

Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Analyse von Ausführungszeiten

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



Übersicht

1 Rekapitulation: Worst-Case Execution Time

2 Ausflug: Cache-Analyse
■ Grundlagen
■ Beispiel: LRU-Cache

3 WCET-Analyse auf dem EZS-Board
■ GPIOs
■ aiT



Übersicht

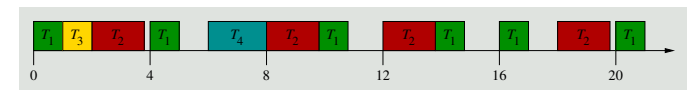
1 Rekapitulation: Worst-Case Execution Time

2 Ausflug: Cache-Analyse
■ Grundlagen
■ Beispiel: LRU-Cache

3 WCET-Analyse auf dem EZS-Board
■ GPIOs
■ aiT



Worst-Case Execution Time



■ Eine entscheidende Größe für:

- Statische **Ablaufplanung**
- **Planbarkeitsanalyse**
- **Übernahmepfung**
- ...

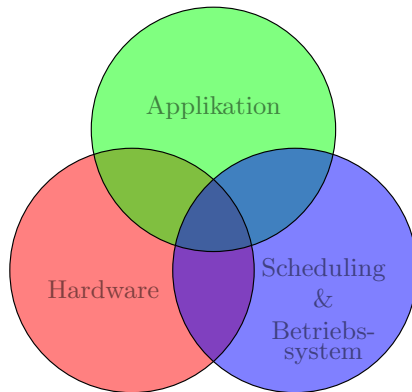


Es geht um den **schlimmsten Fall** (engl. *worst case*)

→ Obere Schranke für **alle** Fälle



Wiederholung: Einflüsse auf die Ausführungszeit



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



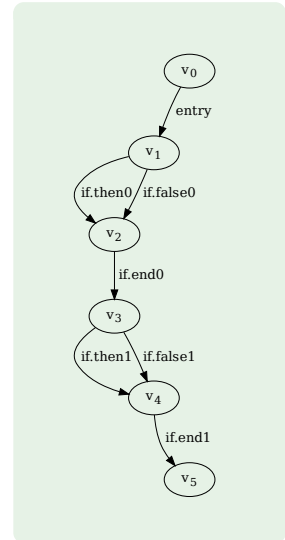
WCET-Analyse – Flusssensitive Informationen

Beispiel

```

1 void func(int a) { // entry
2   if (a % 2) {
3     f(); // if.then0
4   }
5   ++a; // if.end0
6
7   if(a % 2) {
8     g(); // if.then1
9   }
10  ... // if.end1
11 }
    
```

- T-Graph aus Kontrollflussgraph abgeleitet
- Worst Case == maximaler Fluss durch T-Graph
- Nebenbedingungen des Flussproblems:
 - $freq(entry) = freq(if.then0) + freq(if.false0)$
 - $freq(if.then0) + freq(if.false0) = freq(if.end0)$
 - ...
- Nebenbedingungen werden für Integer Linear Program (ILP) verwendet:
Zielfunktion:



$max : cost(entry) \cdot freq(entry) + cost(if.then0) \cdot freq(if.then0) + \dots$



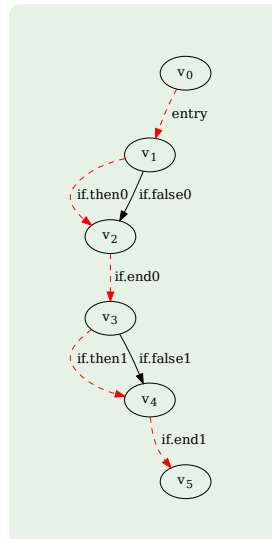
WCET-Analyse – Flusssensitive Informationen

Pessimistische Annahmen der IPET

```

1 void func(int a) { // entry
2   if (a % 2) {
3     f(); // if.then0
4   }
5   ++a; // if.end0
6
7   if(a % 2) {
8     g(); // if.then1
9   }
10  ... // if.end1
11 }
    
```

- Für jeden Basis Block: WCET notwendig
- Schleifengrenzen notwendig
- Struktureller Ansatz: *nicht kontextsensitiv*
- Im Beispiel: *beide Pfade* aufgenommen
⇒ **pessimistische Annahme**
- *Nachträgliche* Reduktion dieser Überabschätzung
☞ **abstrakte Interpretation** \rightsquigarrow VEZS



WCET eines Basis Blocks?

