

# Hardwarenahe Programmierung

Prof. Dr. rer. nat. Peter Gerwinski

5. Dezember 2024

# Hardwarenahe Programmierung

<https://gitlab.cvh-server.de/pgerwinski/hp>

- 1 Einführung**
- 2 Einführung in C**
- 3 Bibliotheken**
  - 3.1 Der Präprozessor
  - 3.2 Bibliotheken einbinden
  - 3.3 Bibliotheken verwenden
  - 3.4 Callbacks
  - 3.5 Projekt organisieren: make
- 4 Hardwarenahe Programmierung**
  - 4.1 Bit-Operationen
  - 4.2 I/O-Ports
  - 4.3 Interrupts
  - 4.4 volatile-Variable
  - ...
- 5 Algorithmen**
- 6 Objektorientierte Programmierung**
- 7 Datenstrukturen**

## 3.3 Bibliothek verwenden (Beispiel: GTK)

- **#include** <gtk/gtk.h>

## 3.3 Bibliothek verwenden (Beispiel: GTK)

- `#include <gtk/gtk.h>`
- Mit `pkg-config --cflags --libs gtk4` erfährt man, welche Optionen und Bibliotheken man an `gcc` übergeben muß:

## 3.3 Bibliothek verwenden (Beispiel: GTK)

- `#include <gtk/gtk.h>`

- Mit `pkg-config --cflags --libs gtk4` erfährt man, welche Optionen und Bibliotheken man an `gcc` übergeben muß:

```
$ pkg-config --cflags --libs gtk4
-I/usr/include/gtk-4.0 -I/usr/include/pango-1.0 -I/usr/
include/glib-2.0 -I/usr/lib/x86_64-linux-gnu/glib-2.0/i
nclude -I/usr/include/harfbuzz -I/usr/include/freetype2
-I/usr/include/libpng16 -I/usr/include/libmount -I/usr/
include/blkid -I/usr/include/fribidi -I/usr/include/cai
ro -I/usr/include/pixman-1 -I/usr/include/gdk-pixbuf-2.
0 -I/usr/include/x86_64-linux-gnu -I/usr/include/graphene-1.0 -I/usr/lib/x86_64-linux-gnu/graphene-1.0/include
-mfpmath=sse -msse -msse2 -pthread -lgtk-4 -lpangocairo
-1.0 -lpango-1.0 -lharfbuzz -lgdk_pixbuf-2.0 -lcairo-go
bject -lcairo -lgraphene-1.0 -lgio-2.0 -lgobject-2.0 -l
glib-2.0
```

## 3.3 Bibliothek verwenden (Beispiel: GTK)

- **#include** <gtk/gtk.h>
- Mit `pkg-config --cflags --libs gtk4` erfährt man, welche Optionen und Bibliotheken man an `gcc` übergeben muß.

→ Compiler-Aufruf:

```
$ gcc -Wall -O hello-gtk.c -I/usr/include/gtk-4.0 -I/usr/include/pango-1.0 -I/usr/include/glib-2.0 -I/usr/lib/x86_64-linux-gnu/glib-2.0/include -I/usr/include/harfbuzz -I/usr/include/freetype2 -I/usr/include/libpng16 -I/usr/include/libmount -I/usr/include/blkid -I/usr/include/fribidi -I/usr/include/cairo -I/usr/include/pixman-1 -I/usr/include/gdk-pixbuf-2.0 -I/usr/include/x86_64-linux-gnu -I/usr/include/graphene-1.0 -I/usr/lib/x86_64-linux-gnu/graphene-1.0/include -mfpmath=sse -msse -msse2 -pthread -lgtk-4 -lpangocairo-1.0 -lpango-1.0 -lharfbuzz -lgdk_pixbuf-2.0 -lcairo-gobject -lcairo -lgraphene-1.0 -lgio-2.0 -lgobject-2.0 -l glib-2.0 -o hello-gtk
```

## 3.3 Bibliothek verwenden (Beispiel: GTK)

- `#include <gtk/gtk.h>`
- Mit `pkg-config --cflags --libs gtk4` erfährt man, welche Optionen und Bibliotheken man an `gcc` übergeben muß.

