

# Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Messung von Ausführungszeiten & Antwortzeiten

**Simon Schuster   Phillip Raffeck**

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

Wintersemester 2019/20



- 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

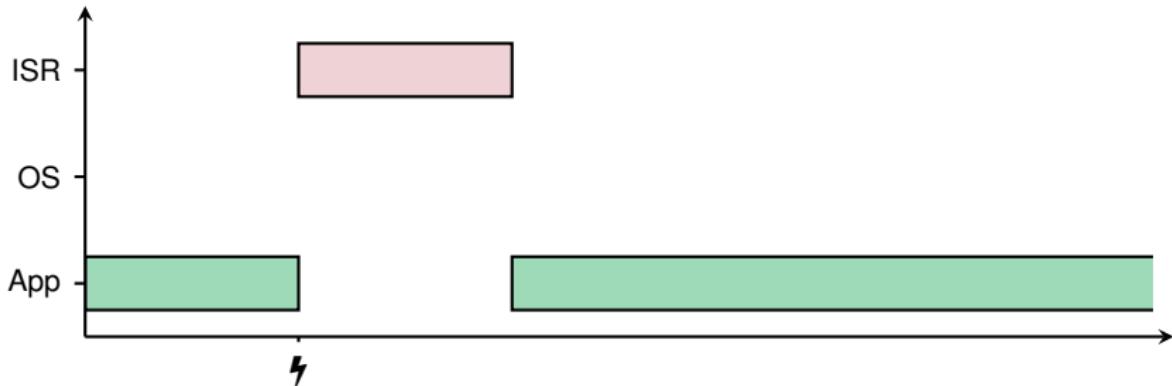


- Problem: Debugger reagiert nicht, Board lässt sich nicht flashen
  - ☞ USB-Kabel abstecken & anstecken
- Falls immer noch keine Reaktion
  - ☞ make unbrick, Anweisungen des Befehls folgen
- Keine leuchtenden LEDs
  - ☞ anderes Board probieren
- Gehäuse für EZS-Board verwenden
- Vorsicht bei wackeligen 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 . . .



