

Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Entwicklungsumgebung (Teil 2)

Tobias Klaus, Florian Schmaus, Peter Wägemann

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)
Lehrstuhl für Informatik 4 (Verteilte Systeme und Betriebssysteme)
<https://www4.cs.fau.de>

24.10.2016



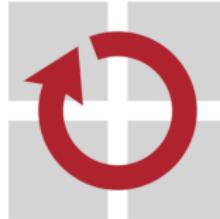
- 1 Weiterführende Informationen zum Übungsbetrieb
- 2 Wahl geeigneter Datentypen
- 3 Handwerkszeug
 - Oszilloskop-Cursor
 - Zeit in eCos
 - Tiefpassfilter
 - Pulsweitenmodulation
- 4 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 5 Zusammenfassung



Informationen zum Übungsbetrieb

- Accounts im CIP-Pool?
 - cipan
 - Sprechstunde der CIP-Admins
- Kenntnisse im Umgang mit Terminals hilfreich
 - UNIX Vorkurs der FSI
 - <https://fsi.cs.fau.de/dw/informationen/ese/2015ws/vorkurs>
- Arbeiten im CIP
 - make edit &
- Arbeiten zu Hause
 - /proj/i4ezs/stm32 kopieren
 - ecosenv.sh anpassen
 - make debug ~ arm-none-eabi-gdb mit Python-Bindings
 - Detaillierte Anleitung folgt ...





- Einführung in GDB
 - EZS-Dashboard
 - https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V_EZS/Uebung/Folien/00_GDB-Primer.pdf
- Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen
 - Stack-Tiefe
 - Backtrace
- Komponenten der Toolchain
 - Präprozessor
 - Compiler
 - Flasher
 - ...



```
1 ezs_printf("Hallo");
```

- Flush der Zeichen erst bei \n



- 1** Weiterführende Informationen zum Übungsbetrieb
- 2** Wahl geeigneter Datentypen
- 3** Handwerkszeug
 - Oszilloskop-Cursor
 - Zeit in eCos
 - Tiefpassfilter
 - Pulsweitenmodulation
- 4** Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 5** Zusammenfassung



Frage #1

Zu was wird $7/2$ ausgewertet?

1. 3.5
2. 3
3. nicht definiert in C



Frage #1

Zu was wird $7/2$ ausgewertet?

1. 3.5
2. 3
3. nicht definiert in C

Erklärung

- Standard-Typ für Ganzzahlen ist `int`
- Rest verschwindet bei Ganzzahl-Division



Frage #2

Zu was wird $2/7$ ausgewertet?

1. 1
2. 0
3. nicht definiert in C



Frage #2

Zu was wird $2/7$ ausgewertet?

1. 1
2. 0
3. nicht definiert in C

Erklärung

- Standard-Typ für Ganzzahlen ist `int`
- Rest verschwindet bei Ganzzahl-Division



Frage #3

Zu was wird $7/2.$ ausgewertet?

1. immer noch 3
2. 0
3. 3.5



Frage #3

Zu was wird $7/2.$ ausgewertet?

1. immer noch 3
2. 0
3. 3.5

Erklärung

- 2. $= 2.0 \sim \text{double}$ auf der rechten Seite
- 7 wird in diesem Ausdruck als `double` behandelt, auch linke Seite
- Division zweier `double` Werte



Frage #5

Zu was wird $1/2 + 1/2$ ausgewertet?

1. nicht definiert
2. 0
3. 1 (dank Compileroptimierung)



Frage #5

Zu was wird $1/2 + 1/2$ ausgewertet?

1. nicht definiert
2. 0
3. 1 (dank Compileroptimierung)

Erklärung

- $\text{int}_1 / (\text{<grösserer int}_2) \rightsquigarrow 0 + 0 = 0$
- Compileroptimierung nicht C-Konform



Frage #6

Zu was wird $2 * \text{M_PI}$ ausgewertet?

1. 6
2. ungefähr 6.28
3. 6.283185307179586476925286766559005768394338798750...



Frage #6

Zu was wird `2 * M_PI` ausgewertet?

1. 6
2. ungefähr 6.28
3. 6.283185307179586476925286766559005768394338798750...

