

Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Messung von Ausführungszeiten & Antwortzeiten

Simon Schuster **Peter Wägemann**

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

Sommersemester 2022



Übersicht

- 1 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit
 - Auflösung von Zeiten in eCos



Bekannte Probleme & beliebte Fehler

Vorsicht eingebettete Hardware!

- Problem: Debugger reagiert nicht, Board lässt sich nicht flashen
 - 🔗 USB-Kabel abstecken & anstecken
- Falls immer noch keine Reaktion
 - 🔗 `make unbrick`, Anweisungen des Befehls folgen
- Keine leuchtenden LEDs
 - 🔗 anderes Board probieren
- Gehäuse für EZS-Board verwenden
- Vorsicht bei wackeligen Jumper-Kabeln
- `make gdb` weniger fragil als `gdb-Dashboard` (`make debug`)
- Vorsicht bei `printf`-Debugging
- Vorsicht `ezs_printf` macht gepufferte Ausgabe
- Verwendung von Fließkomma-Arithmetik und Typecasts ...

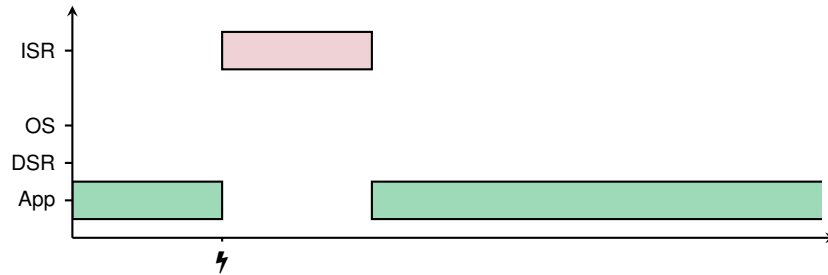


Übersicht

- 1 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit
 - Auflösung von Zeiten in eCos



Unterbrechungen, Prologe, Epiloge

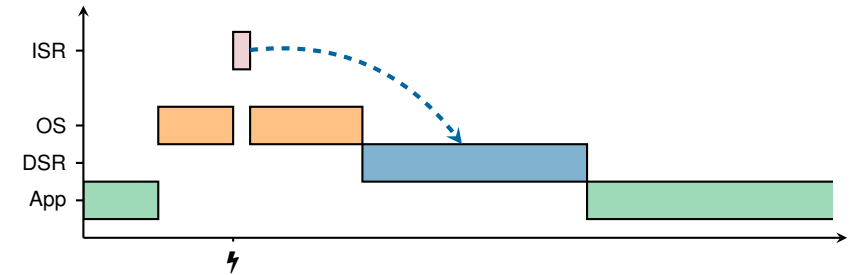


Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

- Unverzöglich, *asynchron*, durch Hardware ausgelöst
 ~> auch innerhalb von Kernelfunktionen!
- Innerhalb ISR *keine Systemaufrufe* erlaubt!
 => Anmelden einer Deferrable Service Routine (DSR)



Unterbrechungen, Prologe, Epiloge



Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

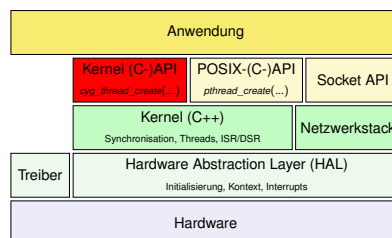
Synonym: *Prolog-Epilog-Schema* bzw. *top/bottom half*



eCos-Systemarchitektur

Kernel – Interruptbehandlung

- Interrupt Service Routine (ISR)
 - Unverzögliche Ausführung
 - Asynchron
 - Kann DSR anfordern
- Deferred Service Routine (DSR)
 - Verzögerte Ausführung (beim Verlassen des Kerns)
 - Synchron



Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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



Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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
);
```

- Interruptpriorität
- für unterbrechbare Unterbrechungen (hardwareabhängig)

¹<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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
);
```

- Beliebiger Übergabeparameter für ISR/DSR

¹<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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
);
```

- Funktionszeiger auf *ISR-Implementierung*

Signatur:

cyg_uint32 (*)(cyg_vector_t, cyg_addrword_t)

¹<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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
);
```

- Funktionszeiger auf *DSR-Implementierung*

Signatur:

cyg_uint32 (*)(cyg_vector_t, cyg_ucount32, cyg_addrword_t)

¹<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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*

Achtung: `cyg_interrupt_create` befüllt nur die Datenstrukturen

☞ Aktivierung mittels `cyg_interrupt_attach(handle)` erforderlich

¹<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

Wie behandle ich einen Interrupt?