- 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

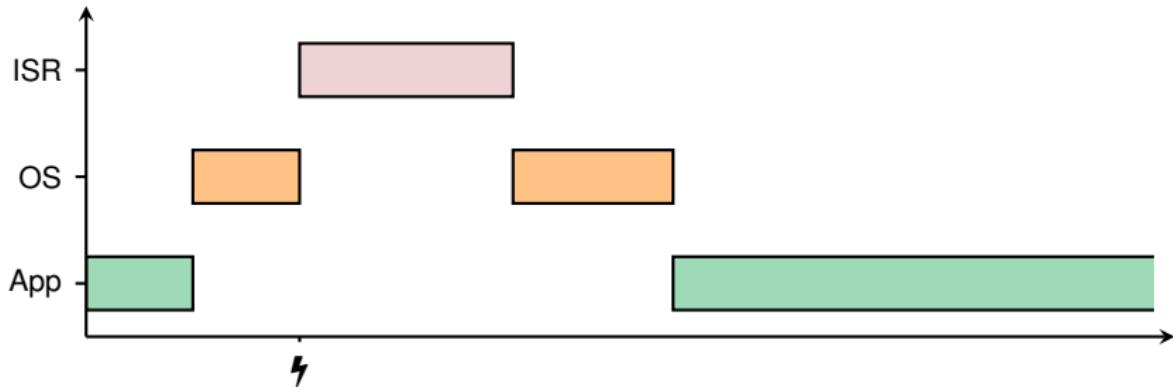




## Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

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



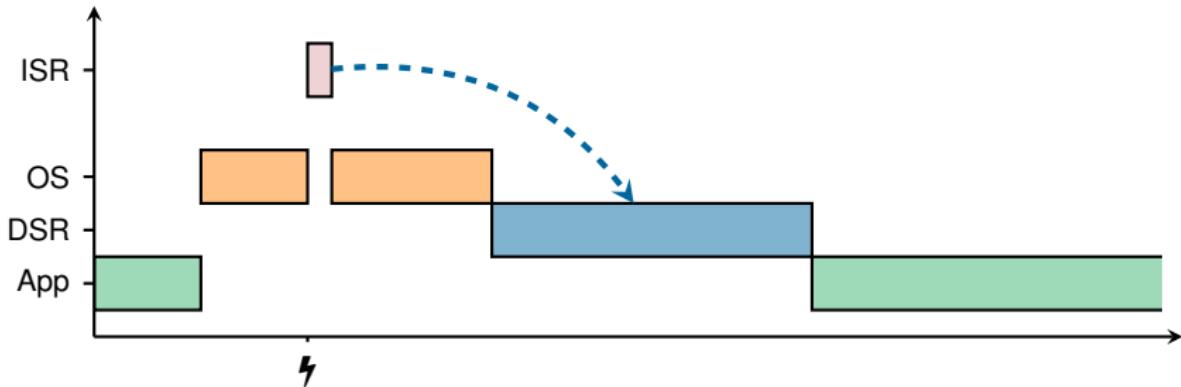


## Interrupt-Service-Routinen-Ausführung

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



# Unterbrechungen, Prolog, Epiloge



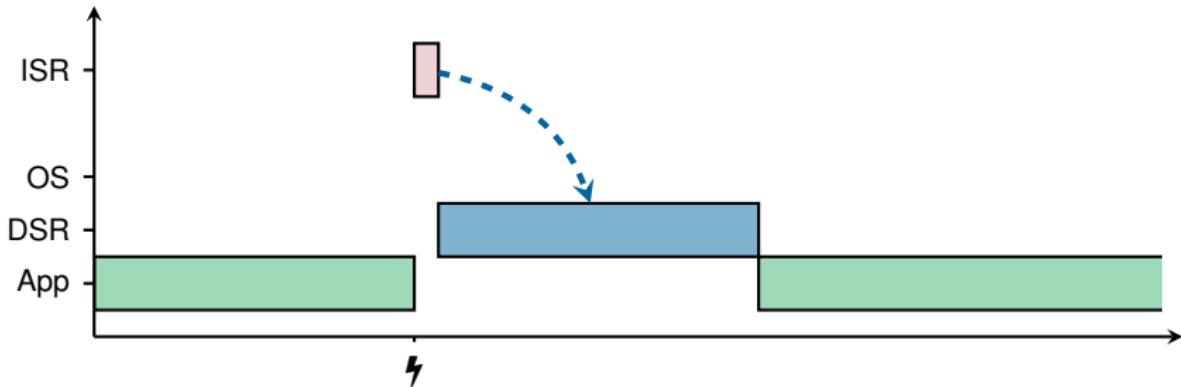
## Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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



# Unterbrechungen, Prolog, Epiloge



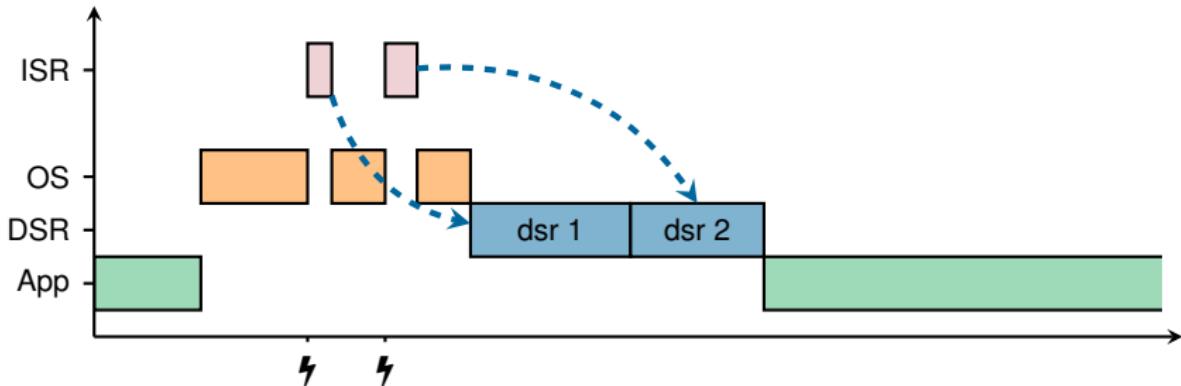
## Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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



