Exercises in System Level Programming (SLP) – Summer Term 2025

Exercise 3

Maxim Ritter von Onciul
Eva Dengler

Lehrstuhl für Informatik 4
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

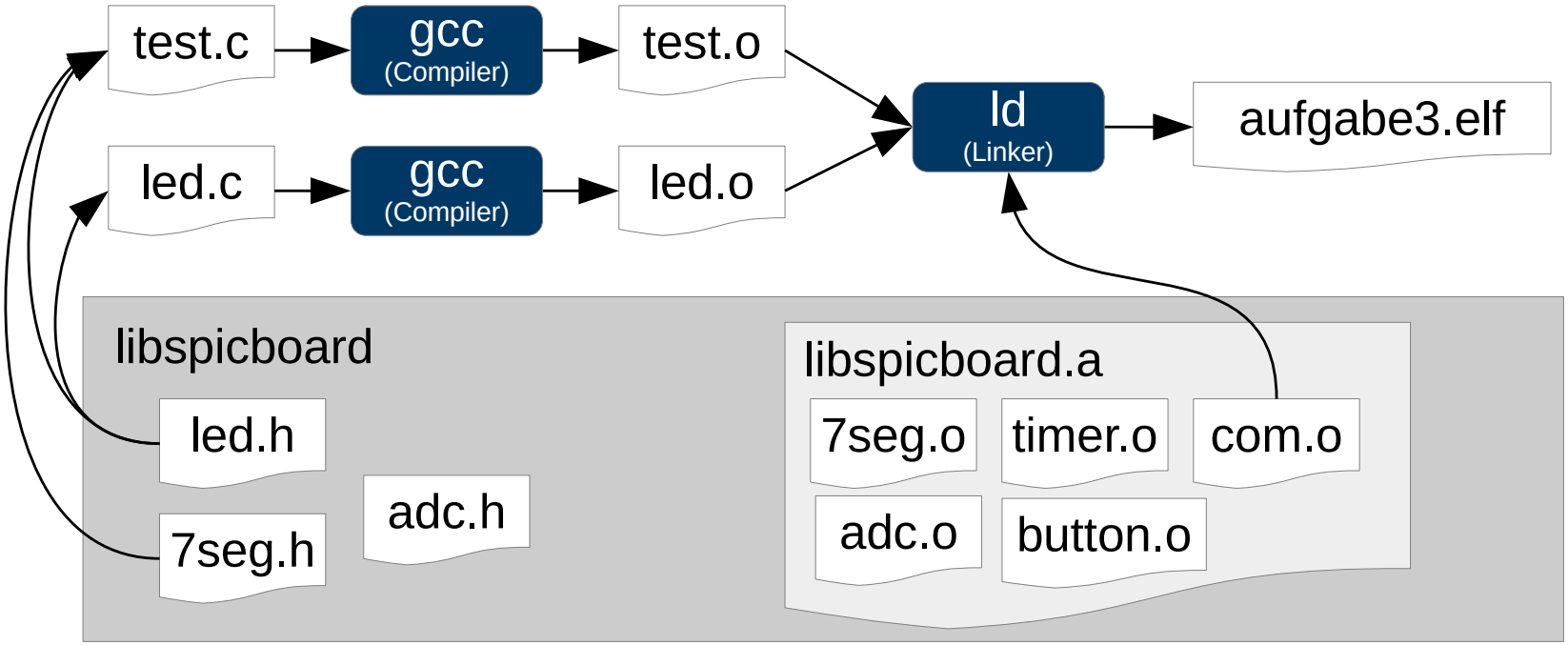
Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Faculty of Engineering

Presentation Assignment 1

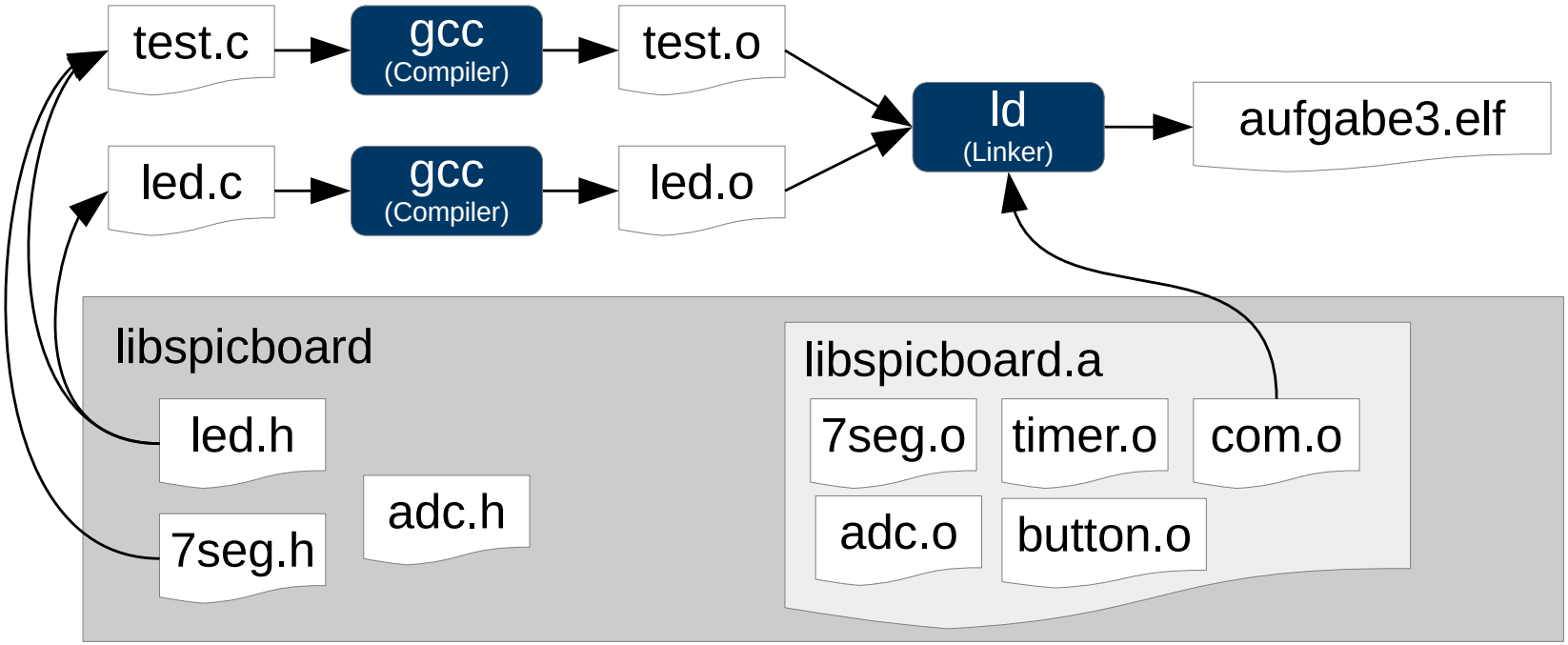
Modules

Ablauf vom Quellcode zum laufenden Programm



1. Präprozessor
2. Compiler
3. Linker
4. Programmer/Flasher

Overview: From the Source Code to a Program



1. Preprocessor
2. Compiler
3. Linker
4. Programmer/Flasher

Schnittstellenbeschreibung (1)

- Header Dateien enthalten die Schnittstelle eines Moduls
  - Funktionsdeklarationen
  - Präprozessormakros
  - Typdefinitionen
- Header Dateien können mehrmals eingebunden werden
  - `led.h` bindet `avr/io.h` ein
  - `button.h` bindet `avr/io.h` ein

