

# Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

**Jürgen Kleinöder, Daniel Lohmann, Volkmar Sieh**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2016

<http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V-SPiC>



- [1] *ATmega32 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash*. 8155-AVR-07/09. Atmel Corporation. July 2009.
- [GDI] Frank Bauer. *Grundlagen der Informatik*. Vorlesung. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Informatik 5, 2015 (jährlich). URL: <https://gdi.cs.fau.de/w15/material>.
- [2] Manfred Dausmann, Ulrich Bröckl, Dominic Schoop, et al. *C als erste Programmiersprache: Vom Einsteiger zum Fortgeschrittenen*. (Als E-Book aus dem Uninetz verfügbar; PDF-Version unter /proj/i4gspic/pub). Vieweg+Teubner, 2010. ISBN: 978-3834812216. URL: <http://www.springerlink.com/content/978-3-8348-1221-6/#section=813748&page=1>.
- [3] Brian W. Kernighan and Dennis MacAlistair Ritchie. *The C Programming Language*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1978.
- [4] Brian W. Kernighan and Dennis MacAlistair Ritchie. *The C Programming Language (2nd Edition)*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1988. ISBN: 978-8120305960.
- [5] Dennis MacAlistair Ritchie and Ken Thompson. "The Unix Time-Sharing System". In: *Communications of the ACM* 17.7 (July 1974), pp. 365–370. DOI: 10.1145/361011.361061.



- [6] David Tennenhouse. "Proactive Computing". In: *Communications of the ACM* (May 2000), pp. 43–45.
- [7] Jim Turley. "The Two Percent Solution". In: *embedded.com* (Dec. 2002). <http://www.embedded.com/story/0EG2002121750039>, visited 2011-04-08.



# Veranstaltungsüberblick

## Teil A: Konzept und Organisation

1 Einführung

2 Organisation

## Teil B: Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

6 Einfache Datentypen

7 Operatoren und Ausdrücke

8 Kontrollstrukturen

9 Funktionen

10 Variablen

11 Präprozessor

## Teil C: Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14  $\mu$ C-Systemarchitektur

## Teil D: Betriebssystemabstraktionen

15 Nebenläufigkeit

16 Ergänzungen zur Einführung in C

17 Betriebssysteme

18 Dateisysteme

19 Programme und Prozesse

20 Speicherorganisation

21 Nebenläufige Prozesse



# Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

## Teil A Konzept und Organisation

**Jürgen Kleinöder, Daniel Lohmann, Volkmar Sieh**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2016

[http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V\\_SPiC](http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V_SPiC)



# Überblick: Teil A Konzept und Organisation

## 1 Einführung

- 1.1 Ziele der Lehrveranstaltung
- 1.2 Warum  $\mu$ -Controller?
- 1.3 Warum C?
- 1.4 Literatur

## 2 Organisation

- 2.1 Vorlesung
- 2.2 Übung
- 2.3 Lötabend
- 2.4 Prüfung
- 2.5 Semesterüberblick

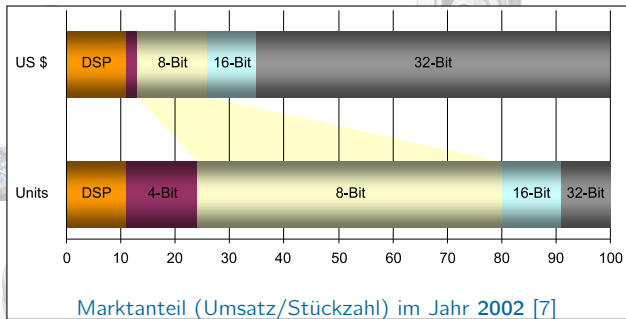


- **Vertiefen** des Wissens über Konzepte und Techniken der Informatik für die Softwareentwicklung
  - Ausgangspunkt: Grundlagen der Informatik (GdI)
  - Schwerpunkt: Systemnahe Softwareentwicklung in C
- **Entwickeln** von Software in C für einen  $\mu$ -Controller ( $\mu$ C) und eine Betriebssystem-Plattform (Linux)
  - SPiCboard-Lehrentwicklungsplattform mit ATmega- $\mu$ C
  - **Praktische Erfahrungen** in hardware- und systemnaher Softwareentwicklung machen
- **Verstehen** der technologischen Sprach- und Hardwaregrundlagen für die Entwicklung systemnaher Software
  - Die Sprache C verstehen und einschätzen können
  - Umgang mit Nebenläufigkeit und Hardwarenähe
  - Umgang mit den Abstraktionen eines Betriebssystems (Dateien, Prozesse, ...)



# Motivation: Eingebettete Systeme

- **Omnipräsent:** **98–99 Prozent** aller Prozessoren wurden im Jahr 2000 in einem **eingebetteten System** verbaut [6]
- **Kostensensitiv:** **70–80 Prozent** aller produzierten Prozessoren sind DSPs und  $\mu$ -Controller, **8-Bit oder kleiner** [6, 7]





# Motivation: Eingebettete Systeme

- **Omnipräsent:** **98–99 Prozent** aller Prozessoren wurden im Jahr 2000 in einem **eingebetteten System** verbaut [6]
- **Kostensensitiv:** **70–80 Prozent** aller produzierten Prozessoren sind DSPs und  $\mu$ -Controller, **8-Bit oder kleiner** [6, 7]
- **Relevant:** **25 Prozent** der Stellenanzeigen für EE-Ingenieure enthalten die Stichworte *embedded* oder *automotive* (<http://stepstone.com>, 4. April 2011)

Bei den oberen Zahlen ist gesunde Skepsis geboten

- Die Veröffentlichungen [6, 7] sind **mehr als 10 Jahre** alt!
- Man kann dennoch davon ausgehen, dass die **relativen Größenordnungen** nach wie vor stimmen
  - 2016 liegt der Anteil an 8-Bitern (vermutlich) noch bei 40 Prozent
  - 4-Bitter dürften inzwischen jedoch weitgehend ausgestorben sein



# Motivation: Die ATmega- $\mu$ C-Familie (8-Bit)

Type	Flash	SRAM	IO	Timer	8/16	UART	SPI	ADC	PWM	EUR
ATTINY13	1 KiB	64 B	6	1/-	-	-	-	1*4	-	0,86
ATTINY2313	2 KiB	128 B	18	1/1	-	1	-	-	-	0,99
ATMEGA48	4 KiB	512 B	23	2/1	1	1	8*10	6	1,40	
ATMEGA16	16 KiB	1024 B	32	2/1	1	1	8*10	4	2,05	
ATMEGA32	32 KiB	2048 B	32	2/1	1	1	8*10	4	3,65	
ATMEGA64	64 KiB	4096 B	53	2/2	2	1	8*10	8	5,70	
ATMEGA128	128 KiB	4096 B	53	2/2	2	1	8*10	8	7,35	
ATMEGA256	256 KiB	8192 B	86	2/2	4	1	16*10	16	8,99	

ATmega-Varianten (Auswahl) und Handelspreise (Reichelt Elektronik, April 2015)

- Sichtbar wird: **Ressourcenknappheit**
  - **Flash** (Speicher für Programmcode und konstante Daten) ist **knapp**
  - **RAM** (Speicher für Laufzeit-Variablen) ist **extrem knapp**
  - Wenige Bytes „Verschwendung“  $\rightsquigarrow$  signifikant höhere Stückzahlkosten



# Motivation: Die Sprache C

- Systemnahe Softwareentwicklung erfolgt überwiegend in **C**
  - **Warum C?** (und nicht Java/Cobol/Scala/<Lieblingssprache>)
- C steht für eine Reihe hier wichtiger Eigenschaften
  - Laufzeiteffizienz (CPU)
    - Übersetzter C-Code läuft direkt auf dem Prozessor
    - Keine Prüfungen auf Programmierfehler zur Laufzeit
  - Platzeffizienz (Speicher)
    - Code und Daten lassen sich sehr kompakt ablegen
    - Keine Prüfung der Datenzugriffe zur Laufzeit
  - Direktheit (Maschinennähe)
    - C erlaubt den direkten Zugriff auf Speicher und Register
  - Portabilität
    - Es gibt für **jede** Plattform einen C-Compiler
    - C wurde „erfunden“ (1973), um das Betriebssystem UNIX portabel zu implementieren [3, 5]



~> **C** ist die **lingua franca** der systemnahen Softwareentwicklung!



- **Lehrziel:** Systemnahe Softwareentwicklung in C
  - Das ist ein sehr umfangreiches Feld: **Hardware-Programmierung**, **Betriebssysteme**, Middleware, Datenbanken, Verteilte Systeme, Übersetzerbau, ...
  - Dazu kommt dann noch das Erlernen der Sprache C selber
- **Ansatz**
  - Konzentration auf zwei Domänen
    - $\mu$ -Controller-Programmierung
    - Softwareentwicklung für die Linux-Systemschnittstelle
  - Gegensatz  $\mu$ C-Umgebung  $\leftrightarrow$  Betriebssystemplattform erfahren
  - Konzepte und Techniken an kleinen Beispielen lehr- und erfahrbar
  - **Hohe Relevanz** für die Zielgruppe (ME)



- Das Handout der Vorlesungsfolien wird online und als 4 × 1-Ausdruck auf Papier zur Verfügung gestellt
  - Ausdrücke werden vor der Vorlesung verteilt
  - Online-Version wird vor der Vorlesung aktualisiert
  - Handout enthält (in geringem Umfang) zusätzliche Informationen
- **Das Handout kann eine eigene Mitschrift nicht ersetzen!**



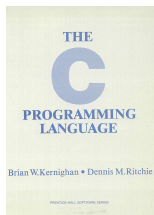
## [2] Für den Einstieg empfohlen:

Manfred Dausmann, Ulrich Bröckl, Dominic Schoop, et al. *C als erste Programmiersprache: Vom Einsteiger zum Fortgeschrittenen*. (Als E-Book aus dem Uninetz verfügbar; PDF-Version unter `/proj/i4gspic/pub`). Vieweg+Teubner, 2010. ISBN: 978-3834812216. URL: <http://www.springerlink.com/content/978-3-8348-1221-6/#section=813748&page=1>



## [4] Der „Klassiker“ (eher als Referenz geeignet):

Brian W. Kernighan and Dennis MacAlistair Ritchie. *The C Programming Language (2nd Edition)*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 1988. ISBN: 978-8120305960



- Inhalt und Themen
  - Grundlegende Konzepte der systemnahen Programmierung
  - Einführung in die Programmiersprache C
    - Unterschiede zu Java
    - Modulkonzept
    - Zeiger und Zeigerarithmetik
  - Softwareentwicklung auf „der nackten Hardware“ (ATmega- $\mu$ C)
    - Abbildung Speicher  $\leftrightarrow$  Sprachkonstrukte
    - Unterbrechungen (*interrupts*) und Nebenläufigkeit
  - Softwareentwicklung auf „einem Betriebssystem“ (Linux)
    - Betriebssystem als Ausführungsumgebung für Programme
    - Abstraktionen und Dienste eines Betriebssystems
- Termin: Do 16:15–17:45, H11
  - Einzeltermin am 13. April (Mi), 16:00–17:30, H8
  - insgesamt 13 Vorlesungstermine



- Tafelübung und Rechnerübung
  - Tafelübungen
    - Ausgabe und Erläuterung der Programmieraufgaben
    - Gemeinsame Entwicklung einer Lösungsskizze
    - Besprechung der Lösungen
  - Rechnerübungen
    - selbstständige Programmierung
    - Umgang mit Entwicklungswerkzeug (Atmel Studio)
    - Betreuung durch Übungsbetreuer
- Termin: Initial 9 Gruppen zur Auswahl
  - Anmeldung über Waffel (siehe Webseite): Heute, 18:00 – So, 18:00
  - Bei zu wenigen Teilnehmern behalten wir uns eine Verteilung auf andere Gruppen vor. Ihr werdet in diesem Fall per E-Mail angeschrieben.

Zur Übungsteilnahme wird ein gültiges Login in Linux-CIP gebraucht!





