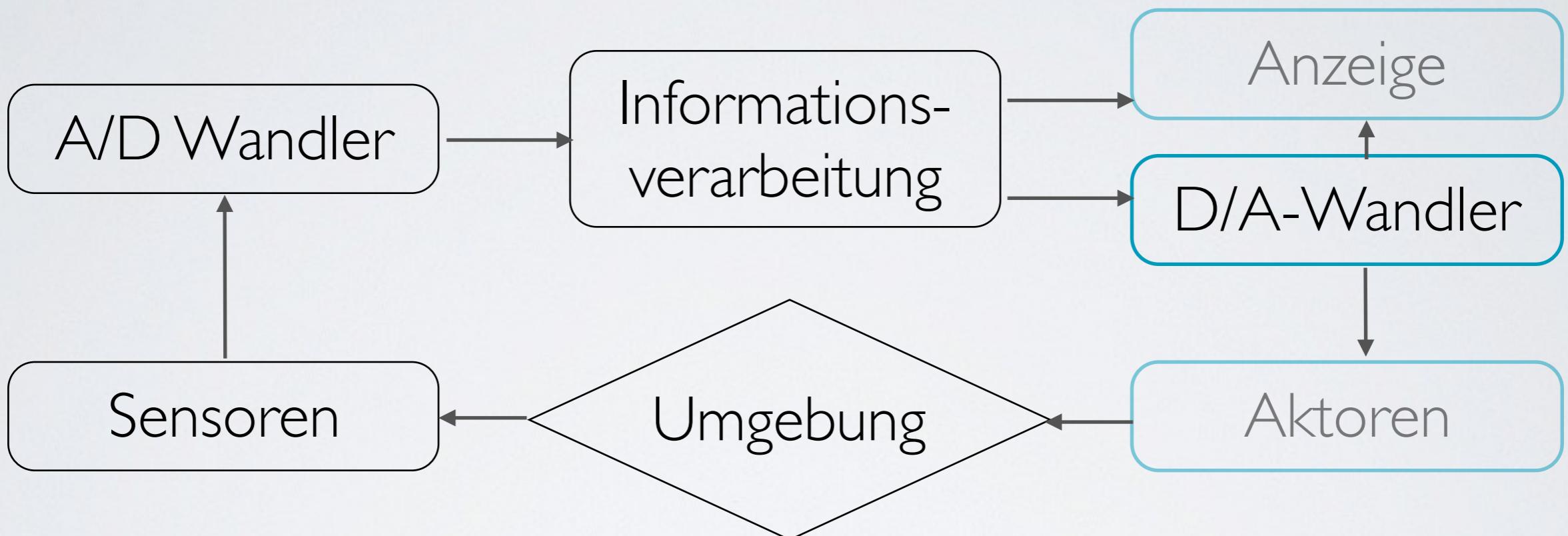
# Beispiel: I<sup>2</sup>C / (2-wire interface)



# Beispiel: I<sup>2</sup>C / (2-wire interface)

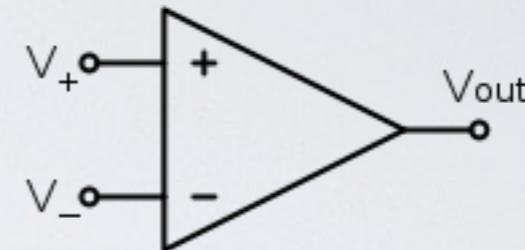


# Hardware in a loop



# Operationsverstärker

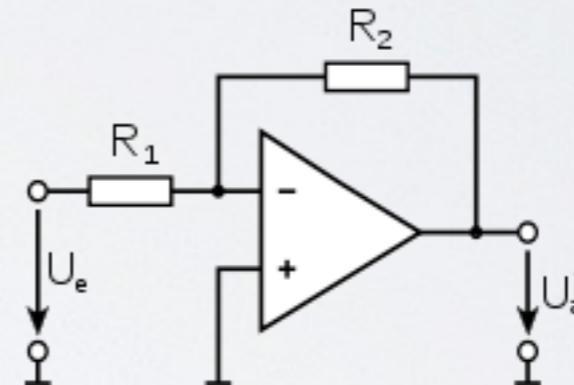
- Operationsverstärker:



- Spannungsverstärkung mit Geraudeausverstärkung der Eingangsspannungsdifferenz

$$\bullet U_{\text{ausgang}} = (U_+ - U_-) G_{\text{gv}}$$

- Invertierender Verstärker:

