Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

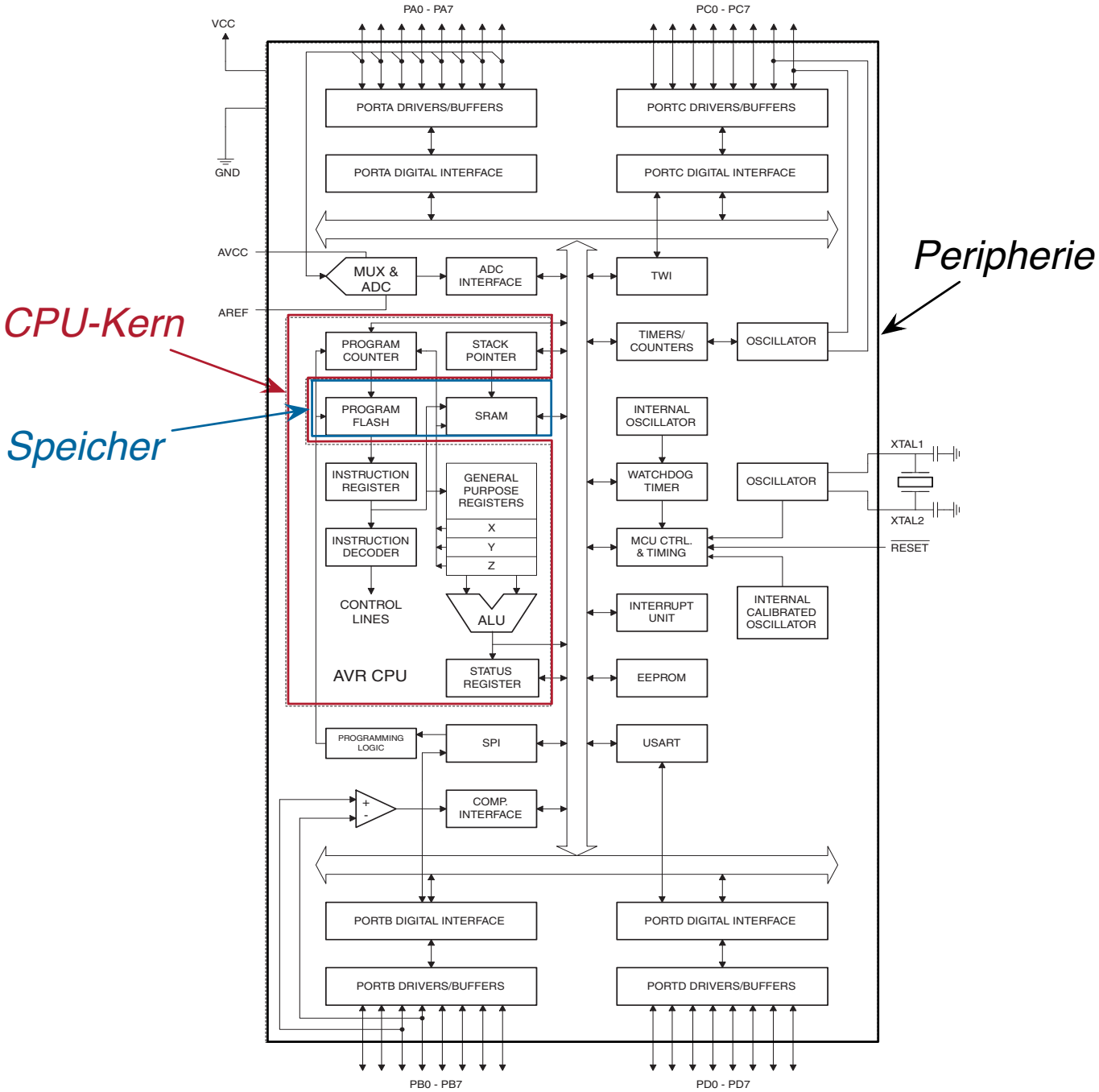
13 Zeiger und Felder

14 μC-Systemarchitektur

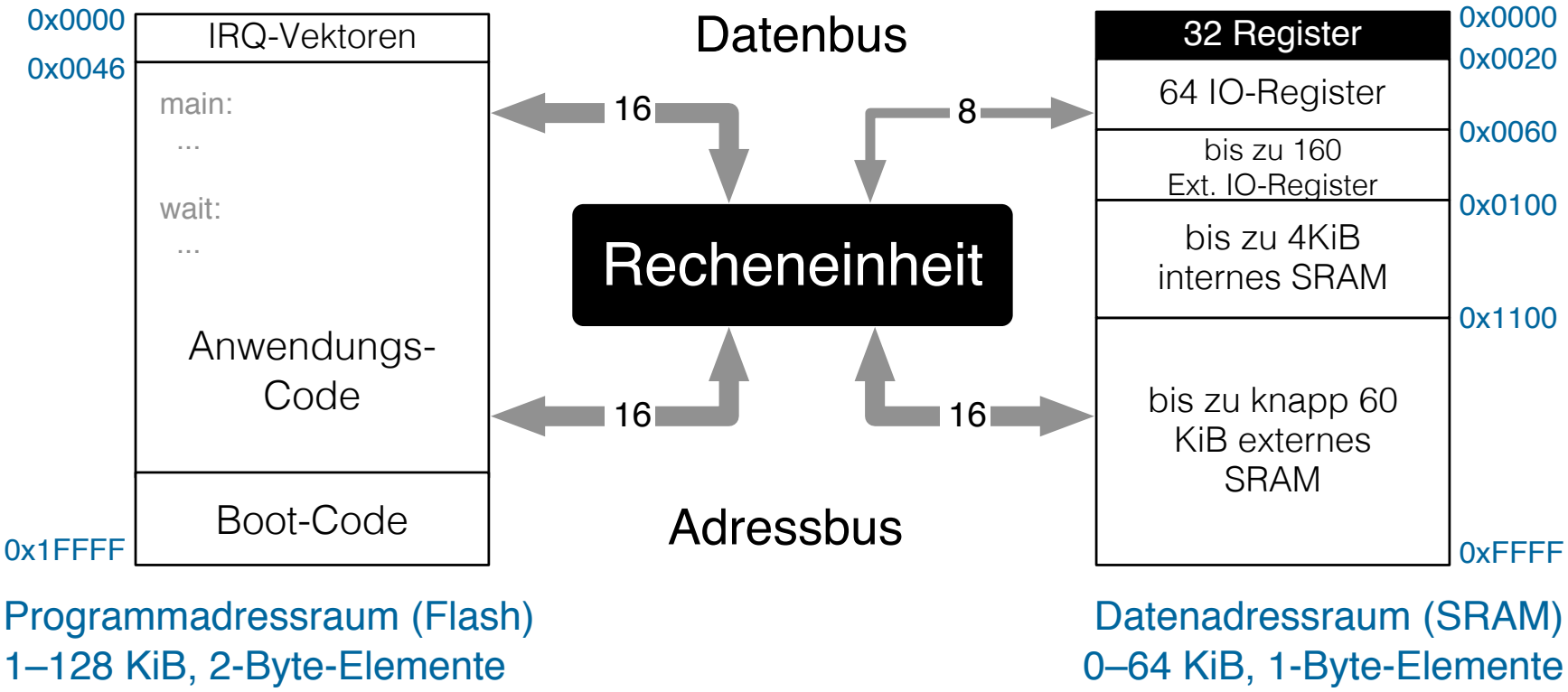
Was ist ein μ-Controller?