# Programmieraufgaben

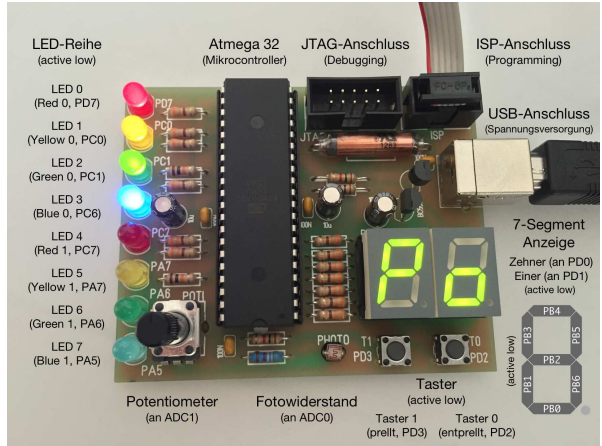
- Praktische Umsetzung des Vorlesungsstoffs
  - Acht Programmieraufgaben ↪ 2-7
  - Bearbeitung teilweise alleine / mit Übungspartner
- Lösungen mit Abgabeskript am Rechner abgeben
  - Lösung wird durch Skripte überprüft
  - Wir korrigieren und bepunkteten die Abgaben und geben sie zurück
- ★ Abgabe der Übungsaufgaben ist **freiwillig**; ↪ 2-6  
es können jedoch bis zu **10% Bonuspunkte**  
für die Prüfungsklausur erarbeitet werden!

Unabhängig davon ist die Teilnahme an den Übungen **dringend empfohlen!**



# Übungsplattform: Das SPiCboard

- ATmega32- $\mu$ C
- JTAG-Anschluss
- 8 LEDs
- 2 7-Seg-Elemente
- 2 Taster
- 1 Potentiometer
- 1 Fotosensor



- Ausleihe zur Übungsbearbeitung möglich
- Oder noch besser  $\leftrightarrow$  selber Löten



- Die Fachschaften (EEI / ME) bieten einen „Lötabend“ an
  - Teilnahme ist freiwillig
  - (Erste) Lötterfahrung sammeln beim Löten eines eigenen SPiCboards
- **Termine:** Mo. 18. – Do. 21. April, 18:30 – 21:30  
Fr. 22. April, 16:00 – 19:00
- **Anmeldung:** über Waffel (Heute, 18:00 – So, 18:00, siehe Webseite)
- **Kostenbeitrag:** SPiCBoard: kostenlos  
Progger: 30 EUR (optional!)

Die Progger (ISPs) können ggfs. auch gebraucht erworben werden.

Thread im EEI-Forum: <http://eei.fsi.fau.de/forum/post/3208>



- Prüfung (Klausur)
  - Termin: voraussichtlich Ende Juli / Anfang August
  - Dauer: 90 min
  - Inhalt: Fragen zum Vorlesungsstoff + Programmieraufgabe
- Klausurnote  $\mapsto$  Modulnote
  - Bestehensgrenze (in der Regel): 50% der möglichen Klausurpunkte (KP)
  - Falls **bestanden** ist eine Notenverbesserung möglich durch Bonuspunkte aus den Programmieraufgaben
    - Basis (Minimum): 50% der möglichen Übungspunkte (ÜP)
    - Jede weiteren 5% der möglichen ÜP  $\mapsto$  +1% der möglichen KP
    - $\rightsquigarrow$  100% der möglichen ÜP  $\mapsto$  +10% der möglichen KP



## Semesterplanung

KW	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Themen	Kapitel im Skript
15	11.04.	12.04.	13.04. VL 1	14.04. VL 2	15.04.	Einführung, Organisation, Java nach C, Abstraktion, Sprachüberblick, Datentypen	VL 1: 1.1 – 3.15, VL 2: 4.1 – 6.14
16	18.04.	19.04. A1 (Blink)	20.04.	21.04. VL 3	22.04.	Ausdrücke, Kontrollstrukturen, Funktionen, Variablen	7.1 – 10.2
17	25.04.	26.04.	27.04.	28.04. VL 4	29.04.	Präprozessor, Programmstruktur, Module, Zeiger, Felder	11.1 – 13.11
18	02.05.	03.05.	04.05.	05.05. Himmelf.	06.05.		
19	09.05.	10.05.	11.05.	12.05. VL 5	13.05.	Zeigerarithmetik, Mikrocontroller-Systemarchitektur, volatile, Verbundtypen (struct, union)	13.12 – 14.22
20	16.05.	17.05.	18.05.	19.05. VL 6	20.05.	Interrupts, Nebenläufigkeit	15.1 – 15.23
21	23.05.	24.05.	25.05.	26.05. Fronleich.	27.05.		
22	30.05.	31.06.	01.06.	02.06. VL 7	03.06.	Ergänzungen zur Einführung in C, Betriebssysteme	16.1 – 17.7
23	06.06.	07.06.	08.06.	09.06. VL 8	10.06.	Dateisysteme	18.1 – 18.29
24	13.06.	14.06.	15.06.	16.06. VL 9	17.06.	Programme und Prozesse	19.1 – 19.25
25	20.06.	21.06.	22.06.	23.06. VL 10	24.06.	Speicherorganisation	20.1 – 20.12
26	27.06.	28.06.	29.06.	30.06. VL 11	01.07.	Nebenläufige Prozesse	21.1 – 21.7
27	04.07.	05.07.	06.07.	07.07. VL 12	08.07.	Synchronisation	21.8 – 21.34
28	11.07.	12.07.	13.07.	14.07. VL 13	15.07.	Fragestunde	



## Dozenten Vorlesung



Volkmar Sieh



Daniel Lohmann



Jürgen Kleinöder

## Organisatoren des Übungsbetriebs



Rainer Müller



Sebastian Maier



Heiko Janker



## Techniker (Ausleihe SPiCboard und Debugger)



Harald Junggunst



Christian Preller



Daniel Christiani



## Übungsleiter



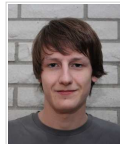
Carsten Braun



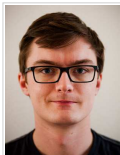
Sabrina Bruckmeier



Benjamin Brunner



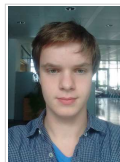
Max Heidbrink



Ivo Ihlemann



Lukas Neckermann



Hannes Wagner



Manfred Wich





## Bei Fragen oder Problemen

---

- Vorlesungs- und Übungsfolien konsultieren
- Häufig gestellte Fragen (FAQ) und Antworten siehe Webseite  
→ [http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V\\_SPIC](http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V_SPIC)  
→ Übungen  
→ FAQ
- Allgemeine Fragen zu Übungsaufgaben etc. im EEI-Forum posten  
→ <https://eei.fsi.uni-erlangen.de/forum/forum/16>
- Bei speziellen Fragen Mail an Mailingliste (alle Übungsleiter)  
→ [i4spic@cs.fau.de](mailto:i4spic@cs.fau.de)



# Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

## Teil B Einführung in C

**Jürgen Kleinöder, Daniel Lohmann, Volkmar Sieh**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2016

[http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V\\_SPiC](http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V_SPiC)



# Überblick: Teil B Einführung in C

**3 Java versus C – Erste Beispiele**

**4 Softwareschichten und Abstraktion**

**5 Sprachüberblick**

**6 Einfache Datentypen**

**7 Operatoren und Ausdrücke**

**8 Kontrollstrukturen**

**9 Funktionen**

**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



# Das erste C-Programm – Vergleich mit Java

## ■ Das berühmteste Programm der Welt in **C**

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main(int argc, char** argv) {
4     // greet user
5     printf("Hello World!\n");
6     return 0;
7 }
```

## ■ Das berühmteste Programm der Welt in **Java**

```
1 import java.lang.System;
2 class Hello {
3     public static void main(String[] args) {
4         /* greet user */
5         System.out.println("Hello World!");
6         return;
7     }
8 }
```



## ■ C-Version zeilenweise erläutert

- 1 Für die Benutzung von `printf()` wird die **Funktionsbibliothek** `stdio.h` mit der **Präprozessor-Anweisung** `#include` eingebunden.
- 3 Ein C-Programm startet in `main()`, einer **globalen Funktion** vom Typ `int`, die in genau einer **Datei** definiert ist.
- 5 Die Ausgabe einer Zeichenkette erfolgt mit der **Funktion** `printf()`. (`\n` ~ Zeilenumbruch)
- 6 Rückkehr zum Betriebssystem mit **Rückgabewert**. 0 bedeutet hier, dass kein Fehler aufgetreten ist.

## ■ Java-Version zeilenweise erläutert

- 1 Für die Benutzung der **Klasse** `out` wird das **Paket** `System` mit der `import`-Anweisung eingebunden.
- 2 Jedes Java-Programm besteht aus mindestens einer **Klasse**.
- 3 Jedes Java-Programm startet in `main()`, einer **statischen Methode** vom Typ `void`, die in genau einer **Klasse** definiert ist.
- 5 Die Ausgabe einer Zeichenkette erfolgt mit der **Methode** `println()` aus der Klasse `out` aus dem Paket `System`. [`↔` GDI, 01-10]
- 6 Rückkehr zum Betriebssystem.



# Das erste C-Programm für einen $\mu$ -Controller

- „Hello World“ für AVR-ATmega (SPiCboard)


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

void main() {
    // initialize hardware: LED on port D pin 7, active low
    DDRD  |= (1<<7); // PD7 is used as output
    PORTD |= (1<<7); // PD7: high --> LED is off

    // greet user
    PORTD &= ~(1<<7); // PD7: low --> LED is on

    // wait forever
    while(1){
    }
}
```

$\mu$ -Controller-Programmierung  
ist „irgendwie anders“.

- Übersetzen und **Flashen** (mit Atmel Studio) ↪ Übung
- Ausführen (SPiCboard):  (rote LED leuchtet)



# Das erste C-Programm für einen $\mu$ -Controller

- „Hello World“ für AVR ATmega (vgl.  $\leftrightarrow$  ??)

```
1 #include <avr/io.h>
2
3 void main() {
4     // initialize hardware: LED on port D pin 7, active low
5     DDRD  |= (1<<7); // PD7 is used as output
6     PORTD |= (1<<7); // PD7: high --> LED is off
7
8     // greet user
9     PORTD &= ~(1<<7); // PD7: low --> LED is on
10
11    // wait forever
12    while(1){
13    }
14 }
```



- $\mu$ -Controller-Programm zeilenweise erläutert  
(Beachte Unterschiede zur Linux-Version  $\leftrightarrow$  3-2)
  - 1 Für den Zugriff auf Hardware-Register (DDRD, PORTD, bereitgestellt als **globale Variablen**) wird die **Funktionsbibliothek** `avr/io.h` mit `#include` eingebunden.
  - 3 Die `main()`-Funktion hat **keinen Rückgabewert** (Typ `void`). Ein  $\mu$ -Controller-Programm läuft **endlos**  $\rightsquigarrow$  `main()` terminiert nie.
  - 5-6 Zunächst wird die **Hardware** initialisiert (in einen definierten Zustand gebracht). Dazu müssen **einzelne Bits** in bestimmten **Hardware-Registern** manipuliert werden.
  - 9 Die Interaktion mit der Umwelt (hier: LED einschalten) erfolgt ebenfalls über die **Manipulation einzelner Bits** in Hardware-Registern.
  - 12-13 Es erfolgt **keine Rückkehr** zum Betriebssystem (wohin auch?). Die Endlosschleife stellt sicher, dass `main()` nicht terminiert.





- Benutzerinteraktion (Lesen eines Zeichens) unter Linux:

```
#include <stdio.h>

int main(int argc, char** argv){
    printf("Press key: ");
    int key = getchar();

    printf("You pressed %c\n", key);
    return 0;
}
```

Die `getchar()`-Funktion liest ein Zeichen von der Standardeingabe (hier: Tastatur). Sie „wartet“ gegebenenfalls, bis ein Zeichen verfügbar ist. In dieser Zeit entzieht das Betriebssystem den Prozessor.



