

Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Messung von Ausführungszeiten & Antwortzeiten

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>

07.11.2016

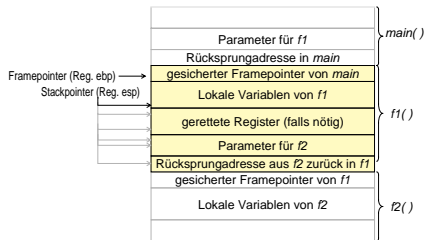


-
- 1 Wiederholung: Stack-Aufbau
 - 2 Einflüsse der Ausführungszeit
 - 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
 - 4 Was bedeutet Antwortzeit?
 - 5 Aufgabe: Antwortzeit



Wiederholung: Stack-Aufbau

```
1 int main() {  
2     int a, b, c;  
  
3     a = 10;  
4     b = 20;  
  
5     f1(a, b);  
  
6     return (a);  
7 }
```



Stack-Frame zur Verwaltung des Stacks

- Lokale Variablen
- Funktionsparameter
- Rücksprungadressen

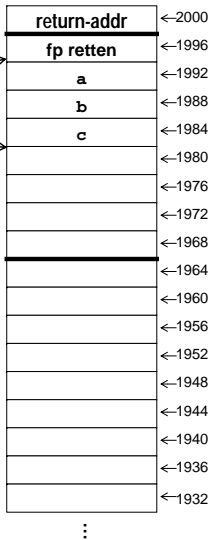


Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
  
    a = 10;  
    b = 20;  
  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

*Stack-Frame für
main erstellen
&a = fp-4
&b = fp-8
&c = fp-12*

sp fp

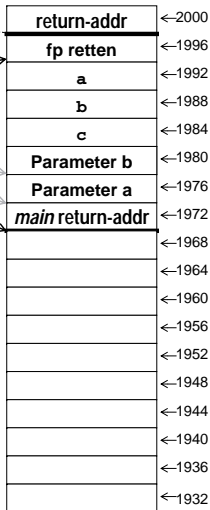


Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

*Parameter
auf Stack legen
Bei Aufruf
Rücksprungadresse
auf Stack legen*

sp fp



⋮



Ablauf Funktionsaufruf

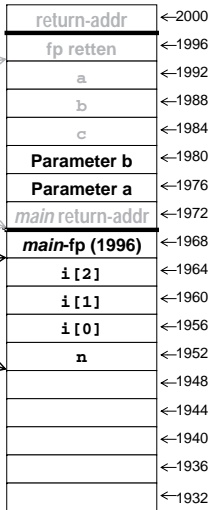
```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

```
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```

Stack-Frame für
f1 erstellen
und aktivieren

$&x = fp+8$
 $&y = fp+12$
 $&(i[0]) = fp-12$
 $&n = fp-16$

$i[4] = 20$ würde
return-Addr. zerstören



sp fp

y x sp fp

⋮

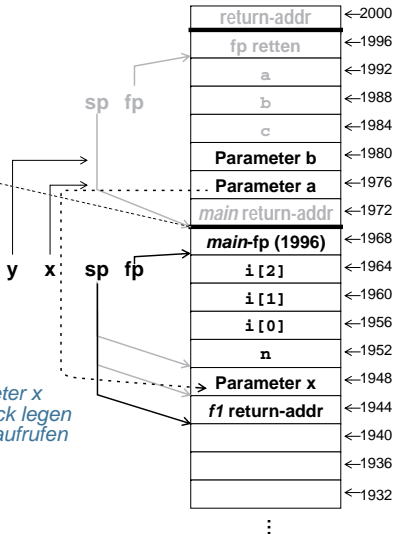


Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

```
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```

*Parameter x
auf Stack legen
und f2 aufrufen*



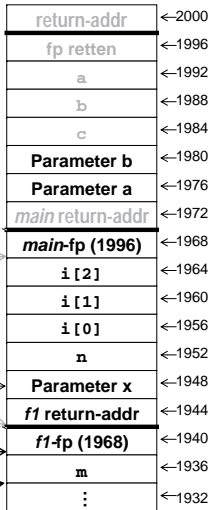
Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

```
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```

```
int f2(int z) {  
    int m;  
    m = 100;  
    return(z+1);  
}
```