Wiederholung aus der Vorlesung



Grundproblem: Ausführungszyklen von Instruktionen zählen

<pre> _getop : link a6,#0 // 16 Zyklen moveml #0x3020,sp@- // 32 Zyklen movel a6@(8),a2 // 16 Zyklen movel a6@(12),d3 // 16 Zyklen </pre>	<ul style="list-style-type: none"> ■ Ergebnis: $e_{getop} = 80$ Zyklen ■ Annahmen: <ul style="list-style-type: none"> – Obere Schranke für jede Instruktion – Obere Schranke der Sequenz durch Summation
---	--

Quelle: Peter Puschner [2]



Äußerst pessimistisch und zum Teil falsch

- **Falsch** für mit *Laufzeitanomalien* behaftete Systeme
 - (intuitive) Annahmen über Worst-Case-Verhalten verletzt
 - Lokales Maximum führt nicht zwingend zu globalem Maximum
- **Pessimistisch** für *moderne Prozessoren*
 - Pipeline, Cache, Branch Prediction, Prefetching, ... haben großen Anteil an der verfügbaren Rechenleistung heutiger Prozessoren
 - Blanke Summation einzelner WCETs ignoriert diese Maßnahmen



Hardware-Analyse

Wiederholung aus der Vorlesung

- Hardware-Analyse teilt sich in verschiedene Phasen
 - Aufteilung ist nicht dogmenhaft festgeschrieben
- Integration von Pfad- und Cache-Analyse
 - Pipeline-Analyse
 - Wie lange dauert die Ausführung der Instruktionssequenz?
 - Cache- und Pfad-Analyse sowie WCET-Berechnung
 - Cache-Analyse wird direkt in das Optimierungsproblem integriert
- Separate Pfad- und Cache-Analyse
 - Cache-Analyse
 - Kategorisiert Speicherzugriffe mit Hilfe einer Datenflussanalyse
 - Pipeline-Analyse
 - Ergebnisse der Cache-Analyse werden anschließend berücksichtigt
 - Pfad-Analyse und WCET-Berechnung



Übersicht

- Rekapitulation: Worst-Case Execution Time
- Ausflug: Cache-Analyse
 - Grundlagen
 - Beispiel: LRU-Cache
- WCET-Analyse auf dem EZS-Board
 - GPIOs
 - aiT



Grundlagen der Cache-Analyse [3, Kapitel 22]

Wiederholung aus der Vorlesung

- Cache: ein kleiner, schneller Zwischenspeicher
 - Zugriffszeiten variieren je nach Zustand des Caches enorm:
 - Treffer (engl. *hit*), Daten/Instruktion sind im Cache $\sim e_h$
 - Fehlschlag (engl. *miss*), Daten/Instruktion sind nicht im Cache $\sim e_m$
- Hits sind schneller als Misses: $e_m \gg e_h$
 - Strafe liegt schnell bei > 100 Taktzyklen
- Eigenschaften von Caches mit Einfluss auf deren Analyse
 - Typ
 - Cache für Instruktionen
 - Cache für Daten
 - kombinierter Cache für Instruktionen und Daten
 - Auslegung
 - direkt abgebildet (engl. *direct mapped*)
 - vollasoziativ (engl. *fully associative*)
 - satz- oder mengenassoziativ (engl. *set associative*)
 - Seitenersetzungsstrategie
 - engl. (*pseudo*) *least recently used*, (Pseudo-)LRU
 - engl. (*pseudo*) *first in first out*, (Pseudo-)FIFO



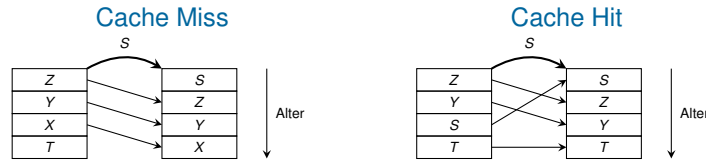
Ergebnisse der Cache-Analyse

- Wissen ob eine Instruktion / ein Datum im Cache ist, oder nicht:
 - must**, die Instruktion ist **garantiert im Cache**
 - man kann immer die schnellere Ausführungszeit e_h annehmen
 - wird für die Vorhersage von Treffern verwendet
 - may**, die Instruktion ist **vielleicht im Cache**
 - ist dies nicht der Fall, muss man die Ausführungszeit e_m annehmen
 - wird für die Vorhersage von Fehlschlägen verwendet
 - persistent**, die Instruktion **verbleibt im Cache**
 - erster Zugriff ist ein Fehlschlag, alle weiteren sind Treffer
 - erster Zugriff: e_m , weitere Zugriffe: e_h
 - ist besonders für Schleifen interessant, die den Cache „füllen“



Beispiel: LRU-Cache, 4-fach assoziativ

LRU = „least recently used“ – Das älteste Element fliegt raus!

