

Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

15 Nebenläufigkeit

Jürgen Kleinöder, Daniel Lohmann, Volkmar Sieh

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2019

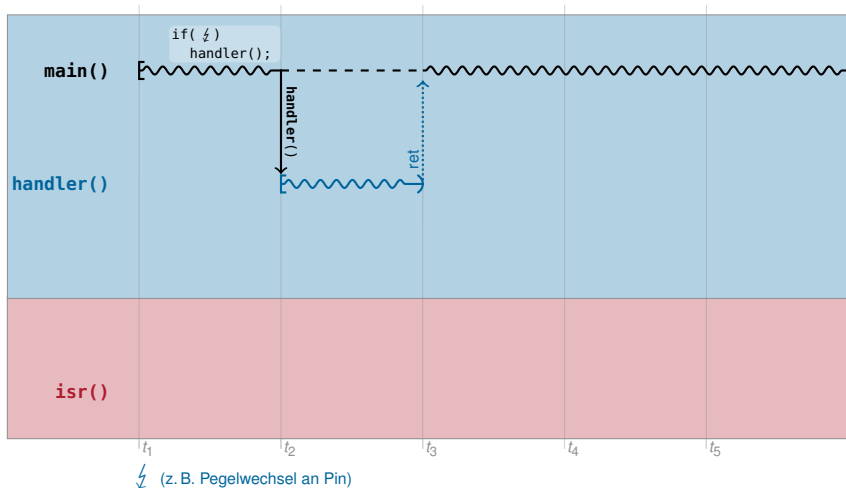
http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS19/V_SPiC



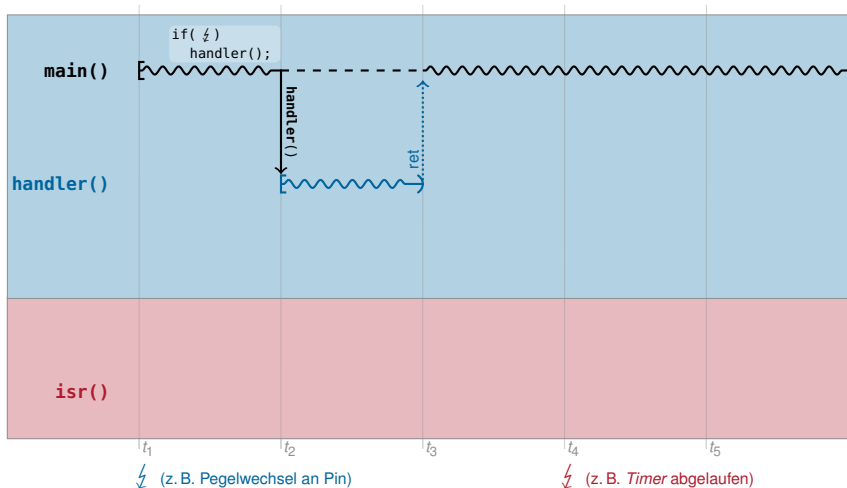
- Bei einem **Peripheriegerät** tritt ein Ereignis (⚡) auf ↔ 14-5
 - Signal an einem Port-Pin wechselt von *low* auf *high*
 - Ein *Timer* ist abgelaufen
 - Ein A/D-Wandler hat einen neuen Wert vorliegen
 - ...
- Wie bekommt das Programm das (nebenläufige) Ereignis mit?
- Zwei alternative Verfahren
 - **Polling:** Das **Programm** überprüft den Zustand regelmäßig und ruft ggf. eine Bearbeitungsfunktion auf.
 - **Interrupt:** Gerät „meldet“ sich beim **Prozessor**, der daraufhin in eine Bearbeitungsfunktion verzweigt.



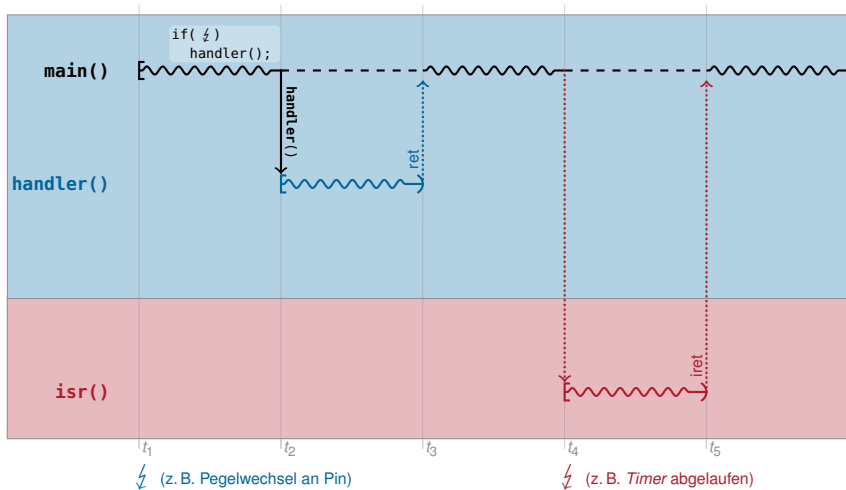
Interrupt \mapsto Funktionsaufruf „von außen“



Interrupt \mapsto Funktionsaufruf „von außen“



Interrupt \mapsto Funktionsaufruf „von außen“



- Polling (↳ „Taktgesteuertes System“)
 - Ereignisbearbeitung erfolgt **synchron** zum Programmablauf
 - Ereigniserkennung über das Programm „verstreut“ (Trennung der Belange)
 - „Verschwendung“ von Prozessorzeit (falls anderweitig verwendbar)
 - Hochfrequentes Pollen \leadsto hohe Prozessorlast \leadsto **hoher Energieverbrauch**
 - + Implizite Datenkonsistenz durch festen, sequentiellen Programmablauf
 - + Programmverhalten gut vorhersagbar

- Interrupts (↳ „Ereignisgesteuertes System“)
 - Ereignisbearbeitung erfolgt **asynchron** zum Programmablauf
 - + Ereignisbearbeitung kann im Programmtext gut separiert werden
 - + Prozessor wird nur beansprucht, wenn Ereignis tatsächlich eintritt
 - Höhere Komplexität durch Nebenläufigkeit \leadsto Synchronisation erforderlich
 - Programmverhalten **schwer vorhersagbar**



