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

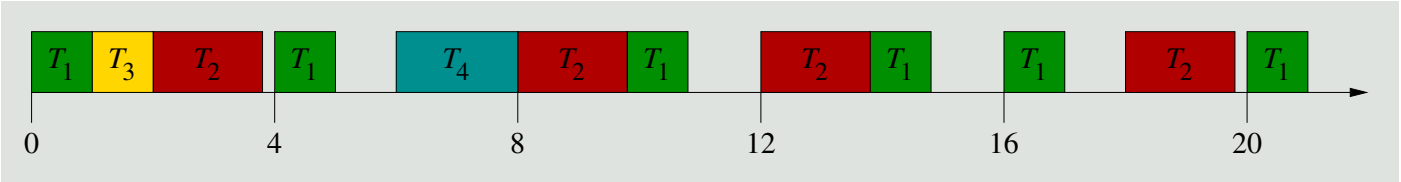
Übersicht

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

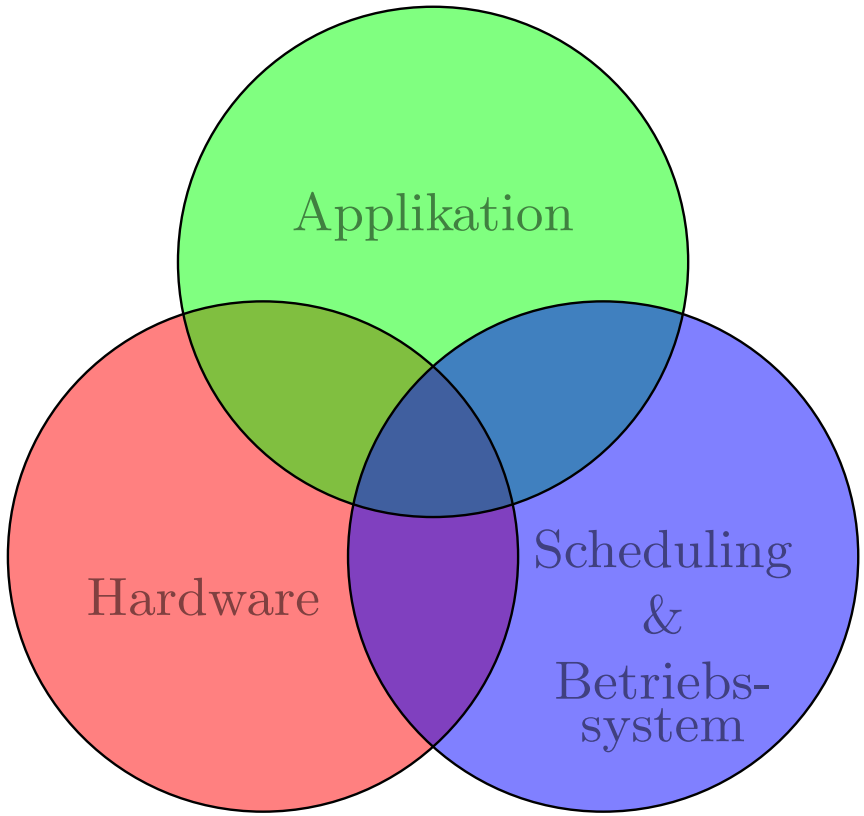


- Eine entscheidende Größe für:
  - Statische Ablaufplanung
  - Planbarkeitsanalyse
  - Übernahmeprüfung
  - ...

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

→ Obere Schranke für alle Fälle

Wiederholung: Einflüsse auf die Ausführungszeit

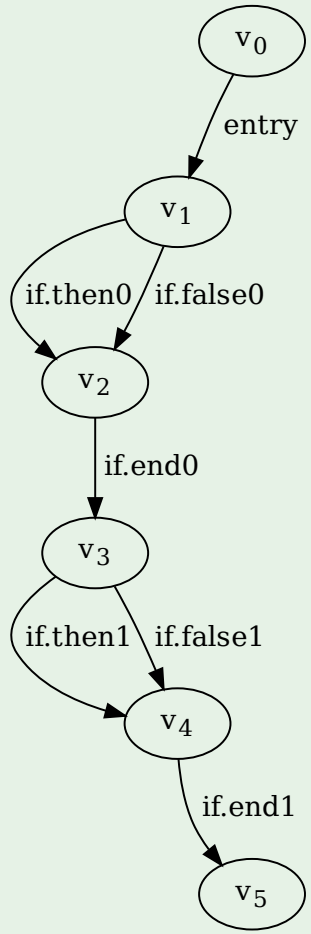


1. **Applikation**: Eingabedaten, ...
2. **Hardware**: Caches, Pipelining, ...
3. **Scheduling**: Höherpriore Aufgaben, Interrupts, Overheads, ...

WCET-Analyse – Flusssensitive Informationen

```
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 }
```

Beispiel



- 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:

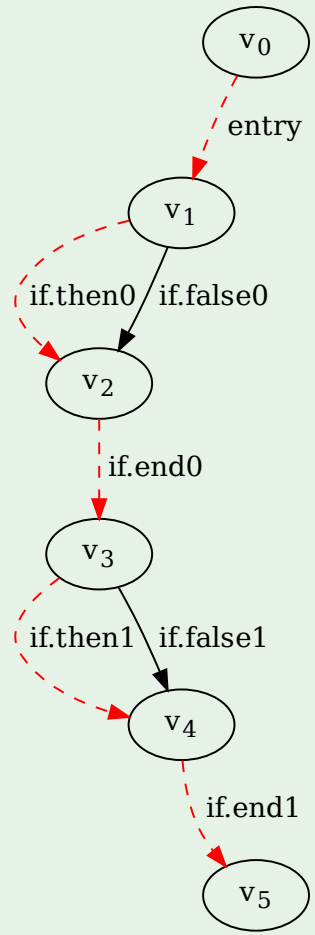
Zielfunktion:

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

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** ⇝ VEZS

WCET eines Basis Blocks?