→ Compiler-Aufruf:

```
$ gcc -Wall -O hello-gtk.c $(pkg-config --cflags --libs  
    gtk4) -o hello-gtk
```

Optionen:

u. a. viele Include-Verzeichnisse:

`-I/usr/include/gtk-4.0`

Bibliotheken:

u. a. `-lgtk-4`

## 3.3 Bibliothek verwenden (Beispiel: GTK)

- `#include <gtk/gtk.h>`
- Mit `pkg-config --cflags --libs gtk4` erfährt man, welche Optionen und Bibliotheken man an `gcc` übergeben muß.

—> Compiler-Aufruf:

```
$ gcc -Wall -O hello-gtk.c $(pkg-config --cflags --libs  
    gtk4) -o hello-gtk
```

- Auf manchen Plattformen kommt es auf die Reihenfolge an:

```
$ gcc -Wall -O $(pkg-config --cflags gtk4) \  
    hello-gtk.c $(pkg-config --libs gtk4) \  
    -o hello-gtk
```

(Backslash = „Es geht in der nächsten Zeile weiter.“)



## 3.4 Callbacks

Selbst geschriebene Funktion übergeben: *Callback*

```
static void hello (GtkWidget *this, gpointer user_data)
{
    char *world = user_data;
    printf ("Hello, %s!\n", world);
}
```

...

```
g_signal_connect (button, "clicked", G_CALLBACK (hello), "world");
```

→ GTK ruft immer dann, wenn der Button betätigt wurde,  
die Funktion `hello` auf.

## 3.4 Callbacks

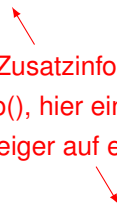
Selbst geschriebene Funktion übergeben: *Callback*

```
static void hello (GtkWidget *this, gpointer user_data)
{
    char *world = user_data;
    printf ("Hello, %s!\n", world);
}
```

...

```
g_signal_connect (button, "clicked", G_CALLBACK (hello), "world");
```

optionale Zusatzinformationen  
für hello(), hier ein String  
oft ein Zeiger auf ein struct



→ GTK ruft immer dann, wenn der Button betätigt wurde,  
die Funktion `hello` auf.

## 3.4 Callbacks

Selbst geschriebene Funktion übergeben: *Callback*

```
static void draw (GtkDrawingArea *drawing_area, cairo_t *c,  
                  int width, int height, gpointer user_data)
```

```
{  
    /* Zeichenbefehle */
```

```
    ...
```

```
}
```

```
...
```

```
gtk_drawing_area_set_draw_func (GTK_DRAWING_AREA (drawing_area),  
                                draw, NULL, NULL);
```

→ GTK ruft immer dann, wenn es etwas zu zeichnen gibt,  
die Funktion `draw` auf.

## 3.4 Callbacks

Selbst geschriebene Funktion übergeben: *Callback*

```
static void draw (GtkDrawingArea *drawing_area, cairo_t *c,  
                  int width, int height, gpointer user_data)
```

```
{  
    /* Zeichenbefehle */  
    ...  
}
```

```
...
```

```
gtk_drawing_area_set_draw_func (GTK_DRAWING_AREA (drawing_area),  
                                draw, NULL, NULL);
```

repräsentiert den  
Bildschirm, auf den  
gezeichnet werden soll

→ GTK ruft immer dann, wenn es etwas zu zeichnen gibt,  
die Funktion `draw` auf.