Erklärung

- `M_PI` \sim `double`
- `float` Standard-Typ, außer zusätzliches Literal (`3.14f`)
- Begrenzter Wertebereich:
`6.2831853071795860000000000000000`



Frage #7

```
1 double a = 0.1;
2 double b = 0.2;

3 float aa = 0.1;
4 float bb = 0.2;

5 if (a+b == aa+bb){
6     ezs_printf("equal\n");
7 }else{
8     ezs_printf("unequal: %.30f != %.30f\n", (a+b), (aa+bb));
9 }
```

Was wird ausgegeben?

1. equal
2. unequal...



Frage #7

```
1 double a = 0.1;
2 double b = 0.2;

3 float aa = 0.1;
4 float bb = 0.2;

5 if (a+b == aa+bb){
6     ezs_printf("equal\n");
7 }else{
8     ezs_printf("unequal: %.30f != %.30f\n", (a+b), (aa+bb));
9 }
```

Was wird ausgegeben?

1. equal
2. unequal...



Fließkomma-Arithmetik

```
1  double a = 0.1;
2  double b = 0.2;

3  float aa = 0.1;
4  float bb = 0.2;

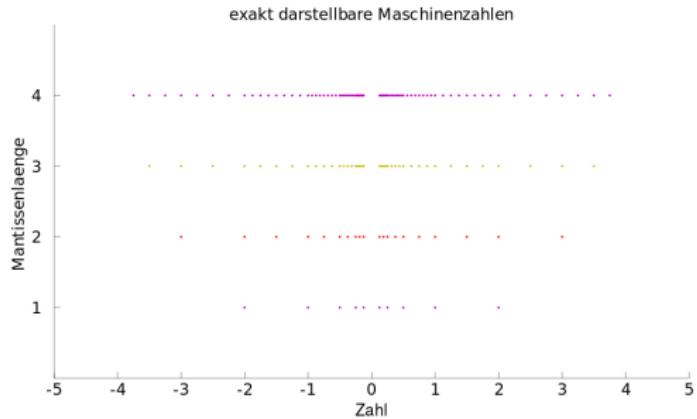
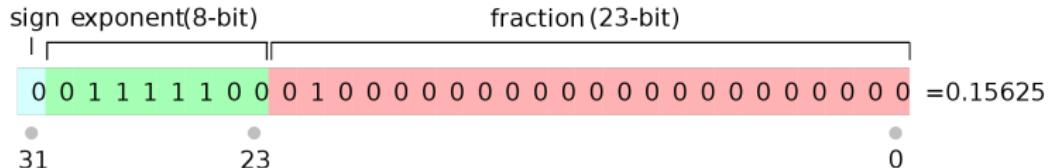
5  if (a+b == aa+bb){
6      ezs_printf("equal\n");
7  }else{
8      ezs_printf("unequal: %.30f != %.30f\n", (a+b), (aa+bb));
9  }

/* Ausgabe:
2 unequal:
0.30000000000000000000000000000000 != 
0.30000011920929000000000000000000
*/
```

- Angenommen die Einheit ist Sekunden
 - 11,9 ns Fehler durch *einzelne Berechnung*
 - Kumulation der Rundungsfehler



Begrenzte Wertebereiche – IEEE 754



IEEE 754

- `sizeof(float) == 4`
 - `sizeof(double) == 8`



- *What Every Computer Scientist Should Know About Floating-Point Arithmetic* [1]
- Rundungsfehler & Überläufe äußerst kritisch in *harten Echtzeitsystemen*
- Konvertierungen zwischen Größeneinheiten (sec_to_nanosec: * 1e9)
- Vermeidung des Wechsels von Größeneinheiten
- Verwendung von Festkomma-Arithmetik \leadsto VEZS '17
- Integer-Division ist *kein sicherer Ausweg*
 - Berechnung der Auflösung von Zeitgebern
 \leadsto nächste Woche
- ☞ *Sorgfalt bei arithmetischen Operationen in begrenzten Wertebereichen*



Wahl des Datentyps bei Berechnung des Sinus-Wertes

- Harmonische Schwingung¹: $y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$ und $\omega = 2\pi f$

```
1 #define TYPE {int|double|float} ?
2 ...
3 TYPE compute_sinus(OTHER_TYPE real_time) {
4     TYPE f      = ...
5     TYPE omega = 2 * M_PI * f;
6     ...
7     ... sin(omega * real_time) // oder doch sinf(omega * real_time) ?
8     ...
9 }
```

- float oder double für Realzeit sinnvoll? Was ist OTHER_TYPE?
- Konfiguration von float und double sinnvoll
- Laufzeit von compute_sinus()?