- **μ-Controller** := Prozessor + Speicher + Peripherie
  - Faktisch ein Ein-Chip-Computersystem $\longrightarrow$ SoC (*System-on-a-Chip*)
  - Häufig verwendbar ohne zusätzliche externe Bausteine, wie z. B. Taktgeneratoren und Speicher $\rightsquigarrow$ kostengünstiges Systemdesign
- Wesentliches Merkmal ist die (reichlich) enthaltene Peripherie
  - Timer/Counter (Zeiten/Ereignisse messen und zählen)
  - Ports (digitale Ein-/Ausgabe), A/D-Wandler (analoge Eingabe)
  - PWM-Generatoren (pseudo-analoge Ausgabe)
  - Bus-Systeme: SPI, RS-232, CAN, Ethernet, MLI, I^2C, ...
  - ...
- Die Abgrenzungen sind fließend: Prozessor $\longleftrightarrow$ μC $\longleftrightarrow$ SoC
  - AMD64-CPUs haben ebenfalls eingebaute Timer, Speicher (Caches), ...
  - Einige μC erreichen die Geschwindigkeit „großer Prozessoren“

Beispiel ATmega32: Blockschaltbild



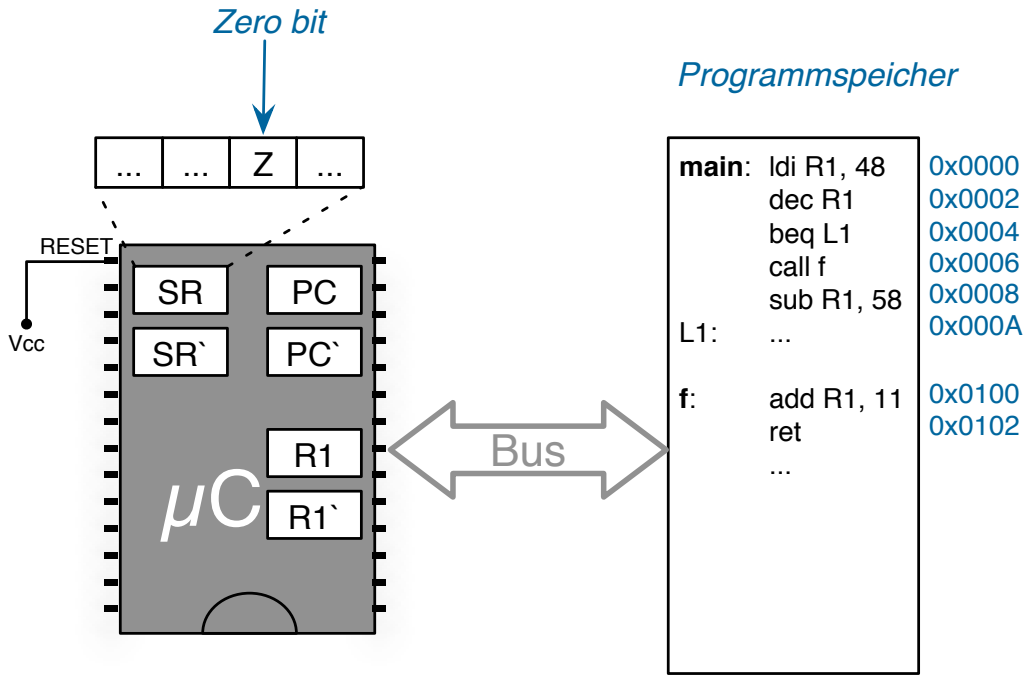
Beispiel ATmega-Familie: CPU-Architektur



- Harvard-Architektur (getrennter Speicher für Code und Daten)
- Peripherie-Register sind in den Speicher eingeblendet
  $\rightsquigarrow$ ansprechbar wie globale Variablen

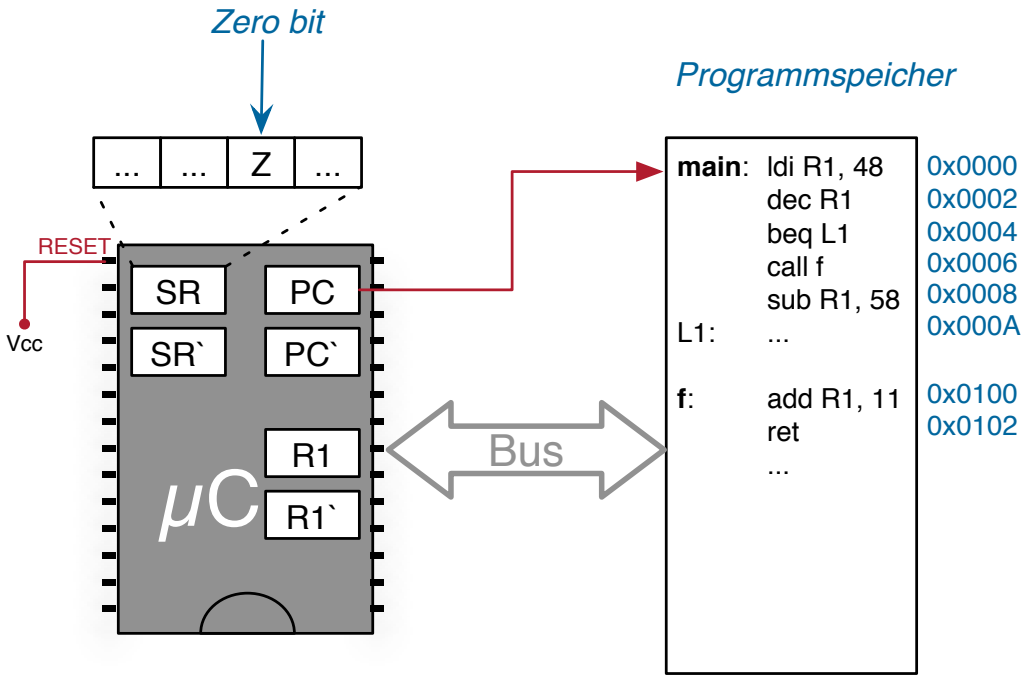
Zum Vergleich: PC basiert auf von-Neumann-Architektur [$\hookrightarrow$ GDI, 18-10] mit gemeinsamem Speicher; I/O-Register verwenden einen speziellen I/O-Adressraum.

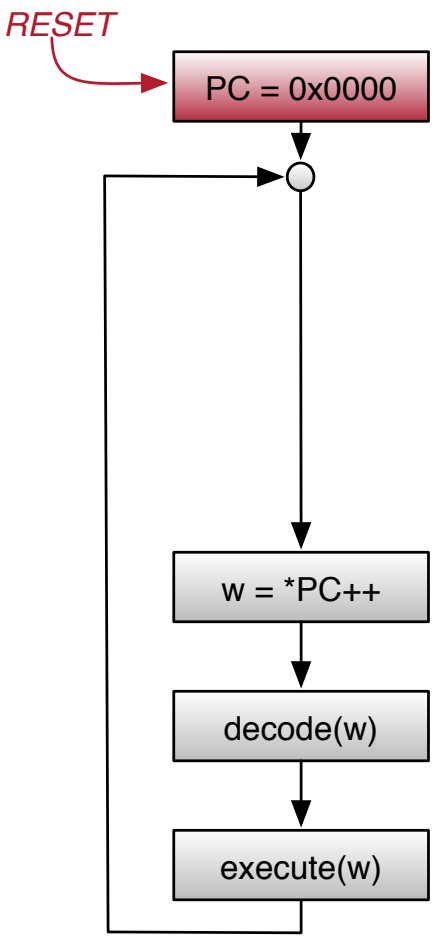
Wie arbeitet ein Prozessor?