- Benutzerinteraktion (Warten auf Tasterdruck) auf dem SPiCboard:

```
1 #include <avr/io.h>
2
3 void main() {
4     // initialize hardware: button on port D pin 2
5     DDRD  &= ~(1<<2); // PD2 is used as input
6     PORTD |= (1<<2); // activate pull-up: PD2: high
7
8     // initialize hardware: LED on port D pin 7, active low
9     DDRD  |= (1<<7); // PD7 is used as output
10    PORTD |= (1<<7); // PD7: high --> LED is off
11
12    // wait until PD2 -> low (button is pressed)
13    while(PIND & (1<<2))
14        ;
15
16    // greet user
17    PORTD &= ~(1<<7); // PD7: low --> LED is on
18
19    // wait forever
20    while(1)
21        ;
22 }
```



- Benutzerinteraktion mit SPiCboard zeilenweise erläutert
  - 5 Wie die LED ist der Taster mit einem **digitalen IO-Pin** des  $\mu$ -Controllers verbunden. Hier konfigurieren wir Pin 2 von Port D als **Eingang** durch **Löschen** des entsprechenden Bits im Register DDRD.
  - 6 Durch **Setzen** von Bit 2 im Register PORTD wird der interne Pull-Up-Widerstand (hochohmig) aktiviert, über den  $V_{CC}$  anliegt  $\rightsquigarrow$  PD2 = *high*.
- 13-14 **Aktive Warteschleife:** Wartet auf Tastendruck, d. h. solange PD2 (Bit 2 im Register PIND) *high* ist. Ein Tasterdruck zieht PD2 auf Masse  $\rightsquigarrow$  Bit 2 im Register PIND wird *low* und die Schleife verlassen.



# Zum Vergleich: Benutzerinteraktion als Java-Programm

Eingabe als „typisches“  
Java-Programm  
(**objektorientiert, grafisch**)

```
1 import java.lang.System;
2 import javax.swing.*;
3 import java.awt.event.*;
4
5 public class Input implements ActionListener {
6     private JFrame frame;
7
8     public static void main(String[] args) {
9         // create input, frame and button objects
10        Input input = new Input();
11        input.frame = new JFrame("Java-Programm");
12        JButton button = new JButton("Klick mich");
13
14        // add button to frame
15        input.frame.add(button);
16        input.frame.setSize(400, 400);
17        input.frame.setVisible(true);
18
19        // register input as listener of button events
20        button.addActionListener(input);
21    }
22
23    public void actionPerformed(ActionEvent e) {
24        System.out.println("Knopfdruck!");
25        System.exit(0);
26    }
27 }
```



- Das Programm ist mit der C-Variante nicht unmittelbar vergleichbar
  - Es verwendet das in Java übliche (und Ihnen bekannte) **objektorientierte Paradigma**.
  - Dieser Unterschied soll hier verdeutlicht werden.
- Benutzerinteraktion in Java zeilenweise erläutert
  - 5 Um Interaktionsereignisse zu empfangen, implementiert die Klasse `Input` ein entsprechendes **Interface**.
  - 10-12 Das Programmverhalten ist implementiert durch eine Menge von **Objekten** (`frame`, `button`, `input`), die hier bei der Initialisierung erzeugt werden.
  - 20 Das erzeugte `button`-Objekt schickt nun seine Nachrichten an das `input`-Objekt.
  - 23-26 Der Knopfdruck wird durch eine `actionPerformed()`-Nachricht (Methodenaufruf) signalisiert.



# Ein erstes Fazit: Von Java → C (Syntax)

- **Syntaktisch** sind Java und C sich sehr ähnlich (Syntax: „Wie sehen **gültige** Programme der Sprache aus?“)
- C-Syntax war Vorbild bei der Entwicklung von Java  
~> Viele Sprachelemente sind ähnlich oder identisch verwendbar
  - Blöcke, Schleifen, Bedingungen, Anweisungen, Literale
  - Werden in den folgenden Kapiteln noch im Detail behandelt
- Wesentliche Sprachelemente aus Java gibt es in C jedoch **nicht**
  - Klassen, Pakete, Objekte, Ausnahmen (Exceptions), . . .



# Ein erstes Fazit: Von Java → C (Idiomatik)

- **Idiomatisch** gibt es sehr große Unterschiede (Idiomatik: „Wie sehen **übliche** Programme der Sprache aus?“)
- **Java: Objektorientiertes Paradigma**
  - Zentrale Frage: Aus welchen **Dingen** besteht das Problem?
  - Gliederung der Problemlösung in **Klassen** und **Objekte**
  - Hierarchiebildung durch **Vererbung** und **Aggregation**
  - Programmablauf durch Interaktion zwischen **Objekten**
  - Wiederverwendung durch umfangreiche **Klassenbibliothek**
- **C: Imperatives Paradigma**
  - Zentrale Frage: Aus welchen **Aktivitäten** besteht das Problem?
  - Gliederung der Problemlösung in **Funktionen** und **Variablen**
  - Hierarchiebildung durch Untergliederung in **Teilfunktionen**
  - Programmablauf durch Aufrufe zwischen **Funktionen**
  - Wiederverwendung durch **Funktionsbibliotheken**



# Ein erstes Fazit: Von Java → C (Philosophie)

- **Philosophisch** gibt es ebenfalls erhebliche Unterschiede (Philosophie: „Grundlegende Ideen und Konzepte der Sprache“)
- **Java:** Sicherheit und Portabilität durch **Maschinenferne**
  - Übersetzung für **virtuelle Maschine** (JVM)
  - **Umfangreiche** Überprüfung von Programmfehlern zur Laufzeit
    - Bereichsüberschreitungen, Division durch 0, ...
  - **Problemnahes** Speichermodell
    - Nur typsichere Speicherzugriffe, automatische Bereinigung zur Laufzeit
- **C:** Effizienz und Leichtgewichtigkeit durch **Maschinennähe**
  - Übersetzung für **konkrete Hardwarearchitektur**
  - **Keine** Überprüfung von Programmfehlern zur Laufzeit
    - Einige Fehler werden vom Betriebssystem abgefangen – **falls vorhanden**
  - **Maschinennahes** Speichermodell
    - Direkter Speicherzugriff durch **Zeiger**
    - Grobgranularer Zugriffsschutz und automatische Bereinigung (auf Prozessebene) durch das Betriebssystem – **falls vorhanden**





# Ein erstes Fazit: $\mu$ -Controller-Programmierung

C  $\mapsto$  Maschinennähe  $\mapsto$   $\mu$ C-Programmierung

Die Maschinennähe von C zeigt sich insbesondere auch bei der  $\mu$ -Controller-Programmierung!

- Es läuft nur ein Programm
  - Wird bei RESET direkt aus dem Flash-Speicher gestartet
  - Muss zunächst die Hardware initialisieren
  - Darf nie terminieren (z. B. durch Endlosschleife in `main()`)
- Die Problemlösung ist maschinennah implementiert
  - Direkte Manipulation von einzelnen Bits in Hardwareregistern
  - Detailliertes Wissen über die elektrische Verschaltung erforderlich
  - Keine Unterstützung durch Betriebssystem (wie etwa Linux)
  - Allgemein geringes Abstraktionsniveau  $\rightsquigarrow$  fehleranfällig, aufwändig

**Ansatz:** Mehr Abstraktion durch **problemorientierte Bibliotheken**

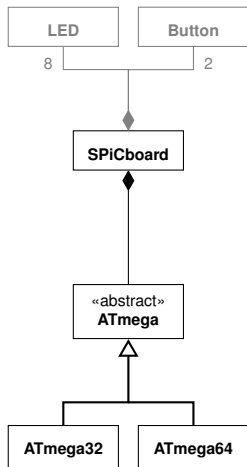


# Abstraktion durch Softwareschichten: SPiCboard

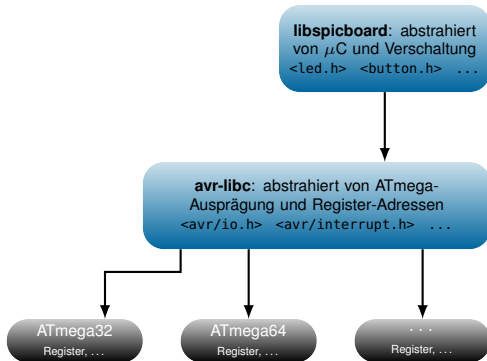
↑ Problemnähe

↓ Maschinennähe

## Hardwareansicht



## Softwareschichten



03-04-ErsteSchritte: 2016-04-11



# Abstraktion durch Softwareschichten: *LED* → *on* im Vergleich

Problemnähe ↑

↓ Maschinennähe

Programm läuft nur auf dem **SPiCboard**. Es verwendet Funktionen (wie `sb_led_on()`) und Konstanten (wie `RED0`) der **lib-spicboard**, welche die konkrete Verschaltung von LEDs, Tastern, usw. mit dem  $\mu\text{C}$  repräsentieren:

```
#include <led.h>
...
sb_led_on(RED0);
```

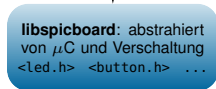
Programm läuft auf **jedem**  $\mu\text{C}$  der ATmega-Serie. Es verwendet **symbolische Registernamen** der **avr-libc** (wie `PORTD`) und allgemeine Merkmale:

```
#include <avr/io.h>
...
DDRD |= (1<<7);
PORTD &= ~(1<<7);
```

Programm läuft nur auf **ATmega32**. Es verwendet **ATmega32-spezifische** Registeradressen (wie `0x12`) und Merkmale:

```
...
(*(unsigned char*)(0x11)) |= (1<<7);
(*(unsigned char*)(0x12)) &= ~(1<<7);
```

**Ziel:** Schalte LED RED0 auf SPiCboard an:



## Bisher: Entwicklung mit avr-libc

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

void main() {
    // initialize hardware

    // button0 on PD2
    DDRD  &= ~(1<<2);
    PORTD |= (1<<2);
    // LED on PD7
    DDRD  |= (1<<7);
    PORTD |= (1<<7);

    // wait until PD2: low --> (button0 pressed)
    while(PIND & (1<<2)) {
    }

    // greet user (red LED)
    PORTD &= ~(1<<7); // PD7: low --> LED is on

    // wait forever
    while(1) {
    }
}
```

(vgl. ↔ 3-7)

## Nun: Entwicklung mit libspicboard

```
#include <led.h>
#include <button.h>

void main() {

    // wait until Button0 is pressed
    while(sb_button_getState(BUTTON0)
        != BTN_PRESSED) {
    }

    // greet user
    sb_led_on(RED0);