  ⇝ Funktionen aus `avr/io.h` mehrmals deklariert
- Mehrfachinkludierung/Zyklen vermeiden ⇝ **Include-Guards**
  - Definition und Abfrage eines Präprozessormakros
  - Konvention: Makro hat den Namen der .h-Datei, '.' ersetzt durch '_'
  - z.B. für `button.h` ⇝ `BUTTON_H`
  - Inhalt nur einbinden, wenn das Makro noch nicht definiert ist
- Vorsicht: Flacher Namensraum ⇝ möglichst eindeutige Namen

Interface Description (1)

- Header files contain the interface of a module
  - Function declarations
  - Preprocessor macros
  - Type definitions
- Header files can be included multiple times
  - `led.h` includes `avr/io.h`
  - `button.h` includes `avr/io.h`
  - ⇝ Functions from `avr/io.h` declared multiple times
- Prevent Multiple inclusions/cycles ⇝ **include-guards**
  - Definition and checking of a preprocessor macro
  - Convention: Macro has the same name as .h-file, '.' replaced by '_'
  - e. g. for `button.h` ⇝ `BUTTON_H`
  - File is only included if the macro has not already been defined
- Attention: Flat name space ⇝ always use unique names

Schnittstellenbeschreibung (2)

- Erstellen einer .h-Datei (Konvention: gleicher Name wie .c-Datei)

```
01 #ifndef COM_H
02 #define COM_H
03 /* Fixed-width Datentypen einbinden (im Header verwendet) */
04 #include <stdint.h>
05
06 /* Datentypen */
07 typedef enum {
08     ERROR_NO_STOP_BIT, ERROR_PARITY,
09     ERROR_BUFFER_FULL, ERROR_INVALID_POINTER
10 } COM_ERROR_STATUS;
11
12 /* Funktionen */
13 void sb_com_sendByte(uint8_t data);
14 [...]
15 #endif //COM_H
```

Interface Description (2)

- Creating a .h-file (convention: same name as .c-file)

```
01 #ifndef COM_H
02 #define COM_H
03 /* Include fixed-width data types (used in the header) */
04 #include <stdint.h>
05
06 /* Data Types */
07 typedef enum {
08     ERROR_NO_STOP_BIT, ERROR_PARITY,
09     ERROR_BUFFER_FULL, ERROR_INVALID_POINTER
10 } COM_ERROR_STATUS;
11
12 /* Functions */
13 void sb_com_sendByte(uint8_t data);
14 [...]
15 #endif //COM_H
```

Implementierung: Kapselung

- Interne Variablen und Hilfsfunktionen nicht Teil der Schnittstelle
- C besitzt einen flachen Namensraum
- Unvorhergesehen Zugriffe können Fehlverhalten auslösen

$\Rightarrow$ Kapselung: Sichtbarkeit & Lebensdauer einschränken

Implementation: Encapsulation

- Internal variables and auxiliary functions not part of the interface
- C has a flat name space
- Unexpected accesses can lead to wrong behaviour

$\Rightarrow$ Encapsulation: Visibility & life span should be restricted

Implementierung: Sichtbarkeit & Lebensdauer (1)

Sichtbarkeit und Lebensdauer	**nicht `static`**	**`static`**
lokale Variable	Sichtbarkeit **Block** Lebensdauer **Block**	Sichtbarkeit **Block** Lebensdauer **Programm**
globale Variable	Sichtbarkeit **Programm** Lebensdauer **Programm**	Sichtbarkeit **Modul** Lebensdauer **Programm**
Funktion	Sichtbarkeit **Programm**	Sichtbarkeit **Modul**

- Lokale Variablen, die **nicht** `static` deklariert werden:

  ⇝ `auto` Variable (automatisch allokiert & freigegeben)
- Globale Variablen und Funktionen als `static`, wenn kein Export notwendig

Implementation: Visibility & Life Span (1)

Visibility and Life Span	not `static`	`static`
Locale variable	visibility **block** life span **block**	visibility **block** life span **program**
Global variable	visibility **program** life span **program**	visibility **module** life span **program**
Function	visibility **program**	visbility **module**

- Local variables that are **not** declared as `static`:

⇝ `auto` variable (automatically allocated & freed)

- Global variables and functions declared as `static`, if no export is necessary

Implementierung: Sichtbarkeit & Lebensdauer (2)

```
01 static uint8_t state; // global static
02 uint8_t event_counter; // global
03
04 static void f(uint8_t a) {
05   static uint8_t call_counter = 0; // local static
06   uint8_t num_leds; // local (auto)
07   /* ... */
08 }
09
10 void main(void) {
11   /* ... */
12 }
```

- Sichtbarkeit & Lebensdauer möglichst weit **einschränken**

⇝ Wo möglich: `static` für globale Variablen und Funktionen

Implementation: Visibility & Life Span (2)

```
01 static uint8_t state; // global static
02 uint8_t event_counter; // global
03
04 static void f(uint8_t a) {
05   static uint8_t call_counter = 0; // local static
06   uint8_t num_leds; // local (auto)
07   /* ... */
08 }
09
10 void main(void) {
11   /* ... */
12 }
```

- Visibility & life span should be chosen as **restricted** as possible

⇝ If possible: `static` for global variables and functions

Implementierung: Initialisierung eines Moduls (1)

- Module müssen Initialisierung durchführen
  - Zum Beispiel Portkonfiguration
  - **Java:** Mit Klassenkonstruktoren möglich
  - **C:** Kennt kein solches Konzept
- *Workaround:* Modul muss bei erstem Aufruf einer seiner Funktionen ggf. die Initialisierung durchführen
  - Muss sich merken, ob die Initialisierung schon erfolgt ist
  - Mehrfachinitialisierung vermeiden
- Anlegen einer Init-Variable
  - Aufruf der Init-Funktion bei jedem Funktionsaufruf
  - Init-Variable anfangs 0
  - Nach der Initialisierung auf 1 setzen

Implementation: Initialization of a Module (1)

- Modules have to perform an initialization
  - For example: Configuring ports
  - **Java:** Possible with class constructors
  - **C:** No such concepts
- *Workaround:* Modules have to initialize themself upon the first function call
  - Remember completion of initialization
  - Prevent multiple initialization
- Creating an `initDone`-variable
  - Call of the `init` function in each function
  - `initDone`-variable initially set to `0`
  - After initialization it is set to `1`

Implementierung: Initialisierung eines Moduls (2)

- `initDone` ist initial `0`
- Wird nach der Initialisierung auf 1 gesetzt

⇝ Initialisierung wird nur einmal durchgeführt

```
01 static void init(void) {
02     static uint8_t initDone = 0;
03     if (initDone == 0) {
04       initDone = 1;
05       ...
06     }
07 }
08
09 void mod_func(void) {
10     init();
11     ...
12 }
```

Implementation: Initialization of a Module (2)

- `initDone` is initially set to `0`
- Is set to 1 after initialization

⇝ Initialization only performed once

```
01 static void init(void) {
02     static uint8_t initDone = 0;
03     if (initDone == 0) {
04       initDone = 1;
05       ...
06     }
07 }
08
09 void mod_func(void) {
10     init();
11     ...
12 }
```

In- & Output via Pins

General Purpose Input/Output (GPIO)

- Mikrocontroller interagieren mit der Außenwelt
- Neben definierten Protokollen auch beliebige (digitale) Signale
- Viele Pins können sowohl als Eingang als auch als Ausgang konfiguriert werden

⇝ General Purpose Input/Output (GPIO)

General Purpose Input/Output (GPIO)

- Microcontroller interact with their environment
- Besides some predefined protocols: Arbitrary (digital) signals
- Many pins can be configured as an input or an output