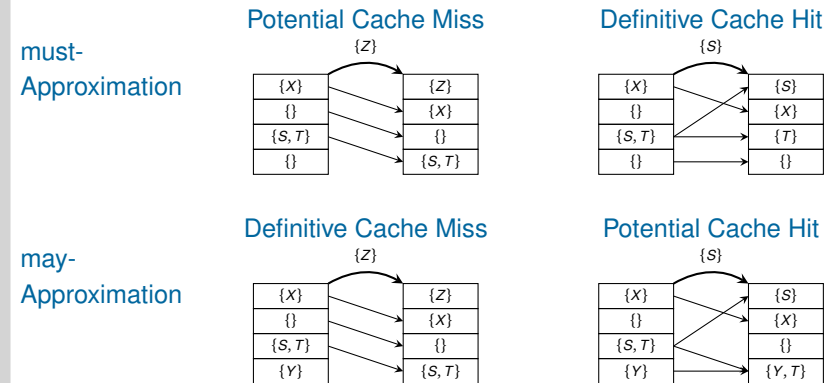


- Caches werden häufig in **Sätze** (engl. *cache set*) unterteilt
 - Ein n -fach assoziativer Cache besitzt pro Satz n Cache-Blöcke
 - Aufnahme von n konkurrierende Speicherstellen pro Satz möglich
 - Inhalt und Verwaltungsinformation (bei LRU das Alter des Blocks) werden sowohl bei Treffern als auch bei Fehlschlägen aktualisiert
- **Konkrete Semantik** des Caches

- **must-Analyse** und **may-Analyse** approximieren diese konkrete Semantik:
 - must** Obergrenze des Alters \rightsquigarrow Unterapproximation des Inhalts
 - Obergrenze \leq Assoziativität \rightsquigarrow garantiert im Cache
 - may** Untergrenze des Alters \rightsquigarrow Überapproximation des Inhalts
 - Untergrenze $>$ Assoziativität \rightsquigarrow garantiert nicht im Cache

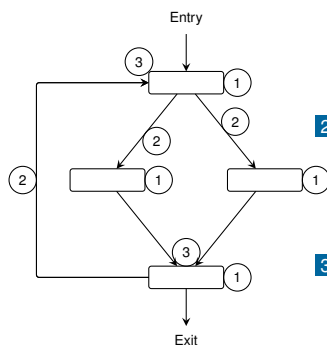
Beispiel: LRU-Cache, Zugriff auf eine Speicherstelle

- Annäherung des Cache-Verhaltens durch **must-** und **may-**Approximation: Aktualisierung von Inhalt und Verwaltungsinformation



Wie funktioniert nun die Cache-Analyse?

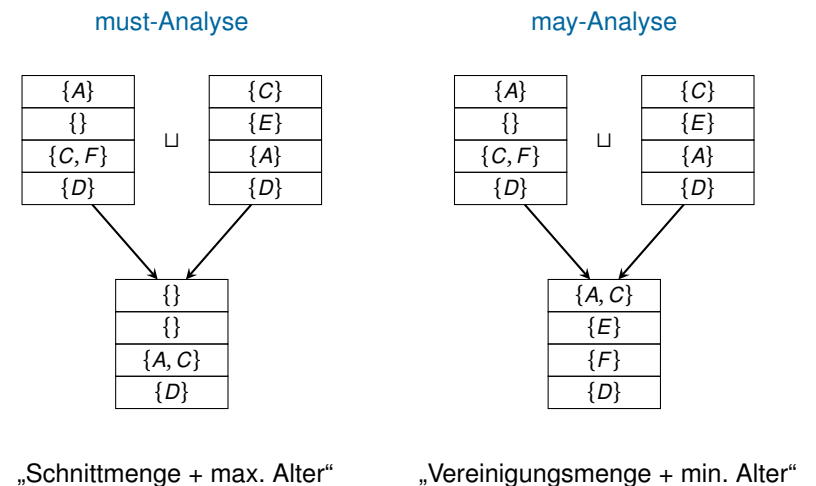
Die Analyse ist eine **Datenflussanalysen** [1, Kapitel 8]