# Unterbrechungen, Prolog, Epiloge



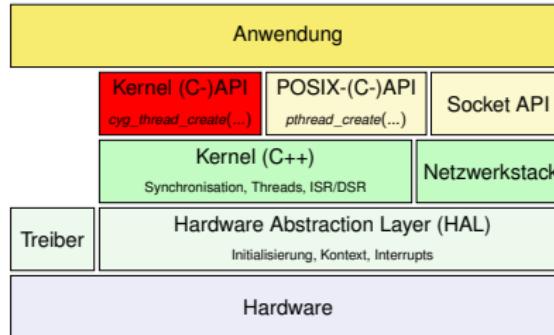
## Deferrable-Service-Routinen-Ausführung

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

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



- 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<sup>1</sup>

```
#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

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

# Wie behandle ich einen Interrupt?

## Anmeldung von ISR und DSR<sup>1</sup>

```
#include <cyg/kernel/kapi.h>
void cyg_interrupt_create
(
    cyg_vector_t vector,
    cyg_priority_t priority, 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)

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

# Wie behandle ich einen Interrupt?

## Anmeldung von ISR und DSR<sup>1</sup>

```
#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

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

# Wie behandle ich einen Interrupt?

## Anmeldung von ISR und DSR<sup>1</sup>

```
#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)

---

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

# Wie behandle ich einen Interrupt?

## Anmeldung von ISR und DSR<sup>1</sup>

```
#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)
```

---

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

# Wie behandle ich einen Interrupt?

## Anmeldung von ISR und DSR<sup>1</sup>

```
#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*

<sup>1</sup><http://ecos.sourceware.org/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



## 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?*



## 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**



## 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



## 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** 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



# 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  }
```