Polling vs. Interrupts – Vor- und Nachteile

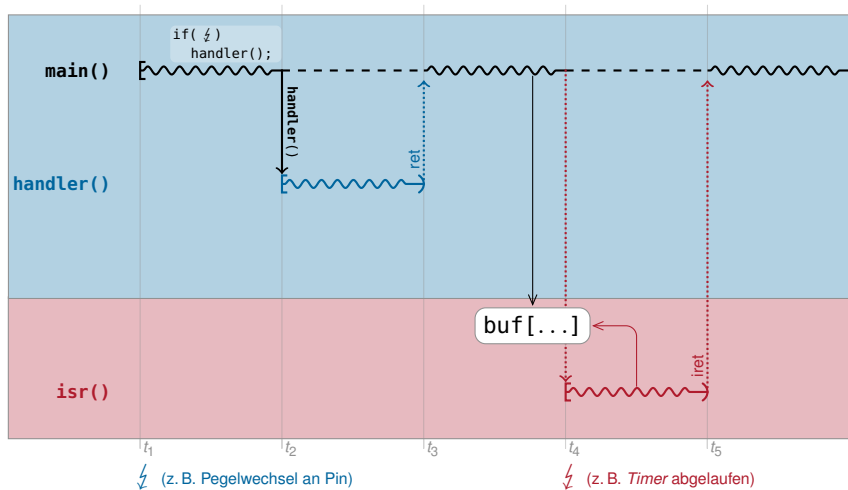
- Polling (↳ „Taktgesteuertes System“)
 - Ereignisbearbeitung erfolgt **synchron** zum Programmablauf
 - Ereigniserkennung über das Programm „verstreut“ (Trennung der Belange)
 - „Verschwendung“ von Prozessorzeit (falls anderweitig verwendbar)
 - Hochfrequentes Pollen \leadsto hohe Prozessorlast \leadsto **hoher Energieverbrauch**
 - + Implizite Datenkonsistenz durch festen, sequentiellen Programmablauf
 - + Programmverhalten gut vorhersagbar

- Interrupts (↳ „Ereignisgesteuertes System“)
 - Ereignisbearbeitung erfolgt **asynchron** zum Programmablauf
 - + Ereignisbearbeitung kann im Programmtext gut separiert werden
 - + Prozessor wird nur beansprucht, wenn Ereignis tatsächlich eintritt
 - Höhere Komplexität durch Nebenläufigkeit \leadsto Synchronisation erforderlich
 - Programmverhalten **schwer vorhersagbar**

Beide Verfahren bieten spezifische Vor- und Nachteile
 \leadsto Auswahl anhand des konkreten Anwendungsszenarios



Interrupt \mapsto unvorhersagbarer Aufruf „von außen“



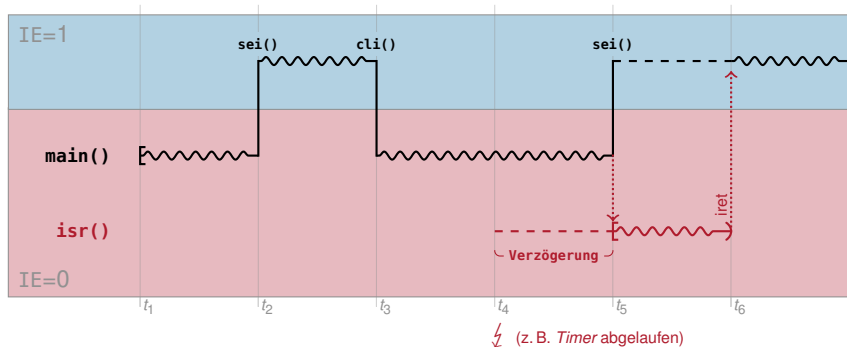
Interruptsperrn

- Zustellung von Interrupts kann softwareseitig **gesperrt** werden
 - Wird benötigt zur **Synchronisation** mit ISRs
 - Einzelne ISR: Bit in gerätespezifischem Steuerregister
 - Alle ISRs: Bit (**IE**, *Interrupt Enable*) im Statusregister der CPU
- Auflaufende IRQs werden (üblicherweise) gepuffert
 - Maximal einer pro Quelle!
 - **Bei längeren Sperrzeiten können IRQs verloren gehen!**
- Das **IE**-Bit wird beeinflusst durch:
 - Prozessor-Befehle: `cli: IE ← 0` (*clear interrupt*, IRQs gesperrt)
`sei: IE ← 1` (*set interrupt*, IRQs erlaubt)
 - Nach einem RESET: `IE = 0` \rightsquigarrow IRQs sind zu Beginn des Hauptprogramms gesperrt
 - Bei Betreten einer ISR: `IE = 0` \rightsquigarrow IRQs sind während der Interruptbearbeitung gesperrt

IRQ \mapsto *Interrupt ReQuest*



Interruptsperrn: Beispiel



t_1 Zu Beginn von `main()` sind IRQs gesperrt (`IE=0`)

t_2, t_3 Mit `sei()` / `cli()` werden IRQs freigegeben (`IE=1`) / erneut gesperrt

t_4 ⚡ aber `IE=0` \leadsto Bearbeitung ist unterdrückt, IRQ wird gepuffert

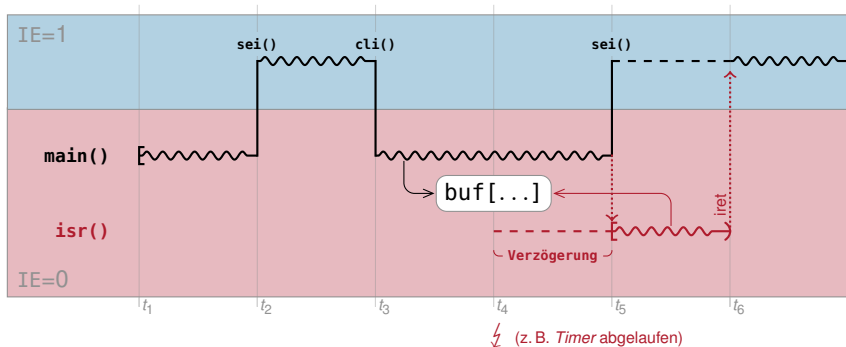
t_5 `main()` gibt IRQs frei (`IE=1`) \leadsto gepufferter IRQ „schlägt durch“