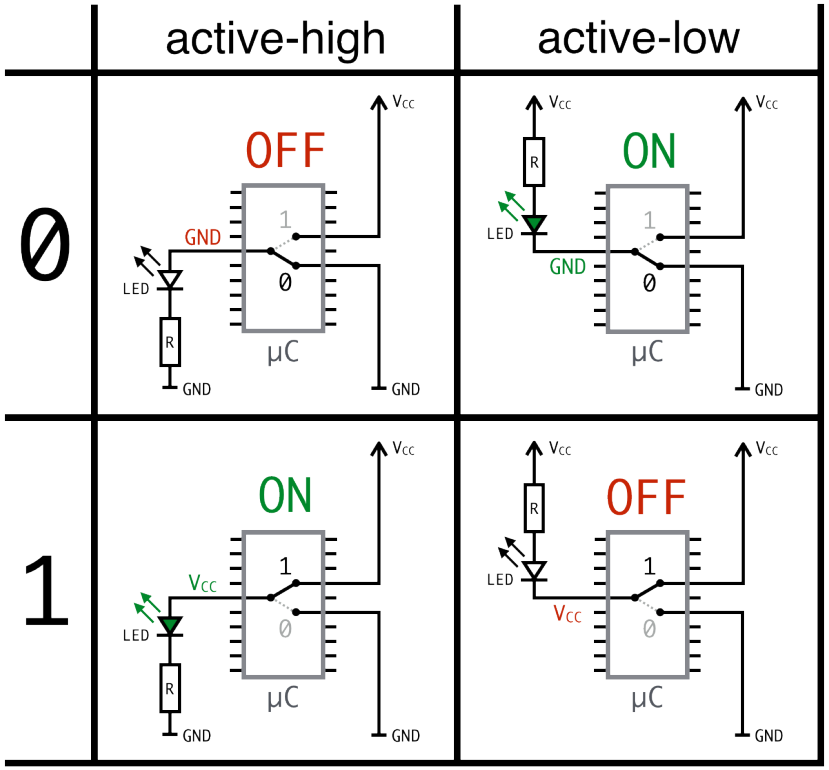
⇝ General Purpose Input/Output (GPIO)

Ausgang: active-high & active-low

Ausgang je nach Beschaltung:

active-high: high-Pegel (logisch 1; V_{cc} am Pin) → LED leuchtet

active-low: low-Pegel (logisch 0; *GND* am Pin) → LED leuchtet

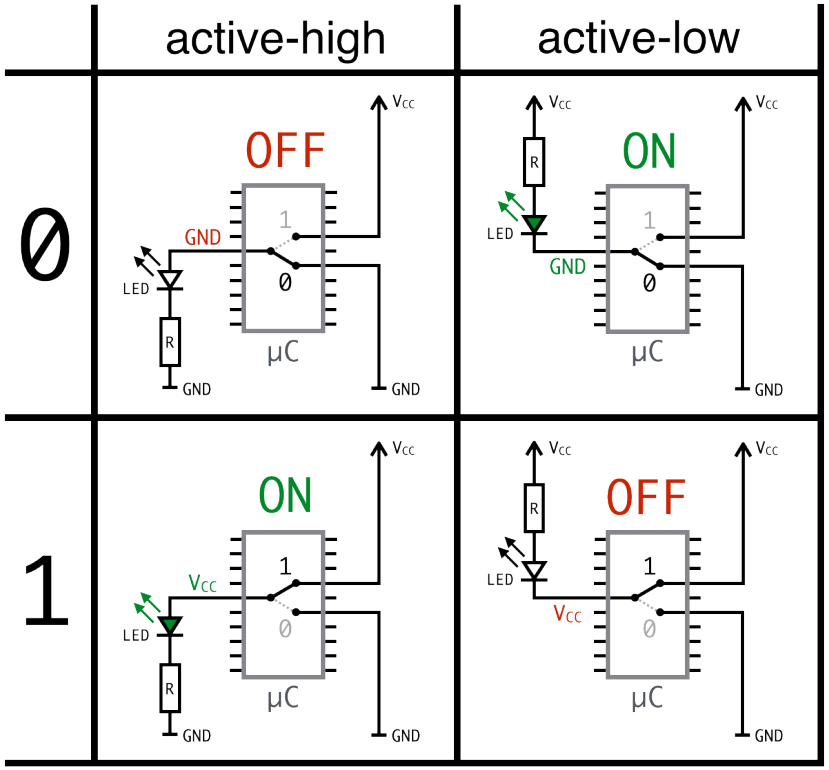


Output: Active-high & Active-low

Output dependent on wiring:

active-high: high-level (logically 1; V_{cc} at Pin) → LED is on

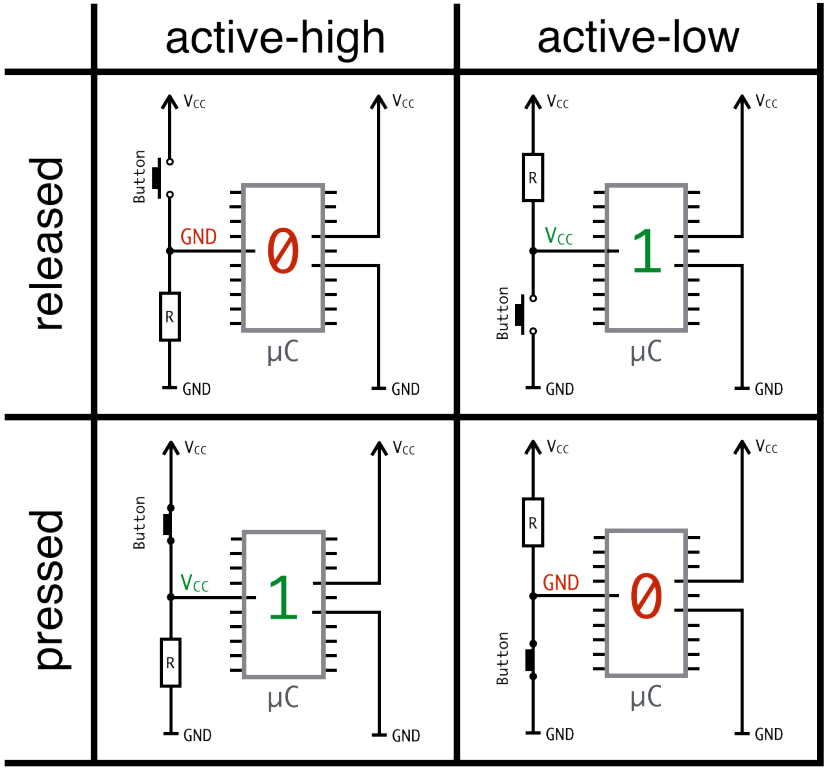
active-low: low-level (logically 0; *GND* at Pin) → LED is on



Eingang: active-high & active-low

Eingang je nach Beschaltung:

active-high: Button gedrückt → high-Pegel (logisch 1; V_{CC} am Pin)
active-low: Button gedrückt → low-Pegel (logisch 0; *GND* am Pin)