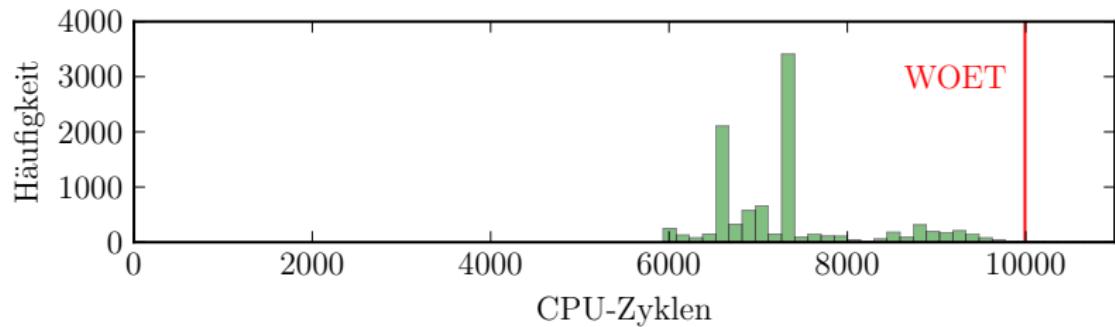
## Benchmark-Programm

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

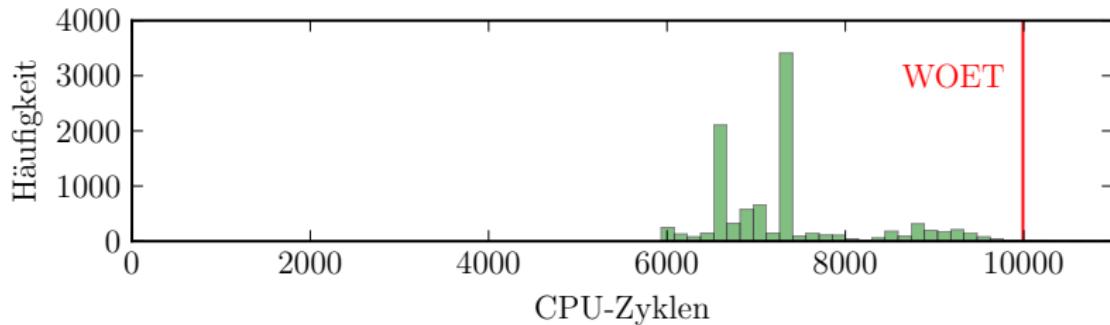
👉 Wie verhält sich die **Ausführungszeit bei 10.000 Messungen?**



# Histogramm: Ausführungszeiten



# Histogramm: Ausführungszeiten

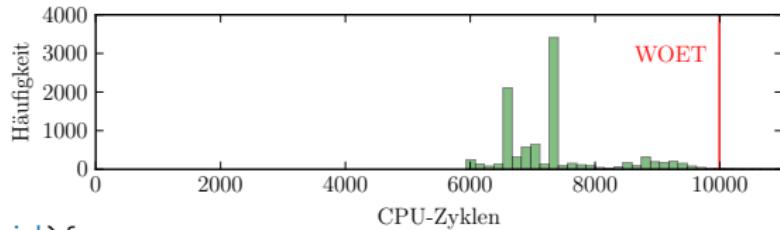


- Maximum der beobachteten Ausführungszeiten (engl. worst-observed execution time **WOET**)
- 10.000 Ausführungen der Funktion `count_positive()`
- Maximum: 9992 CPU-Zyklen
- Hohe Streuung der Ausführungszeiten

Warum?



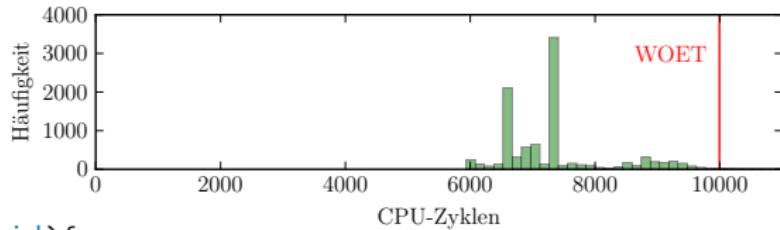
# Setup der Messung: Applikation



```
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



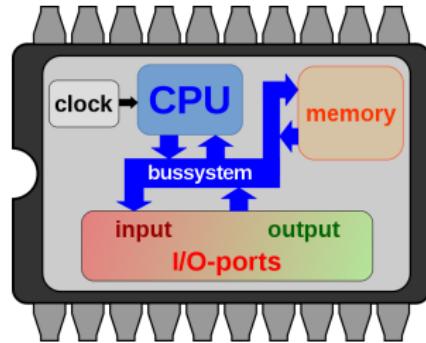
```
1 void main(void){  
2     int64_t array[ARRAY_SIZE];  
3     // alle Eingabedaten mit 0 initialisiert!  
4     memset(array, 0, sizeof(array));  
5     start    = get_time();  
6     positive = count_positive(array, ARRAY_SIZE);  
7     stop     = get_time();  
8     printf("%lu", stop-start); 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

- Ausführungszeit unabhängig von unterschiedlichen Eingabedaten
  - Feste Länge
  - Immer mit 0 initialisiert
-  **kein Einfluss** der Eingabedaten

Woher kommen dann die Schwankungen?