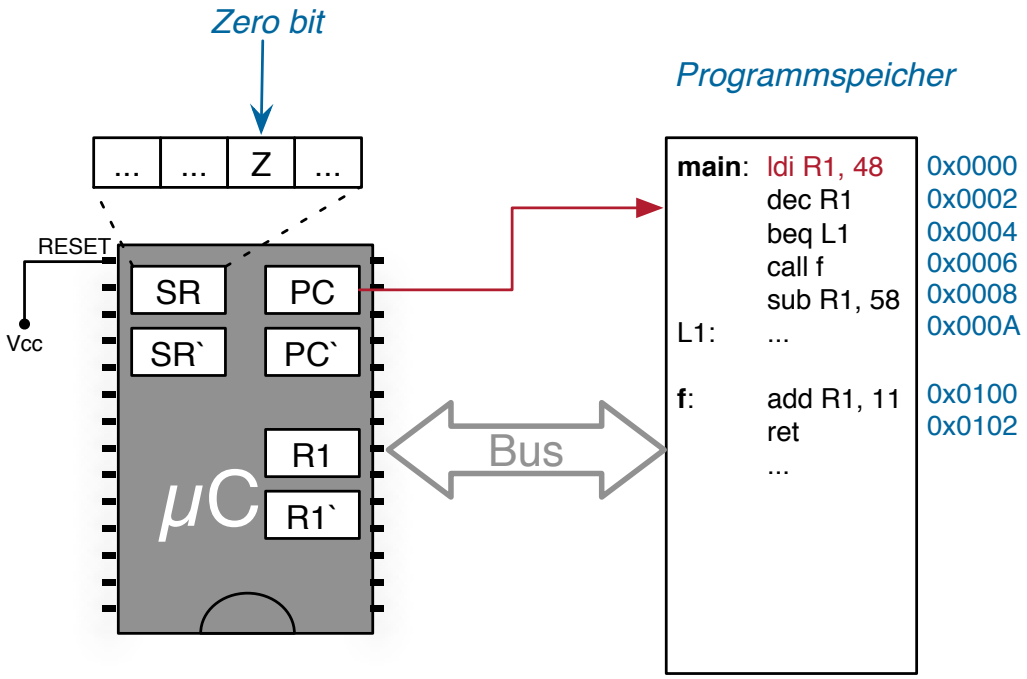
- Hier am Beispiel eines sehr einfachen Pseudoprozessors
  - Nur zwei Vielzweckregister (R1 und R2)
  - Programmzähler (PC) und Statusregister (SR) (+ „Schattenkopien“)
  - Kein Datenspeicher, kein Stapel $\rightsquigarrow$ Programm arbeitet nur auf Registern

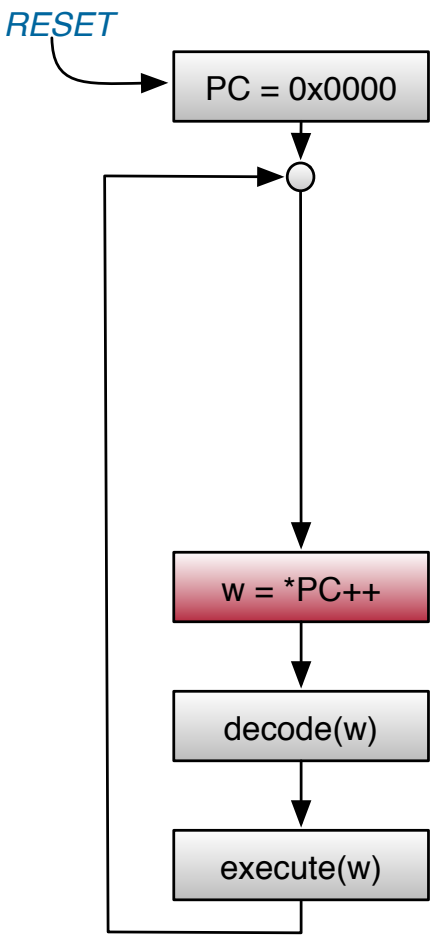
Wie arbeitet ein Prozessor?



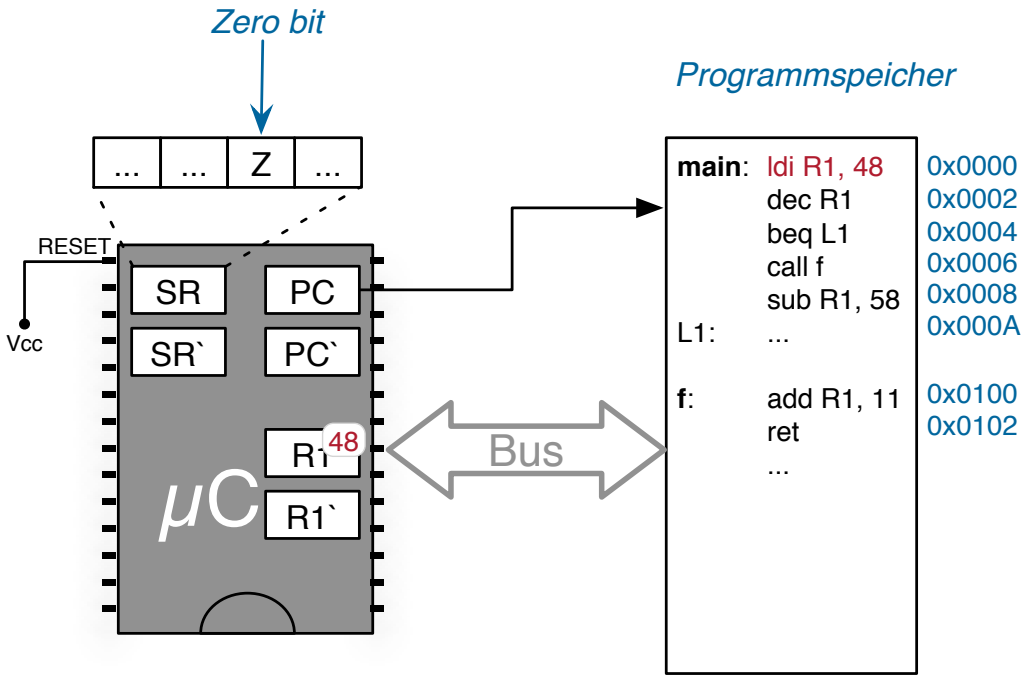


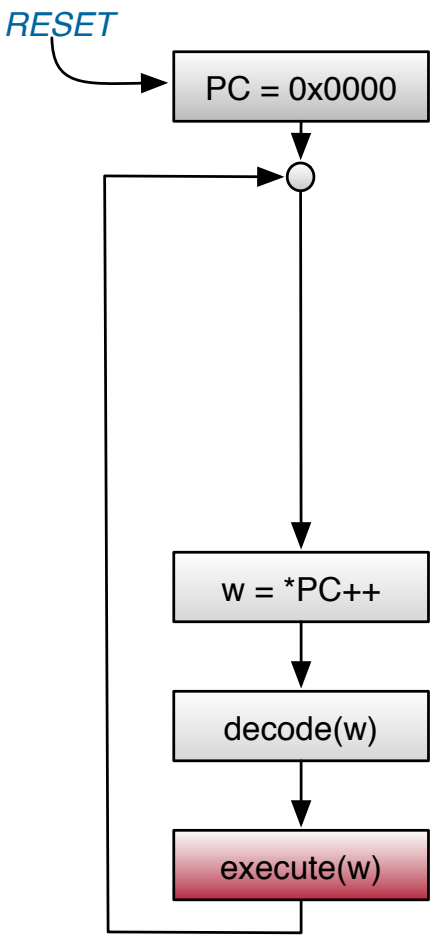
Wie arbeitet ein Prozessor?



