U2 Fortgeschrittene AVR-Programmierung

- Aufgabe 2
- Interrupts
- `volatile`-Variablen
- Synchronisation mit Unterbrechungsbehandlungen
- Stromsparmodi des AVR

U2-1 Externe Interrupts des AVR-µC

1 Flanken-/Pegel-Steuerung

- Externe Interrupts durch Pegel(änderung) an bestimmten I/O-Pins
  - ATmega32: 3 Quellen an den Pins PD2, PD3 und PB2
- Pegel- oder flanken-gesteuert
  - ➤ Abhängig von der jeweiligen Interruptquelle
- Beispiel: Externer Interrupt 2 (INT2)

ISC2	IRQ bei:
0	Fallender Flanke
1	Steigender Flanke

- Dokumentation im ATmega32-Datenblatt
  - Interruptbehandlung allgemein: S. 44-48
  - Externe Interrupts: S. 66-68

1 Flanken-/Pegel-Steuerung (2)

- Beim ATmega32 befinden sich die ISC-Bits im MCU Control Register (`MCUCR`) und MCU Control and Status Register (`MCUCSR`)
- Position der ISC-Bits in den Registern durch Makros definiert `ISCn0` und `ISCn1 (INT0 und INT1) oder ISCn (INT2)`
- Beispiel: `INT2` bei ATmega32 für fallende Flanke konfigurieren

```
/* die ISCs für INT2 befinden sich im MCUCSR */
MCUCSR &= ~(1<<ISC2);     /* ISC2 löschen */
```


2 Maskieren

- Alle Interruptquellen können separat ausgeschaltet (=maskiert) werden
- Für externe Interrupts ist folgendes Register zuständig:
  - ATmega32: General Interrupt Control Register (`GICR`)
- Die Bitpositionen in diesem Register sind durch Makros `INTn` definiert
- Ein gesetztes Bit aktiviert den jeweiligen Interrupt
- Beispiel: Interrupt 2 aktivieren

```
GICR |= (1<<INT2);      /* demaskiere Interrupt 2 */
```

2 Maskieren (2)

- *Alle* Interrupts können nochmals bei der CPU direkt abgeschaltet werden
  - ➤ durch speziellen Maschinenbefehl `cli`
- Die Bibliothek avr-libc bietet hierfür Makros an:
  (`#include <avr/interrupt.h>`)
  - ◆ `sei()` - lässt Interrupts (im nächsten Takt) zu
  - ◆ `cli()` - blockiert alle Interrupts (sofort)
- Beispiel

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

sei();                    /* IRQs zulassen */
```

- Innerhalb eines Interrupt-Handlers sind automatisch alle Interrupts blockiert, beim Verlassen werden sie wieder deblockiert
- Beim Start des µC sind die Interrupts bei der CPU abgeschaltet

3 Interrupt-Handler

- Installieren eines Interrupt-Handlers wird durch C-Bibliothek unterstützt
- Makro `ISR` (Interruptvektor) zur Definition einer Handler-Funktion (`#include <avr/interrupt.h>`)
- Als Parameter gibt man dem Makro den gewünschten Vektor an, z. B. `INT2_vect` für den externen Interrupt 2
  - ◆ verfügbare Vektoren: siehe avr-libc-Doku zu `avr/interrupt.h`
  - ◆ verlinkt im Doku-Bereich auf der SPiC-Webseite
- Beispiel: Handler für Interrupt 2 implementieren

```
#include <avr/interrupt.h>
static int zaehler;

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


4 Implementierung von Interruptbehandlungen

- Während einer Interruptbehandlung sind andere Interrupts gesperrt
- Auftreten eines Interrupts wird durch Flag in Statusregister vermerkt
  - ◆ Dieses Flag (Bit) ist entweder 0 oder 1 (`GIFR`)
  - ◆ es kann also maximal ein Interrupt zwischengespeichert werden
  - ◆ weitere Interrupts während einer Interruptsperre gehen verloren
- Gleiches gilt für mit Interruptsperren synchronisierte kritische Abschnitte
- Das Problem ist generell nicht zu verhindern
  ☞ Risikominimierung: Interruptbehandlungen sollten möglichst kurz sein
- `sei()` sollte niemals in einer Interruptbehandlung ausgeführt werden
  - ◆ potentiell endlos geschachtelte Interruptbehandlung
  - ◆ Stackoverflow möglich

U2-2 Das `volatile`-Schlüsselwort

- Manche Variablen werden "von außen" verändert
  - ◆ Hardware-Register
  - ◆ Variablen, auf die mehrere Programmabläufe nebenläufig zugreifen
    - ➤ Threads
    - ➤ Unterbrechungsbehandlungen
- Kann Probleme bei Compileroptimierungen verursachen

