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 Verteilte Systeme
und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

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
- 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

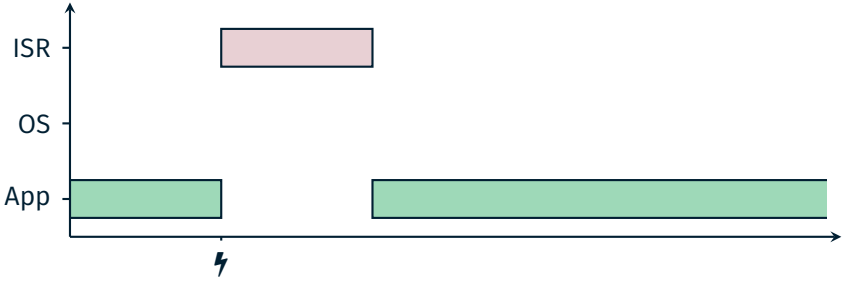
Übersicht

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

Übersicht

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

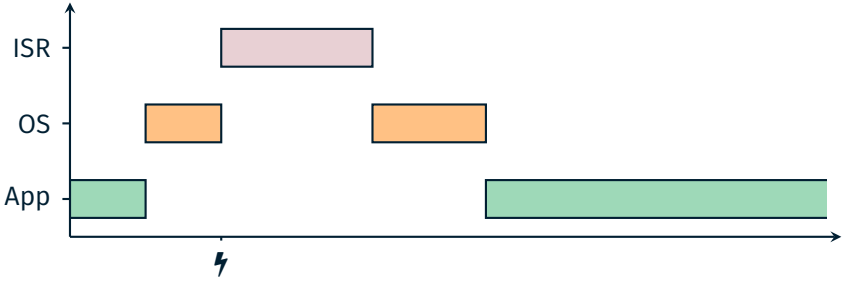
Unterbrechungen, Prologe, Epiloge



Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

- Unverzüglich, *asynchron*, durch Hardware ausgelöst
  $\rightsquigarrow$ auch innerhalb von Kernelfunktionen!
- Innerhalb ISR *keine Systemaufrufe* erlaubt!
  $\Rightarrow$ Anmelden einer Deferrable Service Routine (DSR)

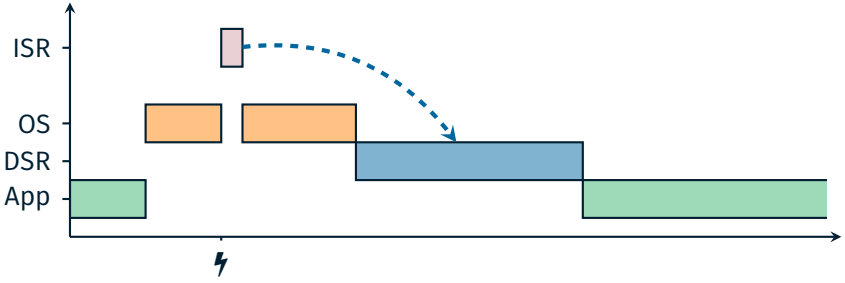
Unterbrechungen, Prologe, Epiloge



Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

- Unverzüglich, *asynchron*, durch Hardware ausgelöst
  $\rightsquigarrow$ auch innerhalb von Kernelfunktionen!
- Innerhalb ISR *keine Systemaufrufe* erlaubt!
  $\Rightarrow$ Anmelden einer Deferrable Service Routine (DSR)

Unterbrechungen, Prologe, Epiloge

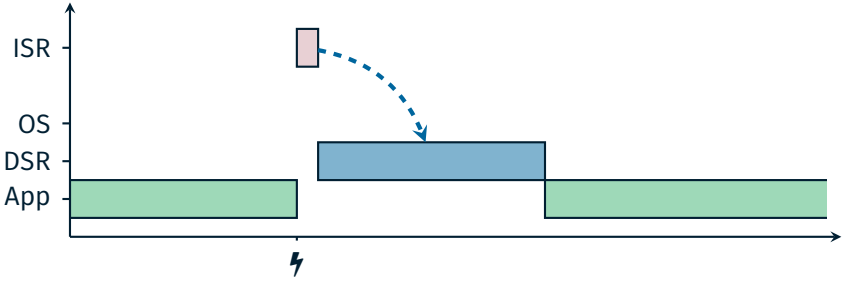


Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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