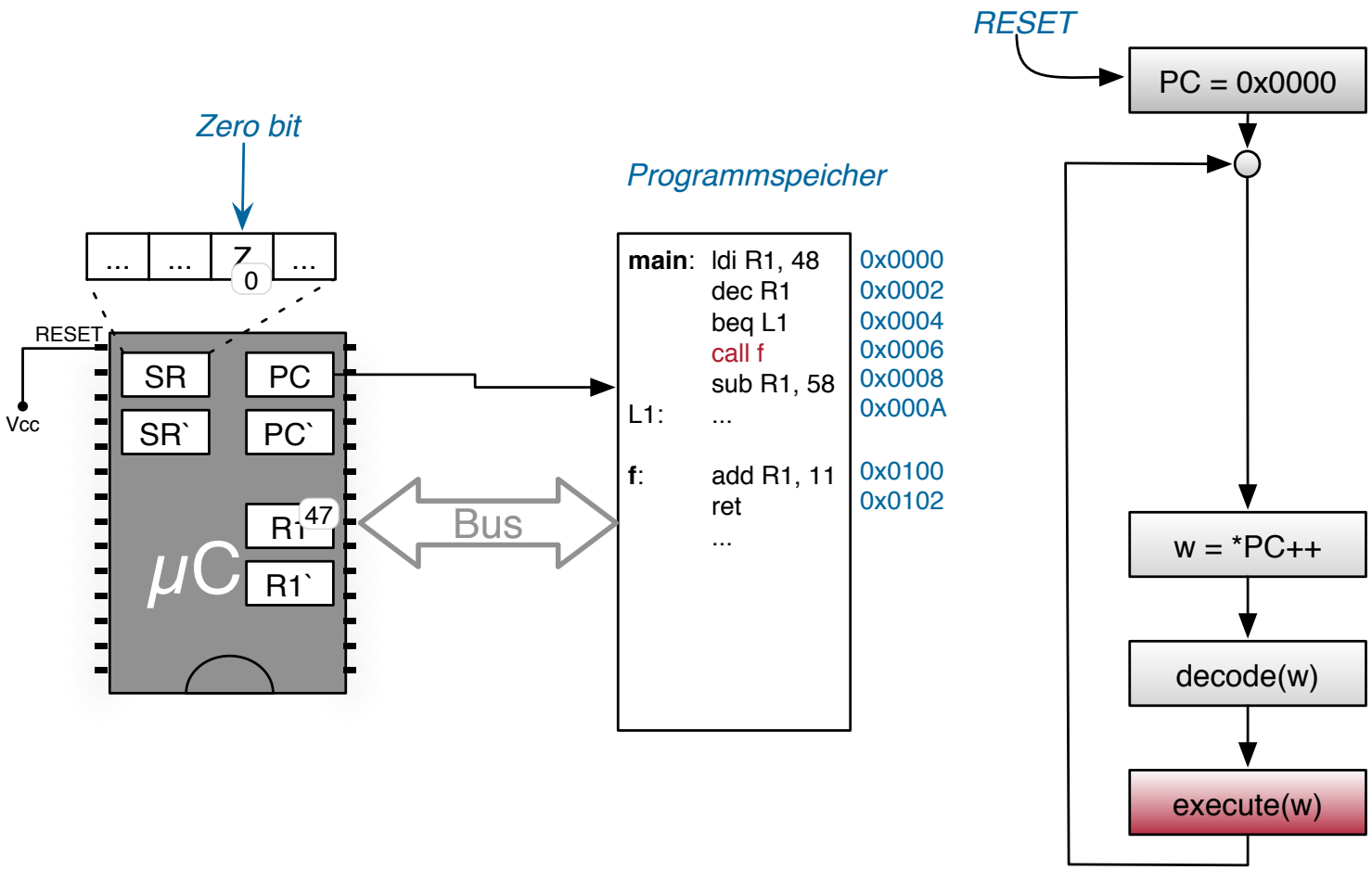


Wie arbeitet ein Prozessor?





Wie arbeitet ein Prozessor?