## 3.5 Projekt organisieren: make

- Regeln
- Makros

## 3.5 Projekt organisieren: make

- Regeln

```
philosophy: philosophy.o answer.o  
gcc philosophy.o answer.o -o philosophy
```

```
answer.o: answer.c answer.h  
gcc -Wall -O answer.c -c
```

```
philosophy.o: philosophy.c answer.h  
gcc -Wall -O philosophy.c -c
```

- Makros

## 3.5 Projekt organisieren: make

- Regeln
- Makros

TARGET = philosophy

OBJECTS = philosophy.o answer.o

HEADERS = answer.h

CFLAGS = -Wall -O

\$(TARGET): \$(OBJECTS)

gcc \$(OBJECTS) -o \$(TARGET)

answer.o: answer.c \$(HEADERS)

gcc \$(CFLAGS) answer.c -c

philosophy.o: philosophy.c \$(HEADERS)

gcc \$(CFLAGS) philosophy.c -c

clean:

rm -f \$(OBJECTS) \$(TARGET)

## 3.5 Projekt organisieren: make

- explizite und implizite Regeln

TARGET = philosophy

OBJECTS = philosophy.o answer.o

HEADERS = answer.h

CFLAGS = -Wall -O

\$(TARGET): \$(OBJECTS)

gcc \$(OBJECTS) -o \$(TARGET)

%.o: %.c \$(HEADERS)

gcc \$(CFLAGS) \$< -c

clean:

rm -f \$(OBJECTS) \$(TARGET)

- Makros



## 3.5 Projekt organisieren: make

- explizite und implizite Regeln
- Makros

→ 3 Sprachen: C, Präprozessor, make

## 4 Hardwarenahe Programmierung

### 4.1 Bit-Operationen

#### 4.1.1 Zahlensysteme

Basis	Name	Beispiel	Anwendung
2	Binärsystem	1 0000 0011	Bit-Operationen
8	Oktalsystem	0403	Dateizugriffsrechte (Unix)
10	Dezimalsystem	259	Alltag
16	Hexadezimalsystem	0x103	Bit-Operationen
256	(keiner gebräuchlich)	0.0.1.3	IP-Adressen (IPv4)

- Computer rechnen im Binärsystem.
- Für viele Anwendungen (z. B. I/O-Ports, Grafik, ...) ist es notwendig, Bits in Zahlen einzeln ansprechen zu können.

### 4.1.1 Zahlensysteme

000	<b>0</b>	0000	<b>0</b>	1000	<b>8</b>
001	<b>1</b>	0001	<b>1</b>	1001	<b>9</b>
010	<b>2</b>	0010	<b>2</b>	1010	<b>A</b>
011	<b>3</b>	0011	<b>3</b>	1011	<b>B</b>
100	<b>4</b>	0100	<b>4</b>	1100	<b>C</b>
101	<b>5</b>	0101	<b>5</b>	1101	<b>D</b>
110	<b>6</b>	0110	<b>6</b>	1110	<b>E</b>
111	<b>7</b>	0111	<b>7</b>	1111	<b>F</b>

- Oktal- und Hexadezimalzahlen lassen sich ziffernweise in Binär-Zahlen umrechnen.
- Hexadezimalzahlen sind eine Kurzschreibweise für Binärzahlen, gruppiert zu jeweils 4 Bits.
- Oktalzahlen sind eine Kurzschreibweise für Binärzahlen, gruppiert zu jeweils 3 Bits.
- Trotz Taschenrechner u. ä. lohnt es sich, die o. a. Umrechnungstabelle **auswendig** zu kennen.

## 4.1.2 Bit-Operationen in C

C-Operator	Verknüpfung	Anwendung
&	Und	Bits gezielt löschen
	Oder	Bits gezielt setzen
^	Exklusiv-Oder	Bits gezielt invertieren
~	Nicht	Alle Bits invertieren
<<	Verschiebung nach links	Maske generieren
>>	Verschiebung nach rechts	Bits isolieren

Numerierung der Bits: von rechts ab 0

Bit Nr. 3 auf 1 setzen: `a |= 1 << 3;`

Bit Nr. 4 auf 0 setzen: `a &= ~(1 << 4);`

Bit Nr. 0 invertieren: `a ^= 1 << 0;`

Abfrage, ob Bit Nr. 1 gesetzt ist: `if (a & (1 << 1))`

## 4.1.2 Bit-Operationen in C

C-Datentypen für Bit-Operationen:

**#include** <stdint.h>

	8 Bit	16 Bit	32 Bit	64 Bit
mit Vorzeichen	int8_t	int16_t	int32_t	int64_t
ohne Vorzeichen	uint8_t	uint16_t	uint32_t	uint64_t

Ausgabe:

**#include** <stdio.h>

**#include** <stdint.h>

**#include** <inttypes.h>

...