Grundproblem: Ausführungszyklen von Instruktionen zählen

```
_getop:
    link      a6,#0            //  16 Zyklen
    moveml    #0x3020,sp@-     //  32 Zyklen
    movel     a6@(8),a2        //  16 Zyklen
    movel     a6@(12),d3       //  16 Zyklen
```

Quelle: Peter Puschner [2]

- Ergebnis: $e_{\texttt{\_getop}} = 80$ Zyklen
- Annahmen:
  - Obere Schranke für jede Instruktion
  - Obere Schranke der Sequenz durch Summation

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

Hardware-Analyse teilt sich in verschiedene Phasen

- Aufteilung ist nicht dogmenhaft festgeschrieben

- Integration von Pfad- und Cache-Analyse
  1. Pipeline-Analyse
     - Wie lange dauert die Ausführung der Instruktionssequenz?
  2. Cache- und Pfad-Analyse sowie WCET-Berechnung
     - Cache-Analyse wird direkt in das Optimierungsproblem integriert

- Separate Pfad- und Cache-Analyse
  1. Cache-Analyse
     - Kategorisiert Speicherzugriffe mit Hilfe einer Datenflussanalyse
  2. Pipeline-Analyse
     - Ergebnisse der Cache-Analyse werden anschließend berücksichtigt
  3. Pfad-Analyse und WCET-Berechnung

Übersicht

1 Rekapitulation: Worst-Case Execution Time

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

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

Grundlagen der Cache-Analyse [3, Kapitel 22]

Cache: ein kleiner, schneller Zwischenspeicher

- Zugriffszeiten variieren je nach Zustand des Caches enorm:

  Treffer (engl. *hit*), Daten/Instruktion sind im Cache $\rightsquigarrow e_h$

  Fehlschlag (engl. *miss*), Daten/Instruktion sind nicht im Cache $\rightsquigarrow e_m$

Hits sind schneller als Misses: $e_m \gg e_h$

$\rightarrow$ 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*)
  - vollassoziativ (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

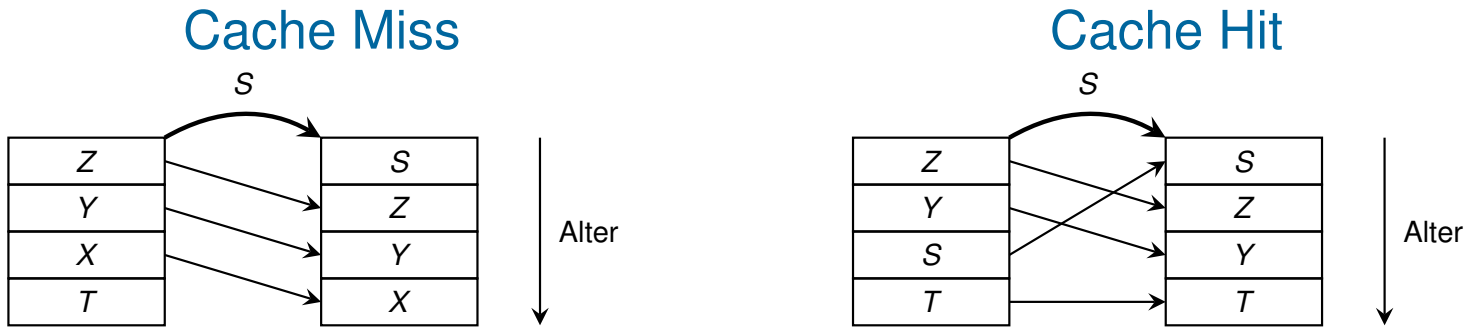
→ erster Zugriff ist ein Fehlschlag, alle weiteren sind Treffer

→ 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

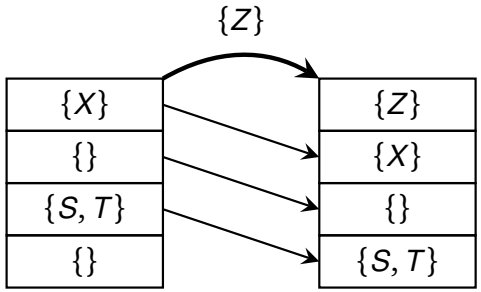
- Untergrenze $>$ Assoziativität $\rightsquigarrow$ garantiert nicht im Cache

Beispiel: LRU-Cache, Zugriff auf eine Speicherstelle

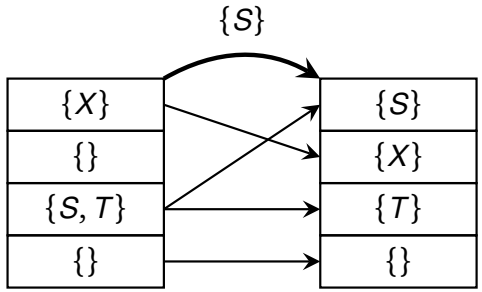
- Annäherung des Cache-Verhaltens durch must- und may-Approximation: Aktualisierung von Inhalt und Verwaltungsinformation

must-Approximation

Potential Cache Miss

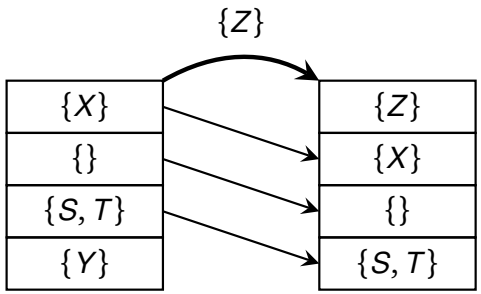


Definitive Cache Hit

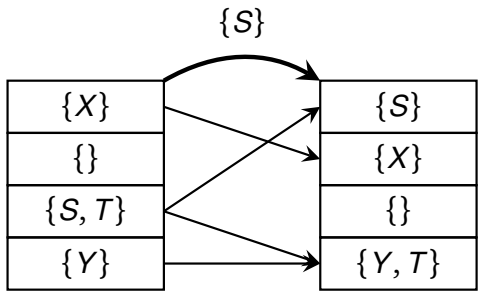


may-Approximation

Definitive Cache Miss

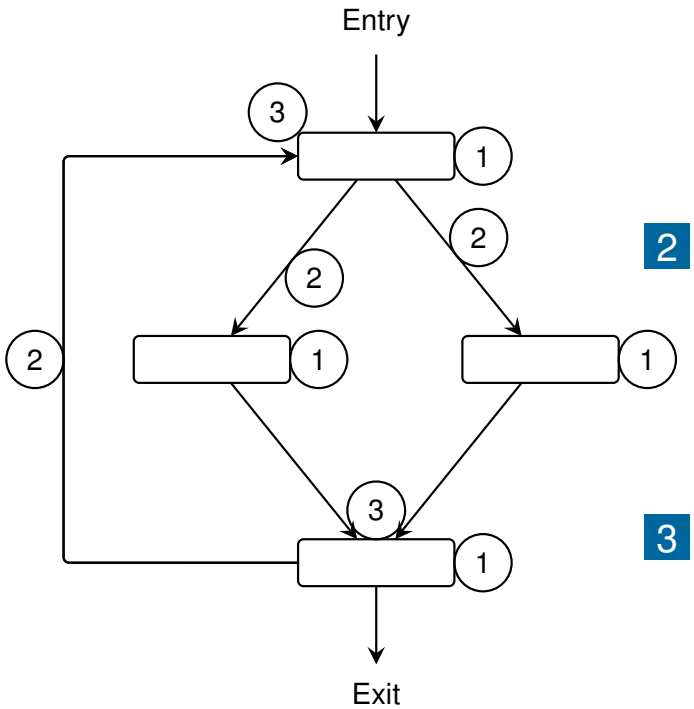


Potential Cache Hit



Wie funktioniert nun die Cache-Analyse?