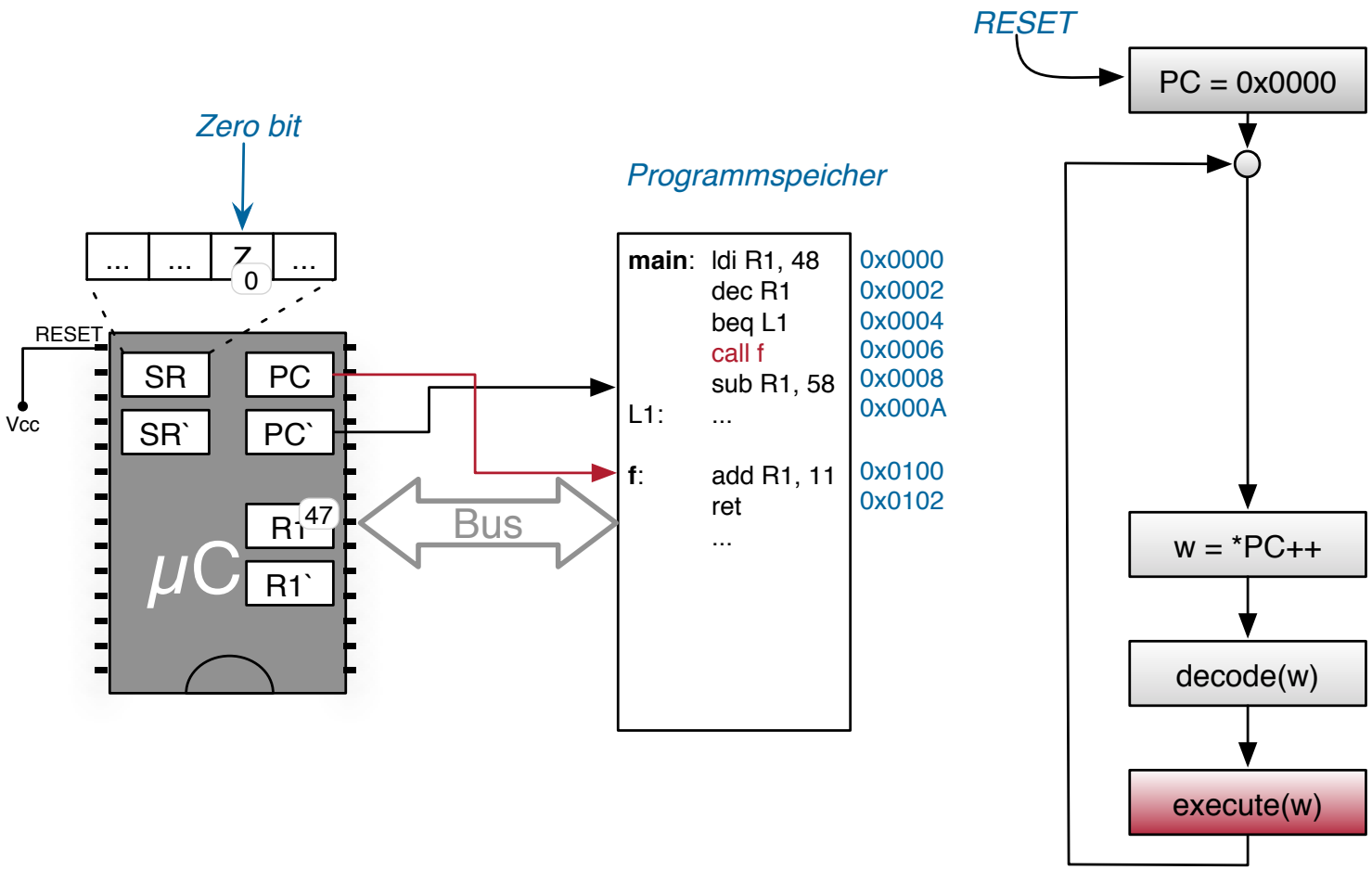


w: **dec** <R>
R –= 1
if(R == 0) Z = 1
else Z = 0

w: **beq** <lab>
if (Z) PC = lab

w: **call** <func>
PC` = PC
PC = func

Wie arbeitet ein Prozessor?

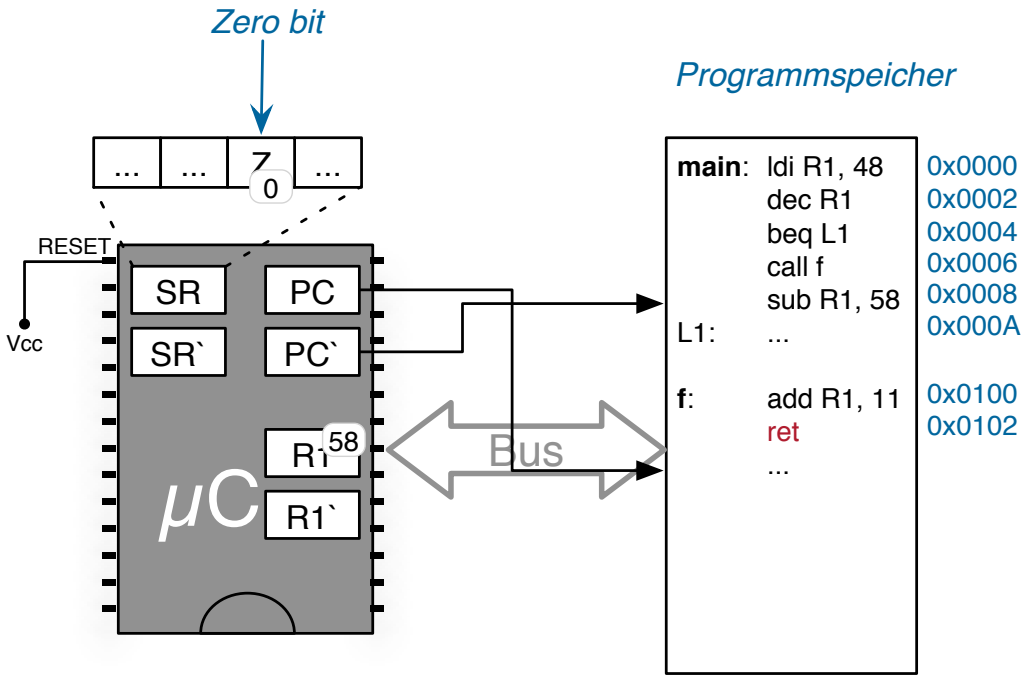


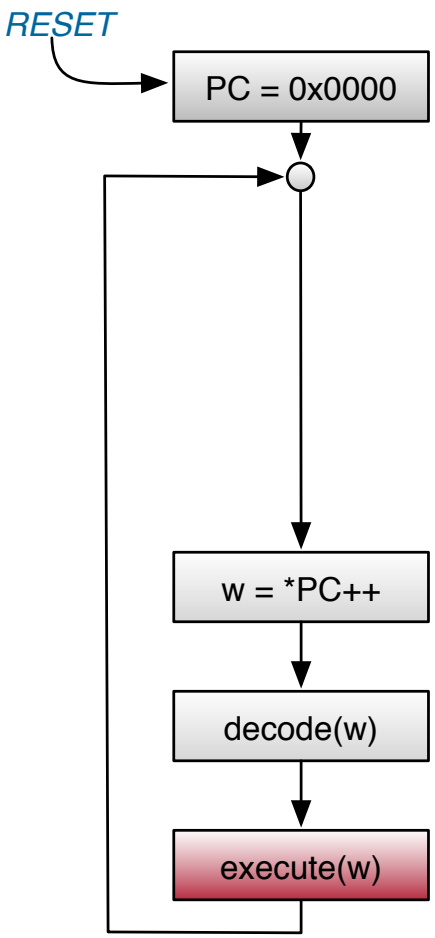
w: **dec** <R>
R –= 1
if(R == 0) Z = 1
else Z = 0

w: **beq** <lab>
if (Z) PC = lab

w: **call** <func>
PC` = PC
PC = func

Wie arbeitet ein Prozessor?





w: **dec** <R>	w: **beq** <lab>	w: **call** <func>	w: **ret**
R –= 1 if(R == 0) Z = 1 else Z = 0	if (Z) PC = lab	PC` = PC PC = func	PC = PC`

Peripheriegeräte

- **Peripheriegerät:** Hardwarekomponente, die sich „außerhalb“ der Zentraleinheit eines Computers befindet
  - Traditionell (PC): Tastatur, Bildschirm, ... ($\mapsto$ physisch „außerhalb“)
  - Allgemeiner: Hardwarefunktionen, die nicht direkt im Befehlssatz des Prozessors abgebildet sind ($\mapsto$ logisch „außerhalb“)

- Peripheriebausteine werden über I/O-Register angesprochen
  - Kontrollregister: Befehle an / Zustand der Peripherie wird durch Bitmuster kodiert (z. B. `DDRD` beim ATmega)
  - Datenregister: Dienen dem eigentlichen Datenaustausch (z. B. `PORTD`, `PIND` beim ATmega)
  - Register sind häufig für entweder nur Lesezugriffe (*read-only*) oder nur Schreibzugriffe (*write-only*) zugelassen

Peripheriegeräte: Beispiele

- Auswahl von typischen Peripheriegeräten in einem μ-Controller
  - Timer/Counter — Zählregister, die mit konfigurierbarer Frequenz (Timer) oder durch externe Signale (Counter) erhöht werden und bei konfigurierbarem Zählwert einen Interrupt auslösen.
  - Watchdog-Timer — Timer, der regelmäßig neu beschrieben werden muss oder sonst einen RESET auslöst („Totmannknopf“).
  - (A)synchrone serielle Schnittstelle — Bausteine zur seriellen (bitweisen) Übertragung von Daten mit synchronem (z. B. RS-232) oder asynchronem (z. B. I^2C) Protokoll.
  - A/D-Wandler — Bausteine zur momentweisen oder kontinuierlichen Diskretisierung von Spannungswerten (z. B. 0–5V $\mapsto$ 10-Bit-Zahl).
  - PWM-Generatoren — Bausteine zur Generierung von pulsweiten-modulierten Signalen (pseudo-analoge Ausgabe).
  - Ports — Gruppen von üblicherweise 8 Anschlüssen, die auf GND oder Vcc gesetzt werden können oder deren Zustand abgefragt werden kann. $\hookrightarrow$ 14–12