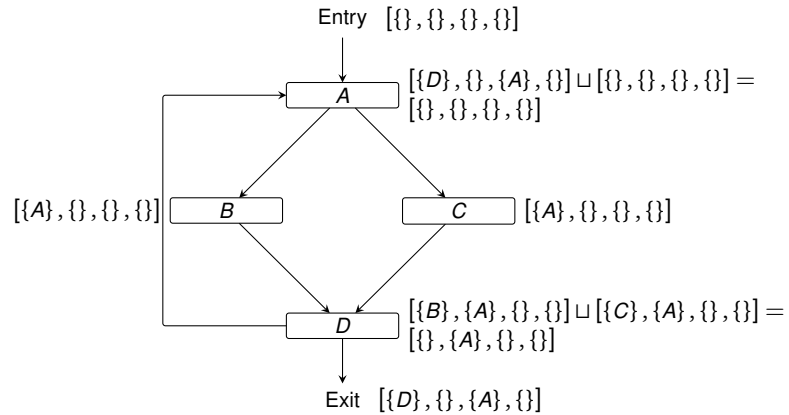
- 1 sammle Information in den Grundblöcken
 - Speicherzugriffe (s. Folie V/14)
 - man bestimmt die **Übertragungsfunktion** (engl. *transfer function*) des Grundblocks
- 2 die Information wird über ausgehende Kanten weiterverteilt
 - Eingabe für die Übertragungsfunktion der folgenden Grundblöcke
- 3 fließt der Kontrollfluss wieder zusammen, wird auch die Information verschmolzen
 - Verschmelzungsoperatoren

Verschmelzungsoperatoren für **must-** und **may-**Analyse

Verschmelzungsoperatoren für **must-** und **may-**Analyse



Beispiel: must-Analyse für LRU



Hier ist leider keine Vorhersage von Treffern möglich ☹️



Praxisrelevante Cache-Implementierungen



Cache-Analyse mithilfe einer Datenflussanalyse funktioniert für **mengenassoziative Caches mit LRU** sehr gut

- Zugriffe auf unterschiedliche Cache-Zeilen beeinflussen sich nicht
- Beispiel TriCore: 2-fach assoziativer LRU-Cache



Es kommen auch andere Strategien zum Einsatz:

- Im Durchschnitt ähnliche Leistung wie LRU, **weniger vorhersagbar**

- **Pseudo-LRU**
 - Cache-Zeilen werden als Blätter eines Baums verwaltet
 - must-Analyse **eingeschränkt brauchbar**, may-Analyse **unbrauchbar**
 - Beispiel: PowerPC 750/755
- **Pseudo-Round-Robin**
 - 4-fach mengenassoziativer Cache mit **einem** 2-bit Ersetzungszähler
 - must-Analyse **kaum**, may-Analyse **überhaupt nicht brauchbar**
 - Beispiel: Motorola Coldfire 5307

Keine belastbaren Aussagen zum STM32F429



Übersicht

- 1 Rekapitulation: Worst-Case Execution Time
- 2 Ausflug: Cache-Analyse
 - Grundlagen
 - Beispiel: LRU-Cache
- 3 WCET-Analyse auf dem EZS-Board
 - GPIOs
 - aiT



GPIO

General Purpose Input/Output

- Pins eines Mikrochips zur *freien Verwendung*
- Konfigurierbar als Ein-/Ausgang
 - Mikrocontroller-Handbuch lesen ☺️
- Zugriff über
 - spezielle Speicheradressen
 - Spezialanweisungen