¹https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingung#Harmonische_Schwingung

Wahl des Datentyps bei Berechnung des Sinus-Wertes

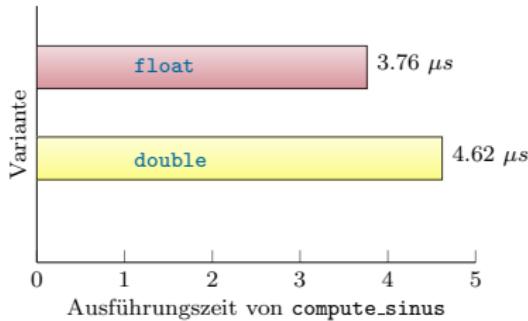
- Harmonische Schwingung¹: $y(t) = y_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi_0)$ und $\omega = 2\pi f$

```
1 #define TYPE {int|double|float} ?
2 ...
3 TYPE compute_sinus(OTHER_TYPE real_time) {
4     TYPE f      = ...
5     TYPE omega = 2 * M_PI * f;
6     ...
7     ... sin(omega * real_time) // oder doch sinf(omega * real_time) ?
8     ...
9 }
```

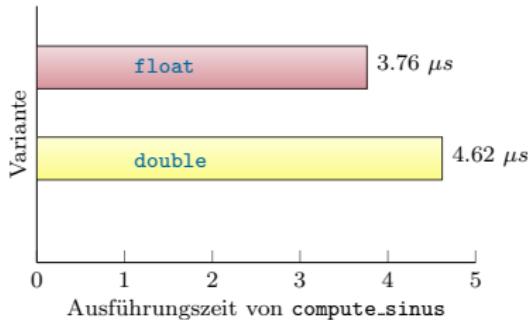
- *float oder double für Realzeit sinnvoll? Was ist OTHER_TYPE?*
- Konfiguration von **float** und **double** sinnvoll
- Laufzeit von **compute_sinus()**?

¹https://de.wikipedia.org/wiki/Schwingung#Harmonische_Schwingung

Vergleich der Laufzeiten



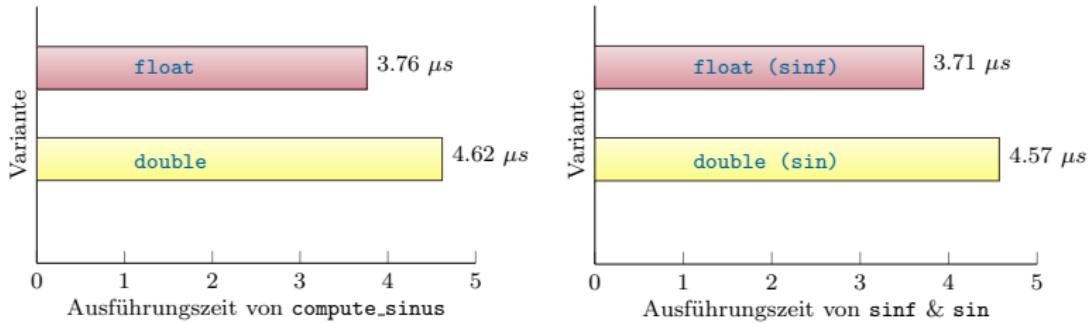
Vergleich der Laufzeiten



- Laufzeitzuwachs um 23 % bei Wechsel **float** → **double**
- Soft Float? Hard Float? hier: Soft Float