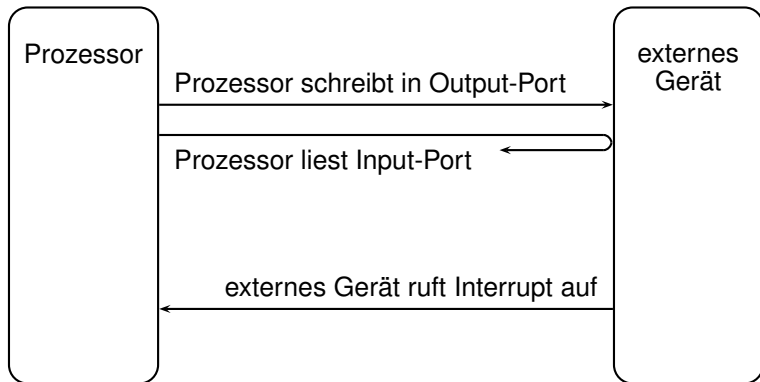
uint64\_t x = 42;

printf ("Die\_Antwort\_lautet:\_% " PRIu64 "\n", x);

## 4.2 I/O-Ports

## 4.3 Interrupts

Kommunikation mit externen Geräten



## 4.2 I/O-Ports

In Output-Port schreiben = Aktoren ansteuern

Beispiel: LED

```
#include <avr/io.h>
```

```
...
```

```
DDRC = 0x70;    binär: 0111 0000
```

```
PORTC = 0x40;   binär: 0100 0000
```

Herstellerspezifisch!

**DDR** = Data Direction Register

Bit = 1 für Output-Port

Bit = 0 für Input-Port

*Details: siehe Datenblatt und Schaltplan*

## 4.2 I/O-Ports

Aus Input-Port lesen = Sensoren abfragen

Beispiel: Taster

```
#include <avr/io.h>
```

```
...
```

```
DDRC = 0xfd;          binär: 1111 1101
```

```
while ((PINC & 0x02) == 0) binär: 0000 0010
```

```
; /* just wait */
```

Herstellerspezifisch!

DDR = Data Direction Register

Bit = 1 für Output-Port

Bit = 0 für Input-Port

*Details: siehe Datenblatt und Schaltplan*

Praktikumsaufgabe: Druckknopfampel



## 4.3 Interrupts

Externes Gerät ruft (per Stromsignal) Unterprogramm auf  
Zeiger hinterlegen: „Interrupt-Vektor“

Beispiel: eingebaute Uhr

statt Zählschleife (`_delay_ms`):  
Hauptprogramm kann  
andere Dinge tun

```
#include <avr/interrupt.h>
```

... „Dies ist ein Interrupt-Handler.“  
Interrupt-Vektor darauf zeigen lassen

```
ISR (TIMER0B_COMP_vect)
{
    PORTD ^= 0x40;
}
```

Herstellerspezifisch!

Initialisierung über spezielle Ports: `TCCR0B`, `TIMSK0`

*Details: siehe Datenblatt und Schaltplan*

## 4.3 Interrupts

Externes Gerät ruft (per Stromsignal) Unterprogramm auf  
Zeiger hinterlegen: „Interrupt-Vektor“

Beispiel: Taster

```
#include <avr/interrupt.h>
```

```
...
```

```
ISR (INT0_vect)
```

```
{  
    PORTD ^= 0x40;  
}
```

statt *Busy Waiting*:  
Hauptprogramm kann  
andere Dinge tun

Herstellerspezifisch!