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



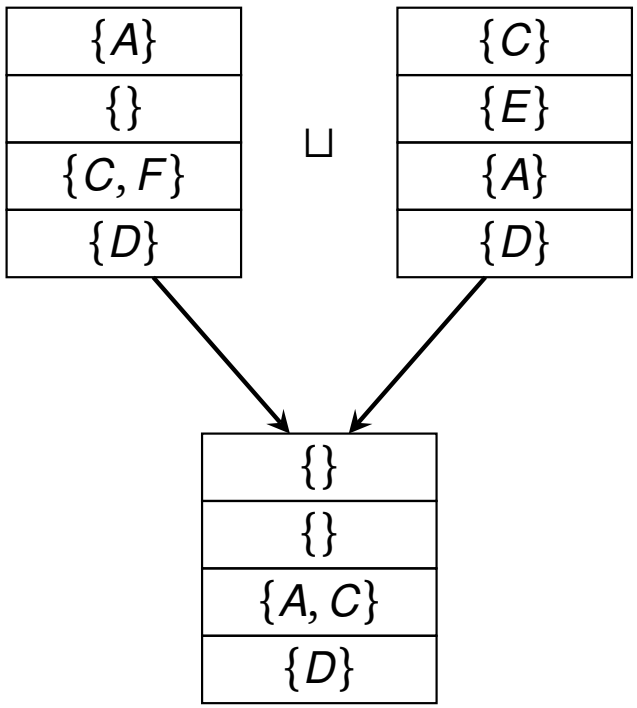
1. sammle Information in den Grundblöcken
   - Speicherzugriffe (s. Folie V/14)
   - man bestimmt die Übertragungsfunktion (engl. *transfer function*) des Grundblocks
2. die Information wird über ausgehende Kanten weiterverteilt
   - Eingabe für die Übertragungsfunktion der folgenden Grundblöcke
3. fließt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

   → Verschmelzungsoperatoren

☞ Verschmelzungsoperatoren für must- und may-Analyse

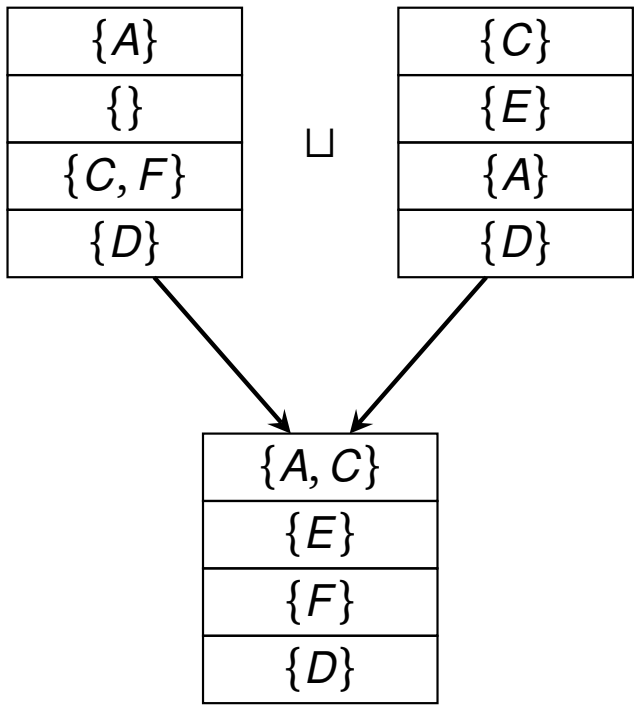
Verschmelzungsoperatoren für must- und may-Analyse