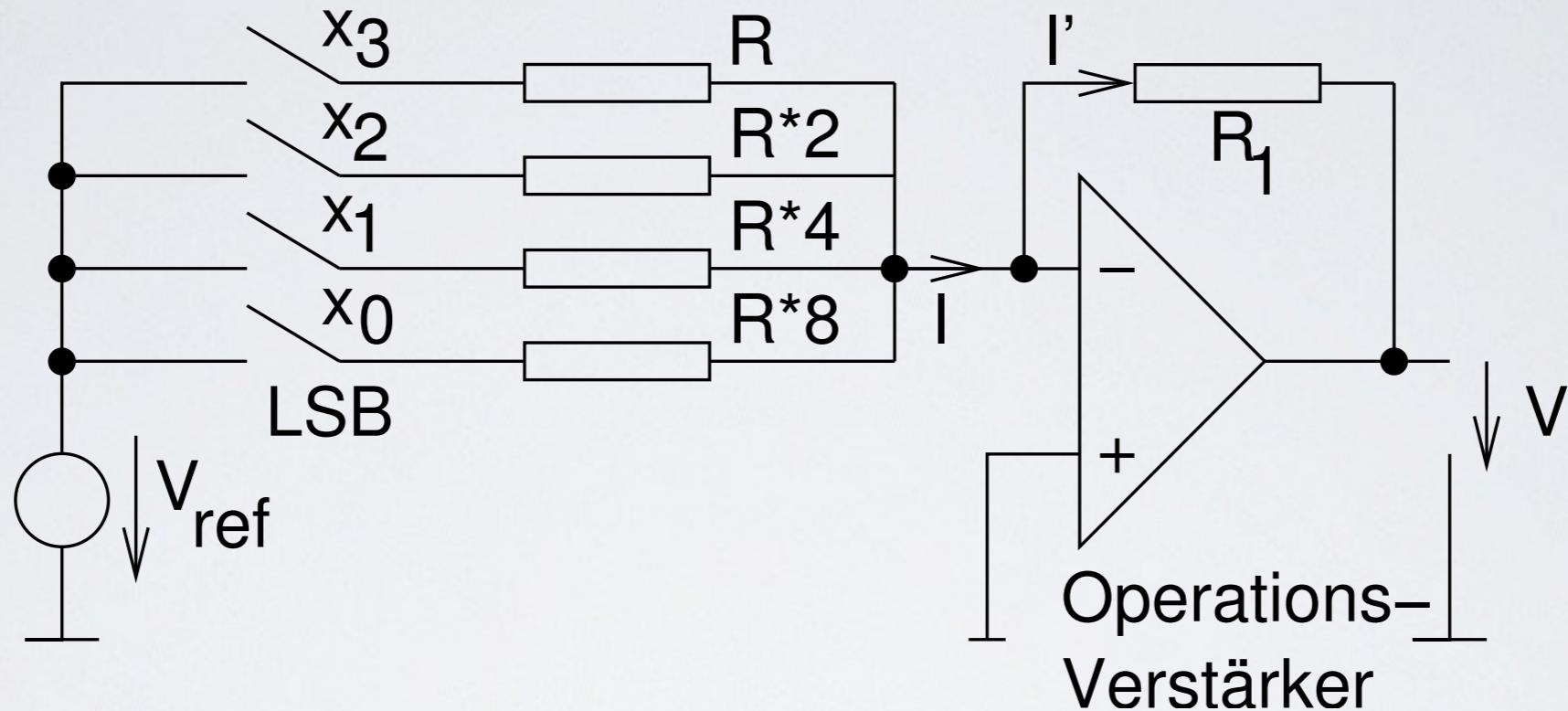


- virtuelle Masse am invertierenden Eingang (-)

$$- U_a = -U_{R2} = -I R_2 = -(U_e/R_1)R_2 = -(R_2/R_1)U_e$$

[Quelle: Wikipedia: Operationsverstärker, <http://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverstärker>]

