

Übungen zu Systemnahe Programmierung in C (SPiC) – Sommersemester 2018

Übung 5

Benedict Herzog
Sebastian Maier

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



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

Interrupts

- Ablauf eines Interrupts (vgl. 15-7)
 0. Hardware setzt entsprechendes Flag
 1. Sind die Interrupts aktiviert und der Interrupt nicht maskiert, unterbricht der Interruptcontroller die aktuelle Ausführung
 2. weitere Interrupts werden deaktiviert
 3. aktuelle Position im Programm wird gesichert
 4. Adresse des Handlers wird aus Interrupt-Vektor gelesen und angesprungen
 5. Ausführung des Interrupt-Handlers
 6. am Ende des Handlers bewirkt ein Befehl "Return from Interrupt" die Fortsetzung des Anwendungsprogramms und die Reaktivierung der Interrupts

1

Implementierung von Interruptbehandlungen



- Je Interrupt steht ein Bit zum Zwischenspeichern zur Verfügung
- Ursachen für den Verlust von weiteren Interrupts
 - Während einer Interruptbehandlung
 - Interruptsperrern (zur Synchronisation von kritischen Abschnitten)
- Das Problem ist generell nicht zu verhindern
 - ↪ Risikominimierung: Interruptbehandlungen sollten möglichst kurz sein
 - Schleifen und Funktionsaufrufe vermeiden
 - Auf blockierende Funktionen verzichten (ADC/serielle Schnittstelle!)

2

- Timer
- Serielle Schnittstelle
- ADC (Analog-Digital-Umsetzer)
- Externe Interrupts durch Pegel(änderung) an bestimmten I/O-Pins
 - ⇒ ATmega328PB: 2 Quellen an den Pins PD2 (INT0) und PD3 (INT1)
 - Wahlweise pegel- oder flankengesteuert
 - Abhängig von der jeweiligen Interruptquelle
- Dokumentation im ATmega328PB-Datenblatt
 - Interruptbehandlung allgemein: S. 77-80
 - Externe Interrupts: S. 81-91

3

(De-)Aktivieren von Interrupts



- Interrupts können durch die spezielle Maschinenbefehle aktiviert bzw. deaktiviert werden.
- Die Bibliothek avr-libc bietet hierfür Makros an:
`#include <avr/interrupt.h>`
 - `sei()` (Set Interrupt Flag) - lässt ab dem nächsten Takt Interrupts zu
 - `cli()` (Clear Interrupt Flag) - blockiert (sofort) alle Interrupts
- Beim Betreten eines Interrupt-Handlers werden automatisch alle Interrupts blockiert, beim Verlassen werden sie wieder deblockiert
- `sei()` sollte niemals in einer Interruptbehandlung ausgeführt werden
 - potentiell endlos geschachtelte Interruptbehandlung
 - Stackoverflow möglich (Vorlesung, voraussichtlich Kapitel 17)
- Beim Start des µC sind die Interrupts abgeschaltet

4

- Interrupt Sense Control (ISC) Bits befinden sich beim ATmega328PB im External Interrupt Control Register A (EICRA)
- Position der ISC-Bits im Register durch Makros definiert

Interrupt 0		Interrupt bei	Interrupt 1	
ISC01	ISC00		ISC11	ISC10
0	0	low Pegel	0	0
0	1	beliebiger Flanke	0	1
1	0	fallender Flanke	1	0
1	1	steigender Flanke	1	1

- Beispiel: INT1 bei ATmega328PB für fallende Flanke konfigurieren

```
01 /* die ISC-Bits befinden sich im EICRA */
02 EICRA &= ~(1<<ISC10); /* ISC10 löschen */
03 EICRA |= (1<<ISC11); /* ISC11 setzen */
```