Ansteuerung

```
void ezs_gpio_set(bool) //PD12
```

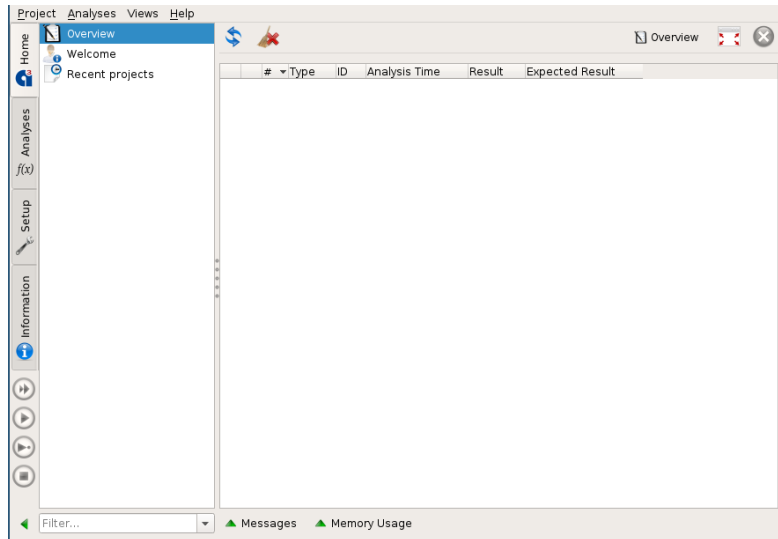
Auswertung

Oszilloskop



Startansicht

AbsInt aiT

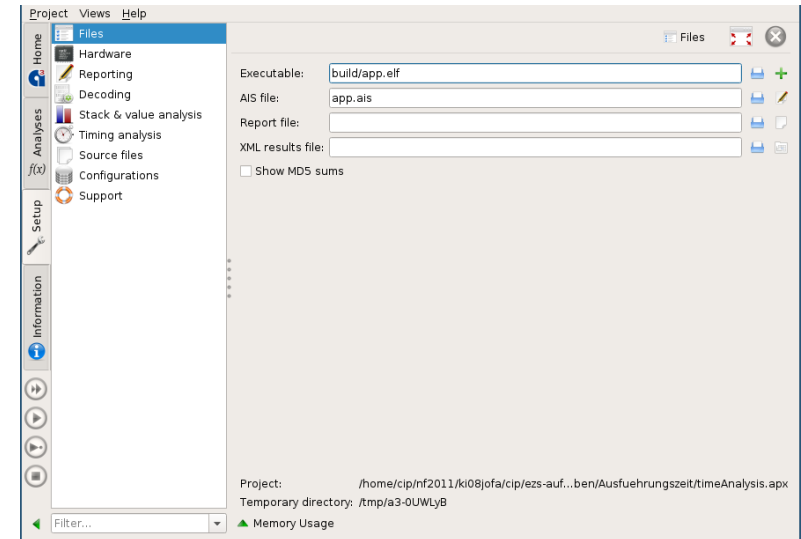


Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

21/39

Projektdateien

AbsInt aiT

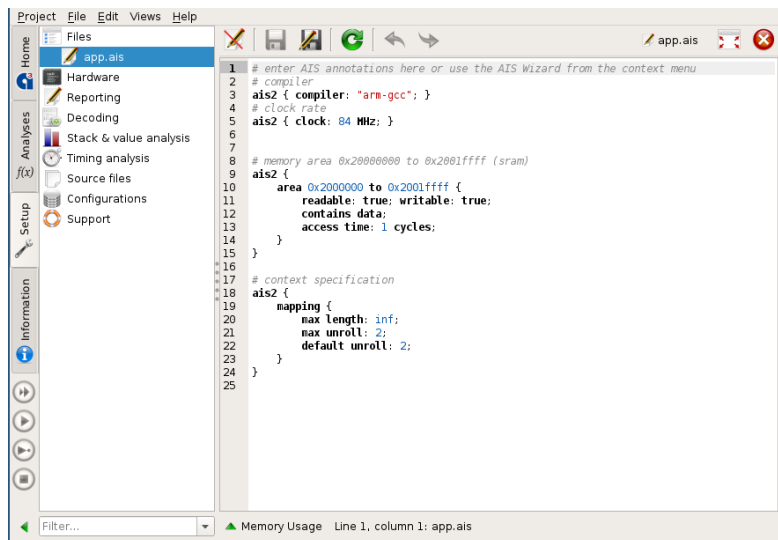


Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

22/39

Projektdateien annotieren

AbsInt aiT

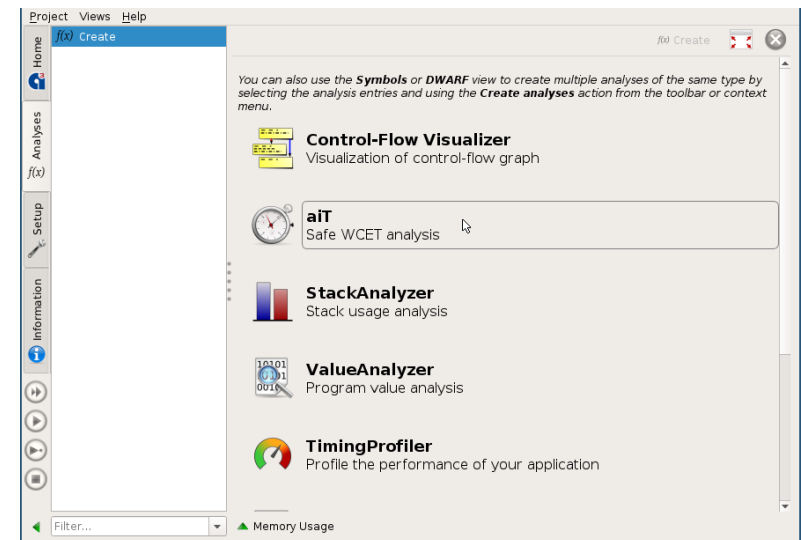


Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

23/39