*Stack-Frame für
f2 erstellen
und aktivieren*

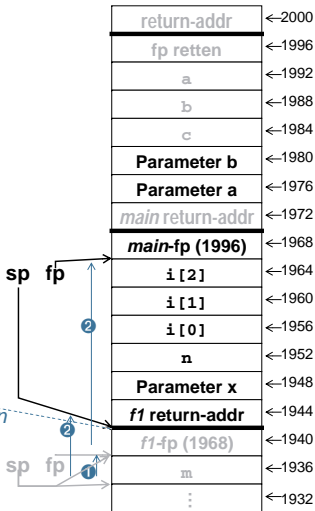


Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {
    int a, b, c;
    a = 10;
    b = 20;
    f1(a, b);
    return(a);
}

int f1(int x, int y) {
    int i[3];
    int n;
    x++;
    n = f2(x);
    return(n);
}

int f2(int z) {
    int m;
    m = 100;
    return(z+1);
}
```



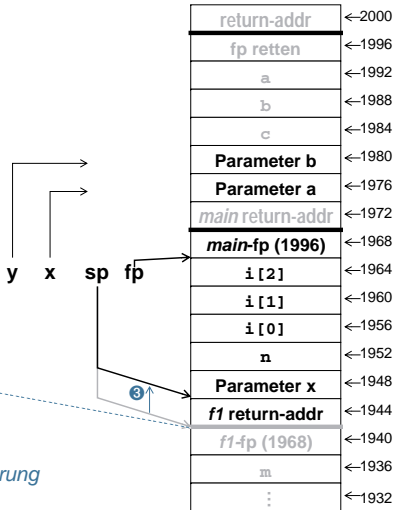
Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

```
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```

```
int f2(int z) {  
    int m;  
    m = 100;  
    return(z+1);  
}
```

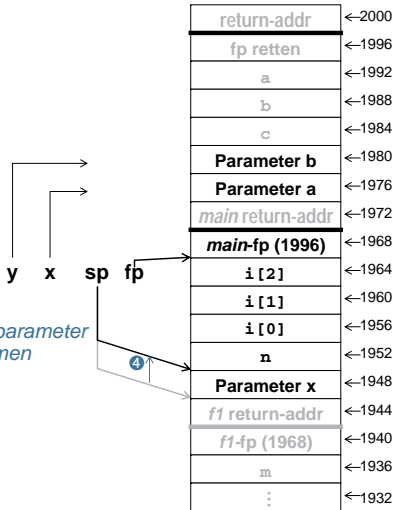
Rücksprung
③ return



Ablauf Funktionsaufruf

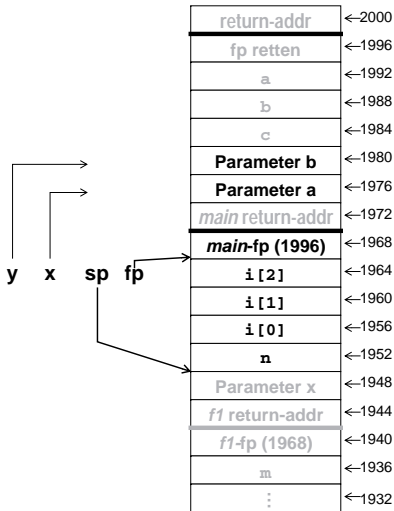
```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}  
  
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```

④ *Aufrufparameter
abräumen*



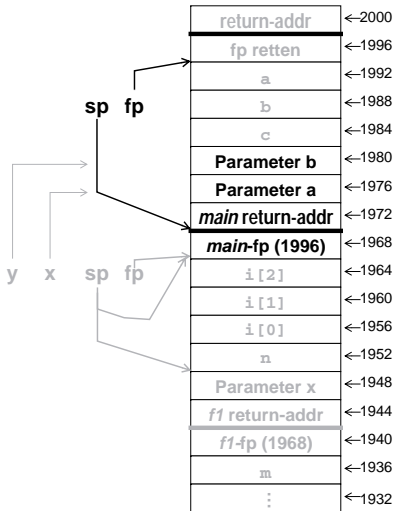
Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}  
  
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```



Ablauf Funktionsaufruf

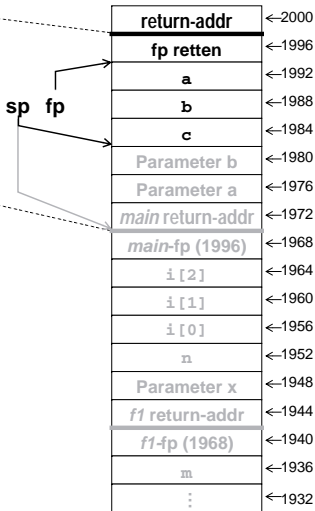
```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}  
  