    // wait forever
    while(1){
    }
}
```

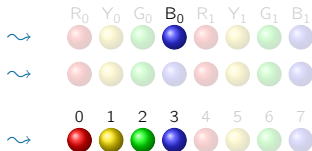
- Hardwareinitialisierung entfällt
- Programm ist einfacher und verständlicher durch **problemspezifische Abstraktionen**
  - Setze Bit 7 in PORTD  
↳ `sb_set_led(RED0)`
  - Lese Bit 2 in PORTD  
↳ `sb_button_getState(BUTTON0)`



## ■ Ausgabe-Abstraktionen (Auswahl)

### ■ LED-Modul (`#include <led.h>`)

- LED einschalten: `sb_led_on(BLUE0)`
- LED ausschalten: `sb_led_off(BLUE0)`
- Alle LEDs ein-/ausschalten:  
`sb_led_set_all_leds(0x0f)`



### ■ 7-Seg-Modul (`#include <7seg.h>`)

- Ganzzahl  $n \in \{-9 \dots 99\}$  ausgeben:  
`sb_7seg_showNumber(47)`



## ■ Eingabe-Abstraktionen (Auswahl)

### ■ Button-Modul (`#include <button.h>`)

- Button-Zustand abfragen:  
`sb_button_getState(BUTTON0)`



{BTNPRESSED, BTNRELEASED}

### ■ ADC-Modul (`#include <adc.h>`)

- Potentiometer-Stellwert abfragen:  
`sb_adc_read(POTI)`



{0...1023}

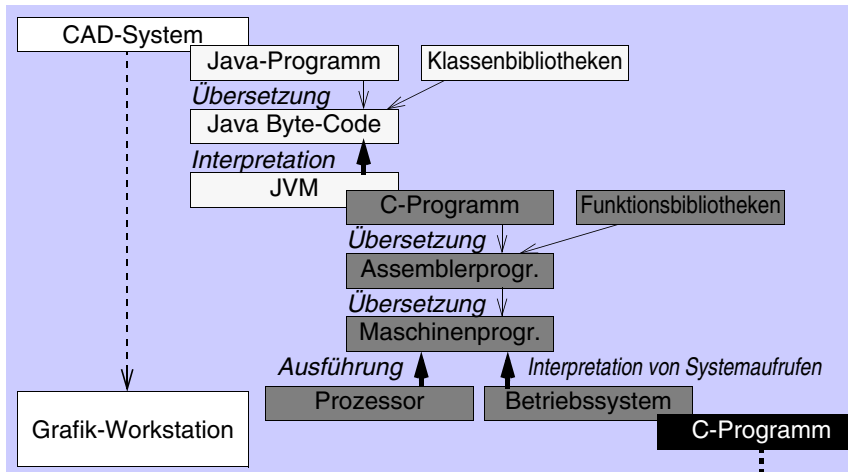


# Softwareschichten im Allgemeinen

↑ Problemnähe

↓ Maschinennähe

**Diskrepanz:** Anwendungsproblem  $\longleftrightarrow$  Abläufe auf der Hardware



**Ziel:** Ausführbarer Maschinencode

03-04-ErsteSchritte: 2016-04-11



- **Anwendersicht:** Umgebung zum Starten, Kontrollieren und Kombinieren von Anwendungen
  - Shell, grafische Benutzeroberfläche
    - z. B. bash, Windows
  - Datenaustausch zwischen Anwendungen und Anwendern
    - z. B. über Dateien
- **Anwendungssicht:** Funktionsbibliothek mit Abstraktionen zur Vereinfachung der Softwareentwicklung
  - Generische Ein-/Ausgabe von Daten
    - z. B. auf Drucker, serielle Schnittstelle, in Datei
  - Permanentspeicherung und Übertragung von Daten
    - z. B. durch Dateisystem, über TCP/IP-Sockets
  - Verwaltung von Speicher und anderen Betriebsmitteln
    - z. B. CPU-Zeit



- **Systemsicht:** Softwareschicht zum Multiplexen der Hardware ( $\leftrightarrow$  Mehrbenutzerbetrieb)
  - Parallele Abarbeitung von Programminstanzen durch **Prozesskonzept**
    - Virtueller Speicher  $\leftrightarrow$  eigener 32-/64-Bit-Adressraum
    - Virtueller Prozessor  $\leftrightarrow$  wird transparent zugeteilt und entzogen
    - Virtuelle Ein-/Ausgabe-Geräte  $\leftrightarrow$  umlenkbar in Datei, Socket, ...
  - Isolation von Programminstanzen durch **Prozesskonzept**
    - Automatische Speicherbereinigung bei Prozessende
    - Erkennung/Vermeidung von Speicherzugriffen auf fremde Prozesse
  - **Partieller Schutz** vor schwereren Programmierfehlern
    - Erkennung *einiger* ungültiger Speicherzugriffe (z. B. Zugriff auf Adresse 0)
    - Erkennung *einiger* ungültiger Operationen (z. B.  $\text{div}/0$ )

## $\mu\text{C}$ -Programmierung ohne Betriebssystemplattform $\rightsquigarrow$ **kein Schutz**

- Ein Betriebssystem schützt **weit weniger** vor Programmierfehlern als z. B. Java.
- Selbst darauf müssen wir jedoch bei der  $\mu\text{C}$ -Programmierung i. a. **verzichten**.
- Bei 8/16-Bit- $\mu\text{C}$  fehlt i. a. die für Schutz erforderliche **Hardware-Unterstützung**.





# Beispiel: Fehlererkennung durch Betriebssystem

## Linux: Division durch 0

```
1 #include <stdio.h>
2
3
4 int main(int argc, char** argv) {
5     int a = 23;
6     int b = 0;
7
8     b = 4711 / (a-23);
9     printf("Ergebnis: %d\n", b);
10
11     return 0;
12 }
```

Übersetzen und Ausführen ergibt:

```
gcc error-linux.c -o error-linux
./error-linux
```

Floating point exception

~> Programm wird **abgebrochen**.

## SPiCboard: Division durch 0

```
#include <7seg.h>
#include <avr/interrupt.h>

void main() {
    int a = 23;
    int b = 0;
    sei();
    b = 4711 / (a-23);
    sb_7seg_showNumber(b);

    while(1){}
```

Ausführen ergibt:



~> Programm setzt  
Berechnung fort  
mit **falschen Daten**.



# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

**5 Sprachüberblick**

**6 Einfache Datentypen**

**7 Operatoren und Ausdrücke**

**8 Kontrollstrukturen**

**9 Funktionen**

**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



# Struktur eines C-Programms – allgemein

```
1 // include files
2 #include ...
3
4 // global variables
5 ... variable1 = ...
6
7 // subfunction 1
8 ... subfunction_1(...) {
9     // local variables
10    ... variable1 = ...
11    // statements
12    ...
13 }
14 // subfunction n
15 ... subfunction_n(...) {
16     ...
17     ...
18     ...
19 }
20
21 // main function
22 ... main(...) {
23     ...
24     ...
25     ...
26 }
```

- Ein C-Programm besteht (üblicherweise) aus
  - Menge von **globalen Variablen**
  - Menge von **(Sub-)Funktionen**
    - Menge von **lokalen Variablen**
    - Menge von **Anweisungen**
  - Der Funktion **main()**, in der die Ausführung beginnt



# Struktur eines C-Programms – am Beispiel

```
1 // include files
2 #include <led.h>
3
4 // global variables
5 LED nextLED = RED0;
6
7 // subfunction 1
8 LED lightLED(void) {
9     if (nextLED <= BLUE1) {
10         sb_led_on(nextLED++);
11     }
12     return nextLED;
13 }
14 // subfunction 2
15 void wait(void) {
16     volatile unsigned int i;
17     for (i=0; i<0xffff; i++)
18         ;
19 }
20
21 // main function
22 void main() {
23     while (lightLED() < 8) {
24         wait();
25     }
26 }
```

## ■ Ein C-Programm besteht (üblicherweise) aus

- Menge von **globalen Variablen** nextLED, Zeile 5
- Menge von **(Sub-)Funktionen** wait(), Zeile 15
  - Menge von **lokalen Variablen** i, Zeile 16
  - Menge von **Anweisungen** for-Schleife, Zeile 17
- Der Funktion **main()**, in der die Ausführung beginnt



```
1 // include files
2 #include <led.h>
3
4 // global variables
5 LED nextLED = RED0;
6
7 // subfunction 1
8 LED lightLED(void) {
9     if (nextLED <= BLUE1) {
10         sb_led_on(nextLED++);
11     }
12     return nextLED;
13 }
14 // subfunction 2
15 void wait(void) {
16     volatile unsigned int i;
17     for (i=0; i<0xffff; i++)
18         ;
19 }
20
21 // main function
22 void main() {
23     while (lightLED() < 8) {
24         wait();
25     }
26 }
```

- Vom Entwickler vergebener **Name** für ein Element des Programms
  - Element: Typ, Variable, Konstante, Funktion, Sprungmarke
  - Aufbau: [ A-Z, a-z, \_ ] [ A-Z, a-z, 0-9, \_ ]\*
    - Buchstabe gefolgt von Buchstaben, Ziffern und Unterstrichen
    - **Unterstrich als erstes Zeichen** möglich, aber reserviert für Compilerhersteller
  - Ein Bezeichner muss vor Gebrauch **deklariert** werden



```

1 // include files
2 #include <led.h>
3
4 // global variables
5 LED nextLED = RED0;
6
7 // subfunction 1
8 LED lightLED(void) {
9     if (nextLED <= BLUE1) {
10         sb_led_on(nextLED++);
11     }
12     return nextLED;
13 }
14 // subfunction 2
15 void wait(void) {
16     volatile unsigned int i;
17     for (i=0; i<0xffff; i++)
18         ;
19 }
20
21 // main function
22 void main() {
23     while (lightLED() < 8) {
24         wait();
25     }
26 }

```

## ■ Reservierte Wörter der Sprache

(↷ dürfen nicht als Bezeichner verwendet werden)

- Eingebaute (*primitive*) Datentypen unsigned int, void
- Typmodifizierer volatile
- Kontrollstrukturen for, while
- Elementaranweisungen return



- Referenz: Liste der Schlüsselwörter (bis einschließlich C99)
  - auto, \_Bool, break, case, char, \_Complex, const, continue, default, do, double, else, enum, extern, float, for, goto, if, \_Imaginary, inline, int, long, register, restrict, return, short, signed, sizeof, static, struct, switch, typedef, union, unsigned, void, volatile, while



```
1 // include files
2 #include <led.h>
3
4 // global variables
5 LED nextLED = RED0;
6
7 // subfunction 1
8 LED lightLED(void) {
9     if (nextLED <= BLUE1) {
10         sb_led_on(nextLED++);
11     }
12     return nextLED;
13 }
14 // subfunction 2
15 void wait(void) {
16     volatile unsigned int i;
17     for (i=0; i<0xffff; i++)
18         ;
19 }
20
21 // main function
22 void main() {
23     while (lightLED() < 8) {
24         wait();
25     }
26 }
```

## ■ (Darstellung von) Konstanten im Quelltext

- Für jeden primitiven Datentyp gibt es eine oder mehrere Literalformen
  - Bei Integertypen: dezimal (Basis 10: 65535), hexadezimal (Basis 16, führendes 0x: 0xffff), oktal (Basis 8, führende 0: 0177777)
- Der Programmierer kann jeweils die am besten geeignete Form wählen
  - 0xffff ist handlicher als 65535, um den Maximalwert einer vorzeichenlosen 16-Bit-Ganzzahl darzustellen





```
1 // include files
2 #include <led.h>
3
4 // global variables
5 LED nextLED = RED0;
6
7 // subfunction 1
8 LED lightLED(void) {
9     if (nextLED <= BLUE1) {
10         sb_led_on(nextLED++);
11     }
12     return nextLED;
13 }
14 // subfunction 2
15 void wait(void) {
16     volatile unsigned int i;
17     for (i=0; i<0xffff; i++)
18         ;
19 }
20
21 // main function
22 void main() {
23     while (lightLED() < 8) {
24         wait();
25     }
26 }
```

- Beschreiben den eigentlichen **Ablauf** des Programms
- Werden hierarchisch komponiert aus drei Grundformen
  - Einzelanweisung – **Ausdruck** gefolgt von **;**
    - einzelnes Semikolon ↦ leere Anweisung
  - **Block** – Sequenz von Anweisungen, geklammert durch **{...}**
  - **Kontrollstruktur**, gefolgt von Anweisung



```
1 // include files
2 #include <led.h>
3
4 // global variables
5 LED nextLED = RED0;
6
7 // subfunction 1
8 LED lightLED(void) {
9     if (nextLED <= BLUE1) {
10         sb_led_on(nextLED++);
11     }
12     return nextLED;
13 }
14 // subfunction 2
15 void wait(void) {
16     volatile unsigned int i;
17     for (i=0; i<0xffff; i++)
18         ;
19 }
20
21 // main function
22 void main() {
23     while (lightLED() < 8) {
24         wait();
25     }
26 }
```

## ■ Gültige Kombination von Operatoren, Literalen und Bezeichnern

- „Gültig“ im Sinne von Syntax und Typsystem
- Vorrangregeln für Operatoren legen die Reihenfolge fest, ↔ 7-14  
in der Ausdrücke abgearbeitet werden
  - Auswertungsreihenfolge kann mit Klammern ( ) explizit bestimmt werden
  - Der Compiler darf Teilausdrücke in möglichst effizienter Folge auswerten



# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

**6 Einfache Datentypen**

**7 Operatoren und Ausdrücke**

**8 Kontrollstrukturen**

**9 Funktionen**

**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



- **Datentyp** := (*<Menge von Werten>*, *<Menge von Operationen>*)
  - **Literal** Wert im Quelltext ↔ 5-6
  - **Konstante** Bezeichner für einen Wert
  - **Variable** Bezeichner für Speicherplatz, der einen Wert aufnehmen kann
  - **Funktion** Bezeichner für Sequenz von Anweisungen, die einen Wert zurückgibt
- ↪ Literale, Konstanten, Variablen, Funktionen haben einen **(Daten-)Typ**
- Datentyp legt fest
  - Repräsentation der Werte im Speicher
  - Größe des Speicherplatzes für Variablen
  - Erlaubte Operationen
- Datentyp wird festgelegt
  - Explizit, durch Deklaration, Typ-Cast oder Schreibweise (Literale)
  - Implizit, durch „Auslassung“ (↪ `int` schlechter Stil!)



# Primitive Datentypen in C

- Ganzzahlen/Zeichen `char`, `short`, `int`, `long`, `long long` (C99)
  - Wertebereich: implementierungsabhängig [≠Java]  
Es gilt: `char` ≤ `short` ≤ `int` ≤ `long` ≤ `long long`
  - Jeweils als `signed`- und `unsigned`-Variante verfügbar
- Fließkommazahlen `float`, `double`, `long double`
  - Wertebereich: implementierungsabhängig [≠Java]  
Es gilt: `float` ≤ `double` ≤ `long double`
  - Ab C99 auch als `_Complex`-Datentypen verfügbar (für komplexe Zahlen)
- Leerer Datentyp `void`
  - Wertebereich: ∅
- Boolescher Datentyp `_Bool` (C99)
  - Wertebereich: {0, 1} (↔ letztlich ein Integertyp)
  - Bedingungsausdrücke (z. B. `if(...)`) sind in C vom Typ `int`! [≠Java]



Integertyp	Verwendung	Literalformen
■ <code>char</code>	kleine Ganzzahl oder Zeichen	'A', 65, 0x41, 0101
■ <code>short [int]</code>	Ganzzahl ( <code>int</code> ist optional)	s. o.
■ <code>int</code>	Ganzzahl „natürlicher Größe“	s. o.
■ <code>long [int]</code>	große Ganzzahl	65L, 0x41L, 0101L
■ <code>long long [int]</code>	sehr große Ganzzahl	65LL, 0x41LL, 0101LL
■ Typ-Modifizierer	werden vorangestellt	Literal-Suffix
■ <code>signed</code>	Typ ist vorzeichenbehaftet (Normalfall)	-
■ <code>unsigned</code>	Typ ist vorzeichenlos	U
■ <code>const</code>	Variable des Typs kann nicht verändert werden	-

### ■ Beispiele (Variablendefinitionen)