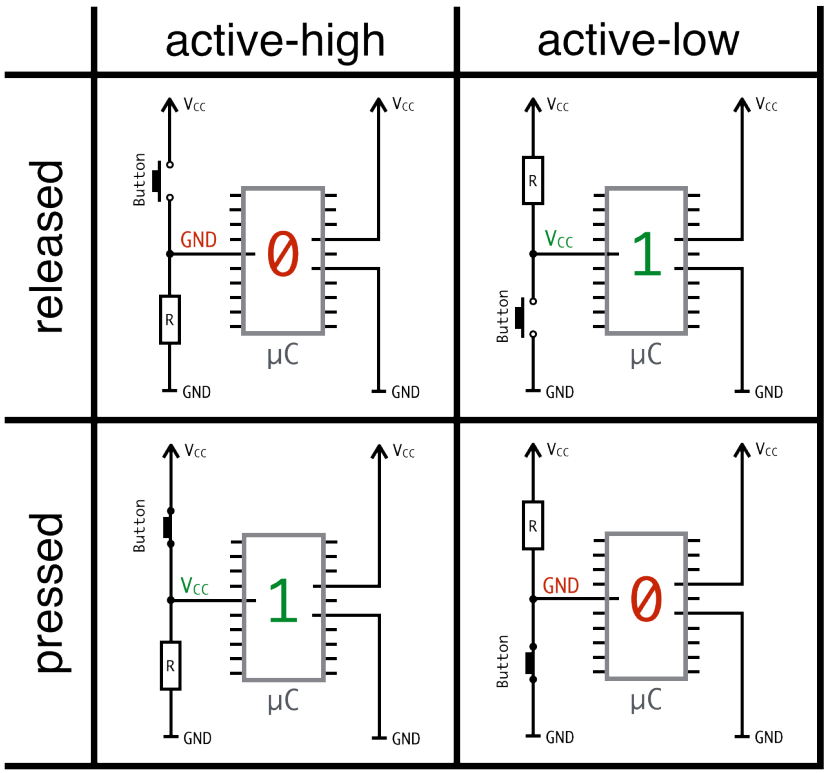
Eingänge sind hochohming, es muss ein definierter Pegel anliegen

⇝ Pull-down oder (interne) Pull-up Widerstände verwenden

Input: Active-high & Active-low

Input dependent on wiring:

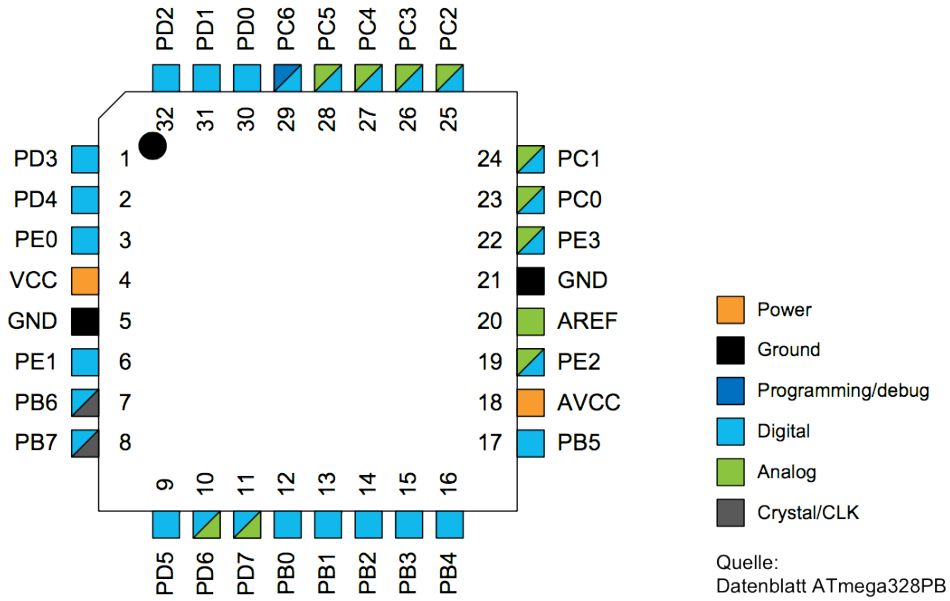
active-high: Button pressed → high-level (logically 1; V_{cc} at Pin)
active-low: Button pressed → low-level (logically 0; *GND* at Pin)



Inputs are of high impedance, a well defined level has to be present

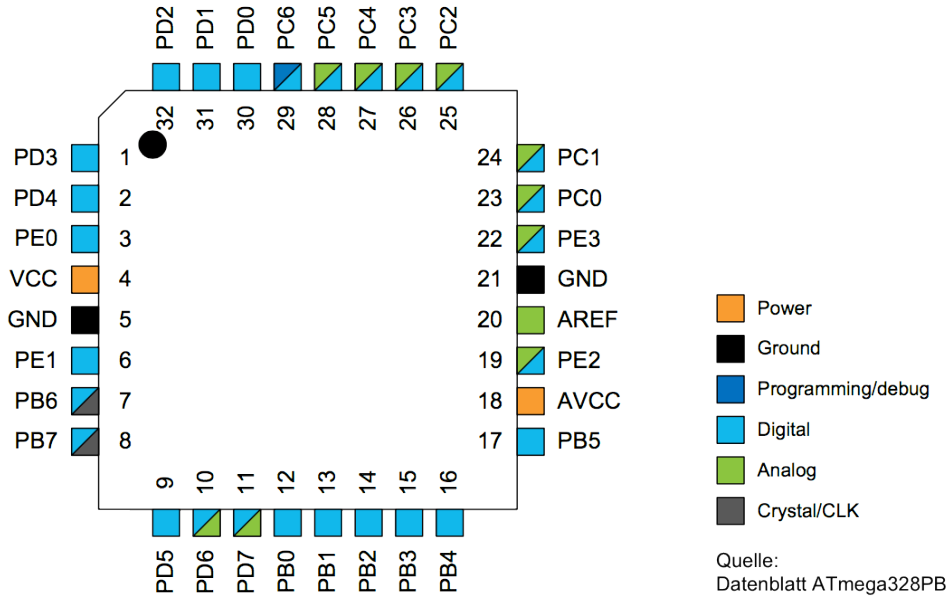
⇝ Use pull-down or (internal) pull-up resistors

Konfiguration der Pins



- Jeweils acht Pins am AVR sind zu einem I/O Port zusammengefasst
- Jeder I/O-Port des AVR wird durch drei 8-bit Register gesteuert:
  - **`DDRx`** Datenrichtungsregister (Data Direction Register)
  - **`PORTx`** Portausgaberegister (Port Output Register)
  - **`PINx`** Porteingaberegister (Port Input Register)
- Jedem Pin eines Ports ist jeweils ein Bit in den drei Register zugeordnet

Configuration of the Pins



- Eight pins are combined to an I/O port for the AVR
- Each I/O port of the AVR is controlled by three 8-bit registers

  DDRx Data Direction Register
  PORTx Port Output Register
  PINx Port Input Register

- Every pin of a port has exactly one bit in each of the three register

I/O-Port-Register (1)

DDRx: Data Direction Register konfiguriert Pin `i` als Ein- oder Ausgang

- `Bit i = 1` → Pin `i` als Ausgang verwenden
- `Bit i = 0` → Pin `i` als Eingang verwenden

Beispiel:

```
01 DDRC |= (1 << PC3);  // PC3 als Ausgang (Pin 3 an Port C)
02 DDRD &= ~(1 << PD2); // PD2 als Eingang (Pin 2 an Port D)
```

I/O-Port-Register (1)

DDRx: Data Direction Register configures pin `i` as an in- or output

- `Bit i = 1` → Pin `i` used as an output
- `Bit i = 0` → Pin `i` used as an input

Example:

```
01 DDRC |= (1 << PC3);  // PC3 as output (Pin 3 at Port C)
02 DDRD &= ~(1 << PD2); // PD2 as input (Pin 2 at Port D)
```

I/O-Port-Register (2)