Anmeldung von ISR und DSR¹

```
#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
);
```

Zusätzlich: Vektoren können individuell aktiviert/deaktiviert werden:

`cyg_interrupt_(un)mask(VECTOR)`

¹<http://ecos.sourceware.org/docs-latest/ref/kernel-interrupts.html>

ISR-Implementierungsskelett

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

ISR-Implementierungsskelett

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

ISR-Implementierungsskelett

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



ISR-Implementierungsskelett

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



DSR-Implementierungsskelett

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?



DSR-Implementierungsskelett

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?



Übersicht

- 1 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit
 - Auflösung von Zeiten in eCos



Beispiel: Ausführungszeit

```
1 uint64_t count_positive(int64_t* array, size_t size){
2     uint64_t count = 0;
3     for(int i = 0; i < size; i++){
4         if (array[i] > 0){
5             count++;
6         }
7     }
8     return count;
9 }
```

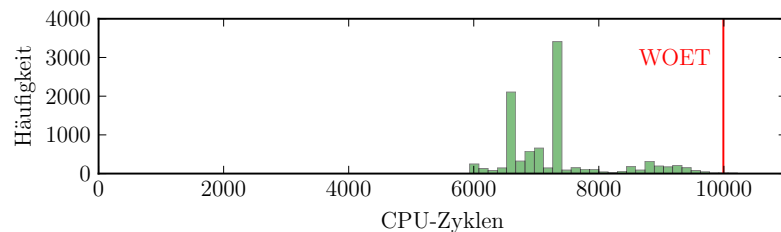
Benchmark-Programm

- Iteration über Array mit variabler Größe
- Zählen der positiven Zahlen in Array

🗨 Wie verhält sich die **Ausführungszeit bei 10.000 Messungen?**



Histogramm: Ausführungszeiten

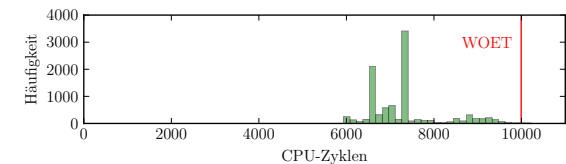


- Maximum der beobachteten Ausführungszeiten (engl. worst-observed execution time **WOET**)
- 10.000 Ausführungen der Funktion `count_positive()`
- Maximum: 9992 CPU-Zyklen
- Hohe Streuung der Ausführungszeiten

Warum?



Setup der Messung: Applikation



```
1 void main(void){
2     int64_t array[ARRAY_SIZE];
3     // alle Eingabedaten mit 0 initialisiert!
4     memset(array, 0, sizeof(array));
5     start = get_time();
6     positive = count_positive(array, ARRAY_SIZE);
7     stop = get_time();
8     printf("%lu", stop-start);
9 }
```

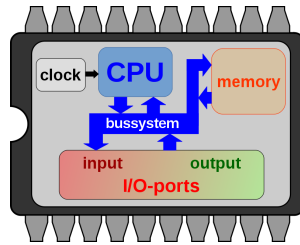
- Ausführungszeit unabhängig von unterschiedlichen Eingabedaten
 - Feste Länge
 - Immer mit 0 initialisiert

🗨 **kein Einfluss** der Eingabedaten

Woher kommen dann die Schwankungen?



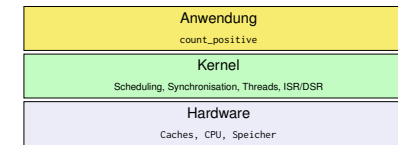
Setup der Messung: Hardware



- CPU: Intel Core i7
- Takt: ≤ 3.3 GHz
- Cache: 4 MB *Smart* Cache
- Universalbetriebssystem
- Aufgaben-System: zusätzliche Last (`stress -cpu 8 -io 8 -hdd 8 -vm 8`)



