

Echtzeitsysteme - Übungen

Messung von Ausführungszeiten & Antwortzeiten

Sommersemester 2024

Eva Dengler Peter Wägemann

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU)

Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

- Problem: Debugger reagiert nicht, Board lässt sich nicht flashen
⇒ USB-Kabel abstecken & anstecken
- Falls immer noch keine Reaktion
⇒ `make unbrick`, Anweisungen des Befehls folgen
- 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 ...
- Keine leuchtenden LEDs
⇒ anderes Board probieren

Interruptbehandlung

- ISR & DSR

- eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

- Zeitgeber

- Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

- Auflösung von Zeiten in eCos

Interruptbehandlung

ISR & DSR

eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

Zeitgeber

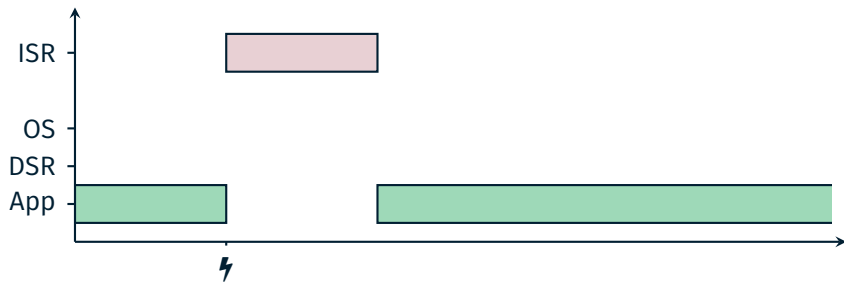
Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

Auflösung von Zeiten in eCos

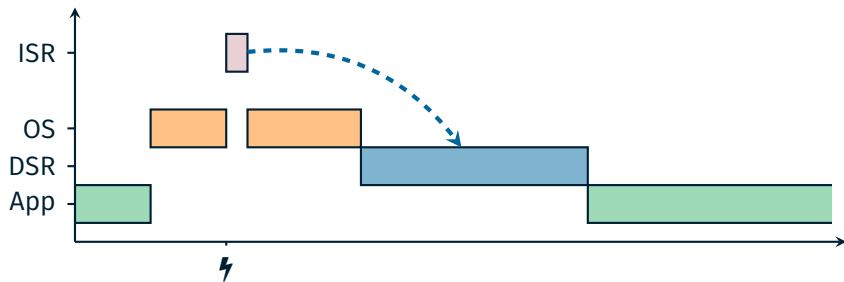
Unterbrechungen, Prologe, Epiloge



Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

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

Unterbrechungen, Prologe, Epiloge

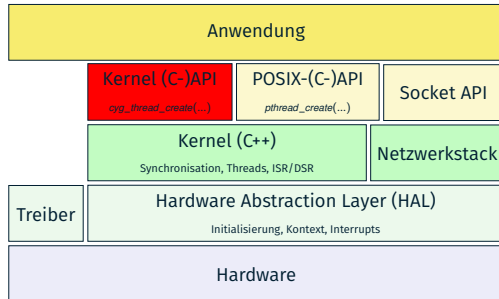


Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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

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

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
);
```

- 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_intrupt* 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

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
 \leadsto 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?

Interruptbehandlung

ISR & DSR

eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

Zeitgeber

Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

Auflösung von Zeiten in eCos

Beispiel: Ausführungszeit

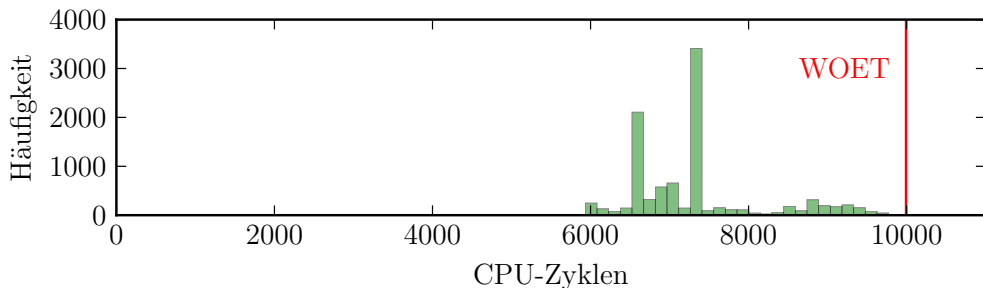
```
1 uint64_t count_positive(int64_t* array, size_t size){
2     uint64_t count = 0;
3     for(int i = 0; i < size; i++){
4         if (array[i] > 0){
5             count++;
6         }
7     }
8     return count;
9 }
```

Benchmark-Programm

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

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

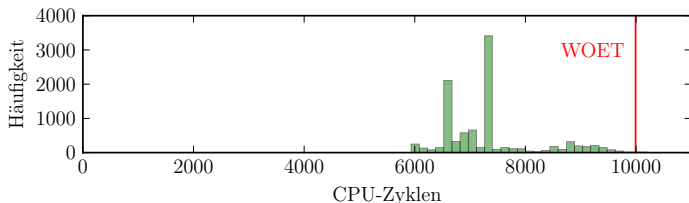
Histogramm: Ausführungszeiten



- 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 }
```