Vergleich der Laufzeiten



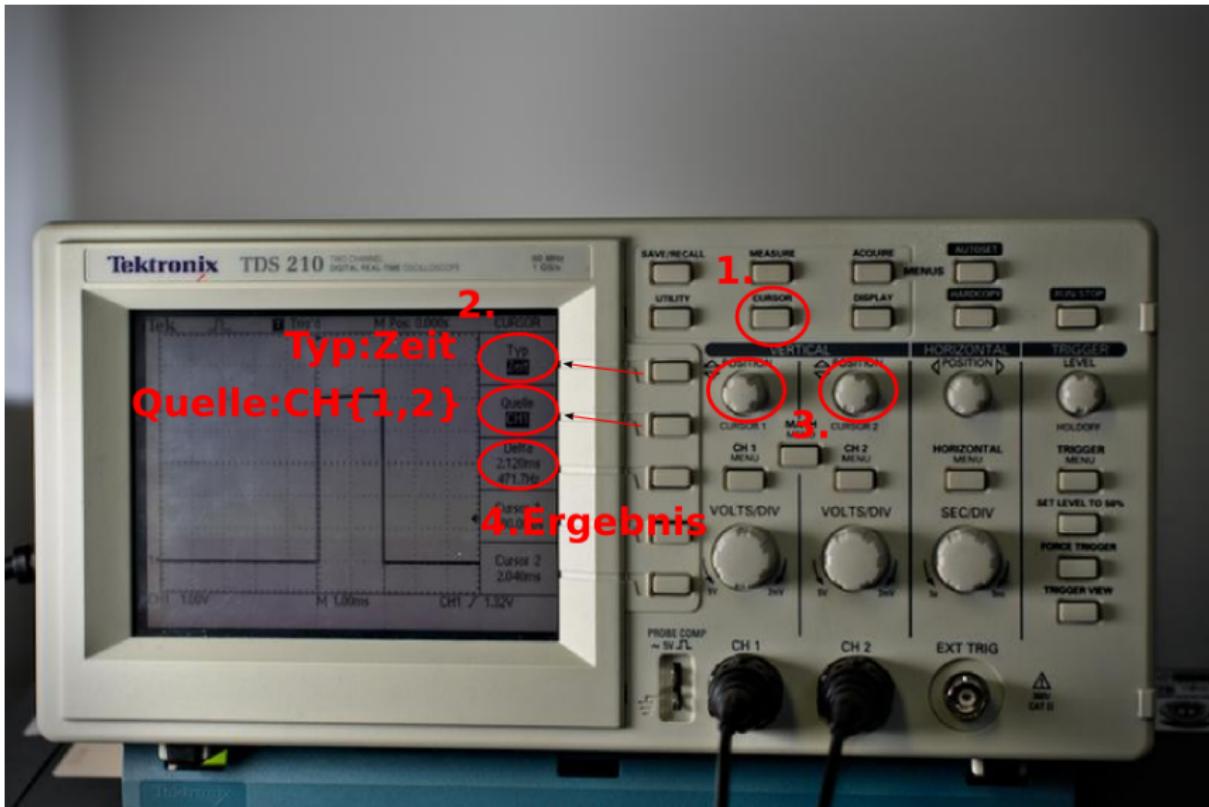
- Laufzeitzuwachs um 23 % bei Wechsel `float` → `double`
- Soft Float? Hard Float? hier: Soft Float
- Noch mehr Optimierungspotential? Wo wird die Laufzeit verbraucht?
 - 99 % der Gesamtlaufzeit für `sinf` und `sin`
- Wahl des Datentyps in Abhängigkeit der Wortbreite (32-Bit Cortex-M4, 8-Bit AVR)
- Spezialbibliothek für Signalverarbeitung mit Integer-Arithmetik
- Spezielle Hardware-Einheiten zur Signalverarbeitung



- 1 Weiterführende Informationen zum Übungsbetrieb
- 2 Wahl geeigneter Datentypen
- 3 Handwerkszeug
 - Oszilloskop-Cursor
 - Zeit in eCos
 - Tiefpassfilter
 - Pulsweitenmodulation
- 4 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 5 Zusammenfassung