5

(De-)Maskieren von Interrupts



- Einzelne Interrupts können separat aktiviert (=demaskiert) werden
 - ATmega328PB: External Interrupt Mask Register (EIMSK)
- Die Bitpositionen in diesem Register sind durch Makros INTn definiert
- Ein gesetztes Bit aktiviert den jeweiligen Interrupt
- Beispiel: Interrupt 1 aktivieren

```
01 EIMSK |= (1<<INT1); /* demaskiere Interrupt 1 */
```

6

- Installieren eines Interrupt-Handlers wird durch C-Bibliothek unterstützt
- Makro ISR (Interrupt Service Routine) zur Definition einer Handler-Funktion (`#include <avr/interrupt.h>`)
- Parameter: gewünschten Vektor; z. B. `INT1_vect` für externen Interrupt 1
 - verfügbare Vektoren: siehe avr-libc-Doku zu `avr/interrupt.h`
⇒ verlinkt im Doku-Bereich auf der SPiC-Webseite
- Beispiel: Handler für Interrupt 1 implementieren

```
01 #include <avr/interrupt.h>
02 static uint16_t zaehler = 0;
03
04 ISR(INT1_vect){
05     zaehler++;
06 }
```

Synchronisation



- Bei einem Interrupt wird `event = 1` gesetzt
- Aktive Warteschleife wartet, bis `event != 0`
- Der Compiler erkennt, dass `event` innerhalb der Warteschleife nicht verändert wird
 - ⇒ der Wert von `event` wird nur einmal vor der Warteschleife aus dem Speicher in ein Prozessorregister geladen
 - ⇒ Endlosschleife

```
01 static uint8_t event = 0;
02 ISR(INT0_vect) { event = 1; }
03
04 void main(void) {
05     while(1) {
06         while(event == 0) { /* warte auf Event */ }
07         /* bearbeite Event */
```

8



- Bei einem Interrupt wird `event = 1` gesetzt
- Aktive Warteschleife wartet, bis `event != 0`
- Der Compiler erkennt, dass `event` innerhalb der Warteschleife nicht verändert wird
 - ⇒ der Wert von `event` wird nur einmal vor der Warteschleife aus dem Speicher in ein Prozessorregister geladen
 - ⇒ Endlosschleife
- `volatile` erzwingt das Laden bei jedem Lesezugriff

```
01 static volatile uint8_t event = 0;
02 ISR(INT0_vect) { event = 1; }
03
04 void main(void) {
05     while(1) {
06         while(event == 0) { /* warte auf Event */ }
07         /* bearbeite Event */
```

8

- Fehlendes `volatile` kann zu unerwartetem Programmablauf führen
- Unnötige Verwendung von `volatile` unterbindet Optimierungen des Compilers
- Korrekte Verwendung von `volatile` ist Aufgabe des Programmierers!
 - ↪ Verwendung von `volatile` so selten wie möglich, aber so oft wie nötig

9

Lost Update



- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrücke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```
01 volatile uint8_t zaehler;  
02  
03 ; C-Anweisung: zaehler--;  
04 lds r24, zaehler  
05 dec r24  
06 sts zaehler, r24
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++  
08 lds r25, zaehler  
09 inc r25  
10 sts zaehler, r25
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		

10



- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrücke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```

01 volatile uint8_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: zaehler--;
04 lds r24, zaehler
05 dec r24
06 sts zaehler, r24
    
```

Interruptbehandlung

```

07 ; C-Anweisung: zaehler++
08 lds r25, zaehler
09 inc r25
10 sts zaehler, r25
    
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		
4	5	5	-

10



- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrücke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```

01 volatile uint8_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: zaehler--;
04 lds r24, zaehler
05 dec r24
06 sts zaehler, r24
    
```

Interruptbehandlung

```

07 ; C-Anweisung: zaehler++
08 lds r25, zaehler
09 inc r25
10 sts zaehler, r25
    
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		
4	5	5	-
5	5	4	-

10

- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrucke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```

01 volatile uint8_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: zaehler--;
04 lds r24, zaehler
05 dec r24
06 sts zaehler, r24
    