t_5-t_6 Während der ISR-Bearbeitung sind die IRQs gesperrt (`IE=0`)

t_6 Unterbrochenes `main()` wird fortgesetzt



Interruptsperrn: Beispiel



t₁ Zu Beginn von main() sind IRQs gesperrt (IE=0)

t₂, t₃ Mit sei() / cli() werden IRQs freigegeben (IE=1) / erneut gesperrt

t₄ ⚡ aber IE=0 ~> Bearbeitung ist unterdrückt, IRQ wird gepuffert

t₅ main() gibt IRQs frei (IE=1) ~> gepufferter IRQ „schlägt durch“

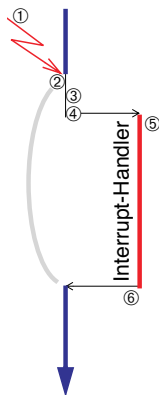
t₅-t₆ Während der ISR-Bearbeitung sind die IRQs gesperrt (IE=0)

t₆ Unterbrochenes main() wird fortgesetzt

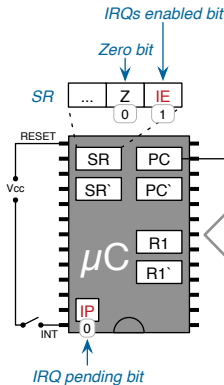


Ablauf eines Interrupts – Überblick

- 1 Gerät signalisiert Interrupt
 - Anwendungsprogramm wird „unmittelbar“ (vor dem nächsten Maschinenbefehl mit $IE=1$) unterbrochen
- 2 Die Zustellung weiterer Interrupts wird gesperrt ($IE=0$)
 - Zwischenzeitlich auflaufende Interrupts werden gepuffert (maximal einer pro Quelle!)
- 3 Registerinhalte werden gesichert (z. B. im Stapel)
 - PC und Statusregister automatisch von der Hardware
 - Vielzweckregister üblicherweise manuell in der ISR
- 4 Aufzurufende ISR (Interrupt-Handler) wird ermittelt
- 5 ISR wird ausgeführt
- 6 ISR terminiert mit einem „return from interrupt“-Befehl
 - Registerinhalte werden restauriert
 - Zustellung von Interrupts wird freigegeben ($IE=1$)
 - Das Anwendungsprogramm wird fortgesetzt



Ablauf eines Interrupts – Details



Programmspeicher

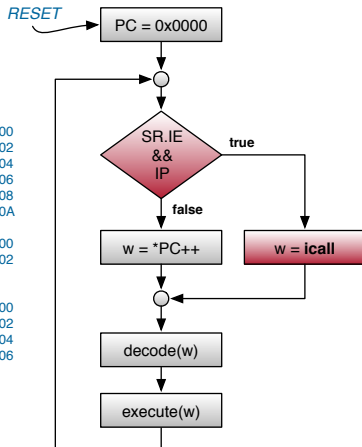
```

main:  Idi R1, 48  0x0000
       dec R1    0x0002
       beq L1    0x0004
       call f    0x0006
       sub R1, 58 0x0008
       ...      0x000A

L1:    ...

f:     add R1, 11 0x0100
       ret       0x0102
       ...

isr:   Idi R1, 1  0x0200
       dec R1    0x0202
       sts a, R1 0x0204
       ired     0x0206
    
```



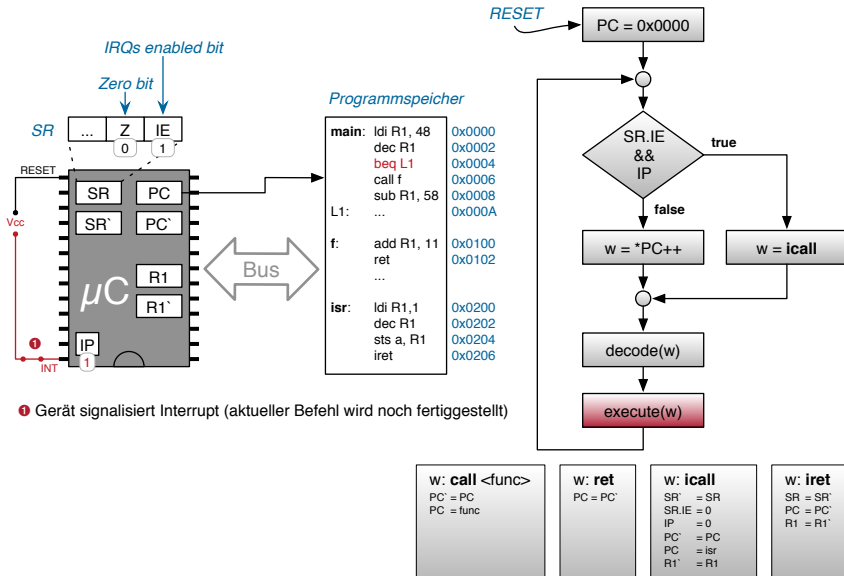
■ Hier als Erweiterung unseres einfachen Pseudoprozessors \leftrightarrow 14-4