Cursor



Umgang mit Zeit in eCos

- Aktuelle Aufgabe: Ausführung soll um feste Zeit *verzögert* werden
 ~ `cyg_thread_delay()`
- Erwartet Parameter der Einheit *Clock-Ticks – Wieso?*
- Zeitmessung nur per Timer möglich ~> Timer-Takt kleinste Einheit

```
cyg_clock_get_resolution(cyg_real_time_clock())
liefert Auflösung der Echtzeituhr:
```

```
typedef struct {
    cyg_uint32 dividend;
    cyg_uint32 divisor;
} cyg_resolution_t;
```

- dividend ~ Zeit in ns, die ein Tick dauert
divisor
- Umrechnung sollte zur Übersetzungszeit erfolgen
 ? Was ist?



Umgang mit Zeit in eCos

- Aktuelle Aufgabe: Ausführung soll um feste Zeit *verzögert* werden
 ~ `cyg_thread_delay()`
- Erwartet Parameter der Einheit *Clock-Ticks – Wieso?*
- Zeitmessung nur per Timer möglich ~ Timer-Takt kleinste Einheit

```
cyg_clock_get_resolution(cyg_real_time_clock())
liefert Auflösung der Echtzeituhr:
```

```
1  typedef struct {
2      cyg_uint32 dividend;
3      cyg_uint32 divisor;
4  } cyg_resolution_t;
```

- $\frac{\text{dividend}}{\text{divisor}}$ ~ Zeit in ns, die ein Tick dauert
- Umrechnung sollte zur Übersetzungszeit erfolgen
Wieso?



Tiefpassfilter

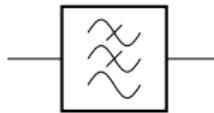


Abbildung: Schaltbild RC-Glied

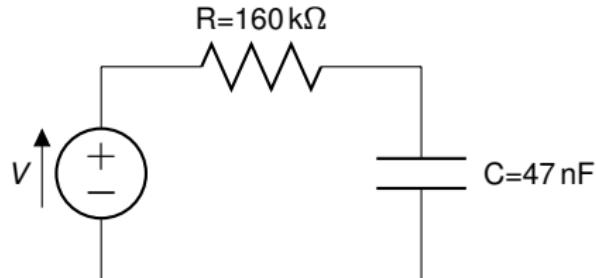
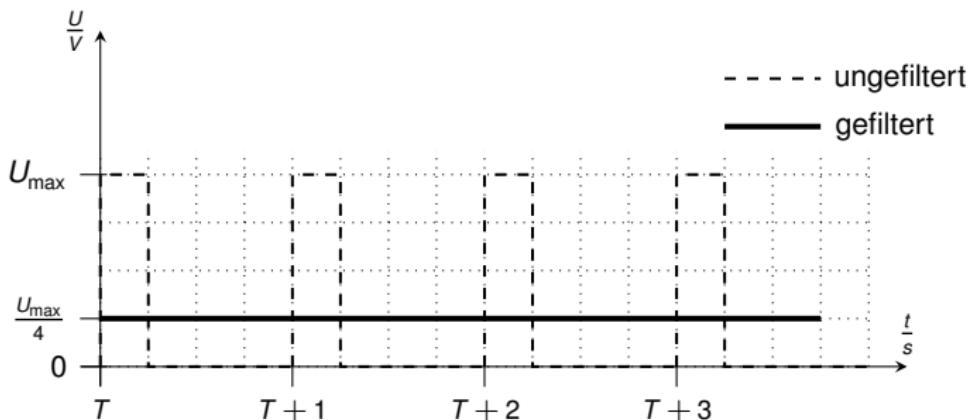


Abbildung: Schaltung RC-Filter auf EZS-Board

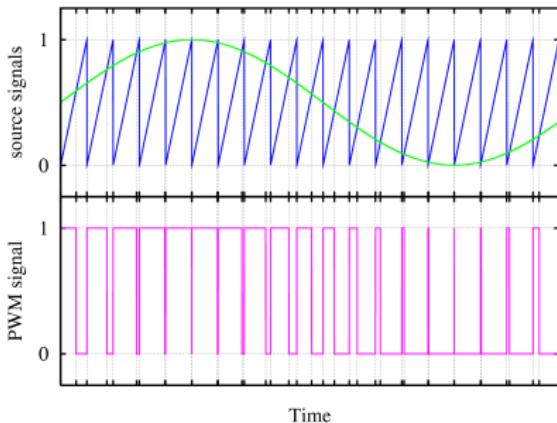
- Filterung hochfrequenter Schwingungen
- Zeitkonstante $\tau = R \cdot C = 7,52\text{ ms}$
- Grenzfrequenz (Dämpfung um 3dB $\approx 71\%$): $f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau} = 21\text{ Hz}$