must-Analyse



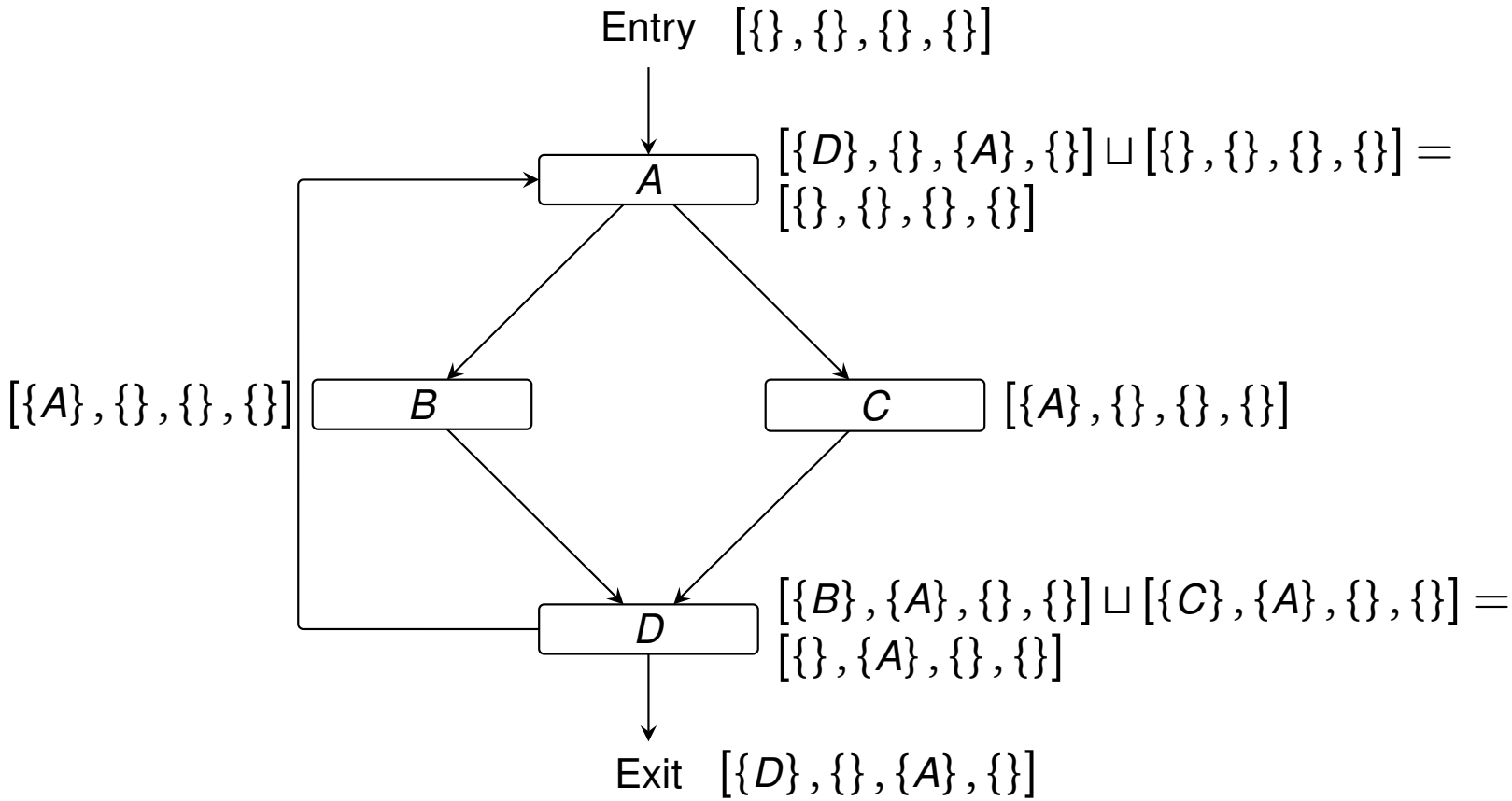
„Schnittmenge + max. Alter“

may-Analyse



„Vereinigungsmenge + min. Alter“

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

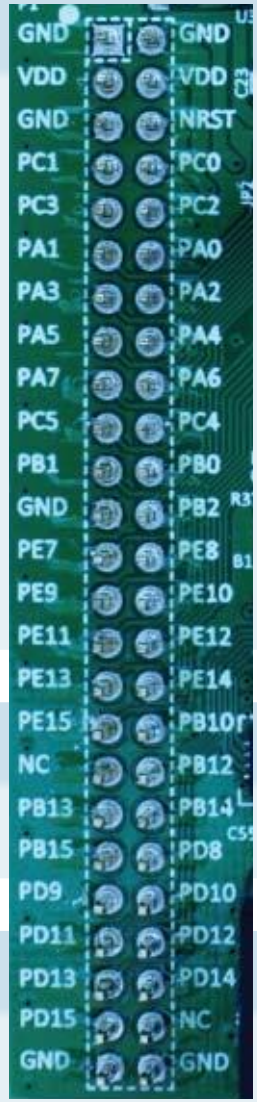
2 Ausflug: Cache-Analyse
- Grundlagen
- Beispiel: LRU-Cache

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

GPIO

General Purpose Input/Output

- Pins eines Mikrochips zur *freien Verwendung*
- Konfigurierbar als Ein-/Ausgang
- Teilweise pegelfest bis 5 V
  - ⇝ Mikrocontroller-Handbuch lesen ☺
- Zugriff über
  - spezielle Speicheradressen
  - Spezialanweisungen