```

Interruptbehandlung

```

07 ; C-Anweisung: zaehler++
08 lds r25, zaehler
09 inc r25
10 sts zaehler, r25
    
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5

10

- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrucke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```

01 volatile uint8_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: zaehler--;
04 lds r24, zaehler
05 dec r24
06 sts zaehler, r24
    
```

Interruptbehandlung

```

07 ; C-Anweisung: zaehler++
08 lds r25, zaehler
09 inc r25
10 sts zaehler, r25
    
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5
9	5	4	6

10

- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrücke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```
01 volatile uint8_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: zaehler--;
04 lds r24, zaehler
05 dec r24
06 sts zaehler, r24
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++
08 lds r25, zaehler
09 inc r25
10 sts zaehler, r25
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5
9	5	4	6
10	6	4	6

10

- Tastendruckzähler: Zählt noch zu bearbeitende Tastendrücke
 - Inkrementierung in der Unterbrechungsbehandlung
 - Dekrementierung im Hauptprogramm zum Start der Verarbeitung

Hauptprogramm

```
01 volatile uint8_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: zaehler--;
04 lds r24, zaehler
05 dec r24
06 sts zaehler, r24
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++
08 lds r25, zaehler
09 inc r25
10 sts zaehler, r25
```

Zeile	zaehler	r24	r25
-	5		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5
9	5	4	6
10	6	4	6
6	4	4	-

10

■ Nebenläufige Nutzung von 16-Bit-Werten (Read-Write)

Hauptprogramm

```
01 volatile uint16_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: z=zaehler;
04 lds r22, zaehler
05 lds r23, zaehler+1
06 ; Verwendung von z
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++;
08 lds r24, zaehler
09 lds r25, zaehler+1
10 adiw r24,1
11 sts zaehler+1, r25
12 sts zaehler, r24
```

Zeile	zaehler	zaehler (in r22 & r23)
-	0x00ff	

11

■ Nebenläufige Nutzung von 16-Bit-Werten (Read-Write)

Hauptprogramm

```
01 volatile uint16_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: z=zaehler;
04 lds r22, zaehler
05 lds r23, zaehler+1
06 ; Verwendung von z
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++;
08 lds r24, zaehler
09 lds r25, zaehler+1
10 adiw r24,1
11 sts zaehler+1, r25
12 sts zaehler, r24
```

Zeile	zaehler	zaehler (in r22 & r23)
-	0x00ff	
4	0x00ff	0x??ff

11

■ Nebenläufige Nutzung von 16-Bit-Werten (Read-Write)

Hauptprogramm

```
01 volatile uint16_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: z=zaehler;
04 lds r22, zaehler
05 lds r23, zaehler+1
06 ; Verwendung von z
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++;
08 lds r24, zaehler
09 lds r25, zaehler+1
10 adiw r24,1
11 sts zaehler+1, r25
12 sts zaehler, r24
```

Zeile	zaehler	zaehler (in r22 & r23)
-	0x00ff	
4	0x00ff	0x??ff
8 - 12	0x0100	0x??ff

11

16-Bit-Zugriffe (Read-Write)

■ Nebenläufige Nutzung von 16-Bit-Werten (Read-Write)

Hauptprogramm

```
01 volatile uint16_t zaehler;
02
03 ; C-Anweisung: z=zaehler;
04 lds r22, zaehler
05 lds r23, zaehler+1
06 ; Verwendung von z
```

Interruptbehandlung

```
07 ; C-Anweisung: zaehler++;
08 lds r24, zaehler
09 lds r25, zaehler+1
10 adiw r24,1
11 sts zaehler+1, r25
12 sts zaehler, r24
```

Zeile	zaehler	zaehler (in r22 & r23)
-	0x00ff	
4	0x00ff	0x??ff
8 - 12	0x0100	0x??ff
5 - 6	0x0100	0x01ff

⇒ Abweichung um 255 !