- Einschaltzeit proportional zum Mittelwert des Ausgangssignals
- Variation der Pulsweite oder Einschaltzeit (engl. duty cycle)
- Pulsweitenmodulation (engl. pulse-width modulation, PWM)
- „Pseudo“ Digital-Analog-Wandler (engl. digital-analog converter, DAC)





Verfahren zur Signalerzeugung

- Hardware: Vergleich periodischer Zähler und Wert der Einschaltdauer
- Weit verbreitet: Motorsteuerung, Class-D-Verstärker, Schaltnetzteile, Nachrichtenübertragung,...
- Mittels Tiefpass \leadsto Digital-Analog-Wandlung
- libEZS: `void ezs_dac_write(uint8_t)` (zusätzlich *echter* DAC auf Board)



- 1 Weiterführende Informationen zum Übungsbetrieb
- 2 Wahl geeigneter Datentypen
- 3 Handwerkszeug
 - Oszilloskop-Cursor
 - Zeit in eCos
 - Tiefpassfilter
 - Pulsweitenmodulation
- 4 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 5 Zusammenfassung



Wie behandle ich einen Interrupt?

Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

- Unverzüglich, *asynchron*
 ~ auch innerhalb von Kernelfunktionen!
- Innerhalb ISR *keine Systemaufrufe* erlaubt!
 ⇒ Anmelden einer Deferrable Service Routine (DSR)

Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

- *Synchron* zum Scheduler
- Falls Scheduler nicht verriegelt: *Unverzüglich* nach ISR
- sonst: Beim *Verlassen* des Kerns

Synonym: *Prolog-Epilog-Schema* bzw. *top/bottom half*



Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR²

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority,
    cyg_addrword_t data,
    cyg_ISR_t* isr,
    cyg_DSR_t* dsr,
    cyg_handle_t* handle,
    cyg_interrupt* intr
);
```

- Interruptvektornummer
- ~~~ Hardwarehandbuch

²<http://ecos.sourceforge.net/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR²

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority,           // highlighted
    cyg_addrword_t data,
    cyg_ISR_t* isr,
    cyg_DSR_t* dsr,
    cyg_handle_t* handle,
    cyg_interrupt* intr
);
```

- Interruptpriorität
- für unterbrechbare Unterbrechungen
(hardwareabhängig)



²<http://ecos.sourceforge.net/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR²

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority,
    cyg_addrword_t data,           // highlighted
    cyg_ISR_t* isr,
    cyg_DSR_t* dsr,
    cyg_handle_t* handle,
    cyg_interrupt* intr
);
```

- Beliebiger Überabeparameter für ISR/DSR

²<http://ecos.sourceforge.net/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR²

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority,
    cyg_addrword_t data,
    cyg_ISR_t* isr,           // highlighted
    cyg_DSR_t* dsr,
    cyg_handle_t* handle,
    cyg_interrupt* intr
);
```

- Funktionszeiger auf *ISR-Implementierung*

Signatur:

cyg_uint32 (*)(cyg_vector_t, cyg_addrword_t)

²<http://ecos.sourceforge.net/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR²

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority,
    cyg_addrword_t data,
    cyg_ISR_t* isr,
    cyg_DSR_t* dsr,           // highlighted
    cyg_handle_t* handle,
    cyg_interrupt* intr
);
```

- Funktionszeiger auf *DSR-Implementierung*

Signatur:

`cyg_uint32 (*) (cyg_vector_t, cyg_ucount32 count, cyg_addrword_t)`

²<http://ecos.sourceforge.net/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR²