```
char a           = 'A';    // char-Variable, Wert 65 (ASCII: A)
const int b      = 0x41;   // int-Konstante, Wert 65 (Hex: 0x41)
long c           = 0L;     // long-Variable, Wert 0
unsigned long int d = 22UL; // unsigned-long-Variable, Wert 22
```



- Die interne Darstellung (Bitbreite) ist **implementierungsabhängig**

	Datentyp-Breite in Bit				
	Java	C-Standard	gcc/A32	gcc/A64	gcc/AVR
char	16	≥ 8	8	8	8
short	16	≥ 16	16	16	16
int	32	≥ 16	32	32	16
long	64	≥ 32	32	64	32
long long	-	≥ 64	64	64	64

- Der Wertebereich berechnet sich aus der Bitbreite

- signed**  $-(2^{Bits-1}-1) \rightarrow +(2^{Bits-1}-1)$
- unsigned**  $0 \rightarrow +(2^{Bits}-1)$

Hier zeigt sich die C-Philosophie: Effizienz durch **Maschinennähe**  $\leftrightarrow$  [3-13]

Die interne Repräsentation der Integertypen ist definiert durch die **Hardware** (Registerbreite, Busbreite, etc.). Das führt im Ergebnis zu **effizientem Code**.



# Integertypen: Maschinennähe → Problemnähe

- **Problem:** Breite ( $\leadsto$  Wertebereich) der C-Standardtypen ist implementierungsspezifisch → **Maschinennähe**
- **Oft benötigt:** Integertyp definierter Größe → **Problemnähe**
  - Wertebereich **sicher**, aber möglichst **kompakt** darstellen
  - Register **definierter Breite**  $n$  bearbeiten
  - Code unabhängig von Compiler und Hardware halten ( $\leadsto$  Portierbarkeit)
- **Lösung:** Modul `stdint.h`
  - Definiert Alias-Typen: `intn_t` und `uintn_t` für  $n \in \{8, 16, 32, 64\}$
  - Wird vom Compiler-Hersteller bereitgestellt

Wertebereich `stdint.h`-Typen

<code>uint8_t</code>	0 → 255	<code>int8_t</code>	-128 → +127
<code>uint16_t</code>	0 → 65.535	<code>int16_t</code>	-32.768 → +32.767
<code>uint32_t</code>	0 → 4.294.967.295	<code>int32_t</code>	-2.147.483.648 → +2.147.483.647
<code>uint64_t</code>	0 → $> 1,8 * 10^{19}$	<code>int64_t</code>	$< -9,2 * 10^{18}$ → $> +9,2 * 10^{18}$





- Mit dem `typedef`-Schlüsselwort definiert man einen **Typ-Alias**:  
`typedef Typausdruck Bezeichner`;
  - *Bezeichner* ist nun ein **alternativer Name** für *Typausdruck*
  - Kann überall verwendet werden, wo ein Typausdruck erwartet wird

```
// stdint.h (avr-gcc)                // stdint.h (x86-gcc, IA32)
typedef unsigned char uint8_t;       typedef unsigned char uint8_t;
typedef unsigned int  uint16_t;      typedef unsigned short uint16_t;
...                                  ...
```

```
// main.c
#include <stdint.h>

uint16_t counter = 0;    // global 16-bit counter, range 0-65535
...
typedef uint8_t Register; // Registers on this machine are 8-bit
...
```



- Typ-Aliase ermöglichen einfache **problembezogene** Abstraktionen
  - Register ist problemnäher als `uint8_t`
    - ↪ Spätere Änderungen (z. B. auf 16-Bit-Register) zentral möglich
  - `uint16_t` ist problemnäher als `unsigned char`
  - `uint16_t` ist **sicherer** als `unsigned char`

Definierte Bitbreiten sind bei der  $\mu$ C-Entwicklung sehr wichtig!

- Große Unterschiede zwischen Plattformen und Compilern
  - ↪ Kompatibilitätsprobleme
- Um Speicher zu sparen, sollte immer der **kleinstmögliche** Integertyp verwendet werden

**Regel:** Bei der systemnahen Programmierung werden Typen aus `stdint.h` verwendet!



- Mit dem `enum`-Schlüsselwort definiert man einen **Aufzählungstyp** über eine explizite Menge **symbolischer** Werte:

```
enum Bezeichneropt { KonstantenListe } ;
```

- Beispiel

- Definition: 

```
enum eLED {RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0,  
          RED1, YELLOW1, GREEN1, BLUE1};
```

- Verwendung: 

```
enum eLED myLed = YELLOW0; // enum necessary here!  
...  
sb_led_on(BLUE1);
```

- Vereinfachung der Verwendung durch typedef

- Definition: 

```
typedef enum eLED {RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0,  
                RED1, YELLOW1, GREEN1, BLUE1} LED;
```

- Verwendung: 

```
LED myLed = YELLOW0; // LED --> enum eLED
```



- Technisch sind enum-Typen Integers (int)
  - enum-Konstanten werden von 0 an durchnummeriert

```
typedef enum { RED0,      // value: 0
              YELLOW0,   // value: 1
              GREEN0,    // value: 2
              ... } LED;
```

- Es ist auch möglich, Werte direkt zuzuweisen

```
typedef enum { BUTTON0 = 4, BUTTON1 = 8 } BUTTON;
```

- Man kann sie verwenden wie ints (z. B. mit ihnen rechnen)

```
sb_led_on(RED0 + 2); // -> LED GREEN0 is on
sb_led_on(1);        // -> LED YELLOW0 is on
for( int led = RED0, led <= BLUE1; led++ )
    sb_led_off(led); // turn off all LEDs
// Also possible...
sb_led_on(4711);    // no compiler/runtime error!
```

- ↪ Es findet **keinerlei Typprüfung** statt!

Das entspricht der

**C-Philosophie!** ↪ 3-13



- Fließkommattyp      Verwendung      Literalformen
  - **float**      einfache Genauigkeit ( $\approx$  7 St.)      100.0F, 1.0E2F
  - **double**      doppelte Genauigkeit ( $\approx$  15 St.)      100.0, 1.0E2
  - **long double**      „erweiterte Genauigkeit“      100.0L 1.0E2L
  
- Genauigkeit / Wertebereich sind **implementierungsabhängig** [ $\neq$  Java]
  - Es gilt: **float**  $\leq$  **double**  $\leq$  **long double**
  - **long double** und **double** sind auf vielen Plattformen identisch

„Effizienz durch Maschinennähe“  $\leftrightarrow$  3-13

## Fließkommazahlen + $\mu$ C-Plattform = \$\$\$

- Oft keine Hardwareunterstützung für **float**-Arithmetik
  - $\rightsquigarrow$  **sehr teure** Emulation in Software (langsam, viel zusätzlicher Code)
- Speicherverbrauch von **float**- und **double**-Variablen ist **sehr hoch**
  - $\rightsquigarrow$  mindestens 32/64 Bit (**float/double**)

**Regel:** Bei der  $\mu$ -Controller-Programmierung ist auf Fließkommaarithmetik **zu verzichten!**



- Zeichen sind in C ebenfalls Ganzzahlen (Integers)  $\hookrightarrow$  6-3
  - `char` gehört zu den Integer-Typen (üblicherweise 8 Bit = 1 Byte)
- Repräsentation erfolgt durch den `ASCII-Code`  $\hookrightarrow$  6-12
  - 7-Bit-Code  $\mapsto$  128 Zeichen standardisiert (die verbleibenden 128 Zeichen werden unterschiedlich interpretiert)
  - Spezielle Literalform durch Hochkommata
    - 'A'  $\mapsto$  ASCII-Code von A
  - Nichtdruckbare Zeichen durch Escape-Sequenzen
    - Tabulator `'\t'`
    - Zeilentrenner `'\n'`
    - Backslash `'\\'`
- Zeichen  $\mapsto$  Integer  $\rightsquigarrow$  man kann mit Zeichen rechnen

```
char b = 'A' + 1;           // b: 'B'
int lower(int ch) {        // lower('X'): 'x'
    return ch + 0x20;
}
```



# ASCII-Code-Tabelle (7 Bit)

ASCII → *American Standard Code for Information Interchange*

<b>NUL</b> 00	<b>SOH</b> 01	<b>STX</b> 02	<b>ETX</b> 03	<b>EOT</b> 04	<b>ENQ</b> 05	<b>ACK</b> 06	<b>BEL</b> 07
<b>BS</b> 08	<b>HT</b> 09	<b>NL</b> 0A	<b>VT</b> 0B	<b>NP</b> 0C	<b>CR</b> 0D	<b>SO</b> 0E	<b>SI</b> 0F
<b>DLE</b> 10	<b>DC1</b> 11	<b>DC2</b> 12	<b>DC3</b> 13	<b>DC4</b> 14	<b>NAK</b> 15	<b>SYN</b> 16	<b>ETB</b> 17
<b>CAN</b> 18	<b>EM</b> 19	<b>SUB</b> 1A	<b>ESC</b> 1B	<b>FS</b> 1C	<b>GS</b> 1D	<b>RS</b> 1E	<b>US</b> 1F
<b>SP</b> 20	<b>!</b> 21	<b>"</b> 22	<b>#</b> 23	<b>\$</b> 24	<b>%</b> 25	<b>&amp;</b> 26	<b>'</b> 27
<b>(</b> 28	<b>)</b> 29	<b>*</b> 2A	<b>+</b> 2B	<b>,</b> 2C	<b>-</b> 2D	<b>.</b> 2E	<b>/</b> 2F
<b>0</b> 30	<b>1</b> 31	<b>2</b> 32	<b>3</b> 33	<b>4</b> 34	<b>5</b> 35	<b>6</b> 36	<b>7</b> 37
<b>8</b> 38	<b>9</b> 39	<b>:</b> 3A	<b>;</b> 3B	<b>&lt;</b> 3C	<b>=</b> 3D	<b>&gt;</b> 3E	<b>?</b> 3F
<b>@</b> 40	<b>A</b> 41	<b>B</b> 42	<b>C</b> 43	<b>D</b> 44	<b>E</b> 45	<b>F</b> 46	<b>G</b> 47
<b>H</b> 48	<b>I</b> 49	<b>J</b> 4A	<b>K</b> 4B	<b>L</b> 4C	<b>M</b> 4D	<b>N</b> 4E	<b>O</b> 4F
<b>P</b> 50	<b>Q</b> 51	<b>R</b> 52	<b>S</b> 53	<b>T</b> 54	<b>U</b> 55	<b>V</b> 56	<b>W</b> 57
<b>X</b> 58	<b>Y</b> 59	<b>Z</b> 5A	<b>[</b> 5B	<b>\</b> 5C	<b>]</b> 5D	<b>^</b> 5E	<b>_</b> 5F
<b>`</b> 60	<b>a</b> 61	<b>b</b> 62	<b>c</b> 63	<b>d</b> 64	<b>e</b> 65	<b>f</b> 66	<b>g</b> 67
<b>h</b> 68	<b>i</b> 69	<b>j</b> 6A	<b>k</b> 6B	<b>l</b> 6C	<b>m</b> 6D	<b>n</b> 6E	<b>o</b> 6F
<b>p</b> 70	<b>q</b> 71	<b>r</b> 72	<b>s</b> 73	<b>t</b> 74	<b>u</b> 75	<b>v</b> 76	<b>w</b> 77
<b>x</b> 78	<b>y</b> 79	<b>z</b> 7A	<b>{</b> 7B	<b> </b> 7C	<b>}</b> 7D	<b>~</b> 7E	<b>DEL</b> 7F



- Ein String ist in C ein Feld (Array) von Zeichen
  - Repräsentation: Folge von Einzelzeichen, terminiert durch (letztes Zeichen): **NUL** (ASCII-Wert 0)
  - Speicherbedarf: (Länge + 1) Bytes
  - Datentyp: **char[]** oder **char\*** (synonym)
- Spezielle Literalform durch doppelte Hochkommata:

"Hi!" → 

'H'	'i'	'!'	0
-----	-----	-----	---

 ← abschließendes 0-Byte

- Beispiel (Linux)