11

- Viele weitere Nebenläufigkeitsprobleme möglich
 - Nicht-atomare Modifikation von gemeinsamen Daten kann zu Inkonsistenzen führen
 - Problemanalyse durch den Anwendungsprogrammierer
 - Auswahl geeigneter Synchronisationsprimitive
- Lösung hier: Einseitiger Ausschluss durch Sperren der Interrupts
 - Sperrung aller Interrupts (`cli()`, `sei()`)
 - Maskieren einzelner Interrupts (EIMSK-Register)
- Problem: Interrupts während der Sperrung gehen evtl. verloren
 - Kritische Abschnitte sollten so kurz wie möglich gehalten werden

Stromsparmodi



- AVR-basierte Geräte oft batteriebetrieben (z.B. Fernbedienung)
- Energiesparen kann die Lebensdauer drastisch erhöhen
- AVR-Prozessoren unterstützen unterschiedliche Powersave-Modi
 - Deaktivierung funktionaler Einheiten
 - Unterschiede in der "Tiefe" des Schlafes
 - Nur aktive funktionale Einheiten können die CPU aufwecken
- Standard-Modus: Idle
 - CPU-Takt wird angehalten
 - Keine Zugriffe auf den Speicher
 - Hardware (Timer, externe Interrupts, ADC, etc.) sind weiter aktiv
- Dokumentation im ATmega328PB-Datenblatt, S. 58-66

13

Nutzung der Sleep-Modi



- Unterstützung aus der avr-libc: (`#include <avr/sleep.h>`)
 - `sleep_enable()` - aktiviert den Sleep-Modus
 - `sleep_cpu()` - setzt das Gerät in den Sleep-Modus
 - `sleep_disable()` - deaktiviert den Sleep-Modus
 - `set_sleep_mode(uint8_t mode)` - stellt den zu verwendenden Modus ein
- Dokumentation von `avr/sleep.h` in avr-libc-Dokumentation
 - verlinkt im Doku-Bereich auf der SPiC-Webseite
- Beispiel

```
01 #include <avr/sleep.h>
02 set_sleep_mode(SLEEP_MODE_IDLE); /* Idle-Modus verwenden */
03 sleep_enable(); /* Sleep-Modus aktivieren */
04 sleep_cpu(); /* Sleep-Modus betreten */
05 sleep_disable(); /* Empfohlen: Sleep-Modus danach deaktivieren
    ↪ */
```

14

■ Dornröschenschlaf

⇒ **Problem:** Es kommt genau ein Interrupt

Hauptprogramm

```
01 sleep_enable();
02 event = 0;
03
04 while( !event ) {
05     sleep_cpu();
06 }
07
08
09
10 sleep_disable();
```

Interruptbehandlung

```
01 ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
02     event = 1;
03 }
```

15

■ Dornröschenschlaf

⇒ **Problem:** Es kommt genau ein Interrupt

Hauptprogramm

```
01 sleep_enable();
02 event = 0;
03
04 while( !event ) {
05     ⚡ Interrupt ⚡
06     sleep_cpu();
07 }
08
09
10 sleep_disable();
```

Interruptbehandlung

```
01 ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
02     event = 1;
03 }
```

15

■ Dornröschenschlaf

- ⇒ **Problem:** Es kommt genau ein Interrupt
- ⇒ **Lösung:** Interrupts während des kritischen Abschnitts sperren

Hauptprogramm

```
01 sleep_enable();
02 event = 0;
03 cli();
04 while( !event ) {
05     sei();
06     sleep_cpu();
07     cli();
08 }
09 sei();
10 sleep_disable();
```