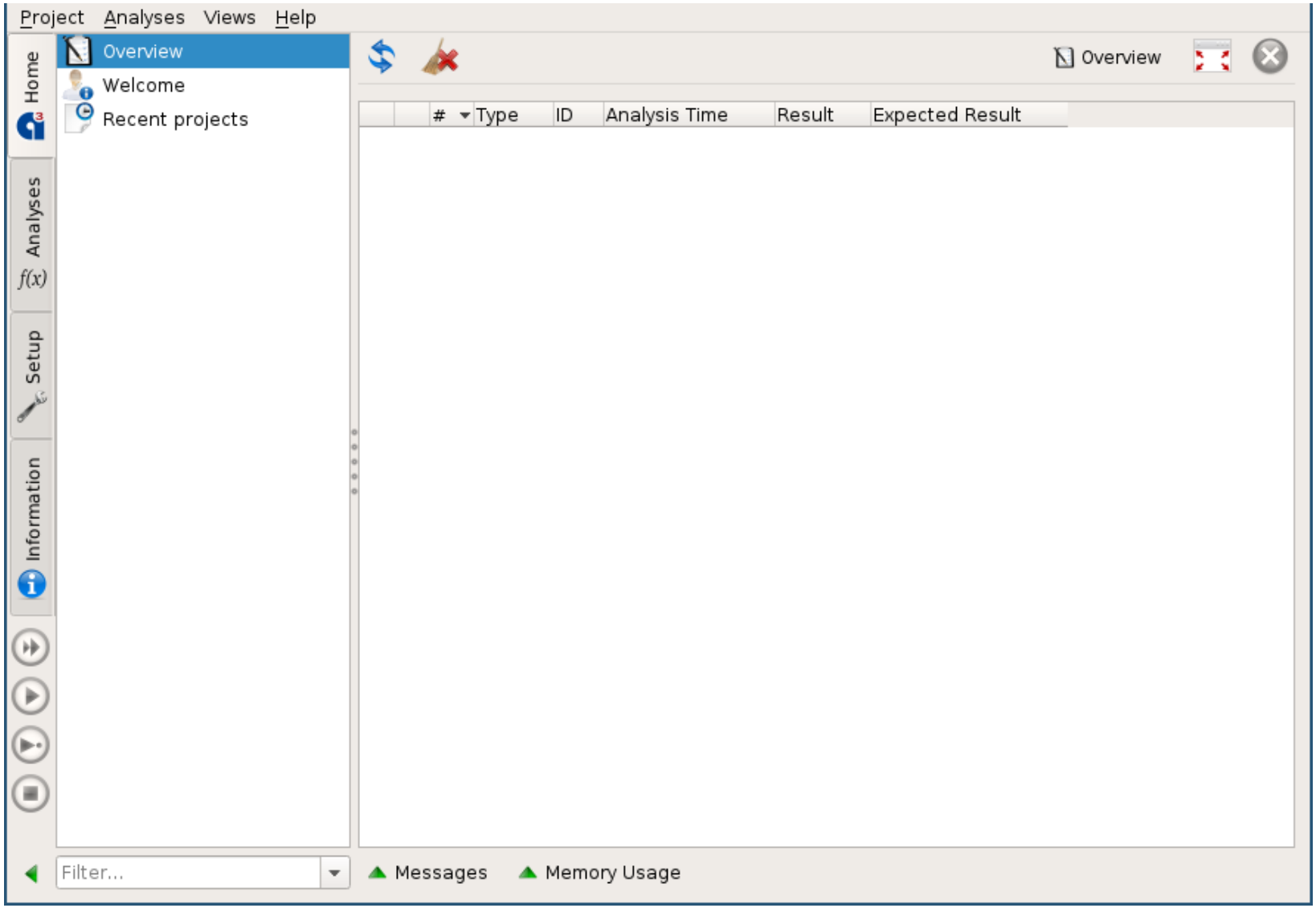
Ansteuerung

☞ `void ezs_gpio_set(bool) //PD12`

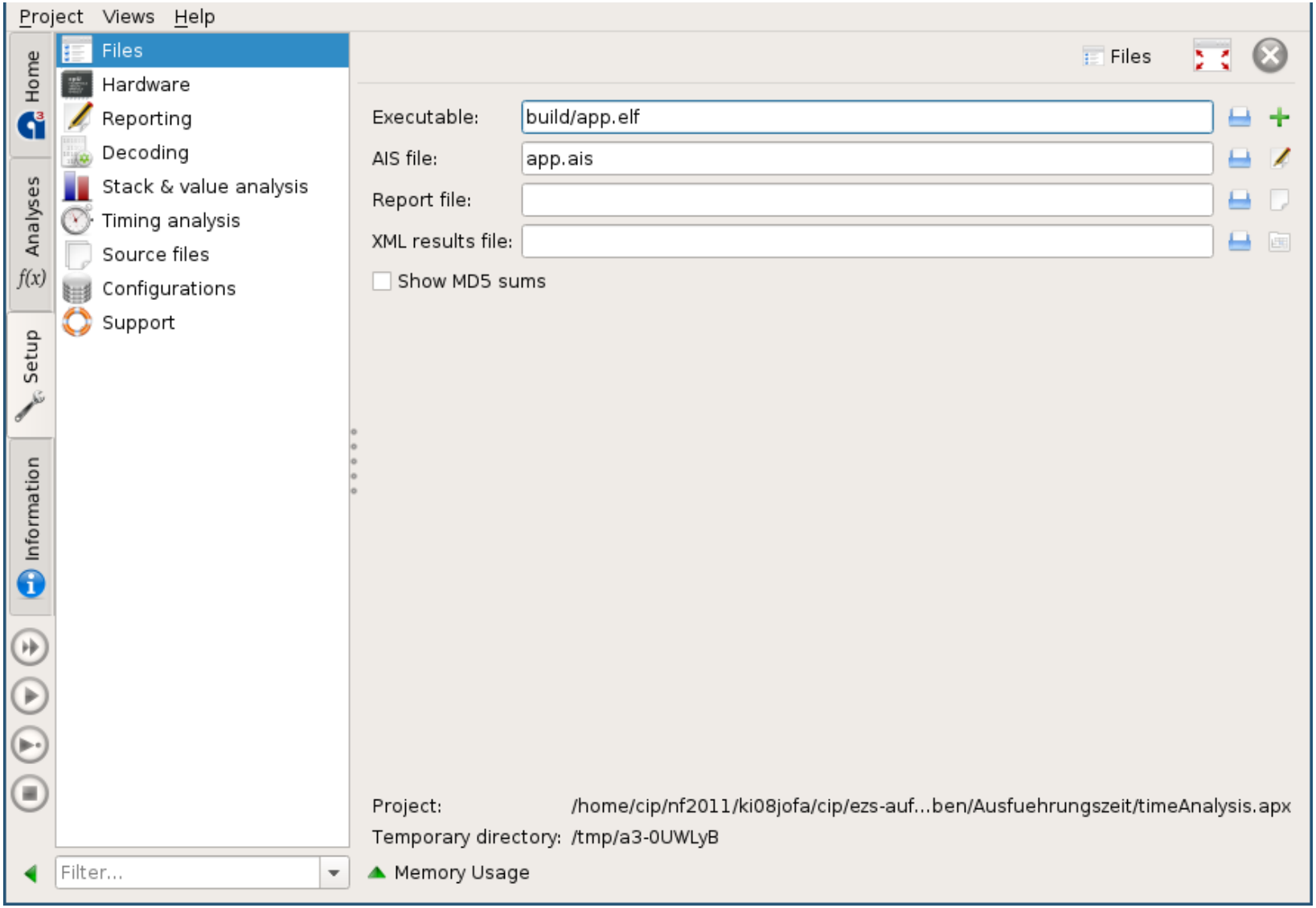
Auswertung

