



64-210 Eingebettete Systeme

<https://lernen.min.uni-hamburg.de>

[https://tams.informatik.uni-hamburg.de/
lectures/2022ss/vorlesung/es](https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2022ss/vorlesung/es)

Andreas Mäder



Universität Hamburg
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Informatik
Technische Aspekte Multimodaler Systeme

Sommersemester 2022



1. Organisatorisches

Vorlesung

Übungen

Allgemein

2. Literatur



- ▶ Di. 12:15-13:45 D 125/129
Fr. 12:15-13:45 B 201
- ▶ Vorlesung folgt: „*Embedded System Design*“ von P. Marwedel
- ▶ Springer eBook
link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-33437-6 -de-
link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60910-8 -en-
- ▶ Originalmaterial der TU Dortmund
daes.cs.tu-dortmund.de/embedded-system-text-book
- ▶ diverse gute Lehrbücher — Empfehlungen s.u.
- ▶ Informationen und Downloads in dem Moodle — **aktuell!**
- ▶ eingestreute Hinweise auf aktuelle Themen und Vertiefung



Organisation und Material

- ▶ Folien, Videomaterial und die Foren im MIN-Moodle:
<https://lernen.min.uni-hamburg.de>
- ▶ Vorlesung in Präsenz
ergänzend Videos (aus den letzten beiden Online-Jahren)
- ▶ bei Unklarheiten: Fragen in entsprechenden Q&A Foren stellen
⇒ die Antworten bilden dort eine Sammlung „zum Nachlesen“



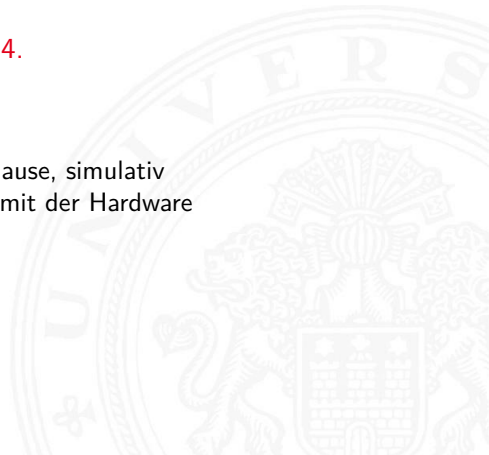
Übungen

tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2022ss/vorlesung/es/uebungen

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme

- ▶ vier Gruppen, Di. nach und Fr. vor Vorlesung
- ▶ Di. 14:15-15:45 Online / F 304 + F 326
Fr. 10:15-11:45 Online / F 304 + F 326
- ▶ Beginn: ab dem **05.04.** / **08.04.**
- ▶ hybride Lehre
 - ⇒ zu Beginn: Einzelarbeit zu Hause, simulativ
 - ⇒ später: Präsenzübungen mit der Hardware





Grundidee

- ▶ praktische Ergänzung zur Vorlesung
- ▶ Programmieraufgaben mit Mikrocontrollern (und FPGAs)
 - ▶ Anschluss von Sensoren und Aktoren
 - ▶ Kontrollaufgaben (Steuerung durch endlichen Automaten)
 - ▶ Interruptbehandlung
 - ▶ einfache Schnittstellen (seriell, I²C...)
 - ▶ Kommunikation
 - ▶ ...
- ▶ spätere Aufgaben bauen auf Vorherigen auf
 - ⇒ fertige Lösungen abspeichern und gut dokumentieren
 - ⇒ automatisierte Tests erstellen

