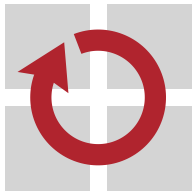
Übungen zu Grundlagen der systemnahen Programmierung in C (GSPiC) im Sommersemester 2018

2018-05-29

Bernhard Heinloth

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



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme

FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

Interrupts

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

Implementierung von Interruptbehandlungen

- Je Interrupt steht ein Bit zum Zwischenspeichern zur Verfügung
- Ursachen für den Verlust von weiteren Interrupts
  - Während einer Interruptbehandlung
  - Interruptsperren (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!)

Interrupts beim AVR

- 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

(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

Konfigurieren von Interrupts

- 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  */
```

(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 */
```

Interrupt-Handler

- 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

Schlüsselwort volatile

- 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 */
```

Schlüsselwort volatile

- 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 */
```

Verwendung von volatile

- 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

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		

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		
4	5	5	-

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		
4	5	5	-
5	5	4	-

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		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5

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		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5
9	5	4	6

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		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5
9	5	4	6
10	6	4	6

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		
4	5	5	-
5	5	4	-
8	5	4	5
9	5	4	6
10	6	4	6
6	4	4	-

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	

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

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

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 !

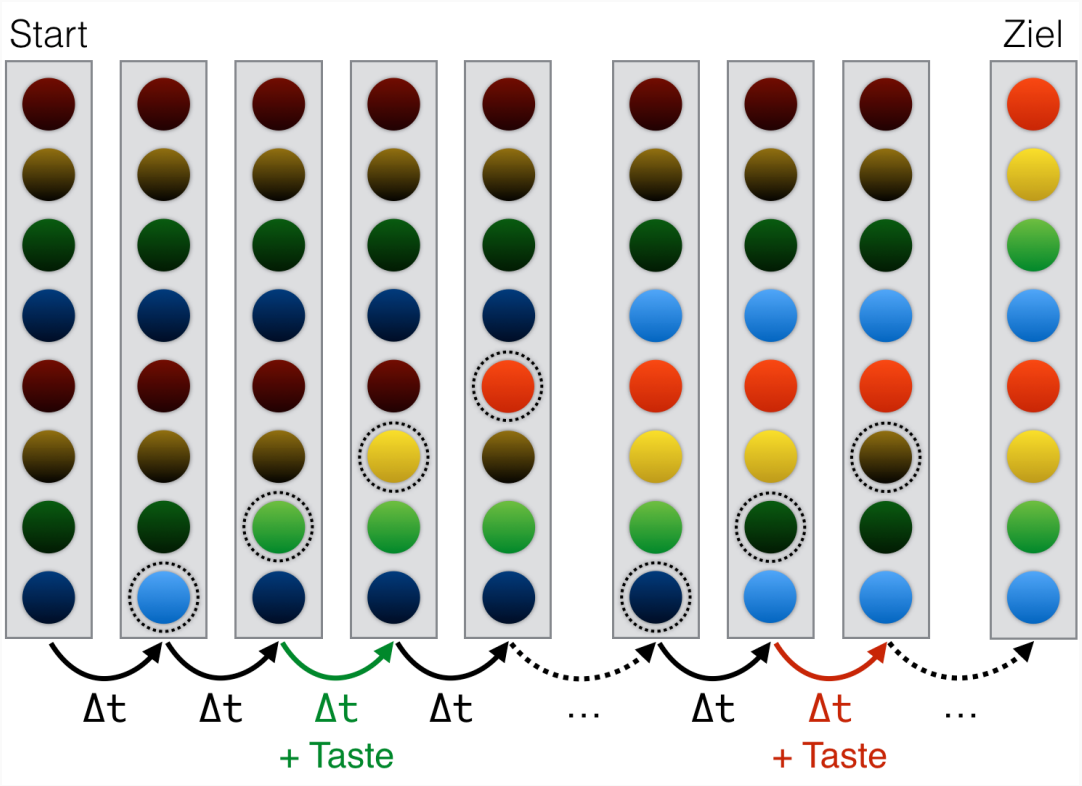
Sperren der Unterbrechungsbehandlung beim AVR

- 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

Aufgabe: Geschicklichkeitsspiel

Aufgabe: Geschicklichkeitsspiel (1)

- Spielcursor wandert dabei über LED-Reihe hin und her und invertiert (engl. toggle) den LED-Zustand
- LED-Zustand bleibt durch Drücken des Tasters erhalten
- Ziel: alle LEDs zum Leuchten bringen



Aufgabe: Geschicklichkeitsspiel (2)

- Nach einem Level wird eine Siegessequenz auf den LEDs dargestellt

```
01 static void play(uint8_t level)
02 static void show_win(void);
03
04 void main(void) {
05   // Initialisierung
06   sei();
07   uint8_t level = 1;
08   while(1){
09     play(level);
10     show_win();
11     // Level aktualisieren
12   }
13 }
```

Schwierigkeitsgrad

- Schwierigkeit (Geschwindigkeit) steigt mit jedem Level
- Schwierigkeit nähert sich einer maximalen Geschwindigkeit
- Asymptotische Annäherung: $f(x) = \frac{c}{x}$ (c ist eine Konstante)