Interruptbehandlung

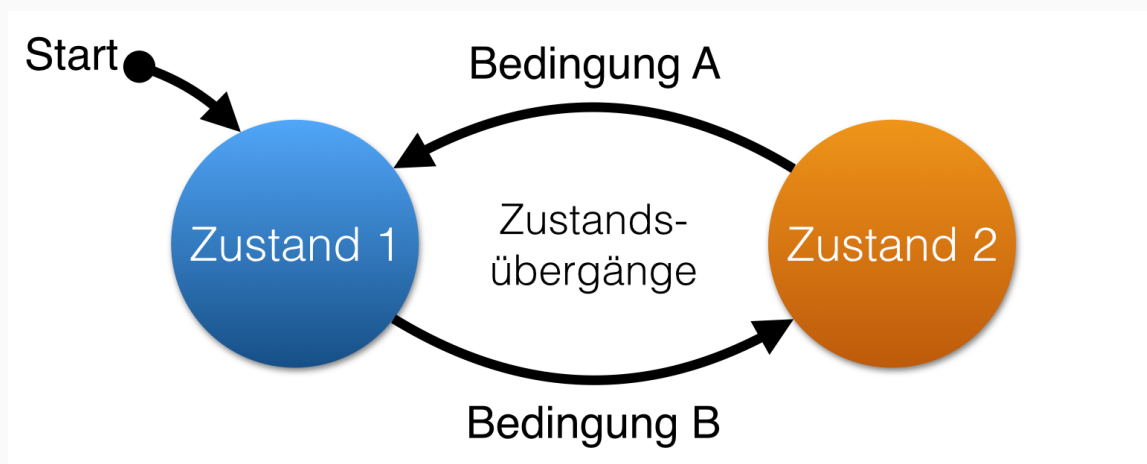
```
01 ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
02     event = 1;
03 }
```

Aufgabe: Ampel

- Implementierung einer (Fußgänger-)Ampel mit Wartezeitanzeige
- Ablauf (exakt) nach Aufgabenbeschreibung (Referenzimplementierung verfügbar)
- Hinweise
 - Tastendrucke und Alarmer als Events (kein aktives Warten)
 - In Sleep-Modus wechseln, wenn keine Events zu bearbeiten sind
 - nur eine Stelle zum Warten auf Events (sleep-Loop)
 - Deaktivieren des Tasters durch Ignorieren des Events (Änderung der Interrupt-Konfiguration ist nicht notwendig)
 - Abbildung auf Zustandsmaschine sinnvoll
 - Verwendung von `volatile` begründen