Einflüsse der Hardware & des Betriebssystems

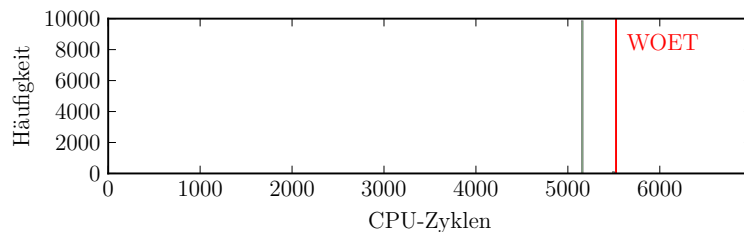


- Pipelining: spekulative Ausführung (engl. Branch Prediction)
- Takt: dynamische Änderung möglich (engl. Dynamic Frequency Voltage Scaling, DVFS)
- Cache: heuristische Strategien
- Scheduling
 - Keine Priorisierung von Aufgabe: Completely Fair Scheduler
 - Timer-Interrupts möglich
 - **Verdrängung** möglich

Wie verhält sich die Messung auf dem **EZS-Board**?



count_positive auf EZS-Board



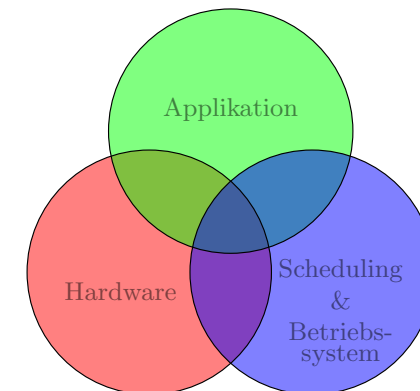
- Geringere Komplexität \leadsto *weniger* Streuung
- Trotzdem Unterschiede
 - Hardware
 - 3-stufige Pipeline
 - Branch-Cache: ART Accelerator™
 - Betriebssystem: *Schwankungen der Ausführungszeit trotz eines Threads?*

Wissen über **Hard- & Software** essenziell für Echtzeitsysteme



Was beeinflusst die Ausführungszeit?

Zusammenfassung



- 1 **Applikation:** Eingabedaten, ...
 - 2 **Hardware:** Caches, Pipelining, ...
 - 3 **Scheduling:** Höherpriorie Aufgaben, Interrupts, Overheads, ...
- (gegenseitige) Einflüsse **kaum vermeidbar**, aber reduzierbar



Übersicht

- 1 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit
 - Auflösung von Zeiten in eCos



Zähler in Mikrocontrollern

Zähler (Counter) zählen Hardware-Ereignisse

- Externer Drehgeber (Radumdrehung)
- Interner Prozessortakt (hohe Auflösung)
- Externer Quarz (Real-Time Clock)

Äquidistante Ereignisse ermöglichen einen *Zeitgeber (Timer)* für

- Periodische Aktivierung
- *Messen von Zeitabständen*
- *Kontrolliertes Verbrennen von Prozessorzeit*



Zähler-Betriebsmodi

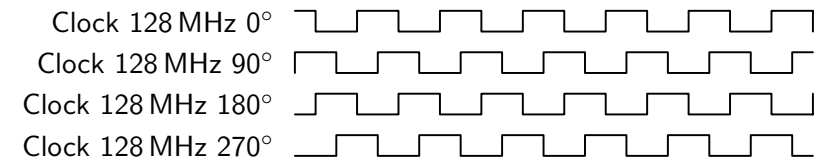
Zähler bzw. Zeitgeber bieten zwei Betriebsmodi:

Abfragebetrieb (Polling) Aktives Auslesen des Zählers
↳ bis Erreichen eines vorgegebenen Wertes

Unterbrecherbetrieb (Interrupt) Zähler unterbricht System
↳ Erreichen eines konfigurierten Zählerstandes.



Probleme von Taktgebern



- Clock-Drift
 - Abweichung der internen Uhr von Realzeit
 - Temperaturabhängiger Phasenunterschied
 - Äußerst kritisch in verteilten Echtzeitsystemen
 - Quarz: $\approx 10^{-6}$ sec/sec = 1 sec in 11,6 Tagen