- Nur eine Interruptquelle
- Sämtliche Register werden von der Hardware gerettet

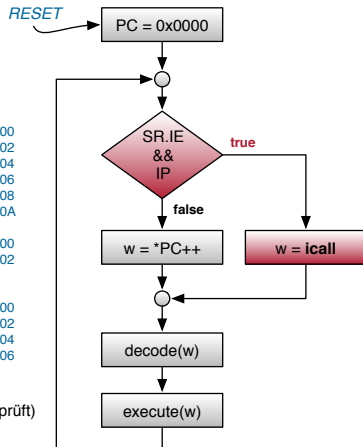
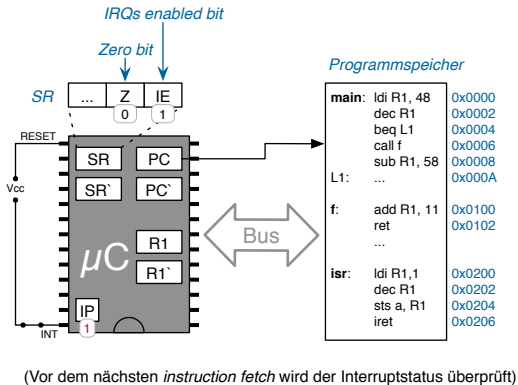
w: call <func> PC' = PC PC = func	w: ret PC = PC'	w: icall SR' = SR SR.IE = 0 IP = 0 PC' = PC PC = isr R1' = R1	w: ired SR = SR' PC = PC' R1 = R1'
--	---------------------------	--	--



Ablauf eines Interrupts – Details



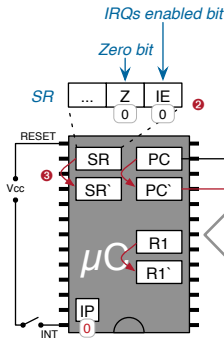
Ablauf eines Interrupts – Details



w: call <func> PC' = PC PC = func	w: ret PC = PC'	w: icall SR' = SR SR.IE = 0 IP = 0 PC' = PC PC = isr R1' = R1	w: ired SR = SR' PC = PC' R1 = R1'
--	---------------------------	--	--



Ablauf eines Interrupts – Details



Programmspeicher

```

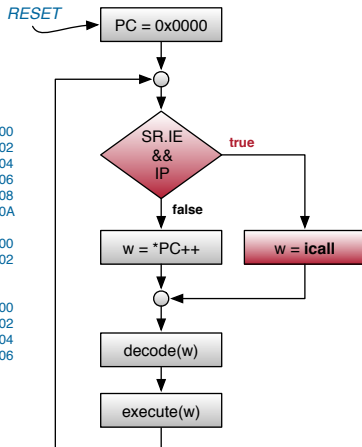
main: ldi R1, 48  0x0000
      dec R1     0x0002
      beq L1    0x0004
      call f    0x0006
      sub R1, 58 0x0008
      ...      0x000A

L1:   ...

f:    add R1, 11 0x0100
      ret       0x0102
      ...

isr:  ldi R1, 1  0x0200
      dec R1     0x0202
      sts a, R1  0x0204
      ired      0x0206
    
```

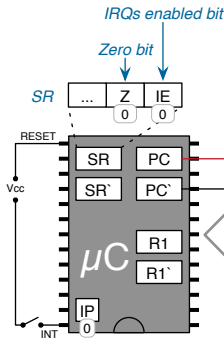
- ② Die Zustellung weiterer Interrupts wird verzögert
- ③ Registerinhalte werden gesichert



w: call <func> PC' = PC PC = func	w: ret PC = PC'	w: icall SR' = SR SR.IE = 0 IP = 0 PC' = PC PC = isr R1' = R1	w: ired SR = SR' PC = PC' R1 = R1'
--	---------------------------	--	--



Ablauf eines Interrupts – Details

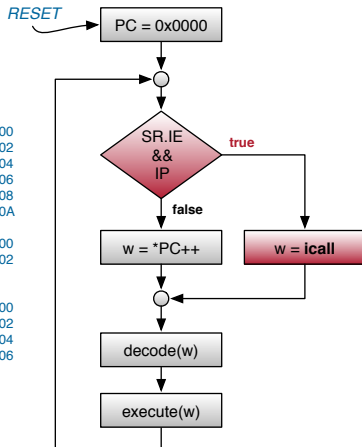


Programmspeicher

```

main:  ldi R1, 48    0x0000
        dec R1     0x0002
        beq L1    0x0004
        call f     0x0006
        sub R1, 58 0x0008
        ...       0x000A
L1:    ...
f:     add R1, 11  0x0100
        ret       0x0102
...
isr:   ldi R1, 1   0x0200
        dec R1     0x0202
        sts a, R1  0x0204
        ired      0x0206
    
```

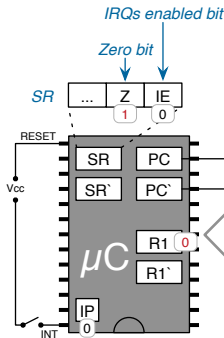
4 Aufzurufende ISR wird ermittelt



w: call <func> PC' = PC PC = func	w: ret PC = PC'	w: icall SR' = SR SR.IE = 0 IP = 0 PC' = PC PC = isr R1' = R1	w: ired SR = SR' PC = PC' R1 = R1'
--	---------------------------	--	--



Ablauf eines Interrupts – Details



⑥ ISR wird ausgeführt

Programmspeicher

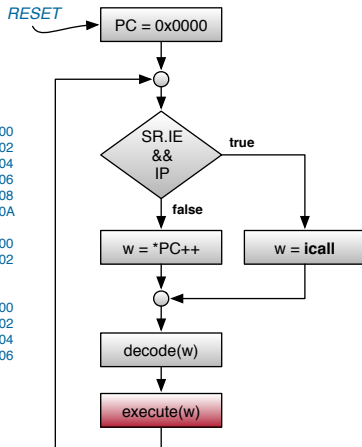
```

main: ldi R1, 48 0x0000
      dec R1    0x0002
      beq L1   0x0004
      call f   0x0006
      sub R1, 58 0x0008
      ...     0x000A

L1:   ...

f:    add R1, 11 0x0100
      ret       0x0102
      ...

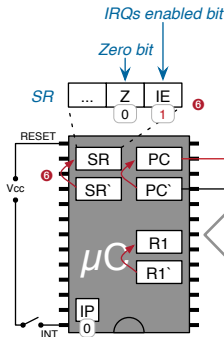
isr:  ldi R1, 1  0x0200
      dec R1    0x0202
      sts a, R1 0x0204
      ired     0x0206
    
```



w: call <func> PC' = PC PC = func	w: ret PC = PC'	w: icall SR' = SR SR.IE = 0 IP = 0 PC' = PC PC = isr R1' = R1	w: ired SR = SR' PC = PC' R1 = R1'
--	---------------------------	--	--



