

# Übungen zu Systemnahe Programmierung in C (SPiC) – Sommersemester 2026

---

## Übung 3

Arne Vogel  
Maxim Ritter von Onciul  
Eva Dengler

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



Lehrstuhl für Informatik 4  
Systemsoftware



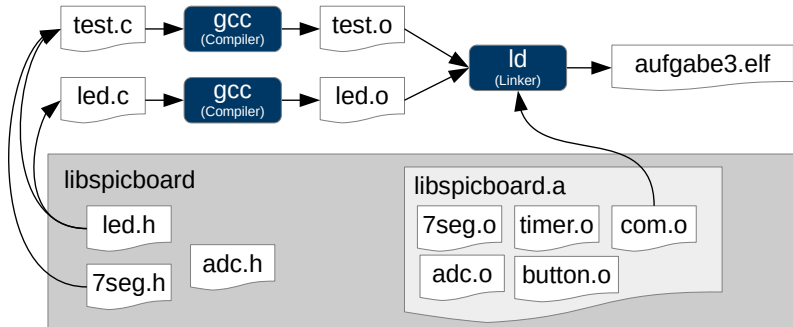
Friedrich-Alexander-Universität  
Technische Fakultät

# Vorstellung Aufgabe 1

---

# Module

---



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



- 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



- 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
```



- Interne Variablen und Hilfsfunktionen nicht Teil der Schnittstelle
  - C besitzt einen flachen Namensraum
  - Unvorhergesehen Zugriffe können Fehlverhalten auslösen
- ⇒ Kapselung: Sichtbarkeit & Lebensdauer einschränken



Sichtbarkeit und Lebensdauer	nicht static	static
lokale Variable	Sichtbarkeit <b>Block</b> Lebensdauer <b>Block</b>	Sichtbarkeit <b>Block</b> Lebensdauer <b>Programm</b>
globale Variable	Sichtbarkeit <b>Programm</b> Lebensdauer <b>Programm</b>	Sichtbarkeit <b>Modul</b> Lebensdauer <b>Programm</b>
Funktion	Sichtbarkeit <b>Programm</b>	Sichtbarkeit <b>Modul</b>

- Lokale Variablen, die **nicht** static deklariert werden:
  - ↪ auto Variable (automatisch allokiert & freigegeben)
- Globale Variablen und Funktionen als static, wenn kein Export notwendig



```
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**



- 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



- `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 }
```

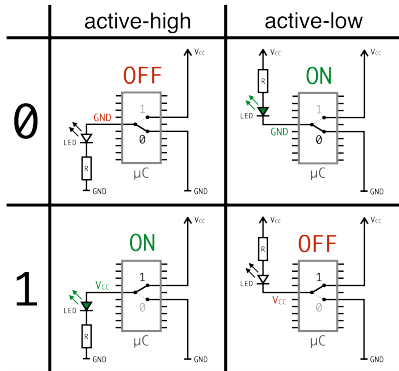


- Mikrocontroller interagieren mit der Außenwelt
  - Neben definierten Protokollen auch beliebige (digitale) Signale
  - Viele Pins können sowohl als Eingang als auch als Ausgang konfiguriert werden
- ~> General Purpose Input/Output (GPIO)

Ausgang je nach Beschaltung:

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

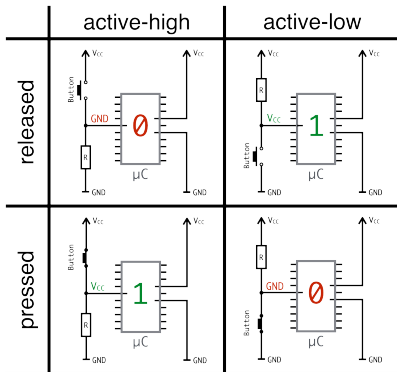
**active-low:** low-Pegel (logisch 0;  $GND$  am Pin) → LED leuchtet



Eingang je nach Beschaltung:

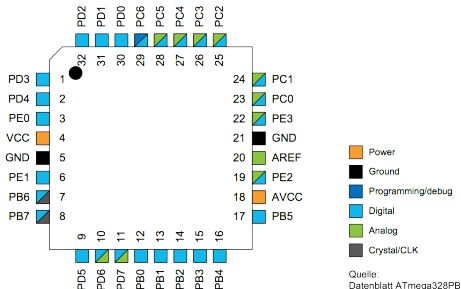
**active-high:** Button gedrückt → high-Pegel (logisch 1;  $V_{CC}$  am Pin)

**active-low:** Button gedrückt → low-Pegel (logisch 0;  $GND$  am Pin)



Eingänge sind hochohmig, es muss ein definierter Pegel anliegen

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



- 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



**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)
```



**PORTx: Port Output Register** abhängig von DDRx Register

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

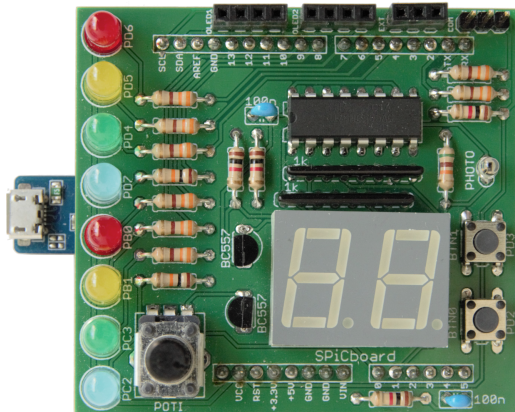


**PINx: Port Input Register (nur lesbar)** aktuellen Wert von Pin  $i$

- 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 }
```



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





- LED-Modul der libspicboard selbst implementieren
  - Gleiches Verhalten wie das Original
  - Beschreibung:  
[https://sys.cs.fau.de/lehre/ss26/spic/uebung/spicboard/libapi/extern/group\\_\\_LED.html](https://sys.cs.fau.de/lehre/ss26/spic/uebung/spicboard/libapi/extern/group__LED.html)
- Einbetten von `led.h`
  - Definition der LED-IDs
  - Deklaration der Funktionssignaturen

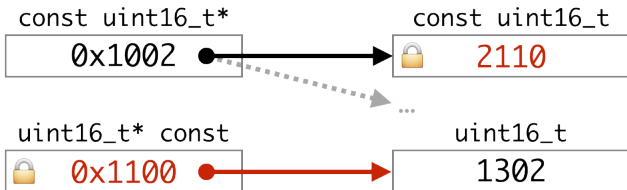
```
01 typedef enum {
02     RED0    = 0, /**< Upper red led    */
03     ...
04     BLUE1   = 7 /**< Lower blue led   */
05 } LED;
06
07 int8_t sb_led_on(LED led);
08 ...
09 int8_t sb_led_off(LED led);
```



- 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



- `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





- 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 `*` ( $\Rightarrow$  `PORTD` greift auf Registerinhalt zu)
  4. Klammern `(...)` erzwingen richtige Operatorreihenfolge  
(Vorsicht, Makro!)



### ■ 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]);
```



- 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?



```
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

# Hands-on: Statistikmodul

Screenecast: <https://www.video.uni-erlangen.de/clip/id/16328>



- 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)