☞ Oszilloskop

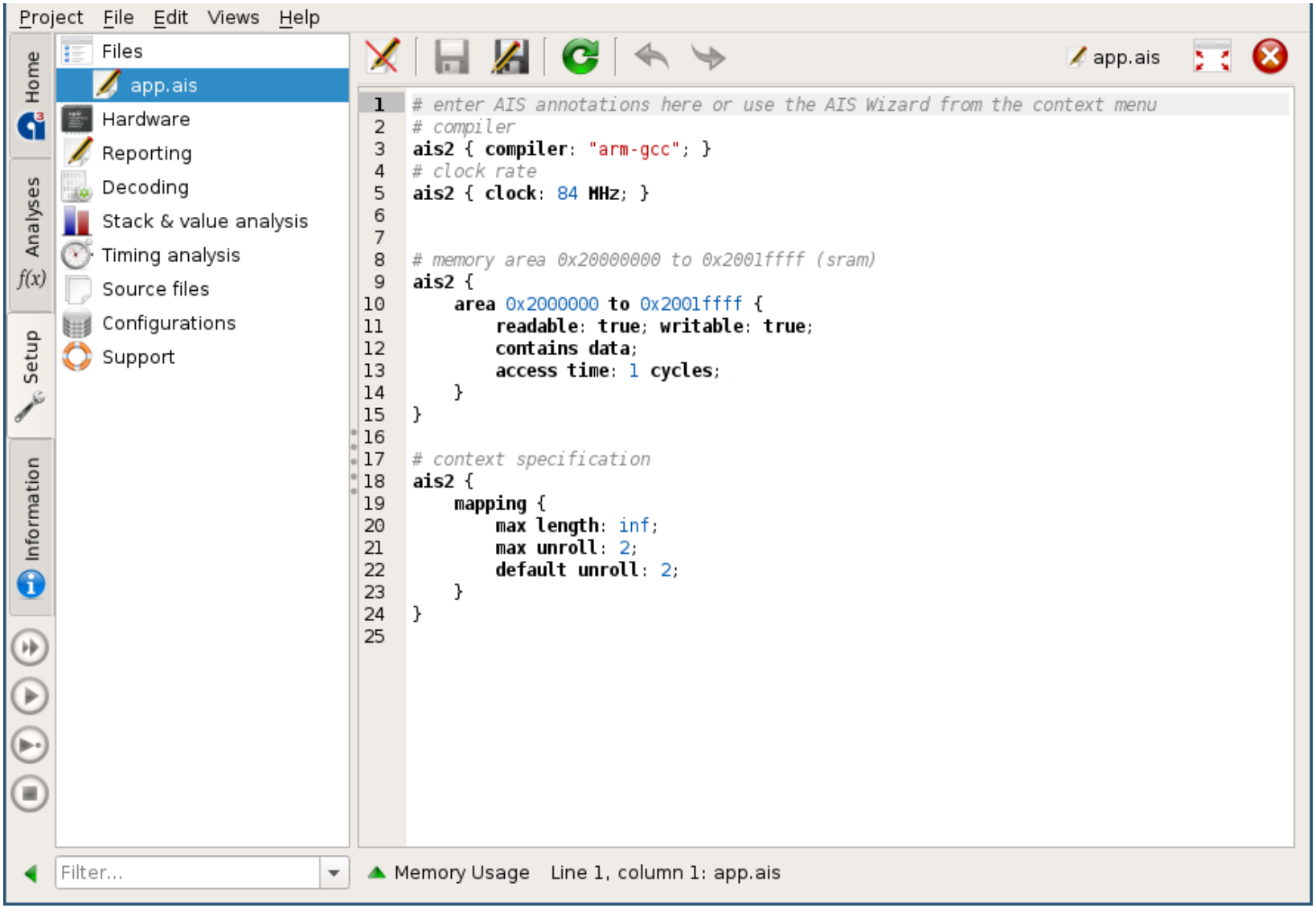
Startansicht



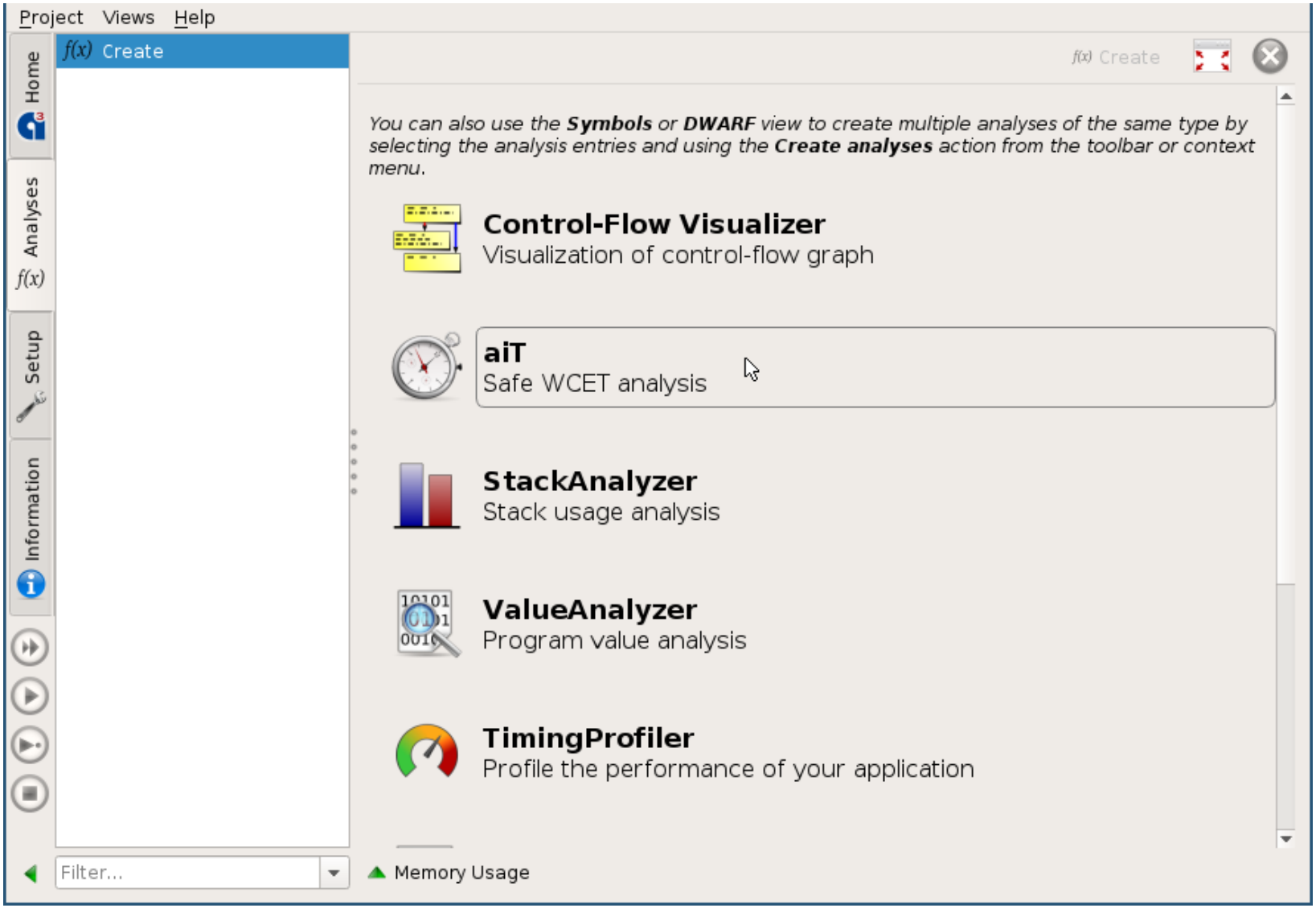
Projektdateien