Unterbrechungen, Prologe, Epiloge

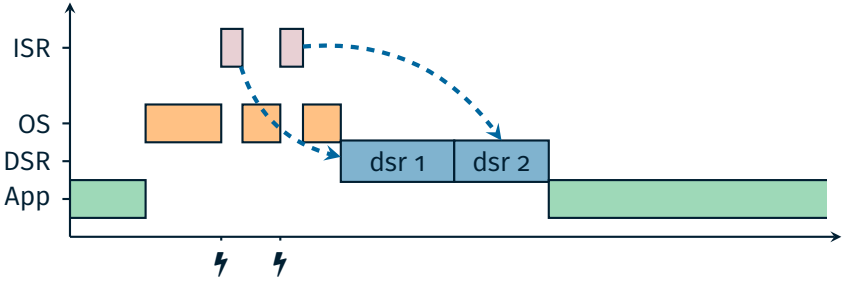


Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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

Unterbrechungen, Prologe, Epiloge

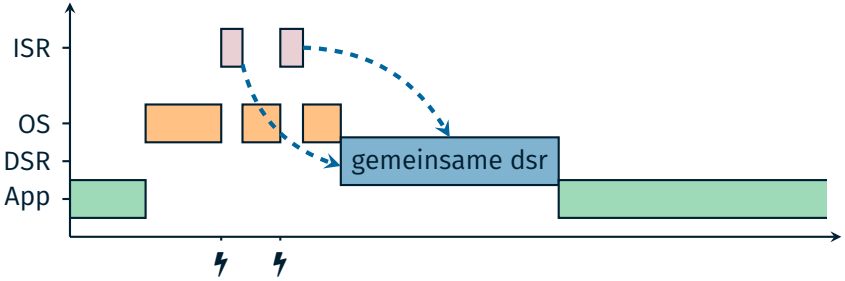


Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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

Unterbrechungen, Prologe, Epiloge

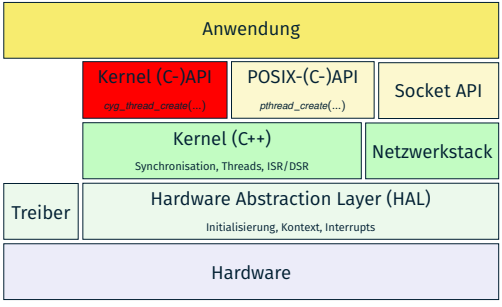


Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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

- Interrupt Service Routine (ISR)
  - Unverzügliche 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 DSR[1]

```
#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 DSR[1]

```
#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 DSR[1]

```
#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 DSR[1]

```
#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 DSR[1]

```
#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 DSR[1]