Neue Analyse anlegen

AbsInt aiT

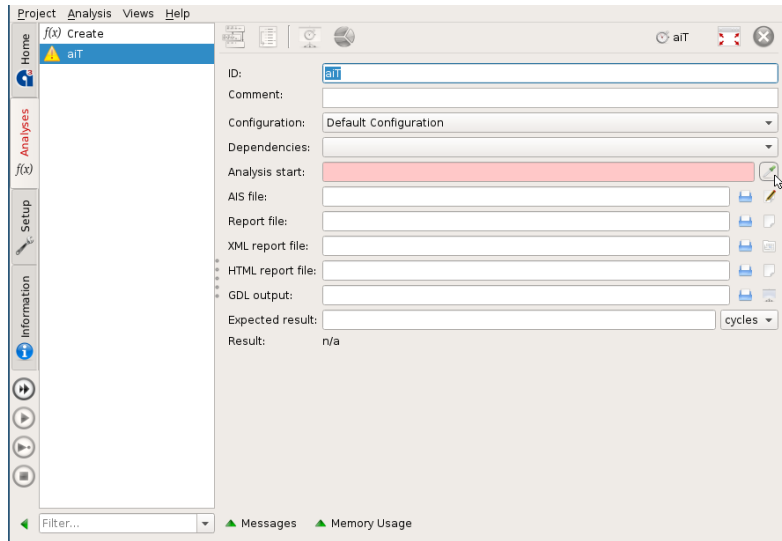


Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

24/39

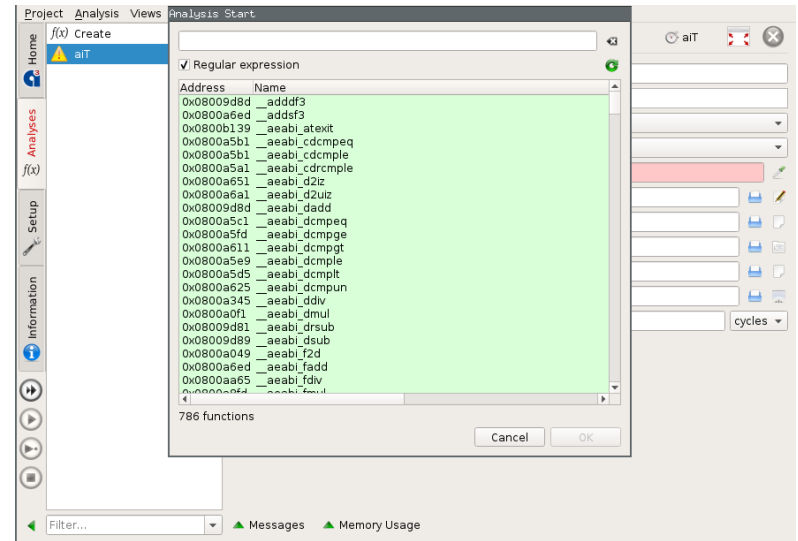
Neue Analyse anlegen

AbsInt aiT



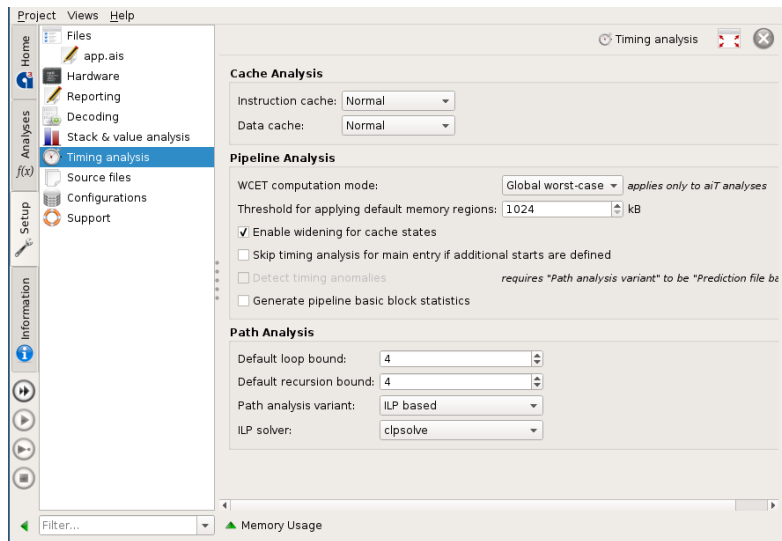
Neue Analyse anlegen

AbsInt aiT



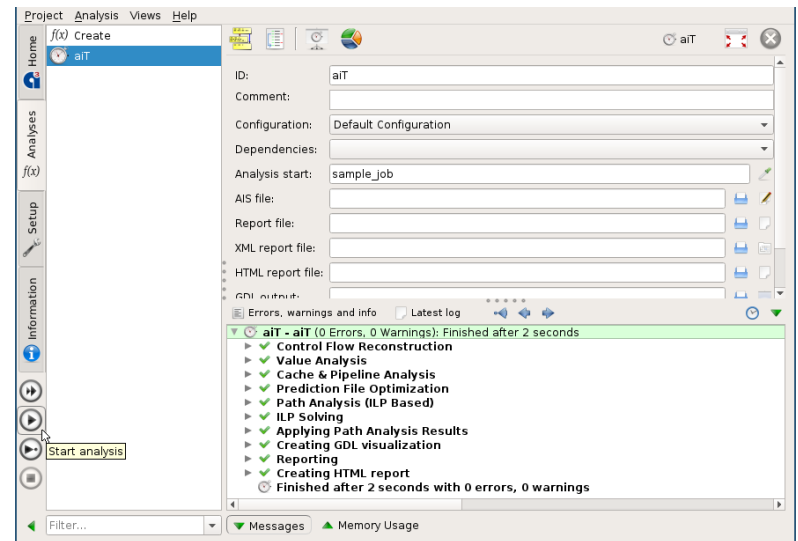
Analyseparameter

AbsInt aiT



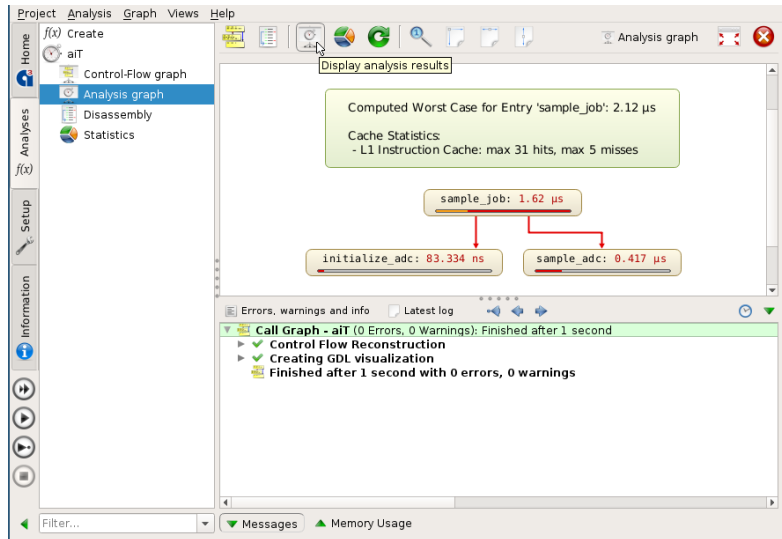
Analyse starten

AbsInt aiT



Analyse untersuchen

AbsInt aiT

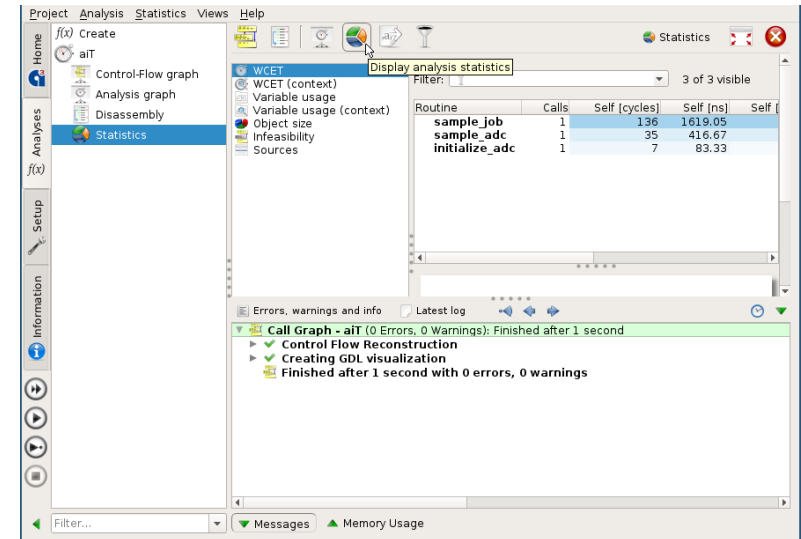


Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

29/39

Analyse untersuchen

AbsInt aiT



Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

30/39

Annotationen

CPU-Takt

- aiT gibt Zeitmessungen zunächst nur in Takten aus
- Taktrate angeben \leadsto tatsächliche Zeit

Beispiele:

```
clock: 84MHz;  
clock: 83.95 .. 84.05 MHz;
```

Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

31/39

Annotationen

Zeit annotieren

- Manche Codestücke sind nicht analysierbar
→ Ausführungszeit annotieren
- ⚠ Natürlich nur sinnvoll, wenn WCET bereits bekannt