Peripheriegeräte – Register

- Es gibt verschiedene Architekturen für den Zugriff auf I/O-Register
  - Memory-mapped: (Die meisten μC) — Register sind in den Adressraum eingeblendet; der Zugriff erfolgt über die Speicherbefehle des Prozessors (`load`, `store`)
  - Port-basiert: (x86-basierte PCs) — Register sind in einem eigenen I/O-Adressraum organisiert; der Zugriff erfolgt über spezielle `in`- und `out`-Befehle
- Die Registeradressen stehen in der Hardware-Dokumentation

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Page
$3F ($5F)	SREG	I	T	H	S	V	N	Z	C	8
$3E ($5E)	SPH	–	–	–	–	SP11	SP10	SP9	SP8	11
$3D ($5D)	SPL	SP7	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0	11
$3C ($5C)	OCR0	Timer/Counter0 Output Compare Register								86
$12 ($32)	PORTD	PORTD7	PORTD6	PORTD5	PORTD4	PORTD3	PORTD2	PORTD1	PORTD0	67
$11 ($31)	DDRD	DDD7	DDD6	DDD5	DDD4	DDD3	DDD2	DDD1	DDD0	67
$10 ($30)	PIND	PIND7	PIND6	PIND5	PIND4	PIND3	PIND2	PIND1	PIND0	68

[1, S. 334]

Peripheriegeräte – Register (Forts.)

- Memory-mapped Register ermöglichen einen komfortablen Zugriff
  - Register ↦ Speicher ↦ Variable
  - Alle C-Operatoren stehen direkt zur Verfügung (z. B. `PORTD++`)
- Syntaktisch wird der Zugriff oft durch Makros erleichtert:

```
#define PORTD ( * (volatile uint8_t*)( 0x12 ) )
```

- `0x12`: Adresse: int
- `(volatile uint8_t*)(0x12)`: Adresse: volatile uint8_t* (Cast ↪ 7–17)
- `*(volatile uint8_t*)(0x12)`: Wert: volatile uint8_t (Dereferenzierung ↪ 13–4)

`PORTD` ist damit (syntaktisch) äquivalent zu einer `volatile uint8_t`-Variablen, die an Adresse `0x12` liegt

- Beispiel

```
#define PORTD (*(volatile uint8_t*)(0x12))

PORTD |= (1<<7);            // set D.7
uint8_t *pReg = &PORTD;     // get pointer to PORTD
*pReg &= ~(1<<7);           // use pointer to clear D.7
```

Registerzugriff und Nebenläufigkeit

- Peripheriegeräte arbeiten nebenläufig zur Software
  ⇝ Wert in einem Hardwareregister kann sich jederzeit ändern
- Dies widerspricht einer Annahme des Compilers
  - Variablenzugriffe erfolgen **nur** durch die aktuell ausgeführte Funktion
    ⇝ Variablen können in Registern zwischengespeichert werden

```
// C code
#define PIND (*(uint8_t*)(0x10))
void foo(void) {
  ...
  if( !(PIND & 0x2) ) {

    // button0 pressed
    ...
  }
  if( !(PIND & 0x4) ) {

    // button 1 pressed
    ...
  }
}
```

```
// Resulting assembly code

foo:
  lds   r24, 0x0010 // PIND->r24
  sbrc  r24, 1      // test bit 1
  rjmp L1
  // button0 pressed
  ...
L1:
  sbrc r24, 2      // test bit 2
  rjmp  L2

  ...
L2:
  ret
```

PIND wird nicht erneut aus dem Speicher geladen. Der Compiler nimmt an, dass der Wert in r24 aktuell ist.

Der `volatile`-Typmodifizierer

- **Lösung:** Variable `volatile` („*flüchtig, unbeständig*“) deklarieren
  - Compiler hält Variable nur so kurz wie möglich im Register
    - ⇝ Wert wird unmittelbar vor Verwendung gelesen
    - ⇝ Wert wird unmittelbar nach Veränderung zurückgeschrieben

```c
// C code
#define PIND \
  (*(volatile uint8_t*)(0x10))
void foo(void) {
  ...
  if( !(PIND & 0x2) ) {

    // button0 pressed
    ...
  }

  if( !(PIND & 0x4) ) {

    // button 1 pressed
    ...
  }
}
```

```
// Resulting assembly code


foo:
  lds  r24, 0x0010 // PIND->r24
  sbrc r24, 1      // test bit 1
  rjmp L1
  // button0 pressed
  ...
L1:
  lds  r24, 0x0010 // PIND->r24
  sbrc r24, 2      // test bit 2
  rjmp L2

  ...
L2:
  ret
```

`PIND` ist `volatile` und wird deshalb vor dem Test erneut aus dem Speicher geladen.

Der `volatile`-Typmodifizierer (Forts.)

- Die `volatile`-Semantik verhindert viele Code-Optimierungen (insbesondere das Entfernen von scheinbar unnützem Code)
- Kann ausgenutzt werden, um aktives Warten zu implementieren:

```
// C code
void wait( void ){
  for( uint16_t i = 0; i<0xffff;)
    i++;
}
```

volatile!

```
// Resulting assembly code
wait:
  // compiler has optimized
  // "nonsensical" loop away
  ret
```