1 Beispiel

- Hauptprogramm wartet auf ein Ereignis, das durch einen Interrupt gemeldet wird (dieser setzt **event** auf **1**)
- 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
  - ➤ dann wird nur noch der Wert im Register betrachtet
  - ➤ Endlosschleife

```
static char event=0;
ISR (INT0_vect) { event=1; }

void main(void) {
    while(1) {
        while(event == 0) { /* warte auf Event */ }
        /* bearbeite Event */
```


2 Beispiel (2)

- Lösung: Unterdrücken der Optimierung mit dem `volatile`-Schlüsselwort

```
static volatile uint8_t event=0;
ISR (INT0_vect) { event=1; }

void main(void) {
    while(1) {
        while(event == 0) { /* warte auf Event */ }
        /* bearbeite Event */
    }
}
```

- Teilt dem Compiler mit, dass der Wert extern verändert wird
- Wert wird bei jedem Lesezugriff erneut aus dem Speicher geladen

3 volatile in einem anderen Zusammenhang...

- Beispiel: Funktion zum aktiven Warten

```
void wait(unsigned int len) {
    while(len > 0) { len--; }
}
```

- Die Schleife wird terminieren
- Der Wert von `len` wird bei Verlassen der Funktion verworfen
  - ➤ Optimierender Compiler entfernt die komplette Schleife
  - ➤ Wartezeit wird stark verkürzt
- Mit `volatile` kann diese Optimierung verhindert werden
  - ➤ Sonderfall: `len` wird nicht extern modifiziert

4 Verwendung von volatile

- Fehlendes `volatile` kann zu unerwartetem Programmablauf führen
- Unnötige Verwendung von `volatile` unterbindet Optimierungen des Compilers und führt zu schlechterem Maschinencode
- Korrekte Verwendung von `volatile` ist Aufgabe des Programmierers!

Verwendung von `volatile` so selten wie möglich, aber so oft wie nötig.

Ab sofort: Alle Programme müssen auch mit -O3 funktionieren

U2-3 Synchronisation mit Interrupt-Handlern

- Unterbrechungsbehandlungen führen zu **Nebenläufigkeit**
- Nicht-atomare Modifikation von gemeinsamen Daten
- Kann zu Inkonsistenzen führen
- Einseitige Unterbrechung: Interrupt-Handler überlappt Hauptprogramm
- Lösung: Synchronisationsprimitiven
  - ➤ hier: zeitweilige Deaktivierung der Interruptbehandlung

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5		
2			
4			
5			
6			
3			

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5	5	-
2			
4			
5			
6			
3			

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5	5	-
2	5	4	-
4			
5			
6			
3			

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5	5	-
2	5	4	-
4	5	4	5
5			
6			
3			

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5	5	-
2	5	4	-
4	5	4	5
5	5	4	6
6			
3			

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5	5	-
2	5	4	-
4	5	4	5
5	5	4	6
6	6	4	6
3			

1 Beispiel 1: Lost Update

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

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned char zaehler;

/* C-Anweisung: zaehler--; */
1 lds r24, zaehler
2 dec r24
3 sts zaehler, r24
```

```
/* Interrupt-Behandlung */


/* C-Anweisung: zaehler++ */
4 lds r25, zaehler
5 inc r25
6 sts zaehler, r25
```

Instruktion	zaehler	zaehler HP	zaehler INT
1	5	5	-
2	5	4	-
4	5	4	5
5	5	4	6
6	6	4	6
3	4	4	-

2 Beispiel 2: 16-bit-Zugriffe

- Nebenläufige Nutzung von 16-bit-Werten

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned int zaehler;

/* C-Anweisung: z=zaehler; */
1 lds r22, zaehler
2 lds r23, zaehler+1
/* z verwenden... */
```

```
/* Interrupt-Behandlung */
/* C-Anweisung: zaehler++ */
3 lds r24, zaehler
4 lds r25, zaehler+1
5 adiw r24,1
6 sts zaehler+1, r25
7 sts zaehler, r24
```

Instruktion	zaehler	z HP
1	0x00ff	
3-7		
2		

2 Beispiel 2: 16-bit-Zugriffe

- Nebenläufige Nutzung von 16-bit-Werten

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned int zaehler;

/* C-Anweisung: z=zaehler; */
1 lds r22, zaehler
2 lds r23, zaehler+1
/* z verwenden... */
```