PORTx: Port Output Register abhängig von DDRx Register

- Wenn **Ausgang**: Legt high- oder low-Pegel an Pin `i` an
  - `Bit i = 1` → high-Pegel an Pin `i`
  - `Bit i = 0` → low-Pegel an Pin `i`
- Wenn **Eingang**: Konfiguriert internen Pull-Up Widerstand an Pin `i`
  - `Bit i = 1` → aktiviert Pull-Up Widerstand für Pin `i`
  - `Bit i = 0` → deaktiviert Pull-Up Widerstand für Pin `i`

Beispiel:

```
01 PORTC |= (1 << PC3);  // Zieht PC3 auf high (LED aus)
02 PORTC &= ~(1 << PC3); // Zieht PC3 auf low (LED an)
03
04 PORTD |= (1 << PD2);  // Aktiviert internen Pull-Up für PD2
05 PORTD &= ~(1 << PD2); // Deaktiviert internen Pull-Up für PD2
```

I/O-Port-Register (2)

PORTx: Port Output Register depends on DDRx register

- If **output**: Sets level to high or low at pin `i`
  - `Bit i = 1` → high-level at pin `i`
  - `Bit i = 0` → low-level at pin `i`
- If **input**: Sets the state of the internal pull-up resistor at pin `i`
  - `Bit i = 1` → activates pull-up resistor for pin `i`
  - `Bit i = 0` → deactivates pull-up resistor for pin `i`

Example:

```
01 PORTC |= (1 << PC3);  // Pulls PC3 to high (LED off)
02 PORTC &= ~(1 << PC3); // Pulls PC3 to low (LED on)
03
04 PORTD |= (1 << PD2);  // Activates internal pull up for PD2
05 PORTD &= ~(1 << PD2); // Deactivates internal pull up for PD2
```

I/O-Port-Register (3)

PINx: Port Input Register (nur lesbar) aktuellen Wert von Pin `i`

- Wenn **Eingang**: Abrufen was von extern anliegt
- Wenn **Ausgang**: Abrufen ob high oder low ausgegeben wird

Beispiel:

```
01 if((PIND & (1 << PD2)) == 0) { // Testen ob Pin PD2 low ist
02   // low-Pegel --> Button ist gedrückt
03   [...]
04 }
05
06 if((PIND & (1 << PD2)) != 0) { // Testen ob Pin PD2 high ist
07   // high-Pegel --> Button ist nicht gedrückt
08   [...]
09 }
```

I/O-Port-Register (3)

PINx: Port Input Register (read only) current value of pin `i`

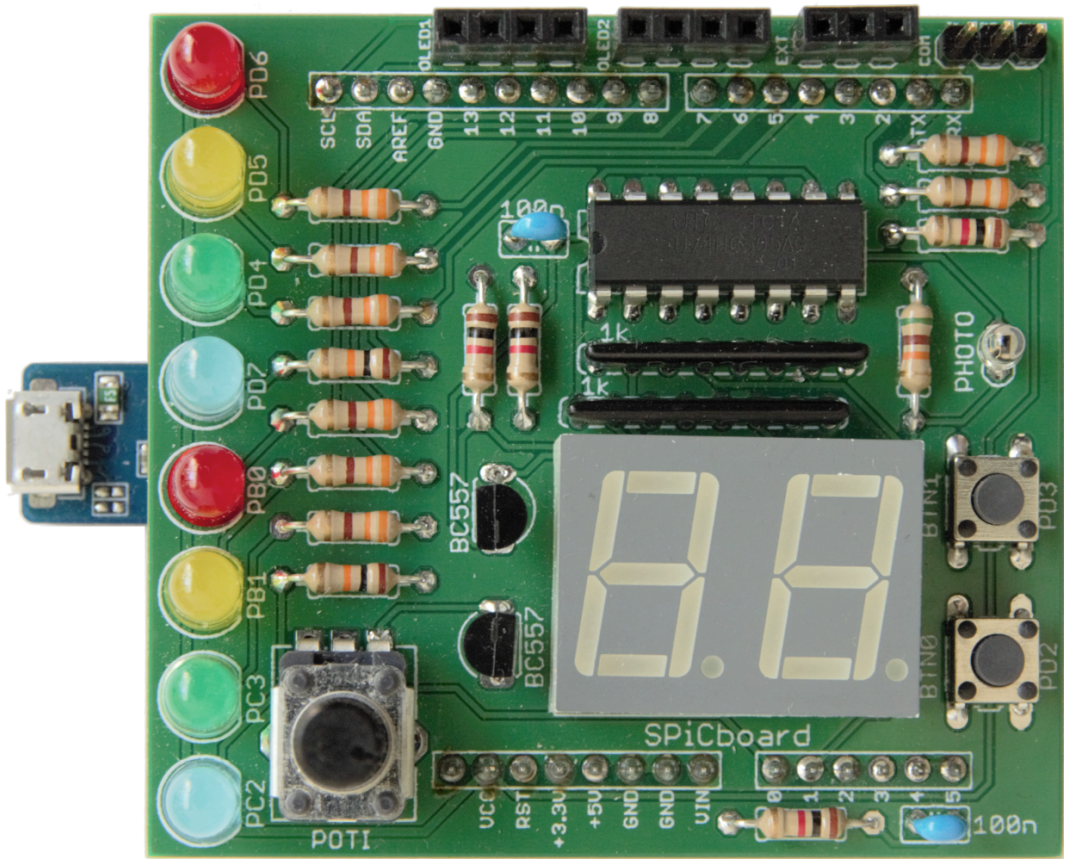
- If **input**: poll what level is set from outside
- If **output**: poll whether high or low is put out

Example:

```
01 if((PIND & (1 << PD2)) == 0) { // Testing whether Pin PD2 is low
02   // low-level --> button is pressed
03   [...]
04 }
05
06 if((PIND & (1 << PD2)) != 0) { // Testing whether Pin PD2 is high
07   // high-level --> button is not pressed
08   [...]
09 }
```