```
#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 DSR[1]

```
#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

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?

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

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
   $\rightsquigarrow$ normalerweise 1

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
   $\rightsquigarrow$ normalerweise 1
2. Ausführung *synchron* zum Scheduler
   Was bedeutet das?

Übersicht

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

Beispiel: Ausführungszeit

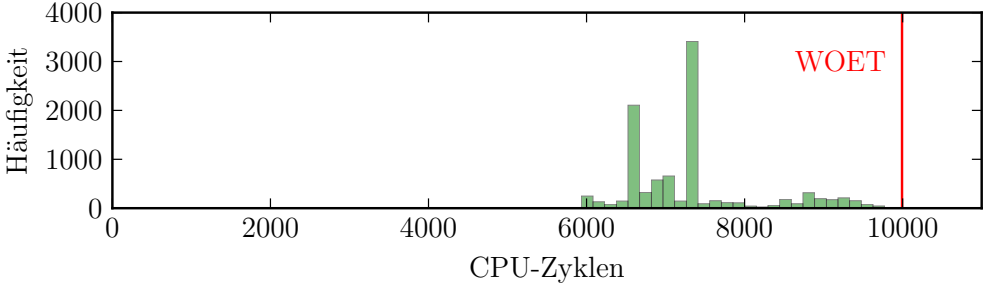
```
1  uint64_t count_positive(int64_t* array, size_t size){
2    uint64_t count = 0;
3    for(int i = 0; i < size; i++){
4      if (array[i] > 0){
5        count++;
6      }
7    }
8    return count;
9  }
```

Benchmark-Programm

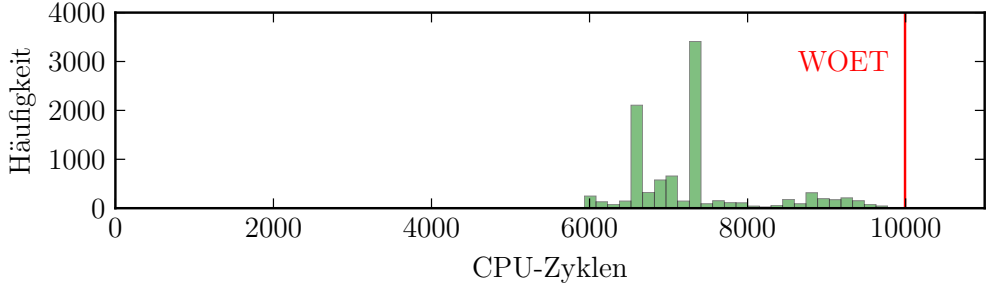
- Iteration über Array mit variabler Größe
- Zählen der positiven Zahlen in Array

☞ Wie verhält sich die Ausführungszeit bei 10.000 Messungen?

Histogramm: Ausführungszeiten

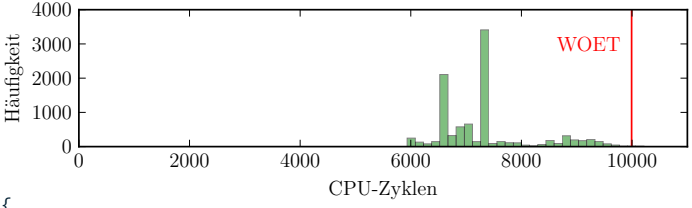


Histogramm: Ausführungszeiten



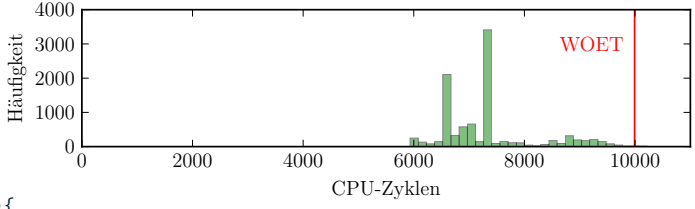
- Maximum der beobachteten Ausführungszeiten
  (engl. worst-observed execution time **WOET**)
- 10.000 Ausführungen der Funktion `count_positive()`
- Maximum: 9992 CPU-Zyklen
- Hohe Streuung der Ausführungszeiten
  Warum?

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  }
```

Setup der Messung: Applikation



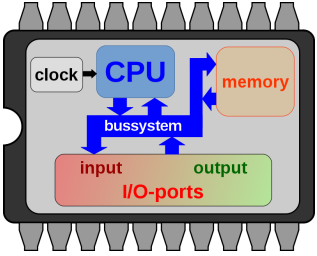

```
1  void main(void){
2    int64_t array[ARRAY_SIZE];
3    // alle Eingabedaten mit 0 initialisiert!
4    memset(array, 0, sizeof(array));
5    start    = get_time();
6    positive = count_positive(array, ARRAY_SIZE);
7    stop     = get_time();
8    printf("%lu", stop-start);
9  }
```

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

⇒ **kein Einfluss** der Eingabedaten

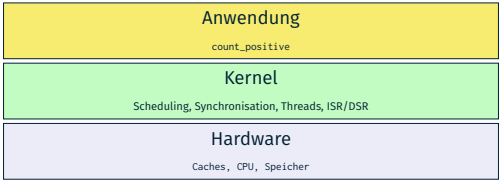
Woher kommen dann die Schwankungen?