Ablauf eines Interrupts – Details



Programmspeicher

```

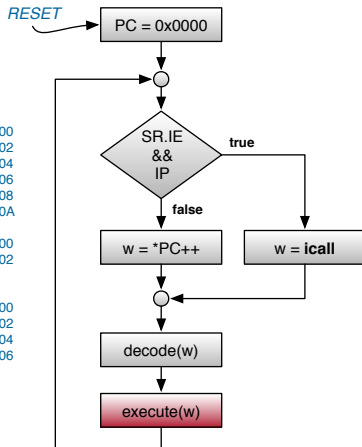
main:  Idi R1, 48  0x0000
       dec R1    0x0002
       beq L1    0x0004
       call f    0x0006
       sub R1, 58 0x0008
       ...      0x000A

L1:    ...

f:     add R1, 11 0x0100
       ret       0x0102
       ...

isr:   Idi R1, 1  0x0200
       dec R1    0x0202
       sts a, R1 0x0204
       ired     0x0206
    
```

- ⑥ ISR terminiert mit *ired*-Befehl
- Registerinhalte werden restauriert
 - Zustellung von Interrupts wird reaktiviert
 - Das Anwendungsprogramm wird fortgesetzt

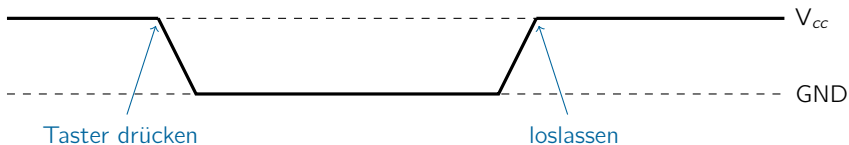


w: call <func> PC' = PC PC = func	w: ret PC = PC'	w: icall SR' = SR SR.IE = 0 IP = 0 PC' = PC PC = isr R1' = R1	w: ired SR = SR' PC = PC' R1 = R1'
--	---------------------------	--	--



Pegel- und Flanken-gesteuerte Interrupts

- Beispiel: Signal eines **idealisierten** Tasters (*active low*)



- Flankengesteuerter Interrupt
 - Interrupt wird durch den Pegelwechsel (Flanke) ausgelöst
 - Häufig ist konfigurierbar, welche Flanke (steigend/fallend/beide) einen Interrupt auslösen soll
- Pegelgesteuerter Interrupt
 - Interrupt wird immer wieder ausgelöst, so lange der Pegel anliegt



Interruptsteuerung beim AVR ATmega

■ IRQ-Quellen beim ATmega328PB

- 45 IRQ-Quellen
- einzeln de-/aktivierbar
- IRQ \rightsquigarrow Sprung an Vektor-Adresse

(IRQ \rightsquigarrow Interrupt ReQuest)

[1, S. 78]

■ Verschaltung SPiCboard

(\leftrightarrow 14-14 \leftrightarrow 2-6)

- INT0 \rightsquigarrow PD2 \rightsquigarrow Button0 (hardwareseitig entprellt)
- INT1 \rightsquigarrow PD3 \rightsquigarrow Button1

Vector No	Program Address	Source	Interrupts definition
1	0x0000	RESET	External Pin, Power-on Reset, Brown-out Reset and Watchdog System Reset
2	0x0002	INT0	External Interrupt Request 0
3	0x0004	INT1	External Interrupt Request 0
4	0x0006	PCINT0	Pin Change Interrupt Request 0
5	0x0008	PCINT1	Pin Change Interrupt Request 1
6	0x000A	PCINT2	Pin Change Interrupt Request 2
7	0x000C	WDT	Watchdog Time-out Interrupt
8	0x000E	TIMER2_COMPA	Timer/Counter2 Compare Match A
9	0x0010	TIMER2_COMPB	Timer/Counter2 Compare Match B
10	0x0012	TIMER2_OVF	Timer/Counter2 Overflow
11	0x0014	TIMER1_CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
12	0x0016	TIMER1_COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
13	0x0018	TIMER1_COMPB	Timer/Counter1 Compare Match B
14	0x001A	TIMER1_OVF	Timer/Counter1 Overflow
15	0x001C	TIMER0_COMPA	Timer/Counter0 Compare Match A
16	0x001E	TIMER0_COMPB	Timer/Counter0 Compare Match B
17	0x0020	TIMER0_OVF	Timer/Counter0 Overflow
18	0x0022	SPI0_STC	SPI1 Serial Transfer Complete
19	0x0024	USART0_RX	USART0 Rx Complete
20	0x0026	USART0_UDRE	USART0, Data Register Empty
21	0x0028	USART0_TX	USART0, Tx Complete
22	0x002A	ADC	ADC Conversion Complete



Externe Interrupts: Register

■ Steuerregister für INT0 und INT1

- **EIMSK** **External Interrupt Mask Register:** Legt fest, ob die Quellen INT_i IRQs auslösen (Bit $INT_i=1$) oder deaktiviert sind (Bit $INT_i=0$) [1, S. 84]



- **EICRA** **External Interrupt Control Register A:** Legt für externe Interrupts INT0 und INT1 fest, wodurch ein IRQ ausgelöst wird (Flanken-/Pegelsteuerung) [1, S. 83]



Jeweils zwei *Interrupt-Sense-Control*-Bits (ISC_{i0} und ISC_{i1}) steuern dabei die Auslöser (Tabelle für INT1, für INT0 gilt entsprechendes):

ISC11	ISC10	Description
0	0	The low level of INT1 generates an interrupt request.
0	1	Any logical change on INT1 generates an interrupt request.
1	0	The falling edge of INT1 generates an interrupt request.
1	1	The rising edge of INT1 generates an interrupt request.