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```



Ablauf Funktionsaufruf

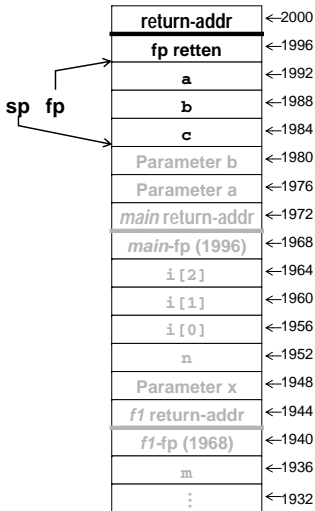
```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

```
int f1(int x, int y) {  
    int i[3];  
    int n;  
    x++;  
    n = f2(x);  
    return(n);  
}
```



Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    return(a);  
}
```

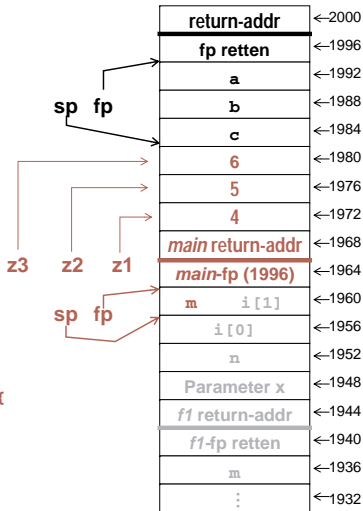


Ablauf Funktionsaufruf

```
int main() {  
    int a, b, c;  
    a = 10;  
    b = 20;  
    f1(a, b);  
    f3(4, 5, 6);  
}
```

*was wäre, wenn man nach
f1 jetzt eine Funktion f3
aufrufen würde?*

```
int f3(int z1, int z2, int z3) {  
    int m;  
  
    return(m);  
}
```



- 1 Wiederholung: Stack-Aufbau
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit**
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit



-
- 1 Wiederholung: Stack-Aufbau
 - 2 Einflüsse der Ausführungszeit**
 - 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
 - 4 Was bedeutet Antwortzeit?
 - 5 Aufgabe: Antwortzeit



Beispiel: Ausführungszeit

```
1  uint64_t count_positive(uint64_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(uint64_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  }
```

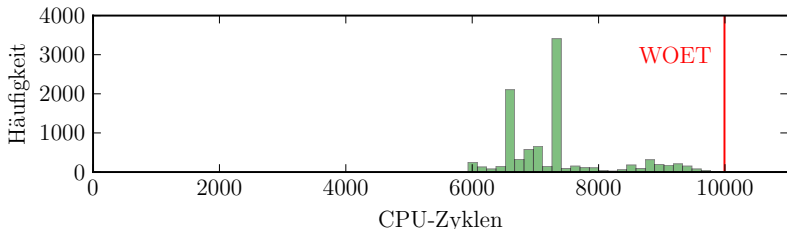
Benchmark-Programm

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

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



Histogramm: Ausführungszeiten

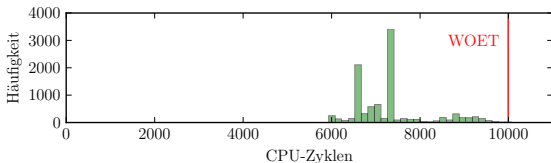


- Maximum der beobachteten Ausführungszeiten (engl. worst-observed execution time **WOET**)
- 10.000 Ausführungen der Funktion `count_positive()`
- Maximum: 9992 CPU-Zyklen
- Hohe Streuung der Ausführungszeiten

Warum?