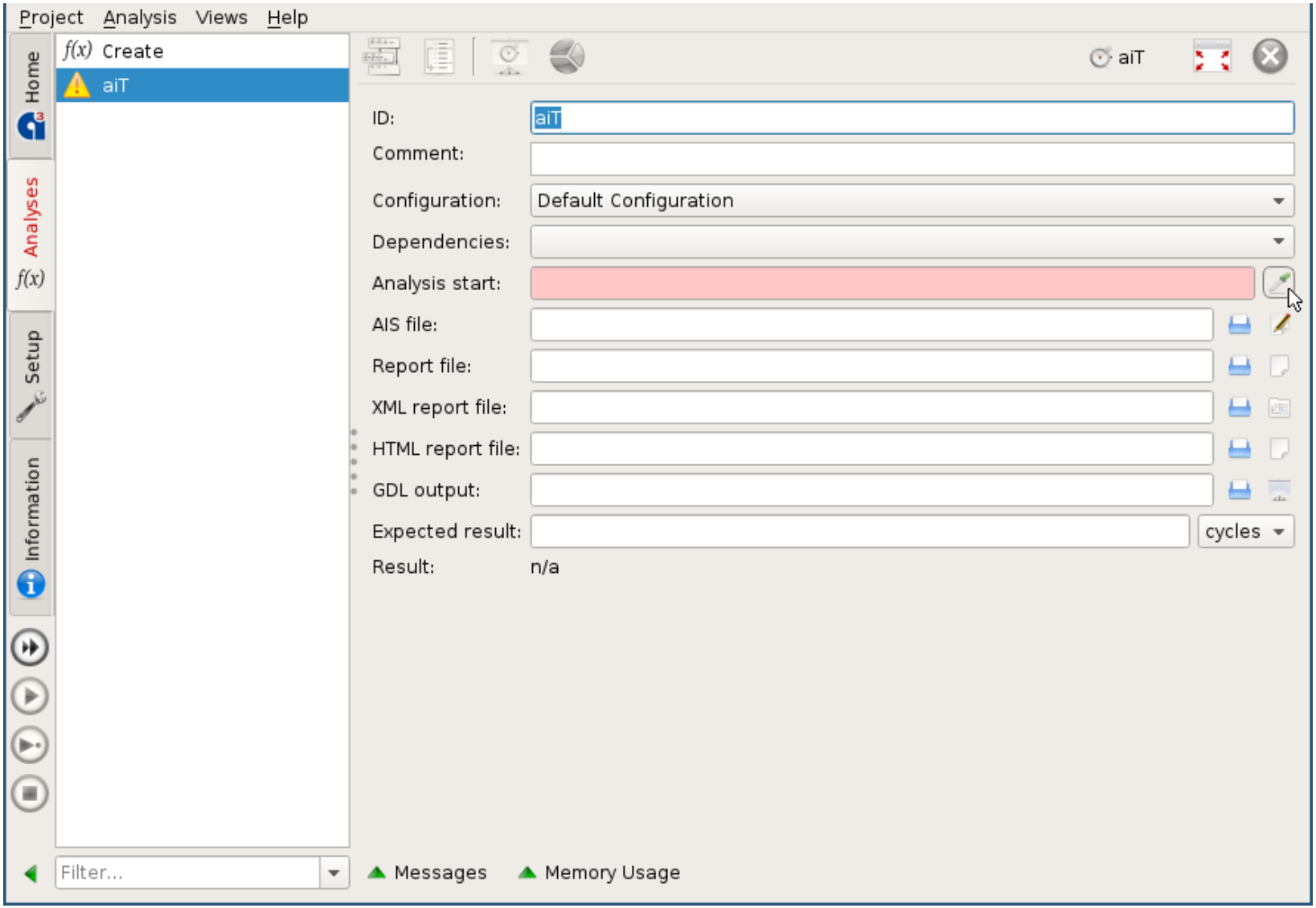
Projektdateien annotieren



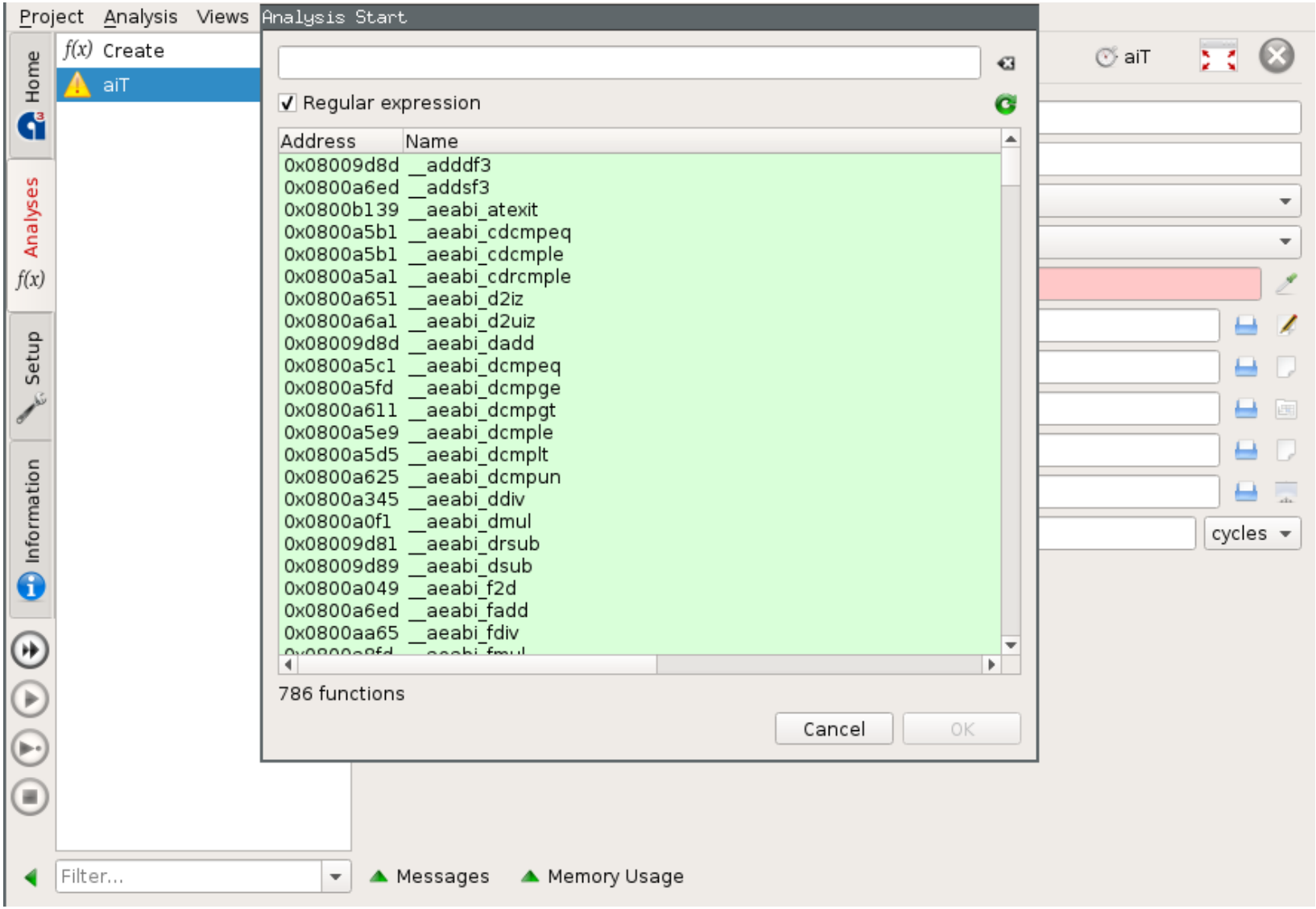
Neue Analyse anlegen