Setup der Messung: Hardware



- CPU: Intel Core i7
- Takt: $\leq$ 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

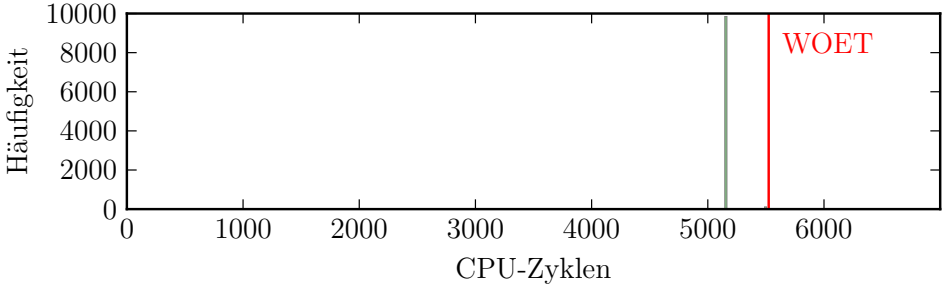


- Pipelining: spekulative Ausführung (engl. Branch Prediction)
- Takt: dynamische Änderung möglich (engl. Dynamic Frequency Voltage Scaling, DVFS)
- Cache: heuristische Strategien
- Scheduling
  - Keine Priorisierung von Aufgabe: Completely Fair Scheduler
  - Timer-Interrupts möglich

    $\Rightarrow$ **Verdrängung** möglich

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

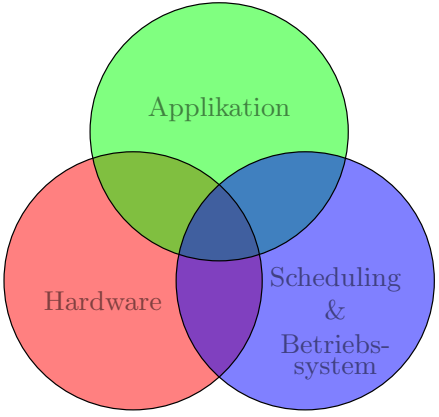
`count_positive` auf EZS-Board



- Geringere Komplexität $\rightsquigarrow$ *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?



1. **Applikation**: Eingabedaten, …
2. **Hardware**: Caches, Pipelining, …
3. **Scheduling**: Höherpriore Aufgaben, Interrupts, Overheads, …

   ⇒ (gegenseitige) Einflüsse **kaum vermeidbar**, aber reduzierbar

Übersicht

Interruptbehandlung

- ISR & DSR
- eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

- Zeitgeber
- Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

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:

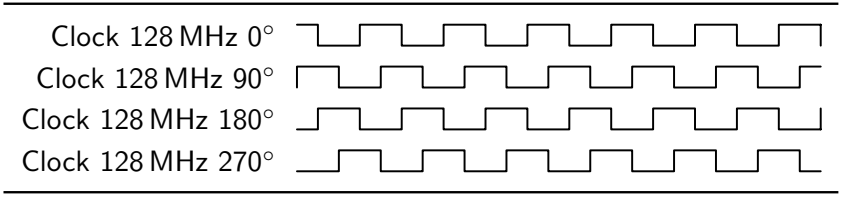
Abfragebetrieb (Polling) Aktives Auslesen des Zählers

$\rightsquigarrow$ bis Erreichen eines vorgegebenen Wertes

Unterbrecherbetrieb (Interrupt) Zähler unterbricht System

$\rightsquigarrow$ Erreichen eines konfigurierten Zählerstandes

Probleme von Taktgebern



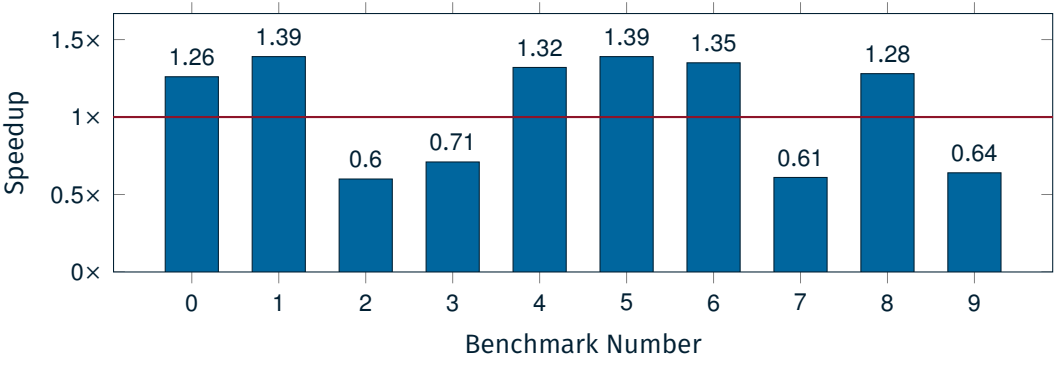
- Clock-Drift
  - Abweichung der internen Uhr von Realzeit
  - Temperaturabhängiger Phasenunterschied
  - Äußerst kritisch in verteilten Echtzeitsystemen
  - Quarz: $\approx 10^{-6}$ sec/sec = 1 sec in 11,6 Tagen