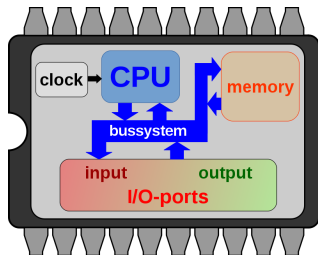
■ Ausführungszeit unabhängig von unterschiedlichen Eingabedaten

- Feste Länge
- Immer mit 0 initialisiert

⇒ **kein Einfluss** der Eingabedaten

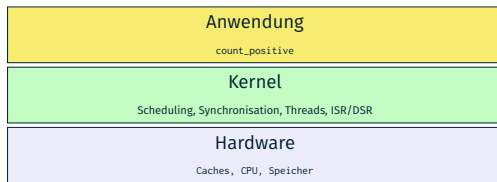
Woher kommen dann die Schwankungen?

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`)

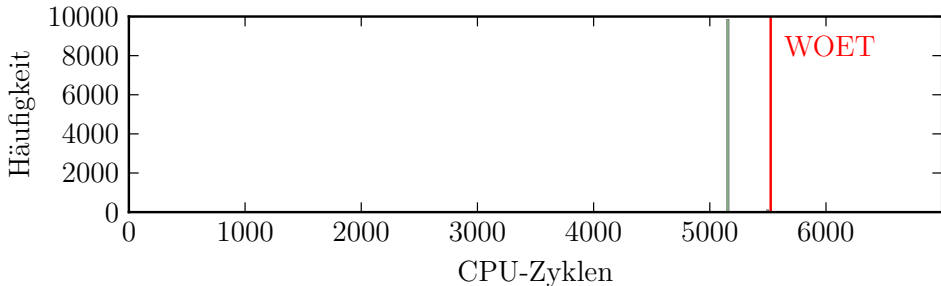
Einflüsse der Hardware & des Betriebssystems



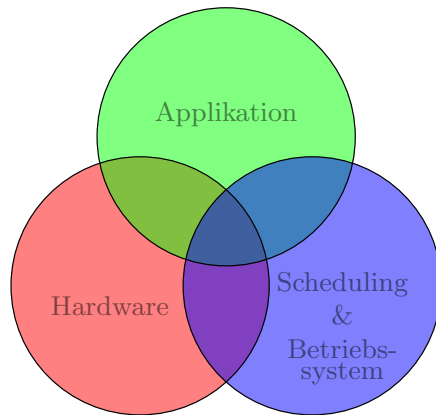
- **Pipelining: spekulative Ausführung** (engl. Branch Prediction)
- **Takt: dynamische Änderung möglich** (engl. Dynamic Frequency Voltage Scaling, DVFS)
- **Cache: heuristische Strategien**
- **Scheduling**
 - Keine Priorisierung von Aufgabe: Completely Fair Scheduler
 - Timer-Interrupts möglich
 -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



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

Interruptbehandlung

ISR & DSR

eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

Zeitgeber

Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

Auflösung von Zeiten in eCos

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 bzw. Zeitgeber bieten zwei Betriebsmodi:

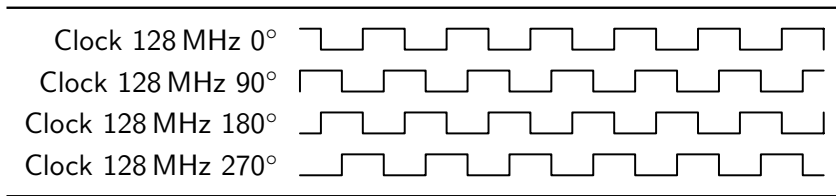
Abfragebetrieb (Polling) Aktives Auslesen des Zählers