```
#include <stdio.h>
char[] string = "Hello, World!\n";
int main(){
    printf(string);
    return 0;
}
```

Zeichenketten brauchen vergleichsweise viel Speicher und „größere“ Ausgabegeräte (z. B. LCD-Display).

~ Bei der  $\mu$ C-Programmierung spielen sie nur eine untergeordnete Rolle.





# Ausblick: Komplexe Datentypen

- Aus einfachen Datentypen lassen sich (rekursiv) auch komplexe(re) Datentypen bilden

- Felder (Arrays)  $\hookrightarrow$  Sequenz von Elementen gleichen Typs [ $\approx$ Java]

```
int intArray[4]; // allocate array with 4 elements
intArray[0] = 0x4711; // set 1st element (index 0)
```

- Zeiger  $\hookrightarrow$  veränderbare Referenzen auf Variablen [ $\neq$ Java]

```
int a = 0x4711; // a: 0x4711
int *b = &a; // b: -->a (memory location of a)
int c = *b; // pointer dereference (c: 0x4711)
*b = 23; // pointer dereference (a: 23)
```

- Strukturen  $\hookrightarrow$  Verbund von Elementen bel. Typs [ $\neq$ Java]

```
struct Point { int x; int y; };
struct Point p; // p is Point variable
p.x = 0x47; // set x-component
p.y = 0x11; // set y-component
```

- Wir betrachten diese detailliert in [späteren Kapiteln](#)



# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

6 Einfache Datentypen

**7 Operatoren und Ausdrücke**

**8 Kontrollstrukturen**

**9 Funktionen**

**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



- Stehen für alle Ganzzahl- und Fließkommatypen zur Verfügung

+ Addition

- Subtraktion

\* Multiplikation

/ Division

unäres - negatives Vorzeichen (z. B.  $-a$ )  $\rightsquigarrow$  Multiplikation mit  $-1$

unäres + positives Vorzeichen (z. B.  $+3$ )  $\rightsquigarrow$  kein Effekt

- Zusätzlich nur für Ganzzahltypen:

% Modulo (Rest bei Division)



- Stehen für Ganzzahltypen und Zeigertypen zur Verfügung

++            Inkrement (Erhöhung um 1)  
--            Dekrement (Verminderung um 1)

- Linksseitiger Operator (Präfix)            ++x bzw. --x

- Erst wird der Inhalt von x verändert
- Dann wird der (neue) Inhalt von x als Ergebnis geliefert

- Rechtsseitiger Operator (Postfix)            x++ bzw. x--

- Erst wird der (alte) Inhalt von x als Ergebnis geliefert
- Dann wird der Inhalt von x verändert

- Beispiele

```
a = 10;  
b = a++; // b: 10, a: 11  
c = ++a; // c: 12, a: 12
```



## ■ Vergleichen von zwei Ausdrücken

<	kleiner
<=	kleiner gleich
>	größer
>=	größer gleich
==	gleich (zwei Gleichheitszeichen!)
!=	ungleich

■ **Beachte:** Ergebnis ist vom Typ `int`

[≠Java]

- Ergebnis: *falsch* ↦ 0  
*wahr* ↦ 1
- Man kann mit dem Ergebnis rechnen

## ■ Beispiele

```
if (a >= 3) {···}
if (a == 3) {···}
return a * (a > 0); // return 0 if a is negative
```



- Verknüpfung von Wahrheitswerten (wahr / falsch), kommutativ

&&	„und“	<i>wahr</i> && <i>wahr</i> $\rightarrow$ <i>wahr</i>
	(Konjunktion)	<i>wahr</i> && <i>falsch</i> $\rightarrow$ <i>falsch</i>
		<i>falsch</i> && <i>falsch</i> $\rightarrow$ <i>falsch</i>

	„oder“	<i>wahr</i>    <i>wahr</i> $\rightarrow$ <i>wahr</i>
	(Disjunktion)	<i>wahr</i>    <i>falsch</i> $\rightarrow$ <i>wahr</i>
		<i>falsch</i>    <i>falsch</i> $\rightarrow$ <i>falsch</i>

!	„nicht“	! <i>wahr</i> $\rightarrow$ <i>falsch</i>
	(Negation, unär)	! <i>falsch</i> $\rightarrow$ <i>wahr</i>

- **Beachte:** Operanden und Ergebnis sind vom Typ `int` [ $\neq$  Java]

- Operanden  
(Eingangspartner):  $0 \mapsto$  *falsch*  
 $\neq 0 \mapsto$  *wahr*

- Ergebnis:  
*falsch*  $\mapsto$  0  
*wahr*  $\mapsto$  1



- Die Auswertung eines logischen Ausdrucks wird **abgebrochen**, sobald das Ergebnis feststeht

■ Sei `int a = 5;` `int b = 3;` `int c = 7;`

$\underbrace{a > b}_{1} \ || \ \underbrace{a > c}_{?}$  ← wird nicht ausgewertet, da der erste Term bereits *wahr* ergibt

$\underbrace{a > c}_{0} \ \&\& \ \underbrace{a > b}_{?}$  ← wird nicht ausgewertet, da der erste Term bereits *falsch* ergibt

- Kann **überraschend** sein, wenn Teilausdrücke **Nebeneffekte** haben

```
int a = 5; int b = 3; int c = 7;
if ( a > c && !func(b) ) {···} // func() will not be called
```



- Allgemeiner Zuweisungsoperator (=)
  - Zuweisung eines Wertes an eine Variable
  - Beispiel: `a = b + 23`
- Arithmetische Zuweisungsoperatoren (`+=`, `-=`, ...)
  - Abgekürzte Schreibweise zur Modifikation des Variablenwerts
  - Beispiel: `a += 23` ist äquivalent zu `a = a + 23`
  - Allgemein: `a op= b` ist äquivalent zu `a = a op b`  
für  $op \in \{ +, -, *, \%, \ll, \gg, \&, ^, | \}$
- Beispiele

```
int a = 8;  
a += 8;    // a: 16  
a %= 3;   // a: 1
```





# Zuweisungen sind Ausdrücke!

- Zuweisungen können in komplexere Ausdrücke geschachtelt werden
  - Das Ergebnis eines Zuweisungsausdrucks ist der zugewiesene Wert

```
int a, b, c;  
a = b = c = 1; // c: 1, b: 1, a: 1
```

- Die Verwendung von Zuweisungen in beliebigen Ausdrücken führt zu **Nebenwirkungen**, die nicht immer offensichtlich sind

```
a += b += c; // Value of a and b?
```

## Besonders gefährlich: Verwendung von = statt ==

In C sind Wahrheitswerte Integers: 0  $\mapsto$  falsch,  $\emptyset$   $\mapsto$  wahr

- Typischer „Anfängerfehler“ in Kontrollstrukturen:

```
if (a = 6) {...} else {...} // BUG: if-branch is always taken!!!
```

- Compiler beanstandet das Konstrukt nicht, es handelt sich um einen gültigen Ausdruck!  $\rightsquigarrow$  Fehler wird leicht übersehen!



## ■ Bitweise Verknüpfung von Ganzzahltypen, kommutativ

&	bitweises „Und“ (Bit-Schnittmenge)	$1 \& 1 \rightarrow 1$
		$1 \& 0 \rightarrow 0$
		$0 \& 0 \rightarrow 0$

	bitweises „Oder“ (Bit-Vereinigungsmenge)	$1   1 \rightarrow 1$
		$1   0 \rightarrow 1$
		$0   0 \rightarrow 0$

$\wedge$	bitweises „Exklusiv-Oder“ (Bit-Antivalenz)	$1 \wedge 1 \rightarrow 0$
		$1 \wedge 0 \rightarrow 1$
		$0 \wedge 0 \rightarrow 0$

~	bitweise Inversion (Einerkomplement, unär)	$\sim 1 \rightarrow 0$
		$\sim 0 \rightarrow 1$



- Schiebeoperationen auf Ganzzahltypen, nicht kommutativ

<<      bitweises Linksschieben (rechts werden 0-Bits „nachgefüllt“)  
 >>      bitweises Rechtsschieben (links werden 0-Bits „nachgefüllt“)

- Beispiele      (x sei vom Typ uint8\_t)

Bit#	7	6	5	4	3	2	1	0	
x=156	1	0	0	1	1	1	0	0	0x9c
~x	0	1	1	0	0	0	1	1	0x63
7	0	0	0	0	0	1	1	1	0x07
x   7	1	0	0	1	1	1	1	1	0x9f
x & 7	0	0	0	0	0	1	0	0	0x04
x ^ 7	1	0	0	1	1	0	1	1	0x9B
x << 2	0	1	1	1	0	0	0	0	0x70
x >> 1	0	1	0	0	1	1	1	0	0x4e



# Bitoperationen – Anwendung

- Durch Verknüpfung lassen sich gezielt einzelne Bits setzen/löschen

Bit#                    7 6 5 4 3 2 1 0  
PORTD                

?	?	?	?	?	?	?	?
---	---	---	---	---	---	---	---

Bit 7 soll verändert werden, die anderen Bits jedoch erhalten bleiben!

0x80                    

1	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

  
PORTD |= 0x80        

1	?	?	?	?	?	?	?
---	---	---	---	---	---	---	---

Setzen eines Bits durch **Ver-odern** mit Maske, in der nur das Zielbit 1 ist

~0x80                    

0	1	1	1	1	1	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

  
PORTD &= ~0x80      

0	?	?	?	?	?	?	?
---	---	---	---	---	---	---	---

Löschen eines Bits durch **Ver-unden** mit Maske, in der nur das Zielbit 0 ist

0x08                    

0	0	0	0	1	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

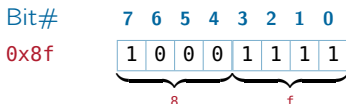
  
PORTD ^= 0x08        

?	?	?	?	?	?	?	?
---	---	---	---	---	---	---	---

Invertieren eines Bits durch **Ver-xodern** mit Maske, in der nur das Zielbit 1 ist



- Bitmasken werden gerne als Hexadezimal-Literale angegeben



Jede Hex-Ziffer repräsentiert genau ein Halb-Byte (*Nibble*) ~ Verständlichkeit

- Für „Dezimal-Denker“ bietet sich die Linksschiebe-Operation an

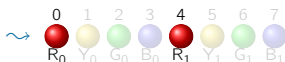
```
PORTD |= (1<<7);      // set bit 7: 1<<7 --> 10000000
PORTD &= ~(1<<7);    // mask bit 7: ~(1<<7) --> 01111111
```

- Zusammen mit der Oder-Operation auch für komplexere Masken