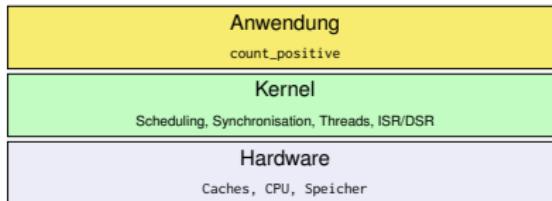
# Setup der Messung: Hardware



- 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

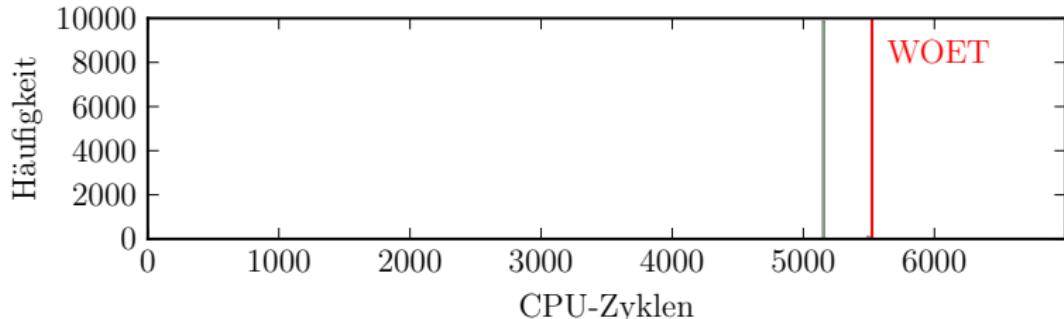


- Pipelining: spekulative Ausführung (engl. Branch Prediction)
- Takt: dynamische Änderung möglich (engl. Dynamic Frequency Voltage Scaling, DVFS)
- Cache: heuristische Strategien
- Scheduling
  - Keine Priorisierung von Aufgabe: Completely Fair Scheduler
  - Timer-Interrupts möglich
    - ☞ **Verdrängung**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

Wie verhält sich die Messung auf dem EZS-Board?



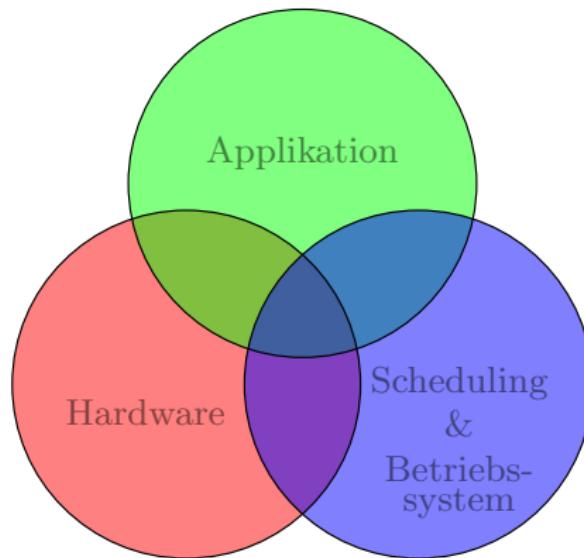
## count\_positive auf EZS-Board



- 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





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



- 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 (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:

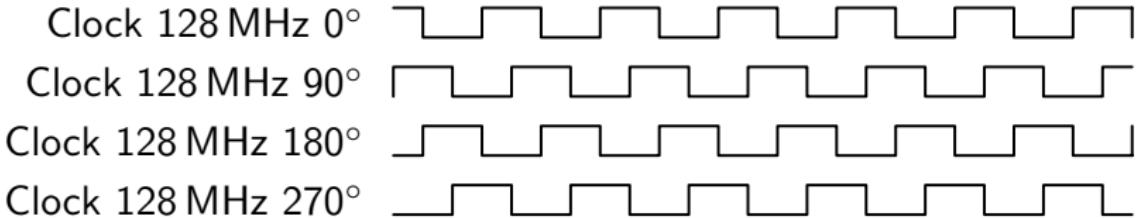
**Abfragebetrieb (Polling)** Aktives Auslesen des Zählers

~ bis Erreichen eines vorgegebenen Wertes

**Unterbrecherbetrieb (Interrupt)** Zähler unterbricht System

~ Erreichen eines konfigurierten Zählerstandes.