Initialisierung über spezielle Ports: `EICRA`, `EIMSK`

*Details: siehe Datenblatt und Schaltplan*

## 4.4 volatile-Variable

Externes Gerät ruft (per Stromsignal) Unterprogramm auf  
Zeiger hinterlegen: „Interrupt-Vektor“  
Beispiel: Taster

```
#include <avr/interrupt.h>
```

```
...
```

```
uint8_t key_pressed = 0;
```

```
ISR (INT0_vect)
```

```
{  
    key_pressed = 1;  
}
```

```
int main (void)
```

```
{
```

```
...
```

```
while (1)
```

```
{
```

```
    while (!key_pressed)
```

```
        ; /* just wait */
```

```
    PORTD ^= 0x40;
```

```
    key_pressed = 0;
```

```
}
```

```
return 0;
```

```
}
```

## 4.4 volatile-Variable

Externes Gerät ruft (per Stromsignal) Unterprogramm auf  
Zeiger hinterlegen: „Interrupt-Vektor“  
Beispiel: Taster

```
#include <avr/interrupt.h>
```

```
...
```

```
volatile uint8_t key_pressed = 0;
```

```
ISR (INT0_vect)
```

```
{  
    key_pressed = 1;  
}
```

```
int main (void)
```

```
{
```

```
...
```

```
while (1)
```

```
{
```

```
    while (!key_pressed)
```

```
        ; /* just wait */
```

```
        PORTD ^= 0x40;
```


```
        key_pressed = 0;
```

```
    }
```

```
    return 0;
```

```
}
```

**volatile:**  
Speicherzugriff  
nicht wegoptimieren



## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

```
PORTD = 0x01;
```

```
→ (*(volatile uint8_t *) ((0x0B) + 0x20)) = 0x01;
```

## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

```
PORTD = 0x01;
```

```
→ (* (volatile uint8_t *) (((0x0B) + 0x20))) = 0x01;
```

Zahl: 0x2B



## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

```
PORTD = 0x01;
```

→ 
$$\underbrace{*(\text{volatile uint8\_t } *)}_{\text{Umwandlung in Zeiger auf volatile uint8\_t}} \underbrace{((0x0B) + 0x20)}_{\text{Zahl: 0x2B}} = 0x01;$$

## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

```
PORTD = 0x01;
```

→ `(*(volatile uint8_t *) ((0x0B) + 0x20)) = 0x01;`

↑  
Dereferenzierung des Zeigers

Umwandlung in Zeiger  
auf **volatile** uint8\_t

Zahl: 0x2B

## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

PORTD = 0x01;

→ `(*(volatile uint8_t *) ((0x0B) + 0x20)) = 0x01;`

↑  
Umwandlung in Zeiger  
auf **volatile** uint8\_t

Dereferenzierung des Zeigers

Zahl: 0x2B

→ **volatile** uint8\_t-Variable an Speicheradresse 0x2B

## 4.4 volatile-Variable

Was ist eigentlich PORTD?

```
avr-gcc -Wall -Os -mmcu=atmega328p blink-3.c -E
```

PORTD = 0x01;

→ `(*(volatile uint8_t *) ((0x0B) + 0x20)) = 0x01;`

↑  
Umwandlung in Zeiger  
auf **volatile** uint8\_t

Zahl: 0x2B

Dereferenzierung des Zeigers

→ **volatile** uint8\_t-Variable an Speicheradresse 0x2B

→ `PORTA = PORTB = PORTC = PORTD = 0` ist eine schlechte Idee.

# Hardwarenahe Programmierung

<https://gitlab.cvh-server.de/pgerwinski/hp>

- 1 Einführung
- 2 Einführung in C
- 3 Bibliotheken
- 4 Hardwarenahe Programmierung
  - 4.1 Bit-Operationen
  - 4.2 I/O-Ports
  - 4.3 Interrupts
  - 4.4 volatile-Variable
  - 4.5 Byte-Reihenfolge – Endianness
  - 4.6 Binärdarstellung negativer Zahlen
  - 4.7 Binärdarstellung von Gleitkommazahlen
  - 4.8 Speicherausrichtung – Alignment
- 5 Algorithmen
- 6 Objektorientierte Programmierung
- 7 Datenstrukturen