```
#include <led.h>
void main() {
    uint8_t mask = (1<<RED0) | (1<<RED1);

    sb_led_set_all_leds (mask);

    while(1) ;
}
```



- Formulierung von Bedingungen in Ausdrücken

$Ausdruck_1 ? Ausdruck_2 : Ausdruck_3$

- Zunächst wird  $Ausdruck_1$  ausgewertet
  - $Ausdruck_1 \neq 0$  (*wahr*)  $\rightsquigarrow$  Ergebnis ist  $Ausdruck_2$
  - $Ausdruck_1 = 0$  (*falsch*)  $\rightsquigarrow$  Ergebnis ist  $Ausdruck_3$
- $?:$  ist der einzige ternäre (dreistellige) Operator in C

- Beispiel

```
int abs(int a) {  
    // if (a<0) return -a; else return a;  
    return (a<0) ? -a : a;  
}
```



- Reihung von Ausdrücken  
 $Ausdruck_1$  ,  $Ausdruck_2$ 
  - Zunächst wird  $Ausdruck_1$  ausgewertet  
     $\rightsquigarrow$  Nebeneffekte von  $Ausdruck_1$  werden sichtbar
  - Ergebnis ist der Wert von  $Ausdruck_2$
- Verwendung des Komma-Operators ist selten erforderlich!  
(Präprozessor-Makros mit Nebeneffekten)



	Klasse	Operatoren	Assoziativität
1	Funktionsaufruf, Feldzugriff Strukturzugriff Post-Inkrement/-Dekrement	x() x[] x.y x->y x++ x--	links → rechts
2	Prä-Inkrement/-Dekrement unäre Operatoren Adresse, Verweis (Zeiger) Typkonvertierung (cast) Typgröße	++x --x +x -x ~x !x & * (<Typ>)x sizeof(x)	rechts → links
3	Multiplikation, Division, Modulo	* / %	links → rechts
4	Addition, Subtraktion	+ -	links → rechts
5	Bitweises Schieben	>> <<	links → rechts
6	Relationaloperatoren	< <= > >=	links → rechts
7	Gleichheitsoperatoren	== !=	links → rechts
8	Bitweises UND	&	links → rechts
9	Bitweises OR		links → rechts
10	Bitweises XOR	^	links → rechts
11	Konjunktion	&&	links → rechts
12	Disjunktion		links → rechts
13	Bedingte Auswertung	?:=	rechts → links
14	Zuweisung	= op=	rechts → links
15	Sequenz	,	links → rechts





# Typumwandlung in Ausdrücken

- Ein Ausdruck wird *mindestens* mit `int`-Wortbreite berechnet
  - `short`- und `signed char`-Operanden werden implizit „aufgewertet“ (↔ *Integer Promotion*)
  - Erst das Ergebnis wird auf den Zieldatentyp abgeschnitten/erweitert

```
int8_t a=100, b=3, c=4, res; // range: -128 --> +127

res = a * b / c; // promotion to int: 300 fits in!
```

Diagramm zur Integer Promotion:

`res` (Typ `int8_t`: 75) = `a * b` (Typ `int`: 300) / `c` (Typ `int`: 75)

Die Operation `a * b` wird von `int8_t` auf `int` erweitert, da `int` die größte Wortbreite unter den Operanden ist.

- Generell wird die *größte* beteiligte Wortbreite verwendet ↔ 6-3

```
int8_t a=100, b=3, res; // range: -128 --> +127
int32_t c=4; // range: -2147483648 --> +2147483647

res = a * b / c; // promotion to int32_t
```

Diagramm zur Integer Promotion:

`res` (Typ `int8_t`: 75) = `a * b` (Typ `int32_t`: 300) / `c` (Typ `int32_t`: 75)

Die Operation `a * b` wird von `int8_t` auf `int32_t` erweitert, da `int32_t` die größte Wortbreite unter den Operanden ist.



# Typumwandlung in Ausdrücken (Forts.)

- Fließkomma-Typen gelten dabei als „größer“ als Ganzzahl-Typen

```
int8_t a=100, b=3, res;           // range: -128 --> +127  
  
res = a * b / 4.0; // promotion to double  
  
int8_t: 75      double: 300.0      double: 4.0  
                └────────────────┘  
                double: 75.0
```

- **unsigned**-Typen gelten dabei als „größer“ als **signed**-Typen

```
int s = -1, res;           // range: -32768 --> +32767  
unsigned u = 1;           // range: 0 --> 65535  
  
res = s < u; // promotion to unsigned: -1 --> 65535  
  
int: 0      unsigned: 65535  
            └────────────────┘  
            unsigned: 0
```

↪ Überraschende Ergebnisse bei negativen Werten!

↪ Mischung von **signed**- und **unsigned**-Operanden vermeiden!



# Typumwandlung in Ausdrücken – Typ-Casts

- Durch den Typ-Cast-Operator kann man einen Ausdruck gezielt in einen anderen Typ konvertieren

*(Typ) Ausdruck*

```
int s = -1, res;           // range: -32768 --> +32767
unsigned u = 1;           // range: 0 --> 65535

res = s < (int) u;        // cast u to int
```

*Diagram illustrating type casting:*

*res* is annotated with *int: 1* below it.

*(int) u* is annotated with *int: 1* below it.

A bracket under *(int) u* points to *int: 1*.

A larger bracket under *s < (int) u* points to *int: 1*.



# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

6 Einfache Datentypen

7 Operatoren und Ausdrücke

**8 Kontrollstrukturen**

**9 Funktionen**

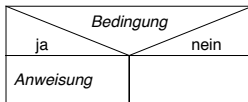
**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



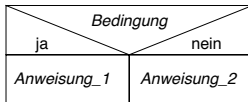
- if-Anweisung (bedingte Anweisung)

```
if ( Bedingung )
    Anweisung;
```



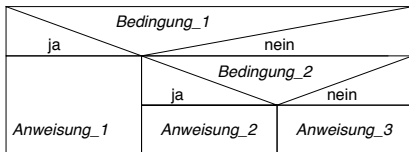
- if-else-Anweisung (einfache Verzweigung)

```
if ( Bedingung )
    Anweisung1;
else
    Anweisung2;
```



- if-else-if-Kaskade (mehrfache Verzweigung)

```
if ( Bedingung1 )
    Anweisung1;
else if ( Bedingung2 )
    Anweisung2;
else
    Anweisung3;
```



- **switch**-Anweisung (Fallunterscheidung)
  - Alternative zur **if**-Kaskade bei Test auf Ganzzahl-Konstanten

ganzzahliger Ausdruck = ?				
Wert1	Wert2			sonst
Anw. 1	Anw. 2		Anw. n	Anw. x

```
switch ( Ausdruck ) {  
  case Wert1:  
    Anweisung1;  
    break;  
  case Wert2:  
    Anweisung2;  
    break;  
  ...  
  case Wertn:  
    Anweisungn;  
    break;  
  default:  
    Anweisungx;  
}
```

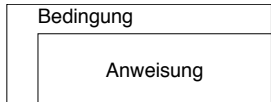


# Abweisende und nicht-abweisende Schleife [=Java]

## ■ Abweisende Schleife

[↔ GDI, 08-05]

- **while**-Schleife
- Null- oder mehrfach ausgeführt



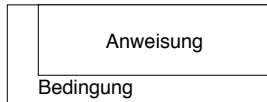
*while*( *Bedingung* )  
    *Anweisung*;

```
while (
    sb_button_getState(BUTTON0)
    == BTNRELEASED
) {
    ... // do unless button press.
}
```

## ■ Nicht-abweisende Schleife

[↔ GDI, 08-07]

- **do-while**-Schleife
- Ein- oder mehrfach ausgeführt



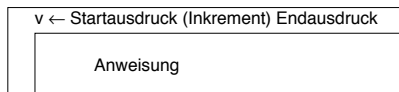
*do*  
    *Anweisung*;  
*while*( *Bedingung* );

```
do {
    ... // do at least once
} while (
    sb_button_getState(BUTTON0)
    == BTNRELEASED
);
```



## ■ for-Schleife (Lauanweisung)

```
for ( Startausdruck;  
      Endausdruck;  
      Inkrement-Ausdruck )  
  Anweisung;
```



## ■ Beispiel (übliche Verwendung: $n$ Ausführungen mit Zählvariable)

```
uint8_t sum = 0; // calc sum 1+...+10  
for (uint8_t n = 1; n < 11; n++) {  
    sum += n;  
}  
sb_7seg_showNumber( sum );
```



## ■ Anmerkungen

- Die Deklaration von Variablen ( $n$ ) im *Startausdruck* ist erst ab C99 möglich
- Die Schleife wird wiederholt, solange *Endausdruck*  $\neq 0$  (*wahr*)  
  ↪ die **for**-Schleife ist eine „verkappte“ **while**-Schleife





- Die `continue`-Anweisung beendet den aktuellen Schleifendurchlauf  
↪ Schleife wird mit dem nächsten Durchlauf fortgesetzt

```
for( uint8_t led=0; led < 8; ++led ) {  
    if( led == RED1 ) {  
        continue;           // skip RED1  
    }  
    sb_led_on(led);  
}
```



- Die `break`-Anweisung verlässt die (innerste) Schleife  
↪ Programm wird *nach* der Schleife fortgesetzt

```
for( uint8_t led=0; led < 8; ++led ) {  
    if( led == RED1 ) {  
        break;             // break at RED1  
    }  
    sb_led_on(led);  
}
```



# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

6 Einfache Datentypen

7 Operatoren und Ausdrücke

8 Kontrollstrukturen

**9 Funktionen**

**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



# Was ist eine Funktion?

- **Funktion** := Unterprogramm [↔ GDI, 11-01]
  - Programmstück (Block) mit einem **Bezeichner**
  - Beim Aufruf können **Parameter** übergeben werden
  - Bei Rückkehr kann ein **Rückgabewert** zurückgeliefert werden
- Funktionen sind elementare Programmbausteine
  - Gliedern umfangreiche Aufgaben in kleine, beherrschbare Komponenten
  - Ermöglichen die einfache Wiederverwendung von Komponenten
  - Ermöglichen den einfachen Austausch von Komponenten
  - Verbergen Implementierungsdetails (**Black-Box**-Prinzip)

## Funktion ↔ Abstraktion

↔ 4-1

- Bezeichner und Parameter **abstrahieren**
  - Vom tatsächlichen Programmstück
  - Von der Darstellung und Verwendung von Daten
- Ermöglicht schrittweise Abstraktion und Verfeinerung



# Beispiel

- Funktion (Abstraktion) `sb_led_set_all_leds()`

```
#include <led.h>
void main() {
    sb_led_set_all_leds( 0xaa );
    while(1) {}
}
```



- Implementierung in der `libspicboard`

```
void sb_led_set_all_leds(uint8_t setting)
```

**Sichtbar:**

Bezeichner und  
formale Parameter

```
{
    uint8_t i = 0;
    for (i = 0; i < 8; i++) {
        if (setting & (1<<i)) {
            sb_led_on(i);
        } else {
            sb_led_off(i);
        }
    }
}
```

**Unsichtbar:**

Tatsächliche  
Implementierung



- Syntax:  $Typ\ Bezeichner\ (FormaleParam_{opt})\ \{Block\}$ 
  - *Typ* Typ des Rückgabewertes der Funktion, `void` falls kein Wert zurückgegeben wird [ =Java ]
  - *Bezeichner* Name, unter dem die Funktion aufgerufen werden kann ↪ 5-3 [ =Java ]
  - *FormaleParam<sub>opt</sub>* Liste der formalen Parameter:  
 $Typ_1\ Bez_1_{opt}, \dots, Typ_n\ Bez_n_{opt}$   
 (Parameter-Bezeichner sind optional) [ =Java ]  
`void`, falls kein Parameter erwartet wird [ ≠Java ]
  - $\{Block\}$  Implementierung; formale Parameter stehen als lokale Variablen bereit [ =Java ]

- Beispiele:

```

int max( int a, int b ) {
    if (a>b) return a;
    return b;
}

void wait( void ) {
    volatile uint16_t w;
    for( w = 0; w<0xffff; w++ ) {
    }
}

```



## ■ Syntax: *Bezeichner* ( *TatParam* )

- *Bezeichner* Name der Funktion, in die verzweigt werden soll [=Java]
- *TatParam* Liste der tatsächlichen Parameter (übergebene Werte, muss anzahl- und typkompatibel sein zur Liste der formalen Parameter) [=Java]

## ■ Beispiele:

```
int x = max( 47, 11 );
```

Aufruf der `max()`-Funktion. 47 und 11 sind die **tatsächlichen Parameter**, welche nun den formalen Parametern `a` und `b` der `max()`-Funktion ( $\leftrightarrow$  9-3) zugewiesen werden.