- **Schritt 1:** Installation der **Interrupt-Service-Routine**
 - ISR in Hochsprache \rightsquigarrow Registerinhalte sichern und wiederherstellen
 - Unterstützung durch die **avrlibc**: Makro **ISR(SOURCE_vect)** (Modul **avr/interrupt.h**)

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

ISR(INT1_vect) { // invoked for every INT1 IRQ
    static uint8_t counter = 0;
    sb_7seg_showNumber(counter++);
    if (counter == 100) counter = 0;
}

void main(void) {
    ... // setup
}
```



■ Schritt 2: Konfigurieren der Interrupt-Steuerung

- Steuerregister dem Wunsch entsprechend initialisieren
- Unterstützung durch die `avrlibc`: Makros für Bit-Indizes (Modul `avr/interrupt.h` und `avr/io.h`)

```
...  
void main(void) {  
    DDRD  &= ~(1<<PD3);           // PD3: input with pull-up  
    PORTD |= (1<<PD3);  
    EICRA &= ~(1<<ISC10 | 1<<ISC11); // INT1: IRQ on level=low  
    EIMSK |= (1<<INT1);           // INT1: enable  
    ...  
    sei();                         // global IRQ enable  
    ...  
}
```

■ Schritt 3: Interrupts global zulassen

- Nach Abschluss der Geräteinitialisierung
- Unterstützung durch die `avrlibc`: Befehl `sei()` (Modul `avr/interrupt.h`)



- **Schritt 4:** Wenn nichts zu tun, den **Stromsparmmodus betreten**
 - Die `sleep`-Instruktion hält die CPU an, bis ein IRQ eintrifft
 - In diesem Zustand wird nur sehr wenig Strom verbraucht
 - Unterstützung durch die `avrlibc` (Modul `avr/sleep.h`):
 - `sleep_enable()` / `sleep_disable()`: Sleep-Modus erlauben / verbieten
 - `sleep_cpu()`: Sleep-Modus betreten



```
#include <avr/sleep.h>
...
void main(void) {
    ...
    sei(); // global IRQ enable
    while(1) {
        sleep_enable();
        sleep_cpu(); // wait for IRQ
        sleep_disable();
    }
}
```



Definition: Nebenläufigkeit

Zwei Programmausführungen A und B sind nebenläufig ($A|B$), wenn für einzelne Instruktionen a aus A und b aus B nicht feststeht, ob a oder b tatsächlich zuerst ausgeführt wird (a, b oder b, a).

- Nebenläufigkeit tritt auf durch
 - Interrupts
 - ↪ IRQs können ein Programm an „beliebiger Stelle“ unterbrechen
 - Echt-parallele Abläufe (durch die Hardware)
 - ↪ andere CPU / Peripherie greift „jederzeit“ auf den Speicher zu
 - Quasi-parallele Abläufe (z. B. Fäden in einem Betriebssystem)
 - ↪ Betriebssystem kann „jederzeit“ den Prozessor entziehen
- **Problem:** Nebenläufige Zugriffe auf **gemeinsamen** Zustand



Nebenläufigkeitsprobleme

■ Szenario

- Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
- Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
static volatile uint16_t cars;

void main(void) {
    while (1) {
        waitsec(60);
        send(cars);
        cars = 0;
    }
}
```

```
// photo sensor is connected
// to INT2

ISR(INT2_vect) {
    cars++;
}
```

■ Wo ist hier das Problem?



Nebenläufigkeitsprobleme

■ Szenario

- Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
- Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
static volatile uint16_t cars;

void main(void) {
    while (1) {
        waitsec(60);
        send(cars);
        cars = 0;
    }
}
```

```
// photo sensor is connected
// to INT2

ISR(INT2_vect) {
    cars++;
}
```

■ Wo ist hier das Problem?

- Sowohl `main()` als auch `ISR` **lesen und schreiben** `cars`
→ Potentielle *Lost-Update*-Anomalie



Nebenläufigkeitsprobleme

■ Szenario

- Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
- Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
static volatile uint16_t cars;

void main(void) {
    while (1) {
        waitsec(60);
        send(cars);
        cars = 0;
    }
}
```

```
// photo sensor is connected
// to INT2

ISR(INT2_vect) {
    cars++;
}
```

■ Wo ist hier das Problem?

- Sowohl `main()` als auch `ISR` **lesen und schreiben** `cars`
→ Potentielle *Lost-Update*-Anomalie
- Größe der Variable `cars` **übersteigt die Registerbreite**
→ Potentielle *Read-Write*-Anomalie



Nebenläufigkeitsprobleme (Forts.)

- Wo sind hier die Probleme?
 - **Lost-Update**: Sowohl `main()` als auch `ISR` lesen und schreiben `cars`
 - **Read-Write**: Größe der Variable `cars` übersteigt die Registerbreite
- Wird oft erst auf der **Assemblerebene** deutlich

```
void main(void) {  
    ...  
    send(cars);  
    cars = 0;  
    ...  
}
```

```
// photosensor is connected  
// to INT2
```

```
ISR(INT2_vect) {  
    cars++;  
}
```

```
main:  
    ...  
    lds r24,cars  
    lds r25,cars+1  
    rcall send  
    sts cars+1,___zero_reg__  
    sts cars,___zero_reg__  
    ...
```

```
INT2_vect:  
    ... ; save regs  
    lds r24,cars ; load cars.lo  
    lds r25,cars+1 ; load cars.hi  
    adiw r24,1 ; add (16 bit)  
    sts cars+1,r25 ; store cars.hi  
    sts cars,r24 ; store cars.lo  
    ... ; restore regs
```



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg__
sts cars,___zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1, __zero_reg__
sts cars, __zero_reg__
...
```



```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=5 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg__
sts cars,___zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```



- Sei cars=5 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat den Wert von cars (5) bereits in Register gelesen (Register ↪ lokale Variable)



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg__
sts cars,___zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=5 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat den Wert von cars (5) bereits in Register gelesen (Register → lokale Variable)
 - INT2_vect wird ausgeführt
 - Register werden gerettet
 - cars wird inkrementiert ~ cars=6
 - Register werden wiederhergestellt



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1, __zero_reg__
sts cars, __zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=5 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat den Wert von cars (5) bereits in Register gelesen (Register → lokale Variable)
 - INT2_vect wird ausgeführt
 - Register werden gerettet
 - cars wird inkrementiert ~ cars=6
 - Register werden wiederhergestellt
 - main übergibt den **veralteten Wert** von cars (5) an send