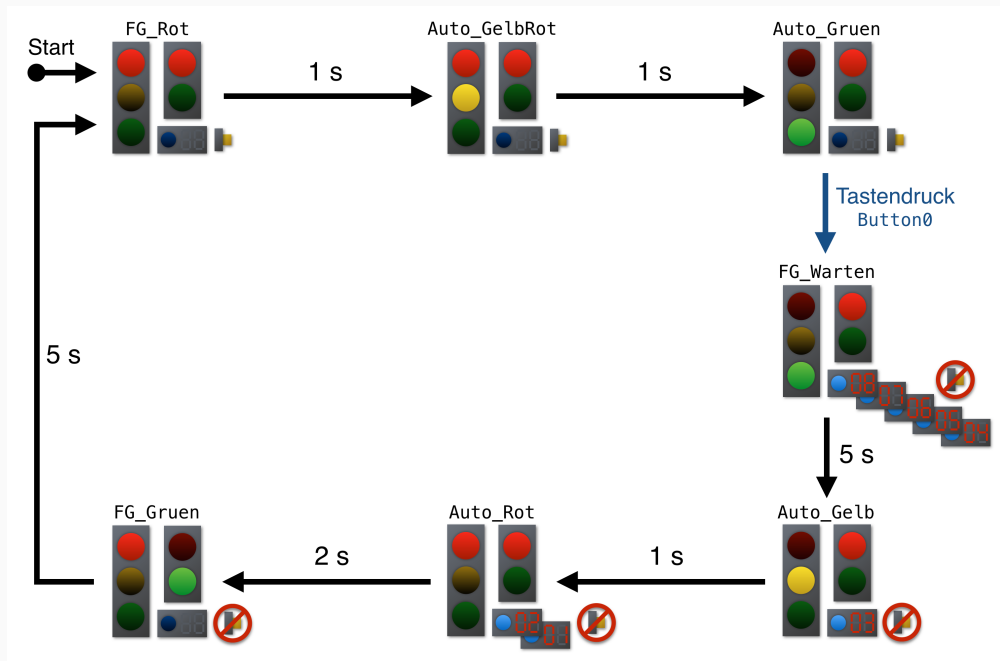
16

Zustandsmaschinen

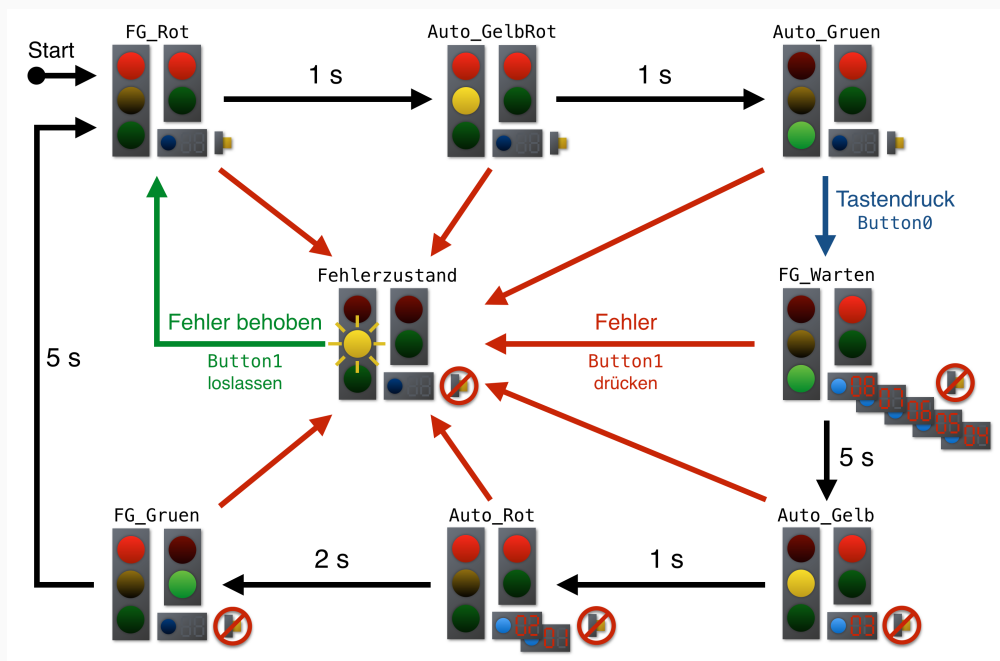


- **Zustände** mit bestimmten Eigenschaften; definierter Initialzustand
- **Zustandswechsel** in Abhängigkeit von definierten Bedingungen

17



18



19



- Festlegung durch Zahlen ist fehleranfällig
 - Schwer zu merken
 - Wertebereich nur bedingt einschränkbar
- Besser enum:

```
01 enum state { STATE_RED, STATE_YELLOW, STATE_GREEN };
02
03 enum state my_state = STATE_RED;
```

- Mit typedef noch lesbarer:

```
01 typedef enum { STATE_RED, STATE_YELLOW, STATE_GREEN } state;
02
03 state my_state = STATE_RED;
```

20

Zustandsabfragen: switch-case-Anweisung



```
01 switch ( my_state ) {
02 case STATE_RED:
03     ...
04     break;
05 case STATE_YELLOW:
06     ...
07     break;
08 case STATE_GREEN:
09     ...
10     break;
11 default:
12     // maybe invalid state
13     ...
14 }
```