Übungen: Hardwareplattformen

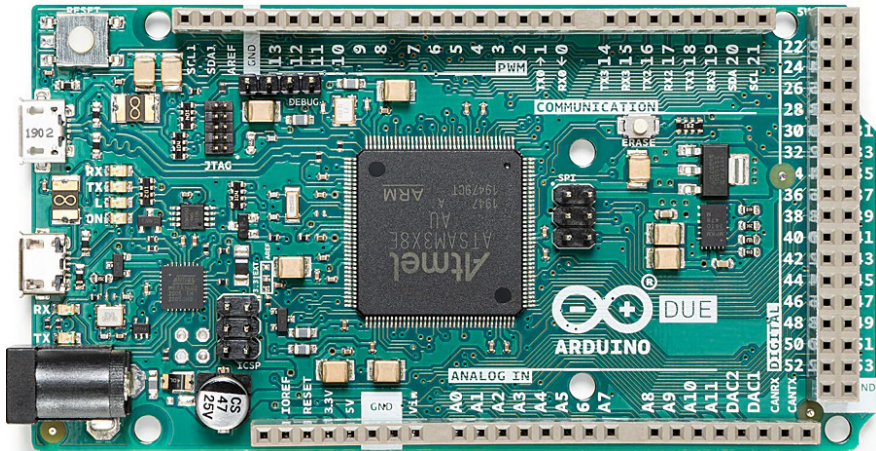
µController System

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme

► Arduino Due

www.arduino.cc



Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

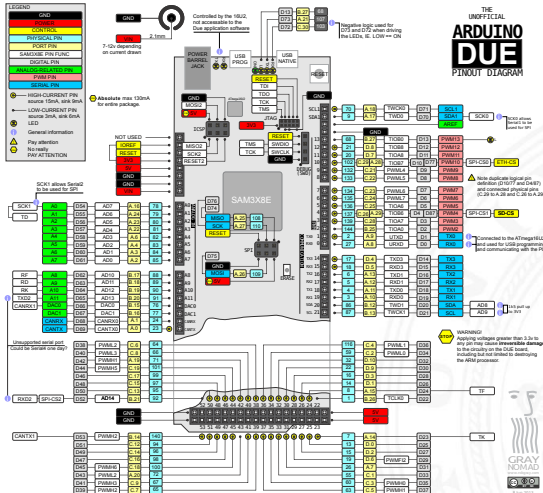
μController System

- ▶ Arduino Due www.arduino.cc
 - ▶ Microcontroller AT91SAM3X8E ARM Cortex-M3, 32bit
 - ▶ Clock Speed 84 MHz
 - ▶ Operating Voltage 3,3V
 - ▶ Digital I/O Pin 54 (12 × PWM output)
 - ▶ Analog Input Pins 12
 - ▶ Analog Outputs Pins 2 (DAC)
 - ▶ SRAM 96 KB (two banks: 64KB and 32KB)
 - ▶ Flash Memory 512 KB
- ▶ typische Prototypenplatine mit frei belegbaren Ein-/Ausgängen
- ▶ Anschluss externer Komponenten über Pfostenleisten
- ▶ sehr große Anzahl fertiger „Shields“
 - ▶ Sensoren
 - ▶ Aktoren, Motortreiber
 - ▶ Displays
 - ▶ Schnittstellen

Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

µController System

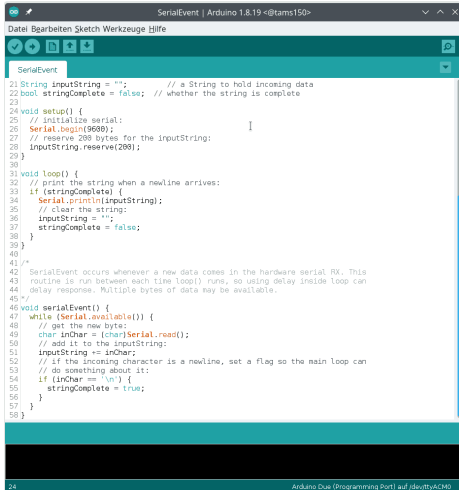
► I/O-Schema



Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

µController System

► Arduino-IDE / C-Code



```
SerialEvent | Arduino 1.8.19 <@rams150>
Datei Bearbeiten Sketch Werkzeuge Hilfe
SerialEvent
21 String inputString = ""; // a String to hold incoming data
22 bool stringComplete = false; // whether the string is complete
23
24 void setup() {
25   // initialize serial:
26   Serial.begin(9600);
27   // reserve 200 bytes for the inputString:
28   inputString.reserve(200);
29 }
30
31 void loop() {
32   // print the string when a newline arrives:
33   if (stringComplete) {
34     Serial.println(inputString);
35     // clear the string:
36     inputString = "";
37     stringComplete = false;
38   }
39 }
40
41 /*
42  SerialEvent occurs whenever a new data comes in the hardware serial RX. This
43  routine is run between each time loop() runs, so using delay inside loop can
44  delay response. Multiple bytes of data may be available.
45 */
46 void serialEvent() {
47   while (Serial.available()) {
48     // get the new byte:
49     char inChar = (char)Serial.read();
50     // add it to the inputString:
51     inputString += inChar;
52     // if the incoming character is a newline, set a flag so the main loop can
53     // do something about it:
54     if (inChar == '\n') {
55       stringComplete = true;
56     }
57   }
58 }
```

24 Arduino Due (Programming Port) auf /dev/ttyACM0

Übungen: Hardwareplattformen

FPGA-Prototypensystem

▶ Altera DE0-Nano

www.terasic.com.tw

www.intel.de/content/www/de/de/products/programmable.html

▶ programmierbare Hardware: FPGA

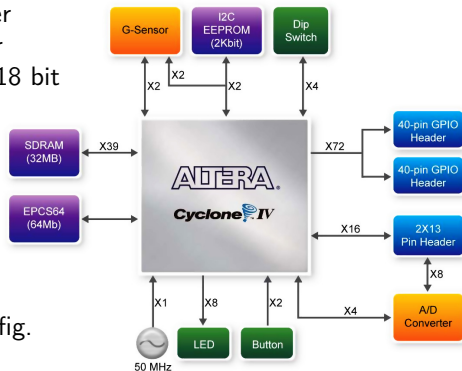
- ▶ Cyclone IV EP4CE22F17C6N [60 nm Prozess, 2009]
- ▶ 153 I/O Pins, gesamt 256 Pins
- ▶ 22 320 LEs \approx 270 000 Gatter
- ▶ 594 Kbit (interner) Speicher
- ▶ 66 HW-Multiplizierer: 18×18 bit
- ▶ 4 PLLs

▶ On-Board Speicher

- ▶ 32MB SDRAM
- ▶ 2Kbit I²C EEPROM

▶ Konfiguration

- ▶ über USB Schnittstelle
- ▶ EPCS64: Flash, serielle Konfig.





Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

FPGA-Prototypensystem

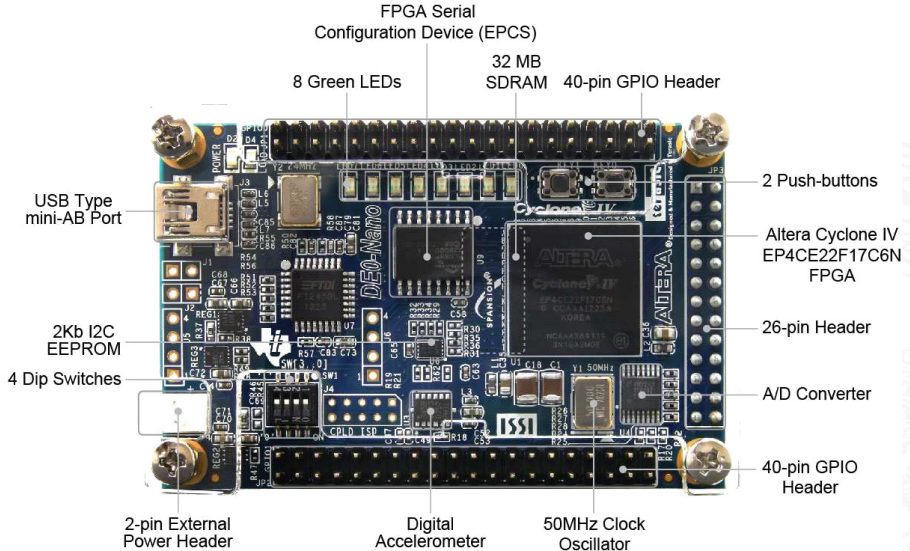
- ▶ Ein-/Ausgabe
 - ▶ 8 LEDs
 - ▶ 2 Taster
 - ▶ 4 DIP Schalter
- ▶ Beschleunigungssensor: ADXL 345, 3-Achsen, 13-bit Auflösung
- ▶ A/D Wandler: ADC128S022, 8-Kanal, 12-bit Auflösung
- ▶ Erweiterungsstecker
 - ▶ 2 × 40-Pin: 72 I/O Pins + Spannungsversorgung; 5V, 3,3V, Gnd
 - ▶ 26-Pin: 16 I/O Pins + 8 analoge Eingänge

Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

FPGA-Prototypensystem

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme



Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

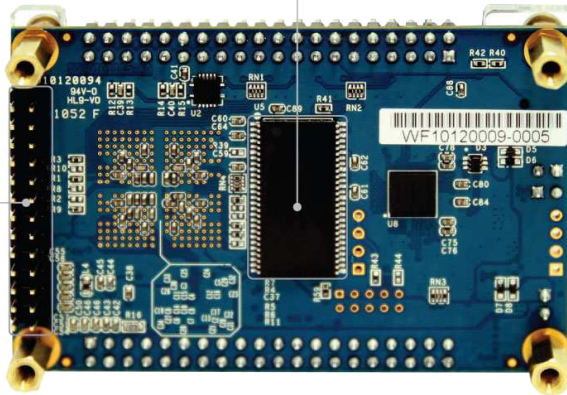
FPGA-Prototypensystem

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme

32MB SDRAM

2X13 Pin Header





Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

FPGA-Prototypensystem

Implementationsmöglichkeiten

1. Softwareentwurf

- ▶ IP-Komponenten (*Intellectual Property*)
Speicher, Busse, I/O-Schnittstellen. . .
- ▶ 32-bit Prozessor (NIOS II)
- ▶ Softwareentwicklung: C Programmierung
Eclipse + Cross-Compiler

2. Hardwareentwurf: Hardwarebeschreibungssprachen hier: VHDL

3. gemischt: Hardware + Software + IP-Komponenten

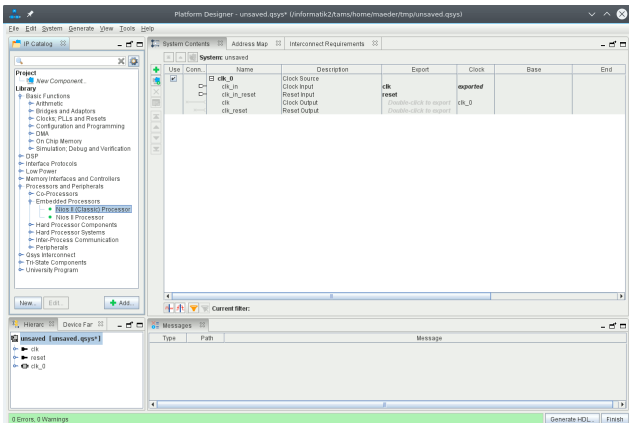
Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

FPGA-Prototypensystem

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme

► IP-Komponenten



The screenshot shows the Platform Designer IP Catalog window. The main pane displays a table of IP components for the 'System: unsaved' project. The table has columns for 'Use', 'Conn.', 'Name', 'Description', 'Export', 'Clock', 'Base', and 'End'. The visible components are:

Use	Conn.	Name	Description	Export	Clock	Base	End
		clk_0	Clock Source				
		clk_in	Clock Input				
		clk_in_reset	Reset Input	clk_reset	exported		
		clk	Clock Output			clk_0	
		clk_reset	Reset Output				

The 'Messages' pane at the bottom is empty. The status bar at the bottom left shows '0 Errors, 0 Warnings'. The 'Generate HDL' and 'Finish' buttons are visible at the bottom right.

Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

FPGA-Prototypensystem

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme

► NIOS Prozessor

Nios II (Classic) Processor
altera_nios2_qsys

Block Diagram
Show signals

Core Nios II | Caches and Memory Interfaces | Advanced Features | MMU and MPU Settings | JTAG Debug Module

Select a Nios II Core

Nios II Core

Nios IIe
 Nios II
 Nios IIT

	Nios II/e	Nios II/s	Nios II/T
Nios II Selector Guide	RISC 32-bit	RISC 32-bit Instruction Cache Branch Prediction Hardware Multiply Hardware Divide	RISC 32-bit Instruction Cache Branch Prediction Hardware Multiply Hardware Divide Barrel Shifter Data Cache Dynamic Branch Prediction
Memory Usage (e.g. Stratix IV)	Two MRMs (or equiv.)	Two MRMs + cache	Three MRMs + cache

Hardware Arithmetic Operation
Hardware multiplication type: Embedded Multipliers
 Hardware divide

Reset Vector
Reset vector memory: None
Reset vector offset: 0x0000000
Reset vector: 0x0000000

Exception Vector
Exception vector memory: None
Exception vector offset: 0x0000000
Exception vector: 0x0000000

MMU and MPU
 Include MMU
Only include the MMU using an operating system that explicitly supports an MMU.
Fast TLB Miss Exception vector memory: None
Fast TLB Miss Exception vector offset: 0x0000000
Fast TLB Miss Exception vector: 0x0000000

❌ Error: nios2_qsys_0 Reset slave is not specified. Please select the reset slave
❌ Error: nios2_qsys_0 Exception slave is not specified. Please select the exception slave
⚠ Warning: nios2_qsys_0 Nios II Classic cores are no longer recommended for new projects

Cancel Finish

Übungen: Hardwareplattformen (cont.)