Achtung: volatile $\mapsto$ **$$$**

Die Verwendung von `volatile` verursacht erhebliche Kosten

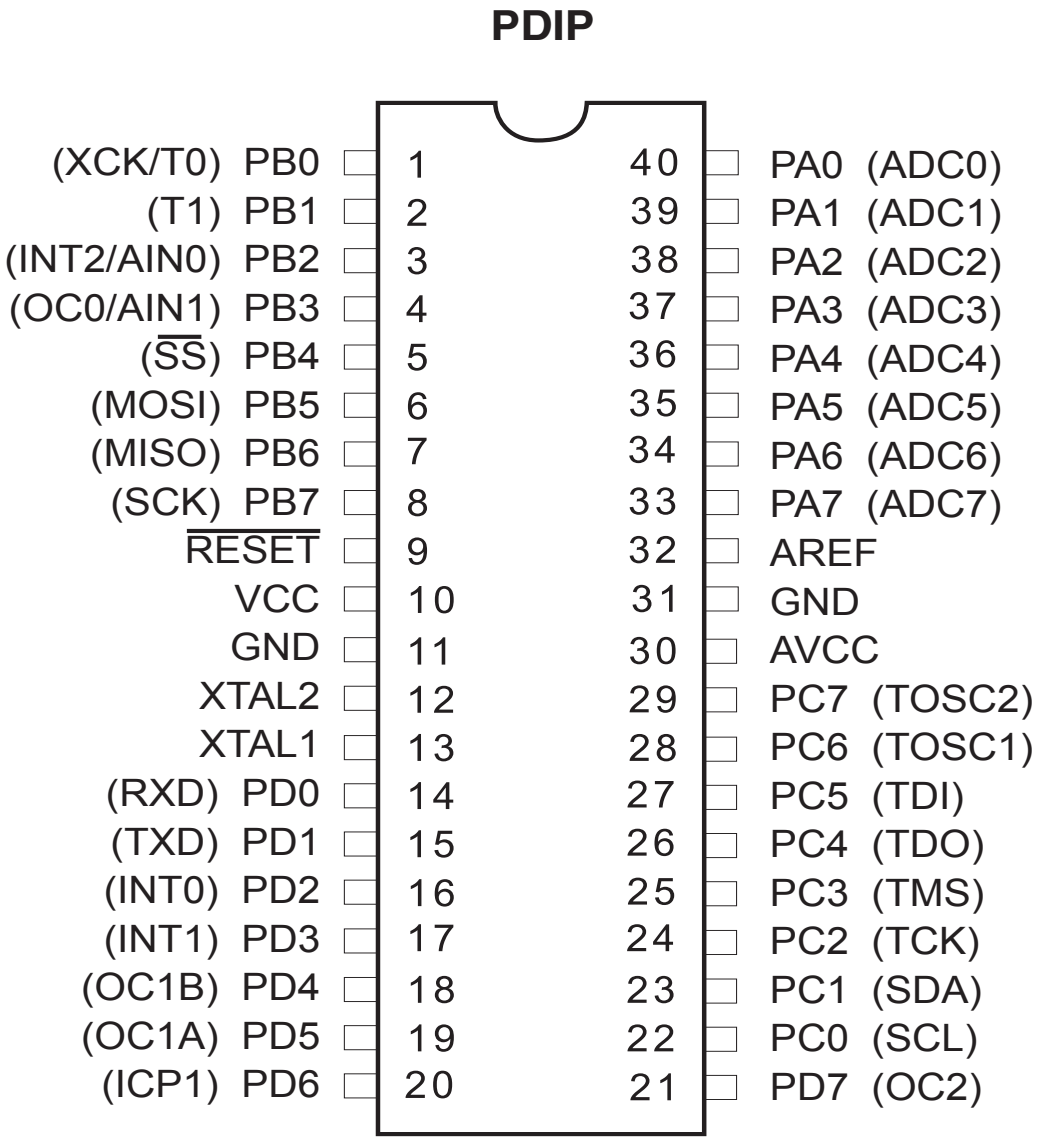
- Werte können nicht mehr in Registern gehalten werden
- Viele Code-Optimierungen können nicht durchgeführt werden

Regel: `volatile` wird nur in **begründeten Fällen** verwendet

Peripheriegeräte: Ports

- **Port** := Gruppe von (üblicherweise 8) digitalen Ein-/Ausgängen
  - Digitaler Ausgang: Bitwert $\mapsto$ Spannungspegel an μC-Pin
  - Digitaler Eingang: Spannungspegel an μC-Pin $\mapsto$ Bitwert
  - Externer Interrupt: Spannungspegel an μC-Pin $\mapsto$ Bitwert
    (bei Pegelwechsel) $\rightsquigarrow$ Prozessor führt Interruptprogramm aus
- Die Funktion ist üblicherweise pro Pin konfigurierbar
  - Eingang
  - Ausgang
  - Externer Interrupt (nur bei bestimmten Eingängen)
  - Alternative Funktion (Pin wird von anderem Gerät verwendet)

Beispiel ATmega32: Port/Pin-Belegung



Aus Kostengründen ist nahezu jeder Pin doppelt belegt, die Konfiguration der gewünschten Funktion erfolgt durch die Software.

Beim SPiCboard werden z. B. Pins 39–40 als ADCs konfiguriert, um Poti und Photosensor anzuschließen.

PORTA steht daher nicht zur Verfügung.

Beispiel ATmega32: Port-Register

- Pro Port x sind drei Register definiert (Beispiel für $x = D$)

  - `DDR`x — **Data Direction Register:** Legt für jeden Pin i fest, ob er als Eingang (Bit i=0) oder als Ausgang (Bit i=1) verwendet wird.

7	6	5	4	3	2	1	0
DDD7	DDD6	DDD5	DDD4	DDD3	DDD2	DDD1	DDD0
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

  - `PORT`x — **Data Register:** Ist Pin i als Ausgang konfiguriert, so legt Bit i den Pegel fest (0=GND sink, 1=Vcc source). Ist Pin i als Eingang konfiguriert, so aktiviert Bit i den internen Pull-Up-Widerstand (1=aktiv).

7	6	5	4	3	2	1	0
PORTD7	PORTD6	PORTD5	PORTD4	PORTD3	PORTD2	PORTD1	PORTD0
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

  - `PIN`x — **Input Register:** Bit i repräsentiert den Pegel an Pin i (1=*high*, 0=*low*), unabhängig von der Konfiguration als Ein-/Ausgang.

7	6	5	4	3	2	1	0
PIND7	PIND6	PIND5	PIND4	PIND3	PIND2	PIND1	PIND0
R	R	R	R	R	R	R	R

Verwendungsbeispiele: ↪ 3–4 und ↪ 3–7 [1, S. 66]

Strukturen: Motivation

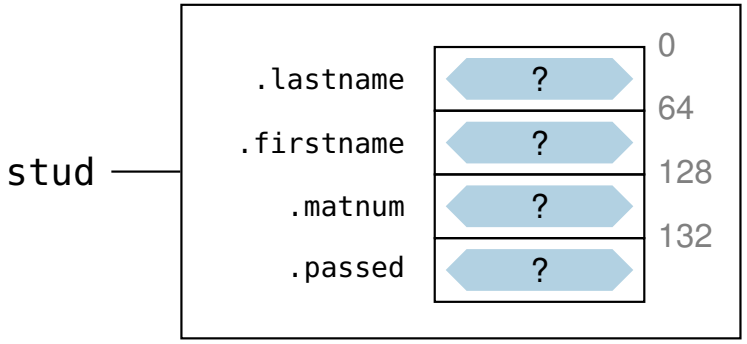
- Jeder Port wird durch *drei* globale Variablen verwaltet
  - Es wäre besser diese zusammen zu fassen
  - „problembezogene Abstraktionen“ ↪ 4–1
  - „Trennung der Belange“ ↪ 12–4
- Dies geht in C mit Verbundtypen (Strukturen)

```
// Structure declaration
struct Student {
  char  lastname[64];
  char  firstname[64];
  long  matnum;
  int   passed;
};

// Variable definition
struct Student stud;
```

Ein Strukturtyp fasst eine Menge von Daten zu einem gemeinsamen Typ zusammen.

Die Datenelemente werden hintereinander im Speicher abgelegt.



Strukturen: Variablendefinition und -initialisierung

- Analog zu einem Array kann eine Strukturvariable bei Definition elementweise initialisiert werden ↪ 13–8

```
struct Student {
  char  lastname[64];
  char  firstname[64];
  long  matnum;
  int   passed;
};
```

```
struct Student stud = { "Meier", "Hans",
                        4711, 0 };
```

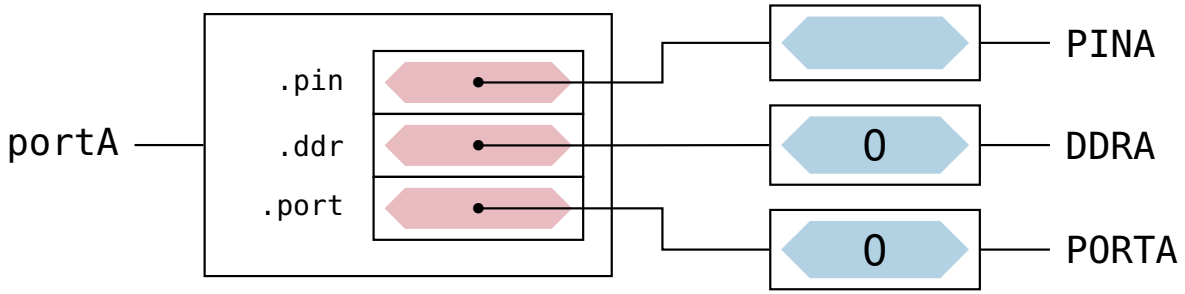
Die Initialisierer werden nur über ihre Reihenfolge, nicht über ihren Bezeichner zugewiesen.
⇝ Potentielle Fehlerquelle bei Änderungen!