Lösung

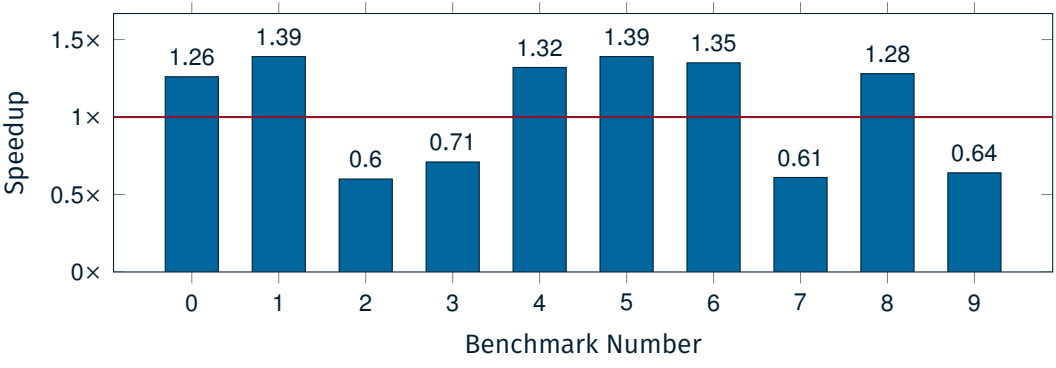
- Messung mit externer, hochauflösender Uhr

  $\Rightarrow$ *Oszilloskop* $\rightsquigarrow$ Übungsaufgabe

Einschub: Zusammenfassung von Ergebnissen (I)

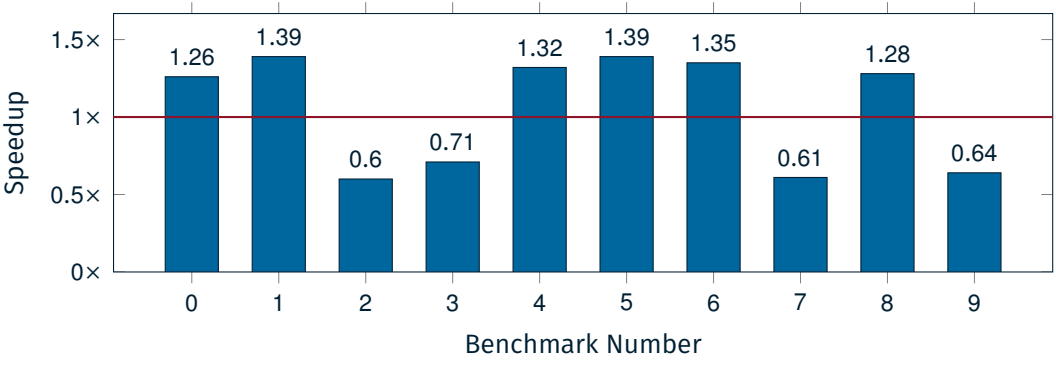


Einschub: Zusammenfassung von Ergebnissen (I)