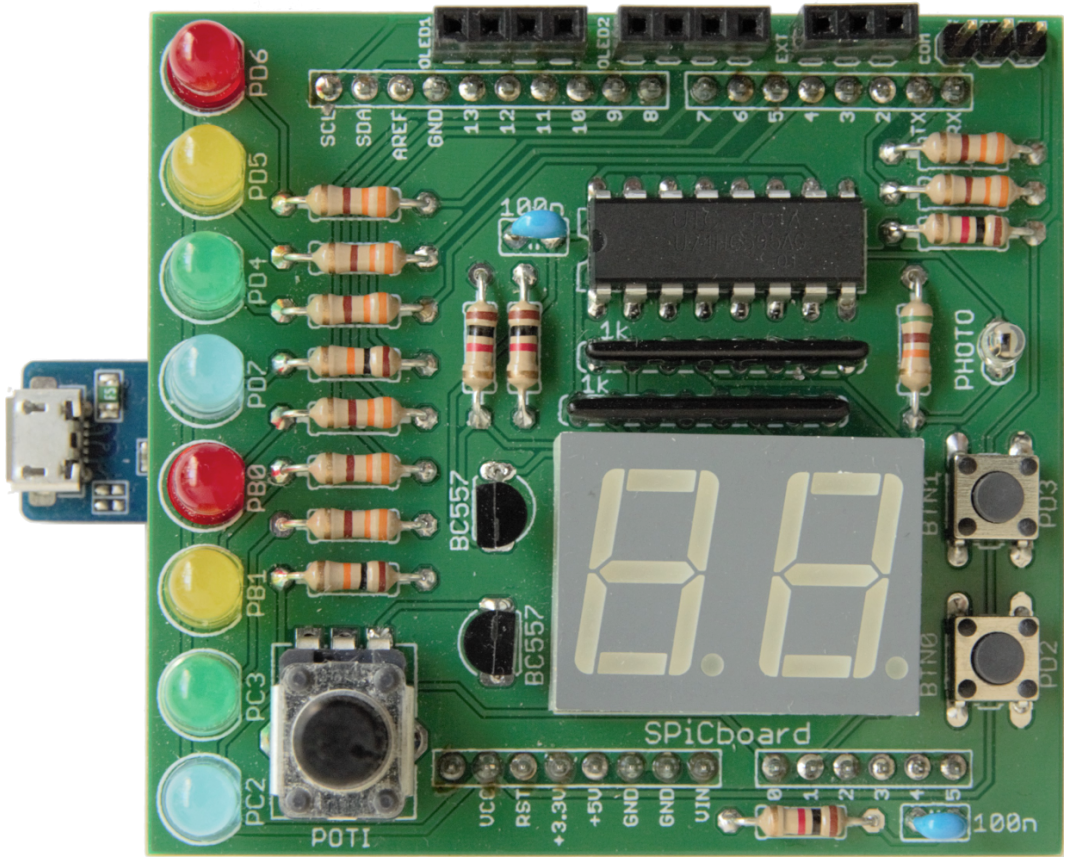
Task: LED Module

LED-Modul – Übersicht



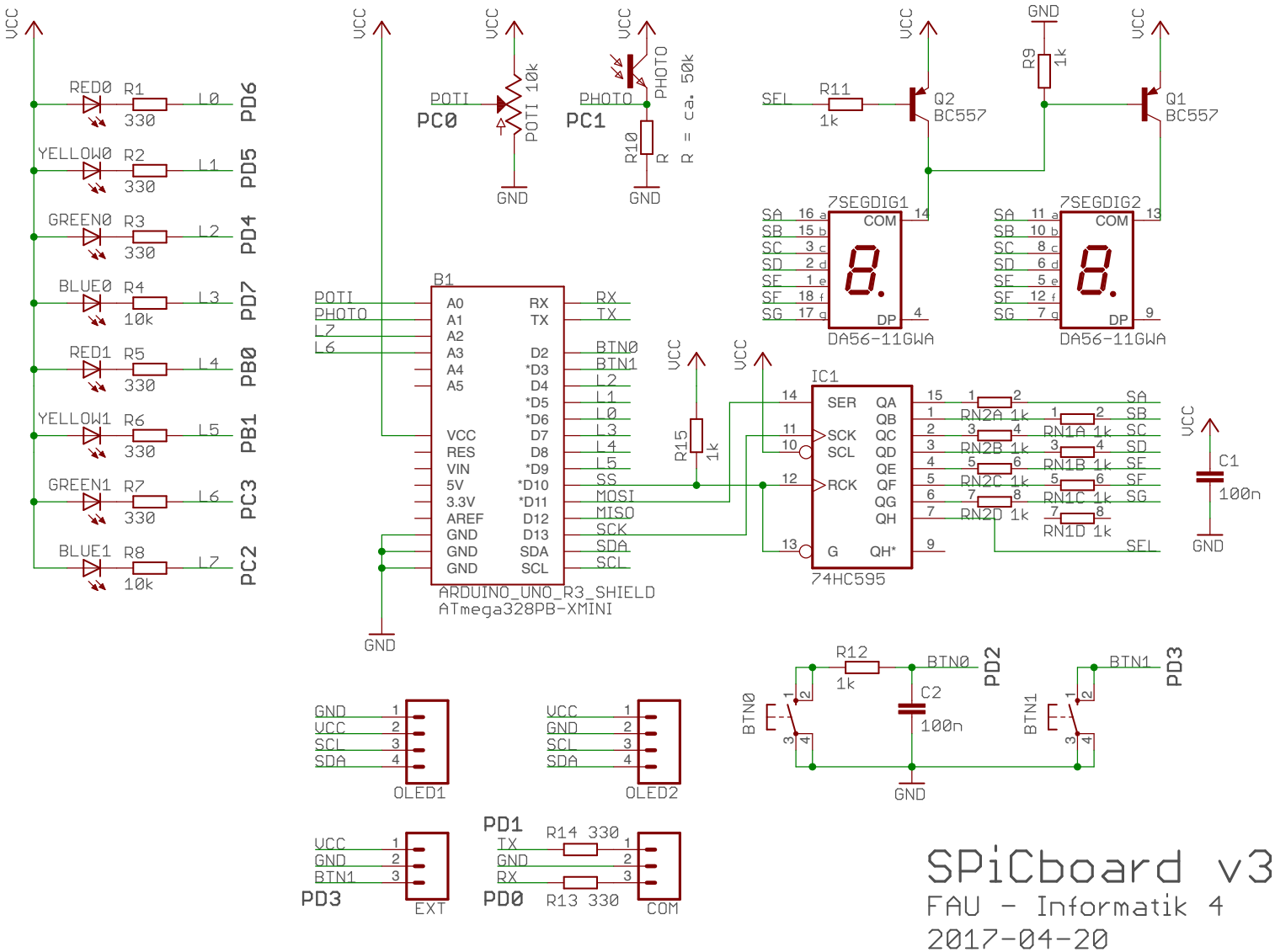
- LED 0 (REDo) ⇒ PD6 ⇒ Port D, Pin 6 ⇒ Bit 6 in PORTD und DDRD
- ...
- LED 7 (BLUE1) ⇒ PC2 ⇒ Port C, Pin 2 ⇒ Bit 2 in PORTC und DDRC