- Analog zur Definition von `enum`-Typen kann man mit `typedef` die Verwendung vereinfachen ↪ 6–8

```
typedef struct {
  volatile uint8_t *pin;
  volatile uint8_t *ddr;
  volatile uint8_t *port;
} port_t;
```

```
port_t portA = { &PINA, &DDRA, &PORTA };
port_t portD = { &PIND, &DDRD, &PORTD };
```

Strukturen: Elementzugriff



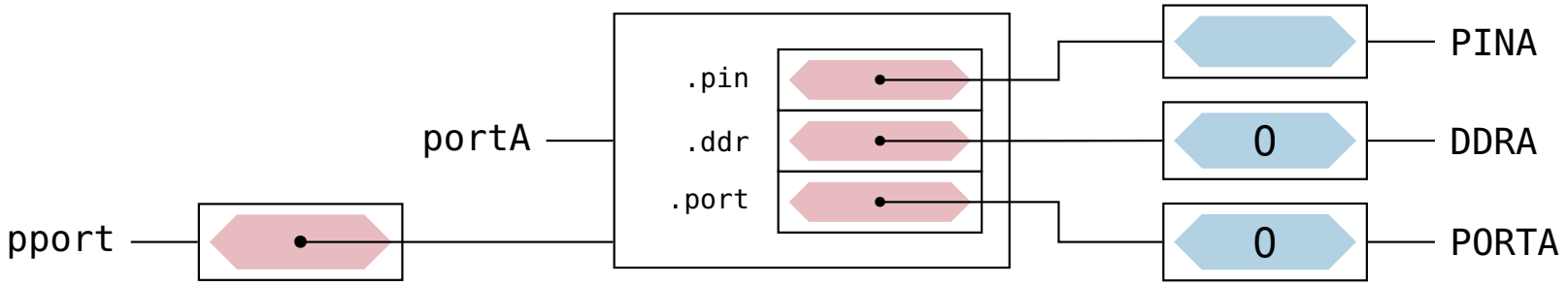
- Auf Strukturelemente wird mit dem `.`-Operator zugegriffen [≈Java]

```
port_t portA = { &PINA, &DDRA, &PORTA };

*portA.port = 0;    // clear all pins
*portA.ddr  = 0xff; // set all to input
```

Beachte: `.` hat eine höhere Priorität als `*`

Strukturen: Elementzugriff



- Bei einem Zeiger auf eine Struktur würde Klammerung benötigt

```
port_t * pport = &portA;  // p --> portA

*(*pport).port = 0;       // clear all pins
*(*pport).ddr  = 0xff;    // set all to output
```

- Mit dem **->**-Operator lässt sich dies vereinfachen `s->m` ≡ `(*s).m`

```
port_t * pport = &portA;  // p --> portA

*pport->port = 0;       // clear all pins
*pport->ddr  = 0xff;    // set all to output
```

-> hat **ebenfalls** eine höhere Priorität als *

Strukturen als Funktionsparameter

- Im Gegensatz zu Arrays werden Strukturen *by-value* übergeben

```
void initPort( port_t p ){
  *p.port = 0;          // clear all pins
  *p.ddr  = 0xff;       // set all to output

  p.port  = &PORTD;     // no effect, p is local variable
}

void main(){ initPort( portA ); ··· }
```

- Bei größeren Strukturen wird das **sehr ineffizient**
  - Z. B. `Student` (↪ 14–15): Jedes mal 134 Byte allozieren und kopieren
  - Besser man übergibt einen Zeiger auf eine konstante Struktur

```
void initPort( const port_t *p ){
  *p->port = 0;          // clear all pins
  *p->ddr  = 0xff;       // set all to output

  // p->port  = &PORTD;   compile-time error, *p is const!
}

void main(){ initPort( &portA ); ··· }
```

Bit-Strukturen: Bitfelder

- Strukturelemente können auf Bit-Granularität festgelegt werden
  - Der Compiler fasst Bitfelder zu passenden Ganzzahltypen zusammen
  - Nützlich, um auf einzelne Bit-Bereiche eines Registers zuzugreifen

- Beispiel
  - `MCUCR` **MCU Control Register:** Steuert Power-Management-Funktionen und Auslöser für externe Interrupt-Quellen `INT0` und `INT1`. [1, S. 36+69]

7	6	5	4	3	2	1	0
SE	**SM2**	**SM1**	**SM0**	**ISC11**	**ISC10**	**ISC01**	**ISC00**
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

```
typedef struct {
  uint8_t ISC0  : 2;  // bit 0-1: interrupt sense control INT0
  uint8_t ISC1  : 2;  // bit 2-3: interrupt sense control INT1
  uint8_t SM    : 3;  // bit 4-6: sleep mode to enter on sleep
  uint8_t SE    : 1;  // bit 7  : sleep enable
} MCUCR_t;
```

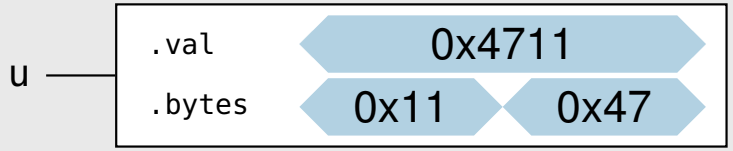
Unions

- In einer Struktur liegen die Elemente hintereinander im Speicher, in einer Union hingegen übereinander ↪ 14–15
  - Wert im Speicher lässt sich verschieden (Typ)-interpretieren
  - Nützlich für bitweise Typ-Casts
- Beispiel

```
void main(){
  union {
    uint16_t  val;
    uint8_t   bytes[2];
  } u;

  u.val = 0x4711;

  // show high-byte
  sb_7seg_showHexNumber( u.bytes[1] );
  ...
  // show  low-byte
  sb_7seg_showHexNumber( u.bytes[0] );
  ...
}
```



Unions und Bit-Strukturen: Anwendungsbeispiel

- Unions werden oft mit Bit-Feldern kombiniert, um ein Register wahlweise „im Ganzen“ oder bitweise ansprechen zu können

```
typedef union {
  volatile uint8_t  reg;  // complete register
  volatile struct {
    uint8_t ISC0  : 2;    // components
    uint8_t ISC1  : 2;
    uint8_t SM    : 3;
    uint8_t SE    : 1;
  };
} MCUCR_t;

void foo( void ) {
  MCUCR_t *mcucr = (MCUCR_t *) (0x35);
  uint8_t oldval = mcucr->reg;  // save register
  ...
  mcucr->ISC0 = 2;              // use register
  mcucr->SE   = 1;              // ···
  ...
  mcucr->reg  = oldval;         // restore register
}
```