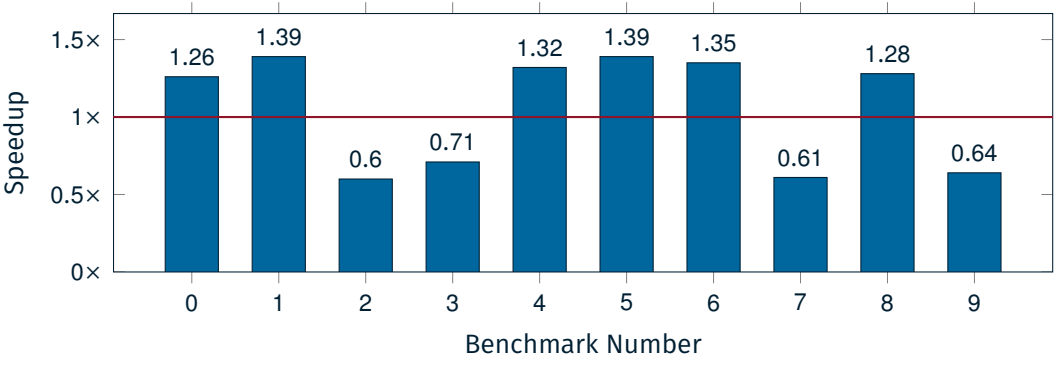
- Aritmetisches Mittel:
  $\frac{1}{10} \sum [1.26, 1.39, 0.60, 0.71, 1.32, 1.39, 1.35, 0.61, 1.28, 0.64] = 1.055$
  $\Rightarrow 5.5\,\%$ Verbesserung im Mittel

Einschub: Zusammenfassung von Ergebnissen (I)



- Aritmetisches Mittel:
  $\frac{1}{10} \sum [1.26, 1.39, 0.60, 0.71, 1.32, 1.39, 1.35, 0.61, 1.28, 0.64] = 1.055$
  $\Rightarrow$ 5.5 % Verbesserung im Mittel **NEIN!**

Einschub: Zusammenfassung von Ergebnissen (I)



- Aritmetisches Mittel:
  $\frac{1}{10}\sum[1.26, 1.39, 0.60, 0.71, 1.32, 1.39, 1.35, 0.61, 1.28, 0.64] = 1.055$
  $\Rightarrow 5.5\,\%$ 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

Interruptbehandlung

- ISR & DSR
- eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

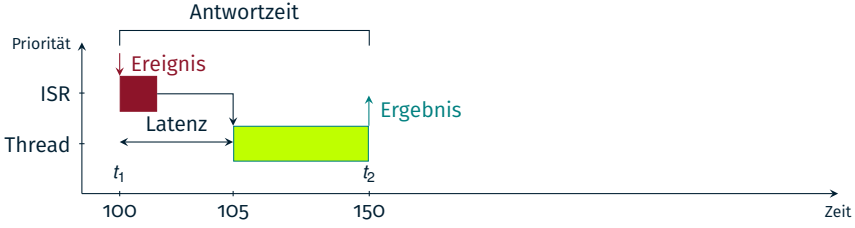
- Zeitgeber
- Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

Aufgabe: Antwortzeit

- Auflösung von Zeiten in eCos

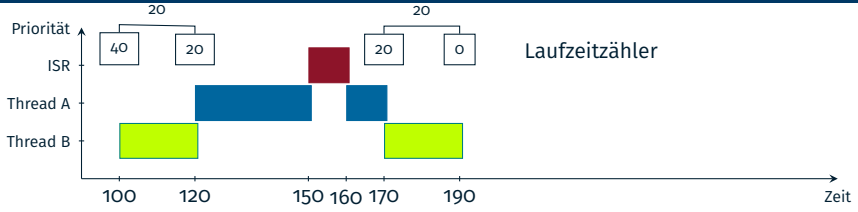
Ausführungszeit & Antwortzeit



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

Übersicht

Interruptbehandlung

- ISR & DSR
- eCos-Unterbrechungsbehandlung

Einflüsse der Ausführungszeit

Zeitmessung

- Zeitgeber
- Probleme von Messungen

Was bedeutet Antwortzeit?

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
  → 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?*

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;
```

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

  $\rightsquigarrow$ `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*

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 welchen Änderung des Systemzählers anpassen?
  - ⇝ Welche Auflösung ist erreichbar?
    - Jeder Thread besitzt einen eigenen Stack!
    - Thread-übergreifende Messungen möglich
- *Abfragebetrieb*

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 welchen 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“
  - $1000000/42 = 23809.5238...$ vs. $\texttt{floor}(1000000/42)$
  - $\approx 15\,\mu\text{s}$ Rundungsfehler bei $1\,\text{s}$ Zeitmessung

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“
  - $1000000/42 = 23809.5238...$ vs. $\texttt{floor}(1000000/42)$
  - $\approx 15\,\mu\text{s}$ Rundungsfehler bei $1\,\text{s}$ 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`

Besprechung der Übungsaufgabe

„Antwortzeit“

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`.