FPGA-Prototypensystem

Organisatorisches - Übungen

64-210 Eingebettete Systeme

▶ VHDL-Code

```
de0Board.vhd -- Kate
File Edit View Projects Bookmarks Sessions Tools Settings Help
de0Board.vhd cDisp14x6.vhd
-- normal display, no timeout:
when dNorm1 =>
  if ack = req then
    then sTransition(dClear1, dispClear);
  end if;
-- clear display:
when dClear1 =>
  if ack = req then
    then sTransition(dAllChars, dispChar, timeC/4);
    char <= character'left';
  end if;
-- display char-set: 0..255, timeC/4 between chars:
when dAllChars =>
  if timer = 0 then
    if ack = req then
      if char = character'right'
        then sTransition(dInv, dispInverse, timeC);
        else sTransition(dAllChars, dispChar, timeC/4);
        char <= character'succ(char);
      end if;
    else
      timer := timer-1;
    end if;
  else
    timer := timer-1;
  end if;
-- invert display, for timeC:
when dInv =>
  tTransition(dNorm2, dispNormal, timeC);
-- normal display, no timeout:
when dNorm2 =>
  if ack = req then
    then sTransition(dClear2, dispClear);
  end if;
-- clear display:
when dClear2 =>
  if ack = req then
    then sTransition(dXV, dispPosXY);
    xPos <= 4;
    yPos <= 2;
  end if;
-- set xPos=4, yPos=2:
when dXV =>
  if ack = req then
    then sTransition(dString, dispChar);
    invC <= 1;
    char <= strReg(1);
    strReg := strReg(2 to strReg'right)'1';
    strCnt <= strCnt-1;
  end if;
-- string output, no timeout:
when dString =>
  if strCnt = 0 then
    state <= halt;
    invC <= 0;
  else
    sTransition(dStrIno, dispChar);
  end if;
Line 1, Column 1
INSERT Soft Tabs: 4 (8) UTF-8 VHDL
Q Search and Replace
```

```
cDisp14x6.vhd -- Kate
File Edit View Projects Bookmarks Sessions Tools Settings Help
de0Board.vhd cDisp14x6.vhd
-- architecture
architecture pcd854 of cDisp14x6 is
  type stateTy is (power, reset, init, active);
  signal state : stateTy;
  signal dispEna : std_logic;
  signal ackL : std_logic;
  signal charBit : natural range 0 to 4031;
  signal charReg : std_logic_vector (47 downto 0);
  signal romA : std_logic_vector ( 6 downto 0);
  signal romD : std_logic_vector (39 downto 0);
begin
  -- set by LID
  bgLED <= '1' when bgLight else '0';
  -- component instantiations
  rom: charROM port map (romA, clk, romD);
  ctrlP: process (clk, rstn) is
    procedure stInit is
      state <= nextState;
      sReg <= s0Data;
      charBit <= regBit;
      charReg <= regData;
    end procedure stInit;
  begin
    state <= nextState;
    sReg <= s0Data;
    charBit <= regBit;
    charReg <= regData;
    end procedure stInit;
  begin
    if rstn = '0' then -- async. reset
      dispEna <= '0';
      state <= power;
      sReg <= 1;
      sReg <= 0;
      charReg <= (others <= '0');
    elsif rising_edge(clk) then
      case state is
        -- power on / hardware reset
        when power =>
          ackL <= '1';
          dispEna <= '1';
          state <= reset; -- 1. reset pcd854
          sReg <= 0;
          -- reset controller:
          when reset =>
            sReg <= 1;
            stInitInit, 0, 39, -- 2. setup pcd854
            intExtInt & setInvC & setVoc & intStrInC & dispNormC & x'00';
            -- initialize controller.
      end case;
    end if;
  end process ctrlP;
end architecture pcd854;
Line 117, Column 1
INSERT Soft Tabs: 4 (8) UTF-8 VHDL
Q Search and Replace
```

- ▶ über die Moodle Foren / E-Mail an mich
- ▶ Fehler und Ungenauigkeiten in den Folien und Materialien bitte melden
- ▶ Vorschläge und Hinweise auf Tools, schöne Lehrmaterialien etc. sind immer willkommen!

Problem: unterschiedliches Vorwissen!

- ▶ Voraussetzungen: insbesondere **Rechnerstrukturen** aber auch: Assemblerprogrammierung, Betriebssysteme, Netzwerke. . .
- ▶ generell: Interesse an Hardware



Dr. Andreas Mäder

E-Mail maeder@informatik.uni-hamburg.de

Tel. +49 40 42883 2502

Büro Informatikum, Haus F 317



[Mar21] P. Marwedel:

Eingebettete Systeme – Grundlagen eingebetteter Systeme in Cyber-Physikalischen Systemen.

2. Auflage, Springer-Verlag, 2021. ISBN 978-3-658-33437-6

Primärliteratur: Komplette Behandlung des Themas. Buch und Foliensatz sind Vorlage dieser Vorlesung.

Originalmaterial der Vorlesung von Peter Marwedel:

daes.cs.tu-dortmund.de/embedded-system-text-book/downloads

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-33437-6

[Mar21e] P. Marwedel:

Embedded System Design – Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems, and the Internet of Things.

4th edition, Springer-Verlag, 2021. ISBN 978-3-030-60910-8

Primärliteratur: die englische Originalversion.

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-60910-8

[TH07] J. Teich, C. Haubelt:

*Digitale Hardware/Software-Systeme –
Synthese und Optimierung.*

2. Auflage, Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-3-540-46822-6

Schwerpunkte: Realisierung eingebetteter Systeme, also Synthese, Scheduling, Bindung von Ressourcen etc.