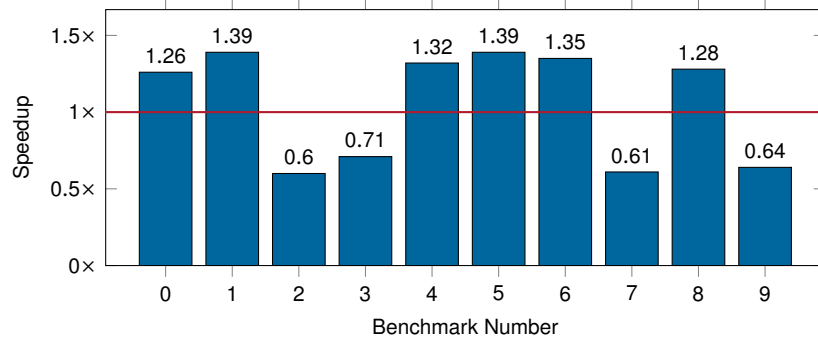
Lösung

- Messung mit externer, hochauflösender Uhr

🔍 *Oszilloskop* ↳ Übungsaufgabe



Einschub: Zusammenfassung von Ergebnissen (I)



■ Aritmetisches Mittel:

$$\frac{1}{10} \sum [1.26, 1.39, 0.60, 0.71, 1.32, 1.39, 1.35, 0.61, 1.28, 0.64] = 1.055$$

⇒ 5.5 % Verbesserung im Mittel **NEIN!**

■ Geometrisches Mittel:

$$\sqrt[10]{\prod [1.26, 1.39, 0.60, 0.71, 1.32, 1.39, 1.35, 0.61, 1.28, 0.64]} \approx 0.992$$



Einschub: Zusammenfassung von Ergebnissen (II)

■ *How Not To Lie With Statistics: The Correct Way To Summarize Benchmark Results* [1]

■ Wichtige Regeln

1. Für normalisierte Werte nicht das arithmetische Mittel verwenden
2. Für normalisierte Werte das geometrische Mittel verwenden
3. Für Rohdaten (mit Einheiten) das arithmetische Mittel verwenden

■ Arithmetisches Mittel: $x_{arith} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i$

■ Geometrisches Mittel: $x_{geom} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^N x_i}$

■ Für Messungen in Echtzeitsystemen

4. Alle Standardabweichungen sollten **weniger als 1%** betragen [2]



Übersicht

1 Interruptbehandlung

- ISR & DSR
- eCos-Unterbrechungsbehandlung

2 Einflüsse der Ausführungszeit

3 Zeitmessung

- Zeitgeber
- Probleme von Messungen

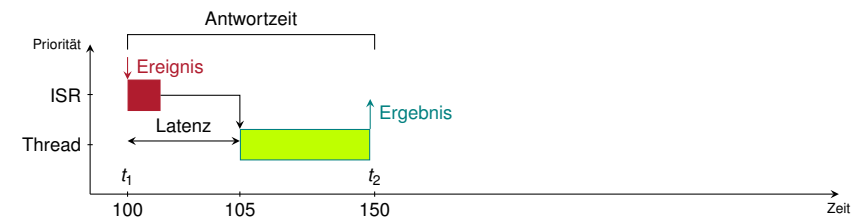
4 Was bedeutet Antwortzeit?

5 Aufgabe: Antwortzeit

- Auflösung von Zeiten in eCos



Ausführungszeit & Antwortzeit

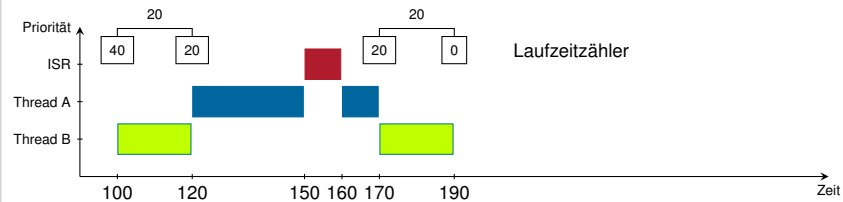


Stoppuhr

- Punkte auf der Zeitachse t_1 und $t_2 \rightsquigarrow$ Ereignis und Ergebnis
- Antwortzeit ist $\Delta t = t_2 - t_1$ (Beispiel: $150 - 100 = 50$ Zählerticks)



Messung der ausgeführten Zeit



Rechenzeitsimulation

- Verbrauchte *Laufzeit* eines Threads
- Vorgegebene Zeit aktiv warten \leadsto Laufzeit verbrauchen

Umsetzung

- Funktion, die *aktiv* t_{wct} wartet \leadsto Schleife auf Zählerwert
- HW-Zähler läuft bei Unterbrechungen weiter! \leadsto *lokaler* Zähler
- Dekrement bei jeder Änderung? Beispiel: Sprung von 120 \rightarrow 170