~> bis Erreichen eines vorgegebenen Wertes

Unterbrecherbetrieb (Interrupt) Zähler unterbricht System

~> Erreichen eines konfigurierten Zählerstandes

Probleme von Taktgebern



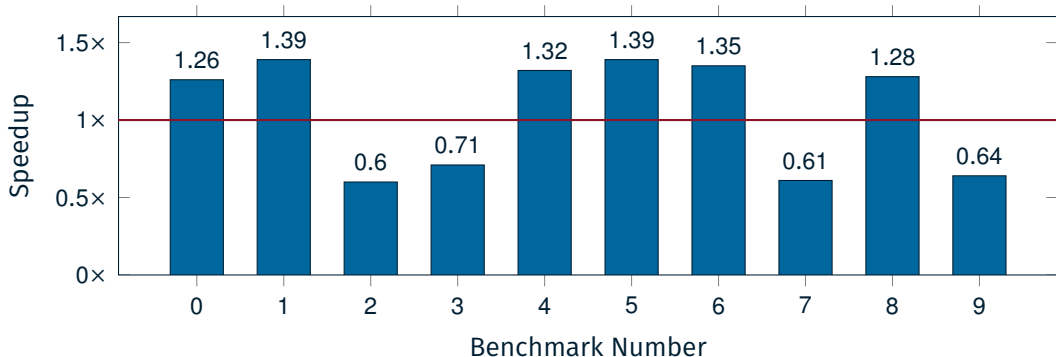
■ Clock-Drift

- 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* \rightsquigarrow 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]

Interruptbehandlung

ISR & DSR

eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

Zeitgeber

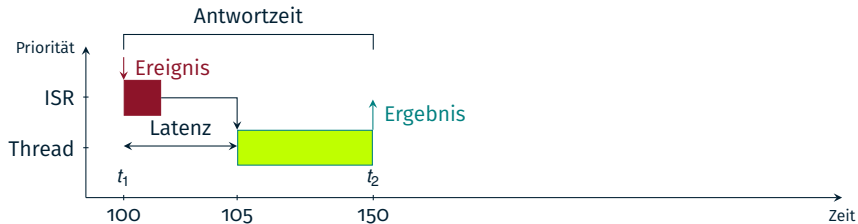
Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

Auflösung von Zeiten in eCos

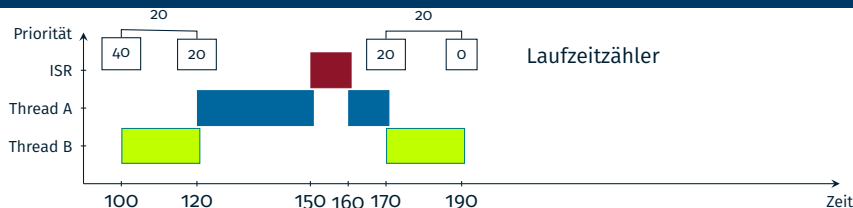
Ausführungszeit & Antwortzeit



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 \rightsquigarrow Laufzeit verbrauchen

Umsetzung

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

Interruptbehandlung

ISR & DSR

eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

Zeitgeber

Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

Auflösung von Zeiten in eCos

Plattformunabhängige Hilfsfunktionen

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

```
<aufgabe>
|-- CMakeLists.txt
|-- app.c
|-- ecos
'-- libEVS
    |-- 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 *libEVS* 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
→ 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 des Zählers in Bruchteilen von Nanosekunden:

→ `ezs_counter_get_resolution()`

Umgang mit Zeit in eCos

- für API-Funktionen: Parameter der Einheit *Clock-Ticks* – *Wieso?*
- Zeitmessung nur per Timer möglich \rightsquigarrow 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;
```

- $\frac{\text{dividend}}{\text{divisor}} \rightsquigarrow$ Zeit in ns, die ein Tick dauert (beispielsweise 1000 ns)
- *Warum Aufteilung in Dividend & Divisor?*
- Umrechnung sollte *einmalig* erfolgen
- Hilfsfunktionen zur Umrechnung
 \rightsquigarrow 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

- ↪ Bei welcher Änderung des Systemzählers anpassen?
- ↪ Welche Auflösung ist erreichbar?
 - Jeder Thread besitzt einen eigenen Stack!
 - Thread-übergreifende Messungen möglich

■ *Abfragebetrieb*

Cont.: Rechnen mit Auflösungen

Auflösung des Zählers in Pikosekunden: → `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. $\text{floor}(1000000/42)$
 - $\approx 15 \mu\text{s}$ 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 \rightsquigarrow siehe make doc

- [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>.