# Ausgabe: D/A Wandler

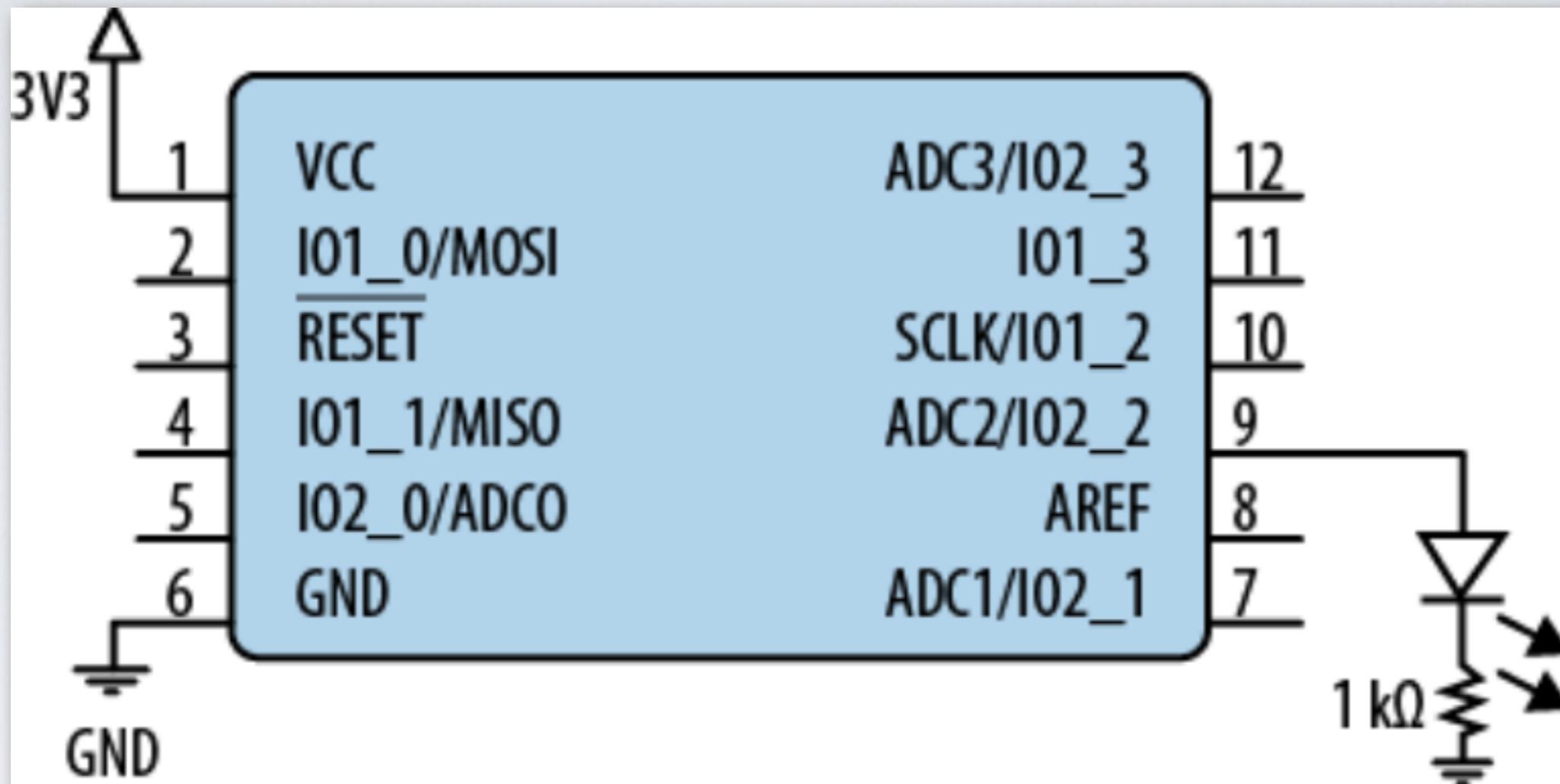


Hier:

$$-V = V_{\text{ref}} R_1 / R \sum_{i=0}^3 x_i 2^{i-3} = V_{\text{ref}} R_1 / (8R) \text{ nat}(x)$$

mit  $\text{nat}(x)$  als Zahl des Bitvektors  $x$ .