## ■ 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*  $\leadsto$  Übungsaufgabe

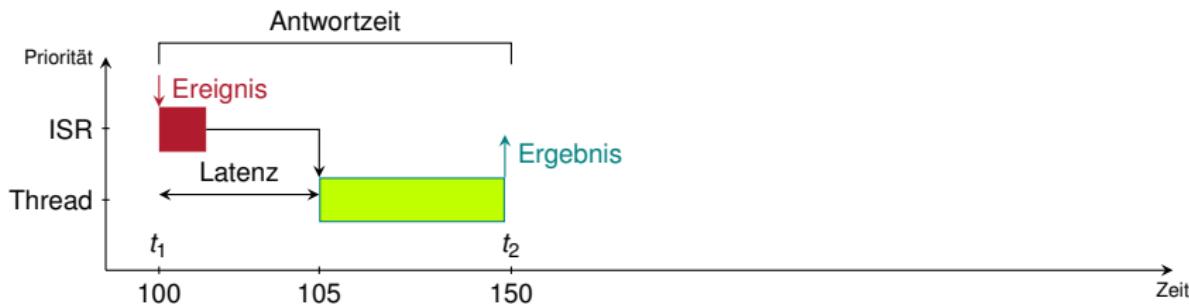


- *How Not To Lie With Statistics: The Correct Way To Summarize Benchmark Results [1]*
- Wichtige Regeln
  1. Für **normalisierte Werte** nicht das arithmetische Mittel verwenden
  2. Für **normalisierte Werte** das geometrische Mittel verwenden
  3. Für **Rohdaten (mit Einheiten)** das arithmetische 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]



- 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



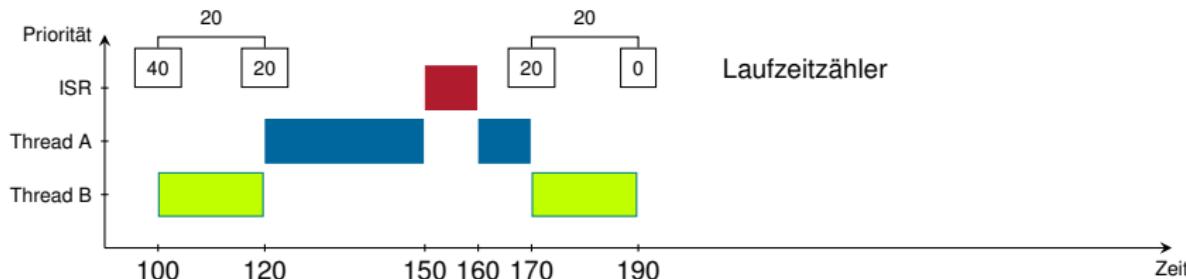


## Stopuhr

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



- 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



## 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 *globale* Variable  
→ viele unabhängige Messzeitpunkte
- `ezs_watch_stop(cyg_uint32 *state)` gibt Zeitdifferenz in *Ticks* zurück

### Hinweis

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

### Hinweis

Auflösung der Zählers in Bruchteilen von Nanosekunden:

→ `ezs_counter_get_resolution()`



- Viele API-Funktionen erwarten Parameter der Einheit *Clock-Ticks* – Wieso?



- 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 percentage);
```

- 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*

## Hinweis

Auflösung des Zählers in Pikosekunden:

→ `ezs_counter_resolution_ps()`

Kann das problematisch sein?



```
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



```
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  $\leadsto$  siehe make doc



# Besprechung der Übungsaufgabe

## „Antwortzeit“



[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>.