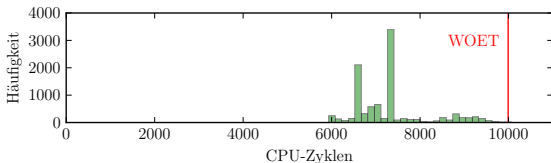
Setup der Messung: Applikation



```
1  uint64_t array[ARRAY_SIZE];
2  void main(void){
3      memset(array, 0, sizeof(array)); // alle Eingabedaten mit 0 initialisiert!
4      start    = get_time();
5      positive = count_positive(array, ARRAY_SIZE);
6      stop     = get_time();
7      printf("%lu", stop-start);
8  }
```



Setup der Messung: Applikation



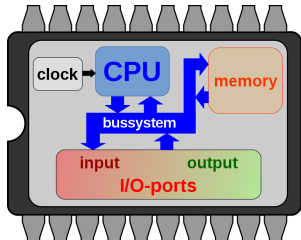
```
1  uint64_t array[ARRAY_SIZE];
2  void main(void){
3      memset(array, 0, sizeof(array)); // alle Eingabedaten mit 0 initialisiert!
4      start    = get_time();
5      positive = count_positive(array, ARRAY_SIZE);
6      stop     = get_time();
7      printf("%lu", stop-start);
8  }
```

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

Woher kommen dann die Schwankungen?

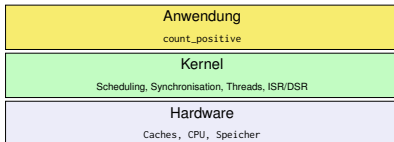


Setup der Messung: Hardware



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

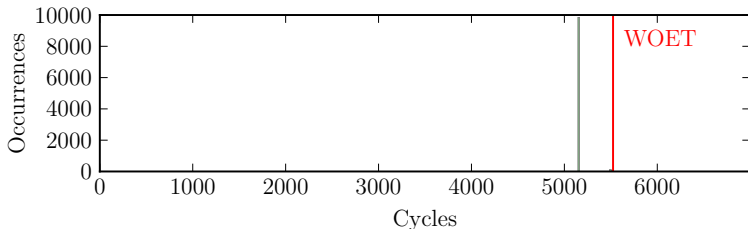




- Pipelining: spekulative Ausführung (engl. Branch Prediction)
- Takt: dynamische Änderung möglich (engl. Dynamic Frequency Voltage Scaling, DVFS)
- Cache: heuristische Strategien
- Scheduling
 - Keine Priorisierung von Aufgabe: Completely Fair Scheduler
 - Timer-Interrupts möglich
 - 👉 **Verdrängung**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

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



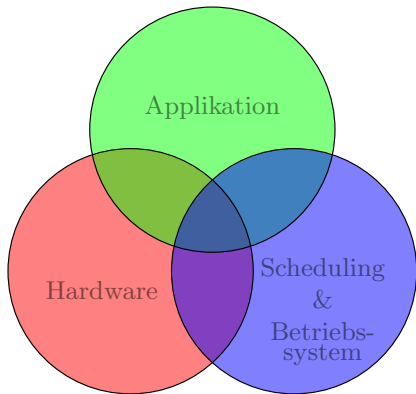


- Geringere Komplexität \rightsquigarrow *weniger* Streuung
- Trotzdem Unterschiede
 - Hardware
 - 3-stufige Pipeline
 - Spekulative Ausführung: ART Accelerator™
 - Betriebssystem: Schwankungen der Ausführungszeit trotz eines Threads?

Wissen über Hard- & Software essenziell für Echtzeitsysteme?



Was beeinflusst die Ausführungszeit?



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



- 1 Wiederholung: Stack-Aufbau
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung**
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit



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:

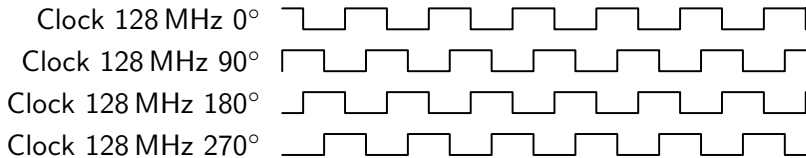
Abfragebetrieb (Polling) Aktives Auslesen des Zählers

~> bis Erreichen eines vorgegebenen Wertes

Unterbrecherbetrieb (Interrupt) Zähler unterbricht System

~> Erreichen eines konfigurierten Zählerstandes.