Übersicht

- 1 Interruptbehandlung
 - ISR & DSR
 - eCos-Unterbrechungsbehandlung
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit
 - Auflösung von Zeiten in eCos



libEZS-Überblick

Plattformunabhängige Hilfsfunktionen

- Timer-Zugriff (Zeitmessung)
- DAC-Zugriff
- GPIO-Zugriff
- ...

```
<aufgabe>
|-- CMakeLists.txt
|-- app.c
|-- ecos
'-- libEZS
    |-- include
    | |-- ezs_dac.h
    | |-- ezs_gpio.h
    | '-- ezs_stopwatch.h
    |-- src
    | '-- ezs_stopwatch.c
    '-- drivers
        '-- stm32
            |-- ezs_dac.c
            |-- ezs_counter.c
            '-- ezs_gpio.c
```

Die *libEZS* wird im Laufe der Übungen erweitert



Zeitmessung in *ezs_stopwatch.c/h*

Die Zeitmessung wird durch zwei Funktionen implementiert:

```
void ezs_watch_start(cyg_uint32 *state);
cyg_uint32 ezs_watch_stop(cyg_uint32 *state);
```

- Parameter: Zeiger auf (*potentiell globale*) Variable
 \rightarrow viele unabhängige Messzeitpunkte
- `ezs_watch_stop(cyg_uint32 *state)` gibt Zeitdifferenz in *Ticks* zurück

Hinweis

`ezs_counter_get()` in `libEZS/include/ezs_counter.h`

Hinweis

Auflösung der Zähler in Bruchteilen von Nanosekunden:
 \rightarrow `ezs_counter_get_resolution()`



Umgang mit Zeit in eCos

- Viele API-Funktionen erwarten Parameter der Einheit *Clock-Ticks* – *Wieso?*
 - Zeitmessung nur per Timer möglich \leadsto Timer-Zyklus 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;
```
- $\frac{\text{dividend}}{\text{divisor}} \leadsto$  Zeit in ns, die ein Tick dauert (beispielsweise 1000 ns)
  - *Warum Aufteilung in Dividend & Divisor?*
  - Umrechnung sollte *einmalig* erfolgen
  - Hilfsfunktionen zur Umrechnung  
 $\leadsto$  `ms_to_{cyg,ezs}_ticks()`



## WCET-Simulator in `ezs_stopwatch.c/.h`

Zu implementieren:

```
void ezs_simulate_wcet(cyg_uint32 wcet, cyg_uint8 jitter);
```

- Parameter:
  - 1 Gewünschte WCET in *Ticks*
  - 2 *Maximum* des zufällig zu subtrahierenden *WCET-Anteils*
- Implementierung muss internen Zähler verwalten
  - $\leadsto$  Bei welcher Änderung des Systemzählers anpassen?
  - $\leadsto$  Welche Auflösung ist erreichbar
    - Jeder Thread besitzt einen eigenen Stack!
    - Thread-übergreifende Messungen möglich
- *Abfragebetrieb*

Cont.: Rechnen mit Auflösungen

Auflösung des Zählers in Pikosekunden:

$\rightarrow$  `ezs_counter_resolution_ps()`

Kann das problematisch sein?



## Rechnen mit Timer-Auflösungen

```
1 // CPU_SPEED is 84MHz
2 // RCC_CLOCK is CPU_SPEED / 2 = 42MHz
3 // timer increment frequency is RCC_CLOCK / (PRESCALER+1)
4 // PRESCALE is configured as 0
```

- **Überläufe:** *Dauer der Messung* beachten
  - 32-Bit Timer auf EZS-Board
- **Rundungsfehler:** *Auflösungen* beachten
  - Auflösung in „Mikro-Sekunden-Ticks“
  - $1000000/42 = 23809.5238\dots$  vs. `floor(1000000/42)`
  - $\approx 15 \mu\text{s}$  Rundungsfehler bei 1 s Zeitmessung

### Lösung

```
1 cyg_resolution_t ezs_counter_get_resolution(void);
 ■ $\frac{\text{Dividend}}{\text{Divisor}}$ beinhaltet die Auflösung in Nanosekunden \leadsto siehe make doc
```



## Literatur

- [1] Philip J Fleming and John J Wallace.  
How not to lie with statistics: the correct way to summarize benchmark results.  
*Communications of the ACM*, 29(3):218–221, 1986.
- [2] Gernot Heiser.  
Systems benchmarking crimes, 2016.  
<http://gernot-heiser.org/benchmarking-crimes.html>.