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,__zero_reg__
sts cars,__zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=5 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat den Wert von cars (5) bereits in Register gelesen (Register → lokale Variable)
 - INT2_vect wird ausgeführt
 - Register werden gerettet
 - cars wird inkrementiert ~ cars=6
 - Register werden wiederhergestellt
 - main übergibt den **veralteten Wert** von cars (5) an send
 - main nullt cars ~ **1 Auto ist „verloren“ gegangen**



Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write-Anomalie*

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg__
sts cars,___zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```



Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write-Anomalie*

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg__ ← ⚡
sts cars,___zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=255 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf



Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write-Anomalie*

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg__ ← ⚡
sts cars,___zero_reg__
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=255 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat bereits cars=255 Autos mit send gemeldet



Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write-Anomalie*

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg ← ⚡
sts cars,___zero_reg
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=255 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat bereits cars=255 Autos mit send gemeldet
 - main hat bereits das **High-Byte** von cars genullt
↪ cars=255, cars.lo=255, cars.hi=0



Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write-Anomalie*

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg___ ← ⚡
sts cars,___zero_reg___
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=255 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat bereits cars=255 Autos mit send gemeldet
 - main hat bereits das **High-Byte** von cars genullt
 - ↪ cars=255, cars.lo=255, cars.hi=0
 - INT2_vect wird ausgeführt
 - ↪ cars wird gelesen und inkrementiert, **Überlauf ins High-Byte**
 - ↪ cars=256, cars.lo=0, cars.hi=1



Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write-Anomalie*

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1,___zero_reg___
sts cars,___zero_reg___ ← ⚡
...
```

```
INT2_vect:
... ; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
... ; restore regs
```

- Sei cars=255 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf
 - main hat bereits cars=255 Autos mit send gemeldet
 - main hat bereits das **High-Byte** von cars genullt
~> cars=255, cars.lo=255, cars.hi=0
 - INT2_vect wird ausgeführt
~> cars wird gelesen und inkrementiert, **Überlauf ins High-Byte**
~> cars=256, cars.lo=0, cars.hi=1
 - main nullt das **Low-Byte** von cars
~> cars=256, cars.lo=0, cars.hi=1
~> Beim nächsten send werden **255 Autos zu viel gemeldet**



Interruptsperrn: Datenflussanomalien verhindern

```
void main(void) {  
    while(1) {  
        waitsec(60);  
  
        send(cars);  
        cars = 0;  
  
    }  
}
```

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?



Interruptsperrn: Datenflussanomalien verhindern

```
void main(void) {  
    while(1) {  
        waitsec(60);  
  
        send(cars);  
        cars = 0;  
    }  
}
```

kritisches Gebiet

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Lesen von cars und Nullen von cars müssen atomar ausgeführt werden



```
void main(void) {  
    while(1) {  
        waitsec(60);  
        cli();  
        send(cars);  
        cars = 0;  
        sei();  
    }  
}
```

kritisches Gebiet

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Lesen von cars und Nullen von cars müssen atomar ausgeführt werden
 - Dies kann hier mit **Interruptsperrn** erreicht werden
 - ISR unterbricht main, aber nie umgekehrt \rightsquigarrow asymmetrische Synchronisation



Interruptsperrn: Datenflussanomalien verhindern

```
void main(void) {  
    while(1) {  
        waitsec(60);  
        cli();  
        send(cars);  
        cars = 0;  
        sei();  
    }  
}
```

kritisches Gebiet

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Lesen von cars und Nullen von cars müssen atomar ausgeführt werden
 - Dies kann hier mit **Interruptsperrn** erreicht werden
 - ISR unterbricht main, aber nie umgekehrt \rightsquigarrow asymmetrische Synchronisation
 - Achtung: Interruptsperrn sollten **so kurz wie möglich** sein
 - Wie lange braucht die Funktion send hier?
 - Kann man send aus dem kritischen Gebiet herausziehen?



- Szenario, Teil 2 (Funktion `waitsec()`)
 - Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
 - Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
void waitsec(uint8_t sec) {
    ...           // setup timer
    sleep_enable();
    event = 0;
    while (! event) { // wait for event
        sleep_cpu(); // until next irq
    }
    sleep_disable();
}
```

```
static volatile int8_t event;

// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Wo ist hier das Problem?



- Szenario, Teil 2 (Funktion `waitsec()`)
 - Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
 - Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
void waitsec(uint8_t sec) {
    ...           // setup timer
    sleep_enable();
    event = 0;
    while (! event) { // wait for event
        sleep_cpu(); // until next irq
    }
    sleep_disable();
}
```

```
static volatile int8_t event;

// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Wo ist hier das Problem?
 - **Test, ob nichts zu tun ist**, gefolgt von
Schlafen, bis etwas zu tun ist



- Szenario, Teil 2 (Funktion `waitsec()`)
 - Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
 - Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
void waitsec(uint8_t sec) {
    ...           // setup timer
    sleep_enable();
    event = 0;
    while (! event) { // wait for event
        sleep_cpu(); // until next irq
    }
    sleep_disable();
}
```

```
static volatile int8_t event;

// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Wo ist hier das Problem?
 - Test, ob nichts zu tun ist, gefolgt von **Schlafen, bis etwas zu tun ist**



- Szenario, Teil 2 (Funktion `waitsec()`)
 - Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
 - Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
void waitsec(uint8_t sec) {
    ...           // setup timer
    sleep_enable();
    event = 0;
    while (! event) { // wait for event
        sleep_cpu(); // until next irq
    }
    sleep_disable();
}
```

```
static volatile int8_t event;

// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Wo ist hier das Problem?
 - Test, ob nichts zu tun ist, gefolgt von Schlafen, bis etwas zu tun ist
↪ Potentielle *Lost-Wakeup*-Anomalie



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Wakeup*-Anomalie

```
void waitsec(uint8_t sec) {  
    ... // setup timer  
    sleep_enable();  
    event = 0;  
    while (! event) {  
        sleep_cpu();  
    }  
    sleep_disable();  
}
```