■ Clock-Drift

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

Lösung

- Messung mit externer, hochauflösender Uhr

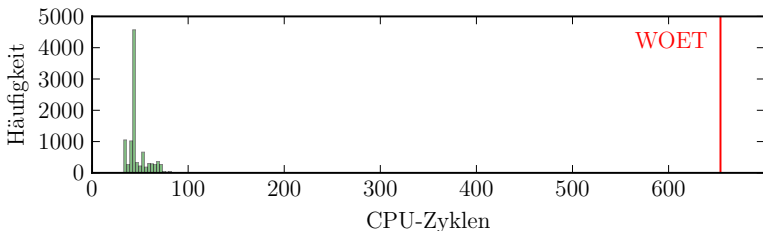
 *Oszilloskop* \leadsto Übungsaufgabe



```
1 start = get_ticks(); // ticks ~ processor cycles/timer values
2 // nothing executed here
3 stop = get_ticks();
4 printf("%lu", stop-start);
```



```
1 start = get_ticks(); // ticks ~ processor cycles/timer values
2 // nothing executed here
3 stop = get_ticks();
4 printf("%lu", stop-start);
```



- Overhead-Bestimmung für Intel-CPU; EZS-Board \leadsto *erweiterte Übungen*
- Overhead-Bestimmung vernachlässigt
 - Instruktionen bis zum 1. Abfragen des Timer-Registers
 - Instruktionen nach dem 2. Abfragen des Timer-Registers
 - *Weitere Störfaktoren?*

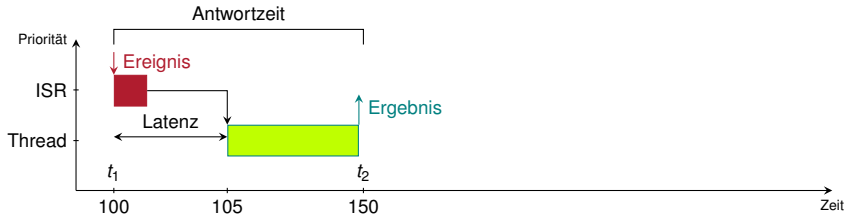


- *How Not To Lie With Statistics: The Correct Way To Summarize Benchmark Results* [1]
- Wichtige Regeln
 1. Für normalisierte Werte nicht das arithmetische Mittel verwenden
 2. Für normalisierte Werte das geometrische Mittel verwenden
 3. Für Rohdaten (mit Einheiten) das arithmetische Mittel verwenden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



- 1 Wiederholung: Stack-Aufbau
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?**
- 5 Aufgabe: Antwortzeit



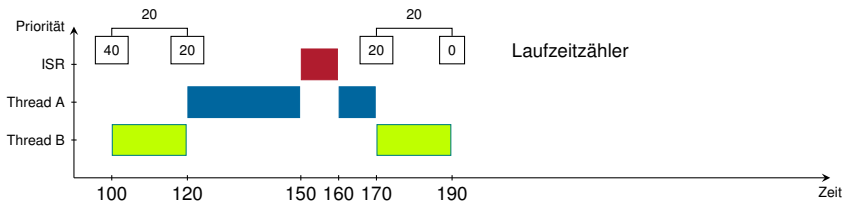


Stoppuhr

- 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 Antwortzeit



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



- 1 Wiederholung: Stack-Aufbau
- 2 Einflüsse der Ausführungszeit
- 3 Zeitmessung
 - Zeitgeber
 - Probleme von Messungen
- 4 Was bedeutet Antwortzeit?
- 5 Aufgabe: Antwortzeit**



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 *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 Zähler in Pikosekunden:

→ `ezs_counter_resolution_ps()`



Zu implementieren:

```
void ezs_lose_time(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 welcher 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?



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 1
5 // counter will overflow after ??? sec
```

- **Überläufe:** *Dauer der Messung* beachten
 - 32-Bit Timer in 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



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 1
5 // counter will overflow after ??? sec
```

- **Überläufe:** *Dauer der Messung* beachten
 - 32-Bit Timer in 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 Nano-Sekunden



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>.



Fragen?

Fragen?