- Vermeidung von if-else-Kaskaden
- switch-Ausdruck muss eine Zahl sein (besser ein enum-Typ)
- break-Anweisung nicht vergessen!
- Ideal für die Abarbeitung von Systemen mit verschiedenen Zuständen
 - ⇒ Implementierung von Zustandsmaschinen

21

- Nachbilden der Funktionalität aus dem `timer` Modul der `libspicboard`
- Regelmäßiger Alarm, um Zustandsübergänge zu realisieren
- Der ATmega328PB bietet 5 verschiedene Timer
- Für diese Aufgabe: Verwendung von `TIMER0` (8-bit Timer)
 - `TIMER0` kann Werte zwischen 0 und 255 annehmen
 - Wird automatisch, abhängig von der CPU Geschwindigkeit, erhöht
 - Kann benutzt werden, um Interrupts beim Erreichen bestimmter Werte oder bei Überläufen auszulösen
 - Für diese Aufgabe: Verwendung des Überlaufinterrupt (`OVF`)

22

- Geschwindigkeit durch `prescaler` einstellbar (Anzahl der CPU-Takte, bis der Zähler inkrementiert wird)
 - `prescaler` $\in \{1, 8, 64, 256, 1024\}$
 - Zum Beispiel:
 - 8-bit Timer mit Überlaufinterrupt
 - CPU Frequenz: 1 MHz
 - `prescaler`: 64
- alle $\frac{64}{1 \text{ MHz}} = 64 \mu\text{s}$ wird der Zähler erhöht
- alle $\frac{64 \cdot 256}{1 \text{ MHz}} = 16.4 \text{ ms}$ wird der Überlaufinterrupt ausgelöst
- CPU Geschwindigkeit des ATmega328PB: 16 MHz
 - Wie viele Interrupts müssen auftreten, bis 1 s vergangen ist?
 - Welcher `prescaler` ist am ressourcenschonendsten?

23

- Clock Select (CS) Bits befinden sich beim ATmega328PB im TC0 Control Register B (TCCR0B)
- (De-)aktivieren den TIMER0 und stellen die Geschwindigkeit ein

CS02	CS01	CS00	Beschreibung
0	0	0	Timer aus
0	0	1	prescaler 1
0	1	0	prescaler 8
0	1	1	prescaler 64
1	0	0	prescaler 256
1	0	1	prescaler 1024
1	1	0	Ext. Takt (fallende Flanke)
1	1	1	Ext. Takt (steigende Flanke)

24

Konfiguration der Timer



- TIMER0 Overflow Interrupt Enable (TOIE0) Bit befindet sich beim ATmega328PB im TC0 Interrupt Mask Register (TIMSK0)
- (De-)aktivieren des Überlaufinterrupts

```
01 ISR(TIMER0_OVF_vect) {  
02     // [...]  
03 }  
04  
05 void init(void) {  
06     // Timer mit prescaler 64 aktivieren  
07     TCCR0B |= (1 << CS01) | (1 << CS00);  
08     TCCR0B &= ~(1 << CS02);  
09  
10     // Überlaufunterbrechung aktivieren  
11     TIMSK0 |= (1 << TOIE0);  
12  
13     // [...]  
14 }
```

25

Hands-on: Interrupts & Sleep

Hands-on A: Einfacher Interrupt-Zähler



- Zählen der Tastendrücke an Taster0 (PD2)
- Erkennung der Tastendrücke mit Hilfe von Interrupts
- Ausgabe der Anzahl über 7-Segment Anzeige
- CPU in den Schlafmodus versetzen, solange **Anzahl gerade**
- “Standby”-LED leuchtet während dem Schlafen
- Hinweise:
 - Erkennung der Tastendrücke **ohne** Verwendung der `libspicboard`
 - PD2 ist der Eingang von INT0
 - PD6 ist der Ausgang für die “Standby”-LED
 - Interrupt bei fallender Flanke:
 - `EICRA(ISC00) = 0`
 - `EICRA(ISC01) = 1`