

U5 Fortgeschrittene AVR-Programmierung

- Interrupts
- Synchronisation mit Unterbrechungsbehandlungen
- Stromsparmodi des AVR

U5-1 Externe Interrupts des AVR-μC

1 Funktionsweise (vgl. VL 15-7)

- (1) Gerät löst Interrupt aus und setzt entsprechendes Flag
- (2) Sind die Interrupts aktiviert und der Interrupt nicht maskiert unterbricht der Interruptcontroller die aktuelle Ausführung
- (3) weitere Interrupts werden deaktiviert
- (4) aktuelle Position im Programm wird gesichert
- (5) Eintrag im Interrupt-Vektor ermitteln
- (6) Die Adresse im Interrupt-Vektor wird angesprungen
(= Sprung in den Interrupt-Handler)
- (7) am Ende der Bearbeitungsfunktion bewirkt ein Befehl
"Return from Interrupt" die Fortsetzung des Anwendungsprogramms und die Reaktivierung der Interrupts

2 Konfiguration des externen Interrupts

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

ISC2	IRQ bei:
0	Fallender Flanke
1	Steigender Flanke

- Dokumentation im ATmega32-Datenblatt
 - ◆ Interruptbehandlung allgemein: S. 45-49
 - ◆ Externe Interrupts: S. 69-72

2 Konfiguration des externen Interrupts (2)

- Beim ATmega32 verteilen sich die Interrupt Sense Control (ISC)-Bits zur Konfiguration der externen Interrupts auf zwei Register:
 - ◆ MCU Control Register (MCUCR)
 - ◆ MCU Control and Status Register (MCUCSR)
- Position der ISC-Bits in den Registern durch Makros definiert `ISCn0` und `ISCn1` (`INT0` und `INT1`) oder `ISC2` (`INT2`)
- Beispiel: `INT2` bei ATmega32 für fallende Flanke konfigurieren

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

2 (De-) Aktivieren von Interrupts

- Interrupts können durch die speziellen Maschinenbefehle `sei` und `cli` aktiviert bzw. deaktiviert werden. Die Bibliothek `avr-libc` bietet hierfür Makros an:
 - (`#include <avr/interrupt.h>`)
 - ◆ `sei()` (Set Interrupt Flag) - lässt Interrupts zu
 - ◆ `cli()` (Clear Interrupt Flag) - blockiert alle Interrupts
- Innerhalb eines Interrupt-Handlers sind automatisch alle Interrupts blockiert, beim Verlassen werden sie wieder deblockiert
- Beim Start des µC sind die Interrupts abgeschaltet

3 (De-) Maskieren von Interrupts

- Das Auslösen einzelner Interrupts kann separat aktiviert (=demaskiert) 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 */
```

4 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>`)
- 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 uint16_t zaehler = 0;

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

5 Implementierung von Interruptbehandlungen

- ◆ Interrupts werden durch ein Flag in einem Statusregister vermerkt
- ◆ Beim Betreten der Interruptbehandlung wird das Flag zurückgesetzt
- Verlust von Interrupts
 - ◆ Wird das Flag vor der Behandlung mehrfach gesetzt, wird der Interrupt dennoch nur einmal behandelt
- Ursachen für den Verlust von Interrupts
 - ◆ Während einer Interruptbehandlung sind andere Interrupts gesperrt
 - ◆ Interruptsperren zur Synchronisation von kritischem Abschnitten
- 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 (Vorlesung, vorraussichtlich Kapitel 17)

U5-2 Das volatile-Schlüsselwort

- 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 uint8_t event = 0;
ISR (INT0_vect) { event = 1; }

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

U5-2 Das volatile-Schlüsselwort (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 */
    }
}
```

- Wert wird bei jedem Lesezugriff erneut aus dem Speicher geladen

1 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

U5-3 Synchronisation mit Interrupt-Handlern

- Unterbrechungsbehandlungen führen zu **Nebenläufigkeit**
- Nicht-atomare Modifikation von gemeinsamen Daten kann zu Inkonsistenzen führen
- Einseitige Unterbrechung: Interrupt-Handler unterbricht 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

<pre>/* Hauptprogramm */ volatile uint8_t zaehler;</pre> <pre>/* C-Anweisung: zaehler--; */ 1 lds r24, zaehler 2 dec r24 3 sts zaehler, r24</pre>	<pre>/* Interrupt-Behandlung */ /* C-Anweisung: zaehler++ */ 4 lds r25, zaehler 5 inc r25 6 sts zaehler, r25</pre>
--	--

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

<pre>/* Hauptprogramm */ volatile uint8_t zaehler;</pre> <pre>/* C-Anweisung: zaehler--; */ 1 lds r24, zaehler 2 dec r24 3 sts zaehler, r24</pre>	<pre>/* Interrupt-Behandlung */ /* C-Anweisung: zaehler++ */ 4 lds r25, zaehler 5 inc r25 6 sts zaehler, r25</pre>
--	--

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 uint8_t 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 uint8_t 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 uint8_t 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 uint8_t 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 uint8_t 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 uint16_t 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 uint16_t 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 uint16_t 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 uint16_t 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
 - ◆ Kritische Abschnitte sollten so kurz wie möglich gehalten werden.

U5-4 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
 - ◆ CPU-Takt wird angehalten
 - ◆ Keine Zugriffe auf den Speicher
 - ◆ Hardware (Timer, externe Interrupts, ADC, etc) sind weiter aktiv
- Dokumentation im ATmega32-Datenblatt, S. 33-37

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 uint8_t event = 0;
ISR(INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
    sleep_enable();
    while(1) {
        while(event == 0) { /* Warte auf Event */
            sleep_cpu();
        }

        /* bearbeite Event */
    }
}

```

- Synchronisation erforderlich?

2 Passives Warten auf Unterbrechungen

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

```

volatile static uint8_t event = 0;
ISR (INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
    sleep_enable();
    while(1) {
        while(event==0) { /* Warte auf Event */
            ↴Interrupt!
            sleep_cpu();
        }

        /* bearbeite Event */
    }
}

```

2 Dornrösenschenschlaf vermeiden

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

```

volatile static uint8_t event = 0;
ISR (INT2_vect) { event = 1; }

void main(void) {
    sleep_enable();
    while(1) {
        cli();
        while(event==0) { /* Warte auf Event */

            sei();                                kritischer Abschnitt
            sleep_cpu();
            cli();
        }
        sei();
        /* bearbeite Event */
    }
}

```

- **sei** und die Folgeanweisung werden atomanar ausgeführt (notwendig?)