```
char[] text = "Hello, World";  
int x = max( 47, text );
```

**Fehler:** `text` ist nicht `int`-konvertierbar ( **tatsächlicher Parameter 2** passt nicht zu formalem Parameter `b`  $\leftrightarrow$  9-3 )

```
max( 48, 12 );
```

Der Rückgabewert darf ignoriert werden (was hier nicht wirklich Sinn ergibt)



- Generelle Arten der Parameterübergabe [↔ GDI, 14-01]
  - *Call-by-value* Die formalen Parameter sind Kopien der tatsächlichen Parameter. Änderungen in den formalen Parametern gehen mit Verlassen der Funktion verloren. **Dies ist der Normalfall in C.**
  - *Call-by-reference* Die formalen Parameter sind Verweise (Referenzen) auf die tatsächlichen Parameter. Änderungen in den formalen Parametern betreffen auch die tatsächlichen Parameter. **In C nur indirekt über Zeiger möglich.** ↔ 13-5
- Des weiteren gilt
  - Arrays werden in C immer *by-reference* übergeben [=Java]
  - Die Auswertungsreihenfolge der Parameter ist **undefiniert!** [≠Java]



- Funktionen können sich auch selber aufrufen (Rekursion)

```
int fak( int n ) {  
    if ( n > 1 )  
        return n * fak(n-1);  
    return 1;  
}
```

Rekursive Definition der Fakultätsfunktion.

Ein anschauliches, aber **mieses Beispiel** für den Einsatz von Rekursion!

## Rekursion ↦ \$\$\$

Rekursion verursacht erhebliche **Laufzeit- und Speicherkosten!**

Pro Rekursionsschritt muss:

- Speicher bereit gestellt werden für Rücksprungadresse, Parameter und alle lokalen Variablen
- Parameter kopiert und ein Funktionsaufruf durchgeführt werden

**Regel:** Bei der systemnahen Softwareentwicklung wird möglichst auf **Rekursion verzichtet!**





- Funktionen müssen vor ihrem ersten Aufruf im Quelltext **deklariert** (↪ bekannt gemacht) worden sein
  - Eine voranstehende Definition beinhaltet bereits die Deklaration
  - Ansonsten (falls die Funktion „weiter hinten“ im Quelltext oder in einem anderen Modul definiert wird) muss sie **explizit deklariert** werden
- Syntax: *Bezeichner ( FormaleParam ) ;*
- Beispiel:

```
// Deklaration durch Definition
int max( int a, int b ) {
    if(a > b) return a;
    return b;
}

void main() {
    int z = max( 47, 11 );
}
```

```
// Explizite Deklaration
int max( int, int );

void main() {
    int z = max( 47, 11 );
}

int max( int a, int b ) {
    if(a > b) return a;
    return b;
}
```



- Funktionen müssen **sollten** vor ihrem ersten Aufruf im Quelltext **deklariert** (↪ bekannt gemacht) worden sein

## Achtung: C erzwingt dies nicht!

- Es ist erlaubt **nicht-deklarierte** Funktionen aufzurufen (↪ implizite Deklaration)
- Derartige Aufrufe sind jedoch **nicht typsicher**
  - Compiler kennt die formale Parameterliste nicht  
↪ kann nicht prüfen, ob die tatsächlichen Parameter passen
  - Man kann **irgendwas** übergeben
- Moderne Compiler generieren immerhin eine **Warnung**  
↪ Warnungen des Compilers immer ernst nehmen!



- Funktionen müssen **sollten** vor ihrem ersten Aufruf im Quelltext **deklariert** (↪ bekannt gemacht) worden sein

- **Beispiel:**

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main() {
4     double d = 47.11;
5     foo( d );
6     return 0;
7 }
8
9 void foo( int a, int b) {
10    printf( "foo: a:%d, b:%d\n", a, b);
11 }
```

- 5 Funktion `foo()` ist nicht **deklariert**  $\leadsto$  der Compiler **warn**t, aber akzeptiert beliebige tatsächliche Parameter
- 9 `foo()` ist **definiert** mit den formalen Parametern (`int`, `int`). Was immer an tatsächlichen Parametern übergeben wurde, wird entsprechend interpretiert!
- 10 **Was wird hier ausgegeben?**



- Funktionen müssen **sollten** vor ihrem ersten Aufruf im Quelltext **deklariert** (↪ bekannt gemacht) worden sein
  - Eine Funktion, die mit **leerer formaler Parameterliste** deklariert wurde, akzeptiert ebenfalls beliebige Parameter ↪ **keine Typsicherheit**
  - In diesem Fall warnt der Compiler **nicht!** Die Probleme bleiben!
- **Beispiel:**

```
#include <stdio.h>

void foo(); // "open" declaration

int main() {
    double d = 47.11;
    foo( d );
    return 0;
}

void foo( int a, int b) {
    printf( "foo: a:%d, b:%d\n", a, b);
}
```

Funktion `foo` wurde mit **leerer** formaler Parameterliste deklariert ↪ dies ist formal ein **gültiger Aufruf!**



- Funktionen müssen **sollten** vor ihrem ersten Aufruf im Quelltext **deklariert** (↪ bekannt gemacht) worden sein
  - Eine Funktion, die mit **leerer formaler Parameterliste** deklariert wurde, akzeptiert ebenfalls beliebige Parameter ↪ **keine Typsicherheit**
  - In diesem Fall warnt der Compiler **nicht!** Die Probleme bleiben!

## Achtung: Verwechslungsgefahr

- In Java deklariert `void foo()` eine **parameterlose** Methode
  - In C muss man dafür `void foo(void)` schreiben ↪ 9-3
- In C deklariert `void foo()` eine **offene** Funktion
  - Das macht nur in (sehr seltenen) Ausnahmefällen Sinn!
  - Schlechter Stil ↪ Punktabzug

**Regel:** Funktionen werden stets **vollständig deklariert!**



# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

6 Einfache Datentypen

7 Operatoren und Ausdrücke

8 Kontrollstrukturen

9 Funktionen

**10 Variablen**

**11 Präprozessor**



- **Variable** := Behälter für Werte (↪ Speicherplatz)

- Syntax (Variablendefinition):

$SK_{opt} Typ_{opt} Bez_1 [= Ausdr_1]_{opt} [, Bez_2 [= Ausdr_2]_{opt} , \dots]_{opt};$

- $SK_{opt}$  Speicherklasse der Variable, [≈Java]  
`auto`, `static`, oder leer
- $Typ$  Typ der Variable, [=Java]  
`int` falls kein Typ angegeben wird [≠Java]  
(↪ schlechter Stil!)
- $Bez_i$  Name der Variable [=Java]
- $Ausdr_i$  Ausdruck für die initiale Wertzuweisung;  
wird kein Wert zugewiesen so ist der Inhalt  
von nicht-`static`-Variablen **undefiniert** [≠Java]



- Variablen können an verschiedenen Positionen definiert werden
  - Global                      außerhalb von Funktionen,  
   üblicherweise am Kopf der Datei
  - Lokal                        zu Beginn eines { Blocks },                      C89  
   direkt nach der öffnenden Klammer
  - Lokal                        überall dort, wo eine Anweisung stehen darf                      C99

```
int a = 0;           // a: global
int b = 47;         // b: global

void main() {
    int a = b;      // a: local to function, covers global a
    printf("%d", a);
    int c = 11;     // c: local to function (C99 only!)
    for(int i=0; i<c; i++) { // i: local to for-block (C99 only!)
        int a = i;  // a: local to for-block,
    }              // covers function-local a
}
```

Mit globalen Variablen beschäftigen wir uns noch näher im Zusammenhang mit **Modularisierung** ↔ 12-5





# Überblick: Teil B Einführung in C

3 Java versus C – Erste Beispiele

4 Softwareschichten und Abstraktion

5 Sprachüberblick

6 Einfache Datentypen

7 Operatoren und Ausdrücke

8 Kontrollstrukturen

9 Funktionen

10 Variablen

**11 Präprozessor**





- Bevor eine C-Quelldatei übersetzt wird, wird sie zunächst durch einen Makro-Präprozessor bearbeitet
  - Historisch ein eigenständiges Programm (**CPP** = **C PreProcessor**)
  - Heutzutage in die üblichen Compiler integriert
- Der CPP bearbeitet den Quellcode durch **Texttransformation**
  - Automatische Transformationen („Aufbereiten“ des Quelltextes)
    - Kommentaren werden entfernt
    - Zeilen, die mit \ enden, werden zusammengefügt
    - ...
  - Steuerbare Transformationen (durch den Programmierer)
    - **Präprozessor-Direktiven** werden evaluiert und ausgeführt
    - **Präprozessor-Makros** werden expandiert



## ■ Präprozessor-Direktive := Steueranweisung an den Präprozessor

`#include` *<Datei>*

**Inklusion:** Fügt den Inhalt von *Datei* an der aktuellen Stelle in den Token-Strom ein.

`#define` *Makro Ersetzung*

**Makrodefinition:** Definiert ein Präprozessor-Makro *Makro*. In der Folge wird im Token-Strom jedes Auftreten des Wortes *Makro* durch *Ersetzung* substituiert. *Ersetzung* kann auch leer sein.

`#if` (*Bedingung*),  
`#elif`, `#else`, `#endif`

**Bedingte Übersetzung:** Die folgenden Code-Zeilen werden in Abhängigkeit von *Bedingung* dem Compiler überreicht oder aus dem Token-Strom entfernt.

`#ifdef` *Makro*,  
`#ifndef` *Makro*

Bedingte Übersetzung in Abhängigkeit davon, ob *Makro* (z. B. mit `#define`) definiert wurde.

`#error` *Text*

**Abbruch:** Der weitere Übersetzungsvorgang wird mit der Fehlermeldung *Text* abgebrochen.

Der Präprozessor definiert letztlich eine eingebettete **Meta-Sprache**. Die Präprozessor-Direktiven (Meta-Programm) verändern das C-Programm (eigentliches Programm) vor dessen Übersetzung.




## ■ Einfache Makro-Definitionen


Leeres Makro (Flag)	<code>#define USE_7SEG</code>
Quelltext-Konstante	<code>#define NUM_LEDS (4)</code>
„Inline“-Funktion	<code>#define SET_BIT(m,b) (m   (1&lt;&lt;b))</code>

Präprozessor-Anweisungen werden **nicht** mit einem Strichpunkt abgeschlossen!

## ■ Verwendung

```
#if( (NUM_LEDS > 8) || (NUM_LEDS < 0) )
# error invalid NUM_LEDS           // this line is not included
#endif

void enlighten(void) {
    uint8_t mask = 0, i;
    for (i = 0; i < NUM_LEDS; i++) { // NUM_LEDS --> (4)
        mask = SET_BIT(mask, i);     // SET_BIT(mask, i) --> (mask | (1<<i))
    }
    sb_led_set_all_leds( mask );     // --> 
}

#ifdef USE_7SEG
    sb_show_HexNumber( mask );       // --> 
#endif
}
```



- Funktionsähnliche Makros sind keine Funktionen!

- Parameter werden nicht evaluiert, sondern **textuell** eingefügt  
Das kann zu **unangenehmen Überraschungen** führen

```
#define POW2(a) 1 << a           << hat geringere Präzedenz als *
n = POW2( 2 ) * 3               ~ n = 1 << 2 * 3
```

- Einige Probleme lassen sich durch korrekte Klammerung vermeiden

```
#define POW2(a) (1 << a)
n = POW2( 2 ) * 3               ~ n = (1 << 2) * 3
```

- Aber nicht alle

```
#define max(a,b) ((a > b) ? a : b)  a++ wird ggf. zweimal ausgewertet
n = max( x++, 7 )                  ~ n = ((x++ > 7) ? x++ : 7)
```

- Eine mögliche Alternative sind **inline**-Funktionen

C99

- Funktionscode wird eingebettet ~ ebenso effizient wie Makros

```
inline int max(int a, int b) {
    return (a > b) ? a : b;
}
```