LED Module – Overview

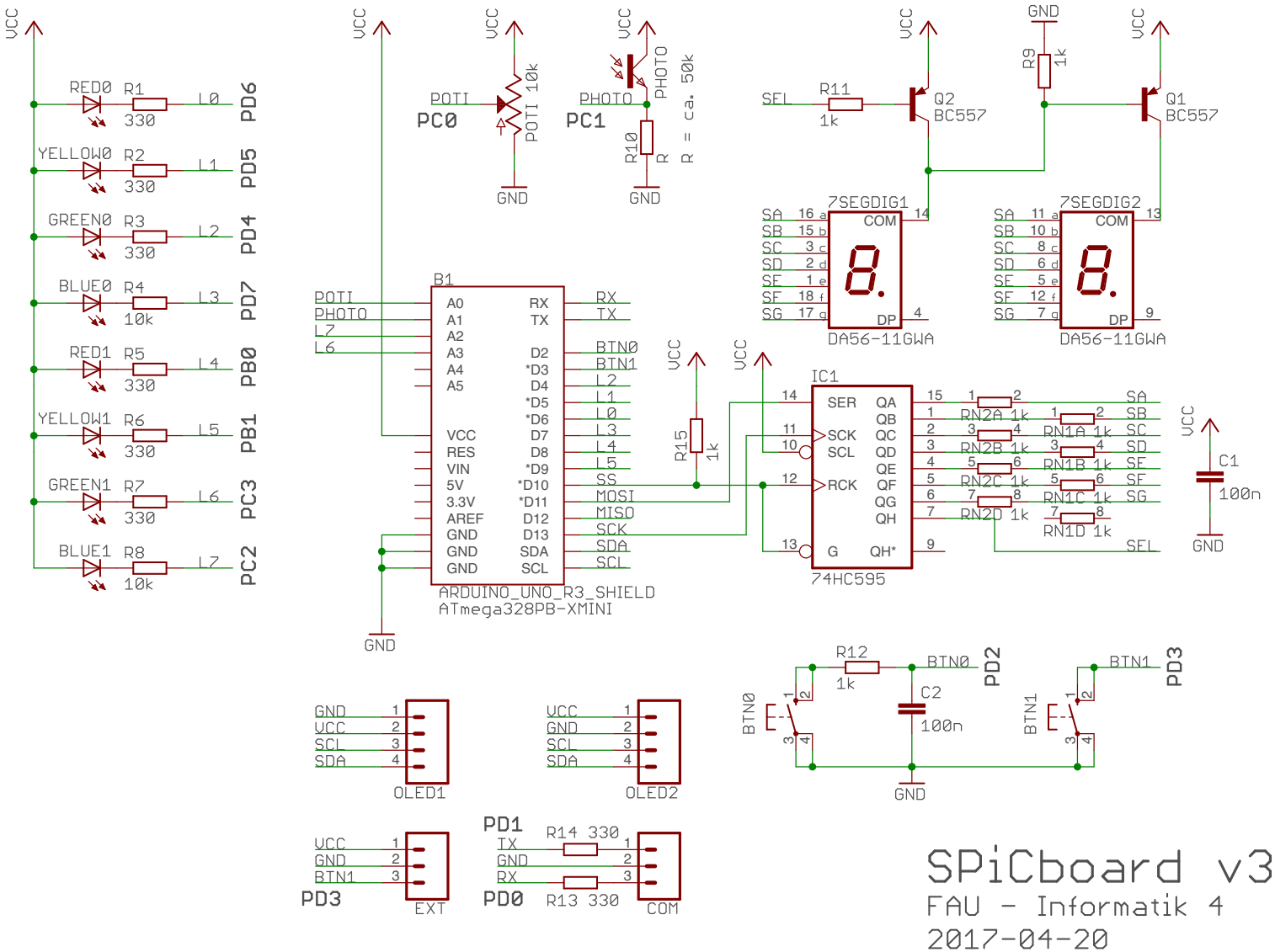


- LED 0 (REDo) ⇒ PD6 ⇒ Port D, Pin 6 ⇒ Bit 6 at PORTD and DDRD
- ...
- LED 7 (BLUE1) ⇒ PC2 ⇒ Port C, Pin 2 ⇒ Bit 2 at PORTC and DDRC

SPiCboard Schaltplan



SPiCboard Block Circuit Diagram



LED-Modul – Aufgabe (1)

- LED-Modul der libspicboard selbst implementieren
  - Gleiches Verhalten wie das Original
  - Beschreibung: `https://sys.cs.fau.de/lehre/ss25/spic/uebung/spicboard/libapi/extern/group__LED.html`
- Einbetten von `led.h`
  - Definition der LED-IDs
  - Deklaration der Funktionssignaturen

```
01 typedef enum {
02     RED0    = 0, /**< Upper red led    **/
03 ...
04     BLUE1   = 7  /**< Lower blue led   **/
05 } LED;
06
07 int8_t sb_led_on(LED led);
08 ...
09 int8_t sb_led_off(LED led);
```

LED Module – Task (1)

- Implement the LED module of the libspicboard
  - Same behaviour as the original
  - Description: `https://sys.cs.fau.de/lehre/ss25/spic/uebung/spicboard/libapi/extern/group__LED.html`
- Including `led.h`
  - Definition of LED-IDs
  - Declaration of function signatures

```
01 typedef enum {
02     RED0    = 0, /**< Upper red led    **/
03 ...
04     BLUE1   = 7  /**< Lower blue led   **/
05 } LED;
06
07 int8_t sb_led_on(LED led);
08 ...
09 int8_t sb_led_off(LED led);
```

LED-Modul – Aufgabe (2)

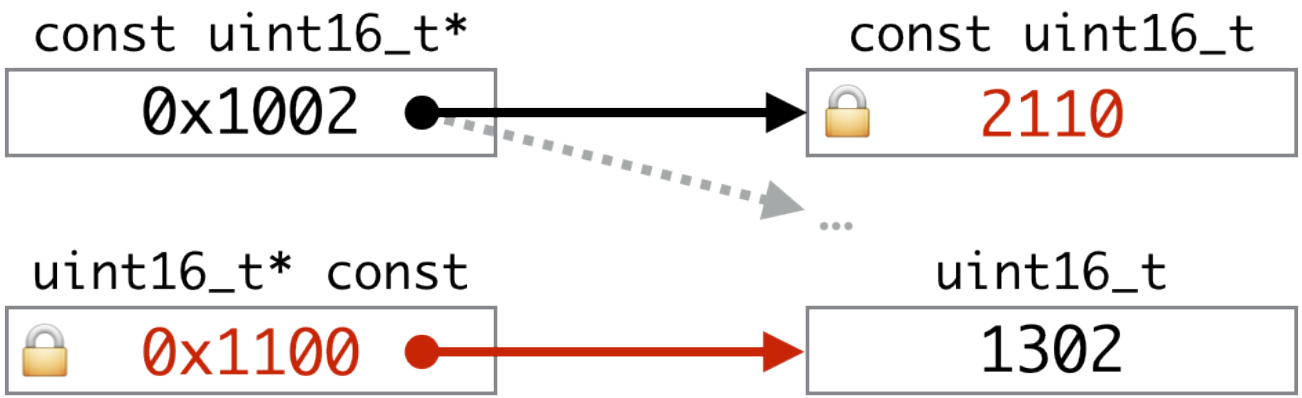
- Testen des Moduls
  - Eigenes Modul mit einem Testprogramm (`test-led.c`) linken
  - Andere Teile der Bibliothek können für den Test benutzt werden
- LEDs des SPiCboards
  - Anschlüsse und Namen der einzelnen LEDs können dem Übersichtsbildchen entnommen werden
  - Alle LEDs sind **active-low**, d.h. leuchten wenn ein low-Pegel auf dem Pin angelegt wird
  - PD6 = Port D, Pin 6

LED Module – Task (2)

- Testing of the module
  - Link your own module with a test program (`test-led.c`)
  - Other parts of the library can be used for testing
- LEDs of the SPiCboard
  - Connections and names of the single LEDs can be extracted from the overview pictures
  - All LEDs are **active-low**
    i.e. they are switched on if a low-level is applied
  - PD6 = Port D, Pin 6

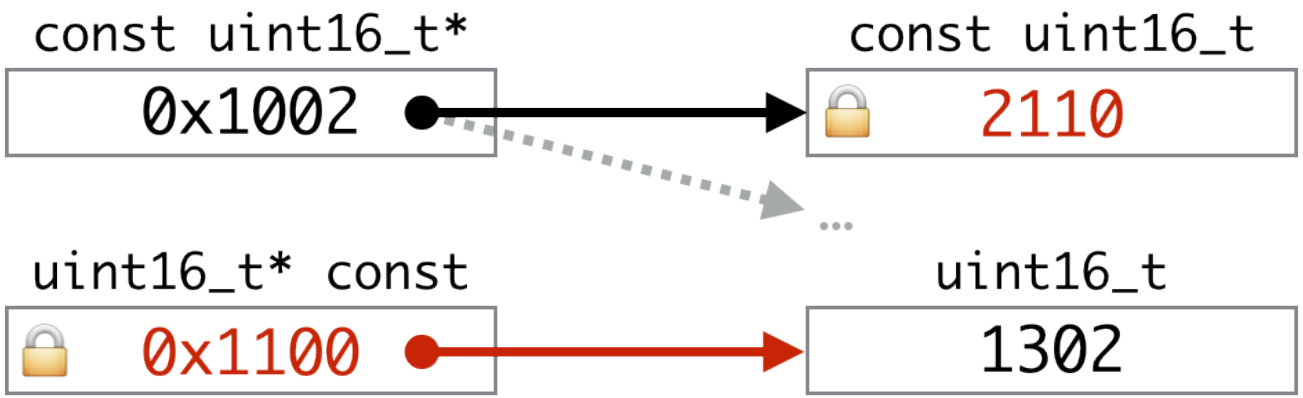
Exkurs: const uint8_t* vs. uint8_t* const