```
static volatile int8_t event;  
  
// TIMER1 ISR  
// triggers when  
// waitsec() expires  
  
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    event = 1;  
}
```

- Angenommen, an **dieser Stelle** tritt der Timer-IRQ (⚡) auf



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Wakeup*-Anomalie

```
void waitsec(uint8_t sec) {  
    ... // setup timer  
    sleep_enable();  
    event = 0;  
    while (! event) {  
        sleep_cpu();  
    }  
    sleep_disable();  
}
```



```
static volatile int8_t event;  
  
// TIMER1 ISR  
// triggers when  
// waitsec() expires  
  
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    event = 1;  
}
```

- Angenommen, an **dieser Stelle** tritt der Timer-IRQ (⚡) auf
 - waitsec hat bereits festgestellt, dass event **nicht gesetzt** ist



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Wakeup*-Anomalie

```
void waitsec(uint8_t sec) {  
    ...           // setup timer  
    sleep_enable();  
    event = 0;  
    while (! event) {  
        sleep_cpu();  
    }  
    sleep_disable();  
}
```



```
static volatile int8_t event;  
  
// TIMER1 ISR  
// triggers when  
// waitsec() expires  
  
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    event = 1;  
}
```

- Angenommen, an **dieser Stelle** tritt der Timer-IRQ (⚡) auf
 - waitsec hat bereits festgestellt, dass event **nicht gesetzt** ist
 - ISR wird ausgeführt \rightsquigarrow event **wird gesetzt**



Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Wakeup*-Anomalie

```
void waitsec(uint8_t sec) {  
    ...           // setup timer  
    sleep_enable();  
    event = 0;  
    while (! event) { ← ⚡  
        sleep_cpu();  
    }  
    sleep_disable();  
}
```

```
static volatile int8_t event;  
  
// TIMER1 ISR  
// triggers when  
// waitsec() expires  
  
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    event = 1;  
}
```

- Angenommen, an **dieser Stelle** tritt der Timer-IRQ (⚡) auf
 - waitsec hat bereits festgestellt, dass event **nicht gesetzt** ist
 - ISR wird ausgeführt ~ event **wird gesetzt**
 - Obwohl event gesetzt ist, wird der **Schlafzustand betreten**
~ Falls kein weiterer IRQ kommt, **Dornröschenschlaf**



Lost-Wakeup: Dornröschenschlaf verhindern

```
1 void waitsec(uint8_t sec) {  
2     ... // setup timer  
3     sleep_enable();  
4     event = 0;  
5  
6     while (! event) {  
7  
8         sleep_cpu();  
9  
10    }  
11  
12    sleep_disable();  
13 }
```

```
static volatile int8_t event;  
  
// TIMER1 ISR  
// triggers when  
// waitsec() expires  
  
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    event = 1;  
}
```

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?



Lost-Wakeup: Dornröschenschlaf verhindern

```
1 void waitsec(uint8_t sec) {  
2     ... // setup timer  
3     sleep_enable();  
4     event = 0;  
5  
6     while (! event) {  
7         // kritisches Gebiet  
8         sleep_cpu();  
9     }  
10 }  
11  
12 sleep_disable();  
13 }
```

```
static volatile int8_t event;  
  
// TIMER1 ISR  
// triggers when  
// waitsec() expires  
  
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {  
    event = 1;  
}
```

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Test auf Vorbedingung und Betreten des Schlafzustands (Kann man *das* durch Interruptsperrern absichern?)



Lost-Wakeup: Dornröschenschlaf verhindern

```
1 void waitsec(uint8_t sec) {
2   ... // setup timer
3   sleep_enable();
4   event = 0;
5   cli();
6   while (! event) {
7     sei(); // kritisches Gebiet
8     sleep_cpu();
9     cli();
10  }
11  sei();
12  sleep_disable();
13 }
```

```
static volatile int8_t event;

// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires

ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
  event = 1;
}
```

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Test auf Vorbedingung und Betreten des Schlafzustands (Kann man *das* durch Interruptsperrern absichern?)
 - Problem: Vor `sleep_cpu()` müssen IRQs freigegeben werden!



Lost-Wakeup: Dornröschenschlaf verhindern

```
1 void waitsec(uint8_t sec) {
2     ... // setup timer
3     sleep_enable();
4     event = 0;
5     cli();
6     while (! event) {
7         sei(); // kritisches Gebiet
8         sleep_cpu();
9         cli();
10    }
11    sei();
12    sleep_disable();
13 }
```

```
static volatile int8_t event;
// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

■ Wo genau ist das **kritische Gebiet**?

- Test auf Vorbedingung und Betreten des Schlafzustands (Kann man *das* durch Interruptsperrern absichern?)
- Problem: Vor `sleep_cpu()` müssen IRQs freigegeben werden!
- Funktioniert dank spezieller Hardwareunterstützung:
↪ Befehlssequenz `sei`, `sleep` wird von der CPU **atomar** ausgeführt



Zusammenfassung

- Interruptbearbeitung erfolgt **asynchron** zum Programmablauf
 - Unerwartet \rightsquigarrow Zustandssicherung im Interrupt-Handler erforderlich
 - Quelle von Nebenläufigkeit \rightsquigarrow **Synchronisation erforderlich**
- Synchronisationsmaßnahmen
 - Gemeinsame Zustandsvariablen als **volatile** deklarieren (immer)
 - Zustellung von Interrupts sperren: `cli`, `sei` (bei nichtatomaren Zugriffen, die mehr als einen Maschinenbefehl erfordern)
 - **Bei längeren Sperrzeiten können IRQs verloren gehen!**
- Nebenläufigkeit durch Interrupts ist eine **sehr große Fehlerquelle**
 - *Lost-Update* und *Lost-Wakeup* Probleme
 - indeterministisch \rightsquigarrow durch Testen schwer zu fassen
- Wichtig zur Beherrschbarkeit: **Modularisierung** \leftrightarrow 12-7
 - Interrupthandler und Zugriffsfunktionen auf gemeinsamen Zustand (**static** Variablen!) in eigenem Modul kapseln.