```
/* Interrupt-Behandlung */
/* C-Anweisung: zaehler++ */
3 lds r24, zaehler
4 lds r25, zaehler+1
5 adiw r24,1
6 sts zaehler+1, r25
7 sts zaehler, r24
```

Instruktion	zaehler	z HP
1	0x00ff	0x??ff
3-7		
2		

2 Beispiel 2: 16-bit-Zugriffe

- Nebenläufige Nutzung von 16-bit-Werten

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned int zaehler;

/* C-Anweisung: z=zaehler; */
1 lds r22, zaehler
2 lds r23, zaehler+1
/* z verwenden... */
```

```
/* Interrupt-Behandlung */
/* C-Anweisung: zaehler++ */
3 lds r24, zaehler
4 lds r25, zaehler+1
5 adiw r24,1
6 sts zaehler+1, r25
7 sts zaehler, r24
```

Instruktion	zaehler	z HP
1	0x00ff	0x??ff
3-7	0x0100	0x??ff
2		

2 Beispiel 2: 16-bit-Zugriffe

- Nebenläufige Nutzung von 16-bit-Werten

```
/* Hauptprogramm */
volatile unsigned int zaehler;

/* C-Anweisung: z=zaehler; */
1 lds r22, zaehler
2 lds r23, zaehler+1
/* z verwenden... */
```

```
/* Interrupt-Behandlung */
/* C-Anweisung: zaehler++ */
3 lds r24, zaehler
4 lds r25, zaehler+1
5 adiw r24,1
6 sts zaehler+1, r25
7 sts zaehler, r24
```

Instruktion	zaehler	z HP
1	0x00ff	0x??ff
3-7	0x0100	0x??ff
2	0x0100	0x01ff

- Weitere Problemszenarien?
- Nebenläufige Zugriffe auf Werte >8-bit müssen i.d.R. geschützt werden!

3 Sperren der Unterbrechungsbehandlung beim AVR

- Viele weitere Nebenläufigkeitsprobleme möglich
  - Problemanalyse durch den Anwendungsprogrammierer
  - Vorsicht bei gemeinsamen Daten nebenläufiger Kontrollflüsse
  - Auswahl geeigneter Synchronisationsprimitive
- Lösung hier: Einseitiger Ausschluss durch Sperren der Interrupts
  - Sperrung aller Interrupts (`sei()`, `cli()`)
  - Maskieren einzelner Interrupts (`GICR`-Register)
- Problem: Interrupts während der Sperrung gehen evtl. verloren
  - Interrupts sollten so kurz wie möglich gesperrt werden

U2-4 Stromsparmodi von AVR-Prozessoren

- AVR-basierte Geräte oft batteriebetrieben (z.B. Sensorknoten)
- 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
- In tieferen Sleep-Modi wird der I/O-Takt deaktiviert
  - ➤ nur asynchron arbeitende Einheiten können die CPU aufwecken
  - ➤ low-level-gesteuerte externe Interrupts werden asynchron ermittelt
  - ➤ flankengesteuerte Interrupts benötigen evtl. den Taktgeber
- Dokumentation im ATmega32-Datenblatt, S. 32-35

1 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

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


2 Passives Warten auf Unterbrechungen

- Polling bei passivem Warten nicht möglich (warum?)
- Beispiel:

```
volatile static char event=0;
ISR (INT2_vect) { event=1; }

void main(void) {
   while(1) {

      while(event==0) { /* Warte auf Event */
         sleep_enable();

         sleep_cpu();
         sleep_disable();

      }

      /* bearbeite Event */
```

- Synchronisation erforderlich?

2 Passives Warten auf Unterbrechungen

- Was passiert, wenn der Interrupt wie unten gezeigt eintrifft?
- Beispiel:

```
volatile static char event=0;
ISR (INT2_vect) { event=1; }

void main(void) {
    while(1) {

        while(event==0) { /* Warte auf Event */
            sleep_enable();
                                Interrupt!
            sleep_cpu();
            sleep_disable();

        }

        /* bearbeite Event */
```


2 Dornröschenschlaf vermeiden

- Atomarität von Wartebedingungsprüfung und Sleep-Modus-Aktivierung
- Beispiel:

```
volatile static char event=0;
ISR (INT2_vect) { event=1; }

void main(void) {
    while(1) {
        cli();
        while(event==0) { /* Warte auf Event */
            sleep_enable();
            sei();
            sleep_cpu();            kritischer Abschnitt
            sleep_disable();
            cli();
        }
        sei();
        /* bearbeite Event */
```

- `sei` und die Folgeanweisung werden atomar ausgeführt (notwendig?)