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority,
    cyg_addrword_t data,
    cyg_ISR_t* isr,
    cyg_DSR_t* dsr,
    cyg_handle_t* handle,
    cyg_interrupt* intr
);
```

- Handle und Speicher für *Interruptobjekt*

²<http://ecos.sourceforge.net/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Beispiel einer minimalen ISR

```
cyg_uint32 isr(cyg_vector_t vector, cyg_addrword_t data) {  
    cyg_bool_t dsr_required = 0;  
    ...  
    cyg_acknowledge_isr(vector);  
    if (dsr_required) {  
        return CYG_ISR_CALL_DSR;  
    } else {  
        return CYG_ISR_HANDLED;  
    }  
}
```

1. Beliebiger ISR-Code
2. Bestätigung der Interruptbehandlung
Wozu ist das gut?
3. Anforderung einer DSR
oder
4. Rückkehr ohne DSR



Beispiel einer minimalen ISR

```
cyg_uint32 isr(cyg_vector_t vector, cyg_addrword_t data) {  
    cyg_bool_t dsr_required = 0;  
    ...  
    cyg_acknowledge_isr(vector);  
    if (dsr_required) {  
        return CYG_ISR_CALL_DSR;  
    } else {  
        return CYG_ISR_HANDLED;  
    }  
}
```

1. Beliebiger ISR-Code
2. Bestätigung der Interruptbehandlung
Wozu ist das gut?
3. Anforderung einer DSR
oder
4. Rückkehr ohne DSR



Beispiel einer minimalen ISR

```
cyg_uint32 isr(cyg_vector_t vector, cyg_addrword_t data) {  
    cyg_bool_t dsr_required = 0;  
    ...  
    cyg_acknowledge_isr(vector);  
    if (dsr_required) {  
        return CYG_ISR_CALL_DSR;  
    } else {  
        return CYG_ISR_HANDLED;  
    }  
}
```

1. Beliebiger ISR-Code
2. Bestätigung der Interruptbehandlung
Wozu ist das gut?
3. Anforderung einer DSR
oder
4. Rückkehr ohne DSR



Beispiel einer minimalen ISR

```
cyg_uint32 isr(cyg_vector_t vector, cyg_addrword_t data) {  
    cyg_bool_t dsr_required = 0;  
    ...  
    cyg_acknowledge_isr(vector);  
    if (dsr_required) {  
        return CYG_ISR_CALL_DSR;  
    } else {  
        return CYG_ISR_HANDLED;  
    }  
}
```

1. Beliebiger ISR-Code
2. Bestätigung der Interruptbehandlung
Wozu ist das gut?
3. Anforderung einer DSR
oder
4. Rückkehr ohne DSR



Beispiel einer minimalen DSR

```
void dsr_function(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_ucount32 count,
    cyg_addrword_t data)
{
    ...
}
```

1. Anzahl der ISRs, die diese DSR anforderten
~> normalerweise 1
2. Ausführung *synchron* zum Scheduler
Was bedeutet das?



Beispiel einer minimalen DSR

```
void dsr_function(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_ucount32 count,
    cyg_addrword_t data)
{
...
}
```

1. Anzahl der ISRs, die diese DSR anforderten
~> normalerweise 1
2. Ausführung *synchron* zum Scheduler
Was bedeutet das?



- 1** Weiterführende Informationen zum Übungsbetrieb
- 2** Wahl geeigneter Datentypen
- 3** Handwerkszeug
 - Oszilloskop-Cursor
 - Zeit in eCos
 - Tiefpassfilter
 - Pulsweitenmodulation
- 4** Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 5** Zusammenfassung



- Vorsicht bei der **Wahl des Datentypen**
 - Abhängig von Zielarchitektur
 - Datentypen **beeinflussen die Laufzeit**
 - Performance *nicht notwendig, aber hilfreich* für Echtzeitsysteme
- Handwerkszeug für EZS
 - Arbeiten mit Oszilloskopen
 - Zeiten in eCos
 - DAC, PWM, Filter
- Interruptbehandlungen
 - Möglichst kurze ISR
 - Sychrone Abarbeitungen DSR



Fragen?

Fragen?