Beispiel:

```
routine "even"{  
    not analyzed;  
    takes: 150 cycles;  
}  
  
# exclude code as far as specified program points  
instruction ProgramPoint snippet {  
    continue at: ProgramPoint1 , PP2 , ... , PPn;  
    not analyzed;  
    takes: 10 cycles;  
}
```

Schu, PR EZS (WS19) – Kapitel V WCET-Analyse
4 WCET-Analyse auf dem EZS-Board–4.2 aiT

32/39

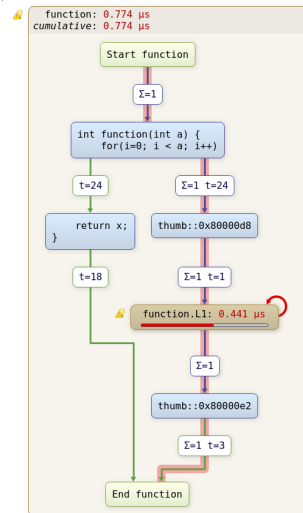
Annotationen

Schleifen automatisch analysieren

- Genaue Anzahl von Schleifendurchläufen zu bestimmen ist teuer
- ☞ aiT versucht standardmäßig nur zwei Durchläufe zu interpretieren
- Lohnt sich jedoch manchmal
- ☞ aiT mehr Freiheiten für die Analyse geben

Beispiel:

```
loop "function.L1" mapping {
  default unroll: 100;
}
```



Annotationen

Schleifen von Hand begrenzen

- Grenzen von Hand spezifizieren

Beispiele:

```
loop "function.L1" { bound: 0 .. 10 end; }
loop "function.L1" { bound: 10 begin; }
loop "function.L1" { bound: 10 .. inf end; }
loop "function.L1" { takes 20 ms; }
```

- Grenzen in Abhängigkeit von Registern spezifizieren

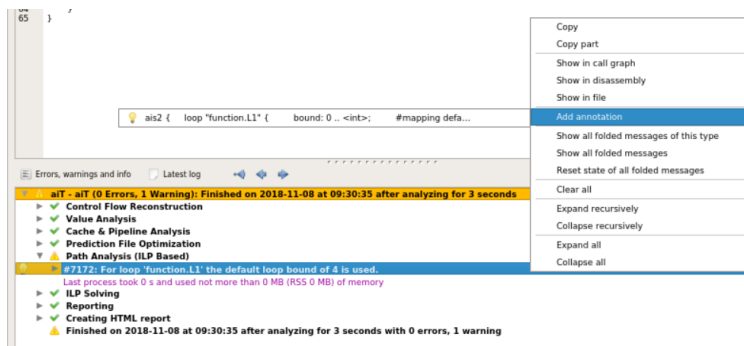
Beispiele:

```
loop "function.L1" {
  bound: 0 .. floor((reg("r0") - reg("r1")) / 4);
}
```



Annotationen

Toolunterstützung



- ☞ Die Herausforderung ist nicht die Syntax, sondern das Finden (präziser) Schleifengrenzen



Annotationen

Kontextsensitive Schleifenannotationen

Problem:

```
if (C) {
  A(); // Vorbedingungen für Schleife in R()
  R();
} else {
  B(); // Andere Vorbedingungen für R()
  R();
}
```

Lösung:

```
// Annotations-"Variable" rmax definieren
routine "A" { enter with: user("rmax") = 10; }
routine "B" { enter with: user("rmax") = 20; }
// "Variable" in Annotation nutzen
loop "R.L1" { bound: 0 .. user("rmax"); }
```



aiT ist oft nicht in der Lage
Rekursionen zu analysieren
→ Grenzen von Hand spezifizieren

Problem:

```
int fib(int n) {  
    if (n <= 1)  
        return n;  
    return fib(n-1)  
        + fib(n-2);  
}
```

Beispiele:

```
routine "fib" { recursion bound: 0 .. 10; }  
routine "fib" { recursion bound: 10; }  
routine "fib" { recursion bound: 5 .. 10; }
```

- Weitere Annotationen im Hilfe-Menü des aiT
→ „AIS2 quick reference“



- [1] Steven S. Muchnick.
Advanced compiler design and implementation.
Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1997.
- [2] Peter Puschner.
Zeitanalyse von Echtzeitprogrammen.
PhD thesis, Technische Universität Wien, Institut für Technische Informatik, Treitlstr. 1-3/182-1,
1040 Vienna, Austria, 1993.
- [3] Reinhard Wilhelm.
Embedded systems.
<http://react.cs.uni-sb.de/teaching/embedded-systems-10-11/lecture-notes.html>,
2010.
[Lecture Notes.](#)