- `const uint8_t*`
  - Ein Zeiger auf einen **konstanten** `uint8_t`-**Wert**
  - **Wert** nicht über den Zeiger veränderbar
- `uint8_t* const`
  - ein **konstanter Zeiger** auf einen (beliebigen) `uint8_t`-Wert
  - **Zeiger** darf nicht mehr auf eine andere Speicheradresse zeigen



Excursion: const uint8_t* vs. uint8_t* const

- `const uint8_t*`
  - Pointer to a **constant** `uint8_t`-**value**
  - **Value** cannot be modified via the pointer
- `uint8_t* const`
  - **Constant pointer** to an (arbitrary) `uint8_t`-value
  - **Pointer** is not allowed to point at a different memory address



Port- und Pin-Array (1)

- Adressoperator: `&`
- Verweisoperator: `*`
- Port und Pin Definitionen (in `avr/io.h`)

```
01 #define PORTD (* (volatile uint8_t *) 0x2B)
02 ...
03 #define PD0     0
04 ...
```

- Makro ersetzt `PORTD` durch `(* (volatile uint8_t *) 0x2B)`
  1. Nimmt die Zahl `0x2B` (Adresse von PORTD)
  2. Castet sie in einen `(volatile uint8_t *)` Zeiger
  3. Dereferenziert Zeiger `*` (⇒PORTD greift auf Registerinhalt zu)
  4. Klammern `(...)` erzwingen richtige Operatorreihenfolge (Vorsicht, Makro!)

Port- and Pin-Array (1)

- Address-of operator: &
- Indirection operator: *
- Definitions for ports and pins (in `avr/io.h`)

```
01 #define PORTD (* (volatile uint8_t *) 0x2B)
02 ...
03 #define PD0     0
04 ...
```

- Macro replaces `PORTD` by `(* (volatile uint8_t *) 0x2B)`
  1. Takes the integer `0x2B` (address of PORTD)
  2. Casts it into a `(volatile uint8_t *)` pointer
  3. Dereferences pointer `*` (⇒PORTD is accessing the register contents)
  4. Brackets `(...)` enforce correct order of operations (Attention, macro!)

Port- und Pin-Array (2)

- Port Array:

```
01 static volatile uint8_t * const ports[8] = { &PORTD,
02                                              ...,
03                                              &PORTC };
```

  - Macht Dereferenzierung durch Adressoperator wieder rückgängig

    ⇒ In `ports` stehen Adressen als `uint8_t` Zeiger

- Pin Array:

```
01 static uint8_t const pins[8] = { PD6, ..., PC2 };
```

- Zugriff:

```
01 * (ports[0]) &= ~(1 << pins[0]);
```

Port- and Pin-Array (2)

- Port array:

```
01 static volatile uint8_t * const ports[8] = { &PORTD,
02                                              ...,
03                                              &PORTC };
```

  - Reverses the dereferencing of the address operator
    - ⇒ Elements of `ports` are addresses in the form of `uint8_t` pointers

- Pin array:

```
01 static uint8_t const pins[8] = { PD6, ..., PC2 };
```

- Access:

```
01 * (ports[0]) &= ~(1 << pins[0]);
```

Übersetzereinstellungen

- Projekt wie gehabt anlegen
  - Initiale Quelldatei: `test-led.c`
  - Dann weitere Quelldatei `led.c` hinzufügen
- Wenn nun übersetzt wird, werden die Funktionen aus dem eigenen LED-Modul verwendet
- Andere Teile der Bibliothek werden nach Bedarf hinzugebunden
- Temporäres Deaktivieren zum Test der Originalfunktionen:

```
01 #if 0
02   ....
03 #endif
```

  ⇒ Sieht der Compiler diese “Kommentare”?

  ⇒ Wie kann der Code wieder einkommentiert werden?

Compiler Settings

- Create project as usual
  - Initial source file: `test-led.c`
  - Then add second source file `led.c`
- When compiling, functions from your own module are used
- Additional parts of the library are included if required
- Code can be temporarily deactivated for testing the original functions:

```
01 #if 0
02   ....
03 #endif
```

  ⇒ Does the compiler see this “comment”?

  ⇒ How can we comment in the code again?

Testen des Moduls

```
01 void main(void){
02   ...
03   // 1.) Testen bei korrekter LED-ID
04   int8_t result = sb_led_on(RED0);
05   if(result != 0){
06     // Test fehlgeschlagen
07     // Ausgabe z.B. auf 7-Segment-Anzeige
08   }
09   // Einige Sekunden warten
10
11   // 2.) Testen bei ungueltiger LED-ID
12   ...
13 }
```

- Schnittstellenbeschreibung genau beachten (inkl. Rückgabewerte)
- Testen **aller möglichen Rückgabewerte**
- Fehler wenn Rückgabewert nicht der Spezifikation entspricht

Testing of the Module

```
01 void main(void){
02   ...
03   // 1.) Testing with valid LED-ID
04   int8_t result = sb_led_on(RED0);
05   if(result != 0){
06     // Test failed
07     // Output e.g. with 7-Segment display
08   }
09   // wait some seconds
10
11   // 2.) Testing with invalid LED-ID
12   ...
13 }
```

- Pay close attention to the interface description (incl. return values)
- Testing of **all possible return values**
- Give an error if the returned value is different from the specification

Hands-on: Statistikmodul

Screencast: https://www.video.uni-erlangen.de/clip/id/16328

Hands-on: Statistics Module

Screencast: https://www.video.uni-erlangen.de/clip/id/16328

Hands-on: Statistikmodul

- Statistikmodul und Testprogramm
- Funktionalität des Moduls (Schnittstelle):

```
01 // Schnittstelle
02 uint8_t avgArray(uint16_t *a, size_t s, uint16_t *avg);
03 uint8_t minArray(uint16_t *a, size_t s, uint16_t *min);
04 uint8_t maxArray(uint16_t *a, size_t s, uint16_t *max);
05
06 // interne Hilfsfunktionen
07 uint16_t getMin(uint16_t a, uint16_t b);
08 uint16_t getMax(uint16_t a, uint16_t b);
```

- Rückgabewert:
  - 0: OK
  - 1: Fehler
- Vorgehen:
  - Header-Datei mit Modulschnittstelle (und Include-Guards)
  - Implementierung des Moduls (Sichtbarkeit beachten)
  - Testen des Moduls im Hauptprogramm (inkl. Fehlerfälle)

Hands-on: Statistics Module

- Statistics module and test program
- Functionality of the module (interface):

```
01 // Interface
02 uint8_t avgArray(uint16_t *a, size_t s, uint16_t *avg);
03 uint8_t minArray(uint16_t *a, size_t s, uint16_t *min);
04 uint8_t maxArray(uint16_t *a, size_t s, uint16_t *max);
05
06 // Internal auxiliary functions
07 uint16_t getMin(uint16_t a, uint16_t b);
08 uint16_t getMax(uint16_t a, uint16_t b);
```

- Return value:
  - 0: OK
  - 1: Error
- How to proceed:
  - Header file with module interface (and include guards)
  - Implementation of the module (consider visibility)
  - Testing of the module in the main program (incl. errors)