# Beispiel: Einschalten der LED

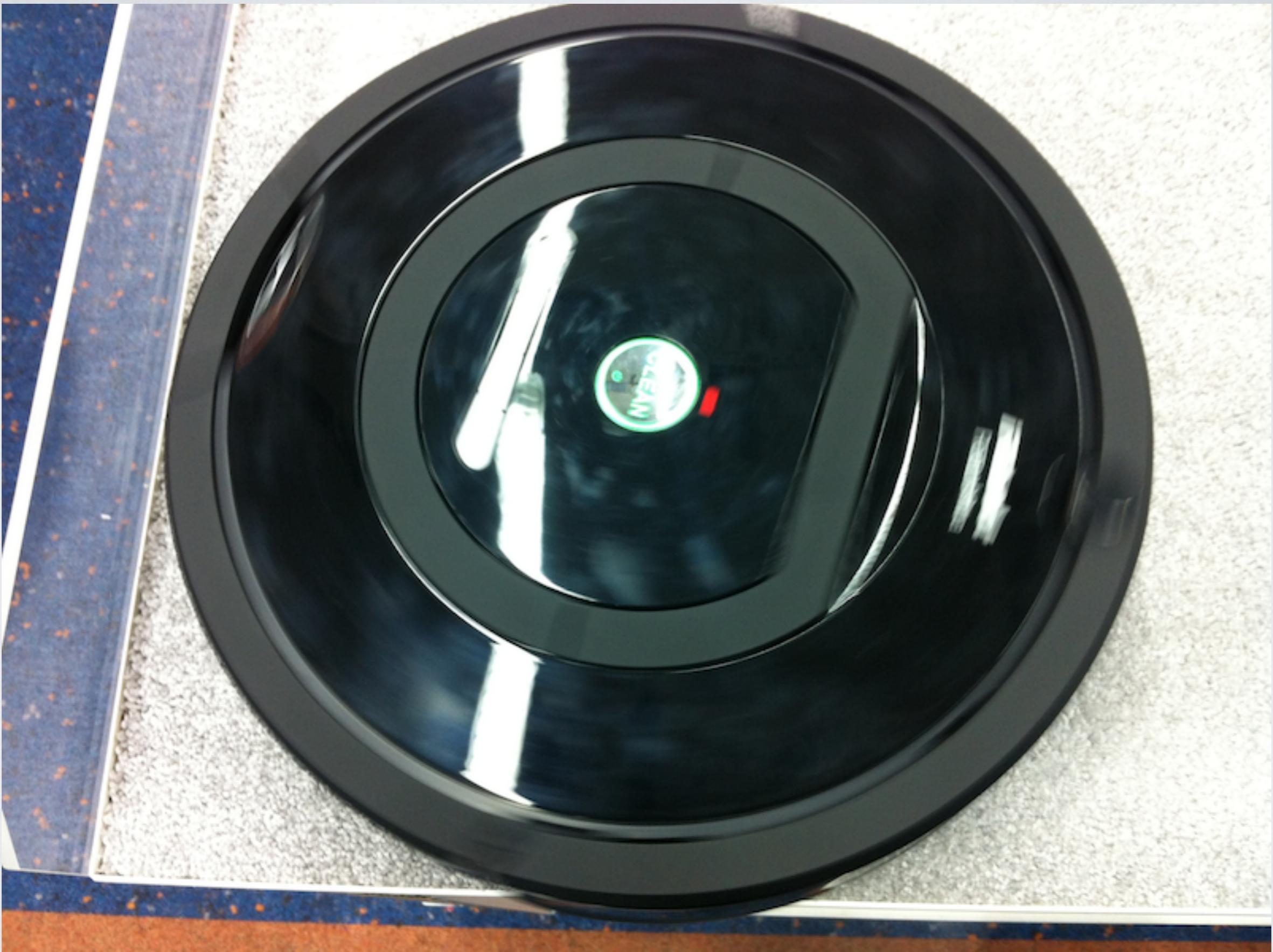


[Quelle: White, Making Embedded Systems]

```
P2DIR |= (1 << 2); // set to output  
P2OUT |= (1 << 2); // turn on
```

# Zusammenfassung

- Beispiele von Hardware eingebetteter Systeme
  - Sensoren
  - A/D Wandler
  - Mikrocontroller
  - D/A Wandler
  - Aktoren
  - Kommunikation/Bus



# Beispiel einer Anwendung: Staubsauger

- Eigenständig arbeitender Staubsauger
- Sensoren
  - Infrarotsensoren zur Entfernungsmessung
  - Kollisionssensoren
  - Höhensensoren zur Abgrunddetektion
  - Schmutzsensoren
  - Verschiedene Fahrstrategien



Beispiel eines Staubsaugerroboters

# Literatur / Quellen

- **Texas Instruments**, An Introduction to the TivaTM C Series Platform of Microcontrollers, <http://www.ti.com/lit/wp/spmy010/spmy010.pdf>
- **Texas Instruments**, Tiva TM4C123GH6PM, Data Sheet, URL: <http://www.ti.com/lit/ds/spms376e/spms376e.pdf>
- **Texas Instruments**, Tiva C Series TM4C123G LaunchPad, User's Guid, URL: <http://www.ti.com/lit/ug/spmu296/spmu296.pdf>
- Peter **Marwedel**, Eingebettete Systeme, Springer-Verlag, 2008
- Harvey **Weinberg**, Dual Axis, Low g, Fully Integrated Accelerometers, Analog Dialogue 33-1, 1999, URL: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/cd/vol33n1.pdf>
- Elicia **White**, Making Embedded Systems, O'Reilly 2011
- Wikipedia, Operationsverstärker, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Operationsverstärker>
- Wikipedia, Von-Neumann-Architektur, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Von-Neumann-Architektur>
- Wikipedia, Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Abtasttheorem>
- Wikipedia, Pulsweitenmodulation, URL: <http://de.wikipedia.org/wiki/Pulsweitenmodulation>
- **Stand aller Internetquellen: 22.05.2018**