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-46824-0

[HT10] C. Haubelt, J. Teich:

*Digitale Hardware/Software-Systeme –
Spezifikation und Verifikation.*

Springer-Verlag, 2010. ISBN 978-3-642-05356-6

Schwerpunkte: Methoden zur Spezifikation eingebetteter Systeme und der (formalen) Verifikation, Simulation etc.

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-05356-6

[VG02] F. Vahid, T. Givargis:

*Embedded System Design –
A Unified Hardware/Software Introduction.*

John Wiley & Sons, 2002. ISBN 978-0-471-38678-0

Alle Themen im Überblick, etwas älter.

Mehrere Exemplare in der Informatik-Bibliothek vorhanden.



[Brä22] T. Bräunl:

Embedded Robotics – From Mobile Robots to Autonomous Vehicles with Raspberry Pi and Arduino.

4th edition, Springer-Verlag, 2022. ISBN 978–981–16–0804–9

Eigentlich ein „Robotik“-Buch, zeigt aber sehr schön den Zusammenhang mit „Eingebetteten Systemen“, passend zu den Übungen

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-0804-9

[Lew13] D. Lewis:

Fundamentals of embedded software – with the ARM Cortex-M3.

2nd edition, Pearson Education, 2013.

ISBN 978–0–13–291654–7

Schwerpunkt: Software, viel praktische Programmierung in C und Assembler.

[SC17] J. Sanchez, M.P. Canton:

Embedded Systems Circuits and Programming.

CRC Press, 2017. ISBN 978-1-138-07406-4

Schwerpunkt auf PIC μ Controller, enthält außerdem viele (elektro-) technische Grundlagen.

[Wol16] M. Wolf:

Computers as Components –

Principles of Embedded Computing System Design.

4th edition, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2016.

ISBN 978-0-12-805387-4

[Zöb20] D. Zöbel:

Echtzeitsysteme – Grundlagen der Planung.

2. Auflage, Springer-Verlag, 2020. ISBN 978-3-662-60421-2

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-60421-2

[BO15] R.E. Bryant, D.R. O'Hallaron:

Computer systems – A programmers perspective.

3rd global ed., Pearson Education Ltd., 2015. ISBN

978-1-292-10176-7

Rechnerarchitektur mit Schwerpunkt Software und Systeme, leider nicht ganz billig. Viele C-Programme und Systemprogrammierung. Beispiele anhand Intel x86 Architektur.

[TA14] A.S. Tanenbaum, T. Austin:

Rechnerarchitektur –

Von der digitalen Logik zum Parallelrechner.

6. Auflage. Pearson Deutschland GmbH, 2014.

ISBN 978-3-8689-4238-5

Guter Überblick zum Thema Rechnerarchitektur, klares didaktisches Konzept. Java VM, Intel x86, SPARC. Mit jeder Auflage komplett überarbeitet und aktualisiert.

[PH20] D.A. Patterson, J.L. Hennessy:

*Computer Organization and Design –
The Hardware Software Interface – MIPS Edition.*

6th Edition, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2020.

ISBN 978-0-12-820109-1

Schönes Lehrbuch von den Entwicklern der RISC/MIPS Prozessoren.

[HP17] J.L. Hennessy, D.A. Patterson:

Computer Architecture – A Quantitative Approach.

6th edition, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2017.

ISBN 978-0-12-811905-1

Die Bibel zum Thema Rechnerarchitektur

[MJW20] M. Margolis, B. Jepson, N. R. Weldin:

Arduino Cookbook –

Recipes to Begin, Expand, and Enhance Your Projects.

3rd edition, O'Reilly, 2020. ISBN 978-1-4919-0352-0

Die Arduino Referenz

[McR13] M. McRoberts:

Beginning Arduino.

Apress, 2013. ISBN 978-1-4302-5016-6

Praxisnahe Beispiele und Projekte

eBook: link.springer.com/book/10.1007/978-1-4302-5017-3