Neue Analyse anlegen

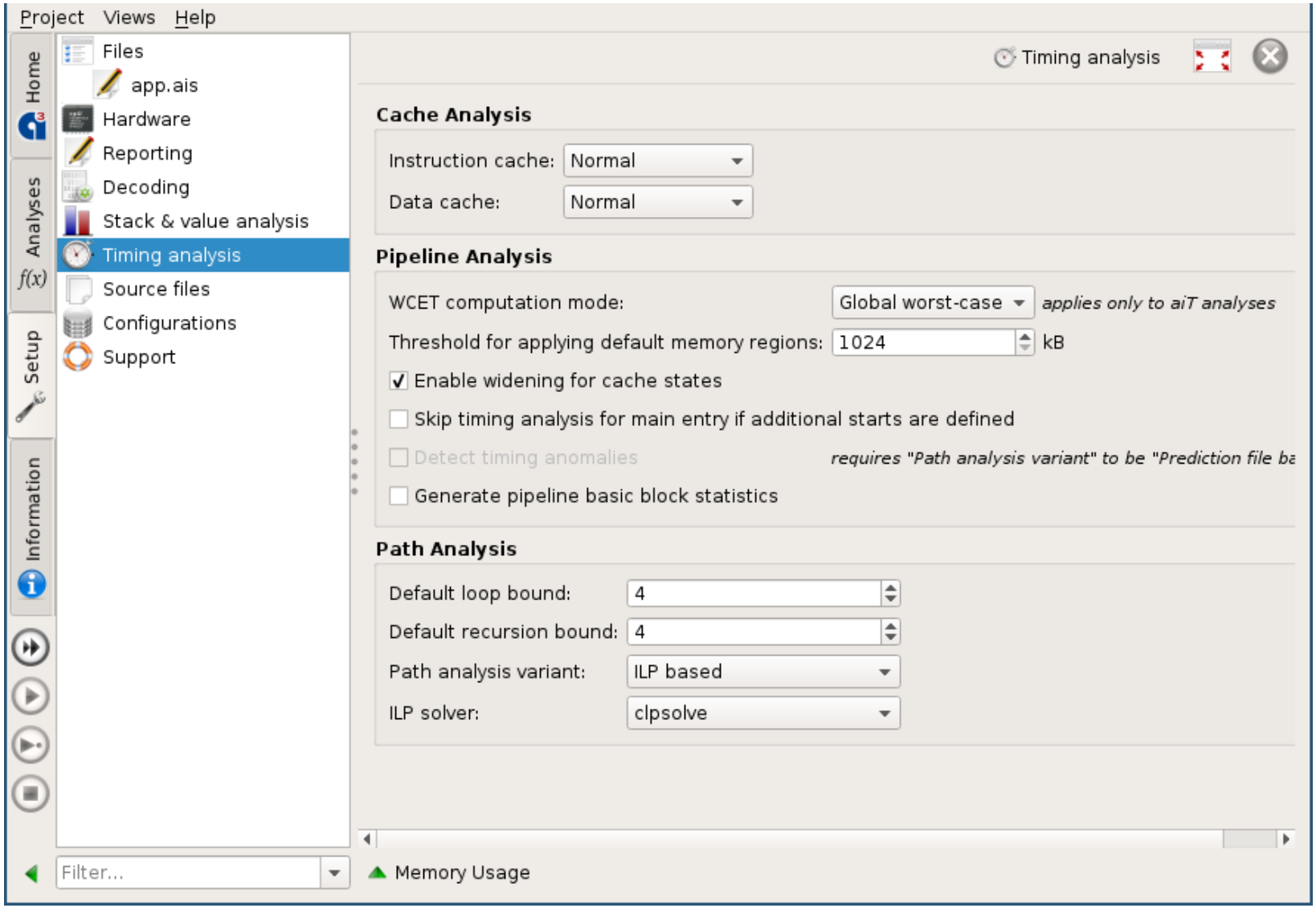


Neue Analyse anlegen

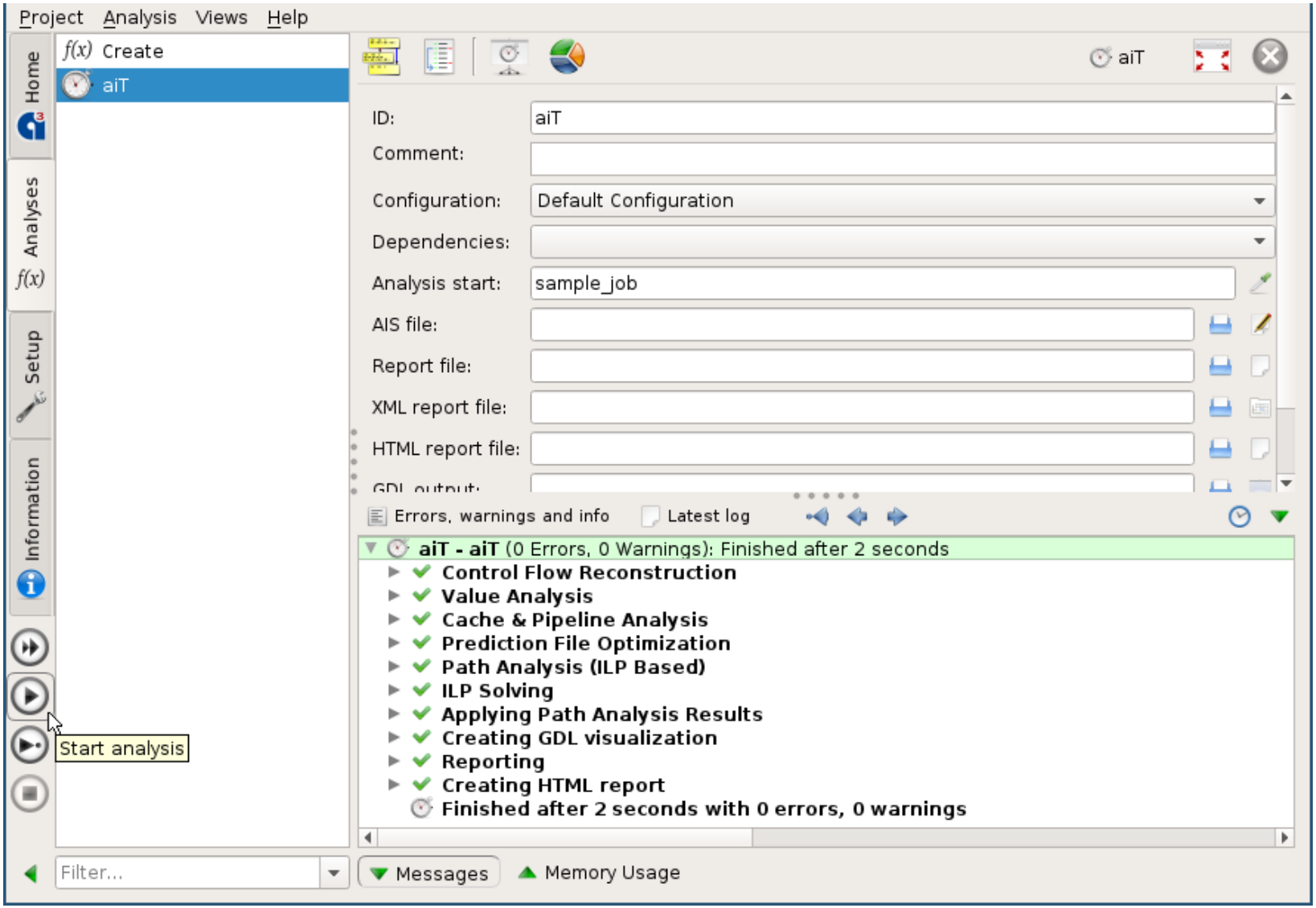


Analyseparameter

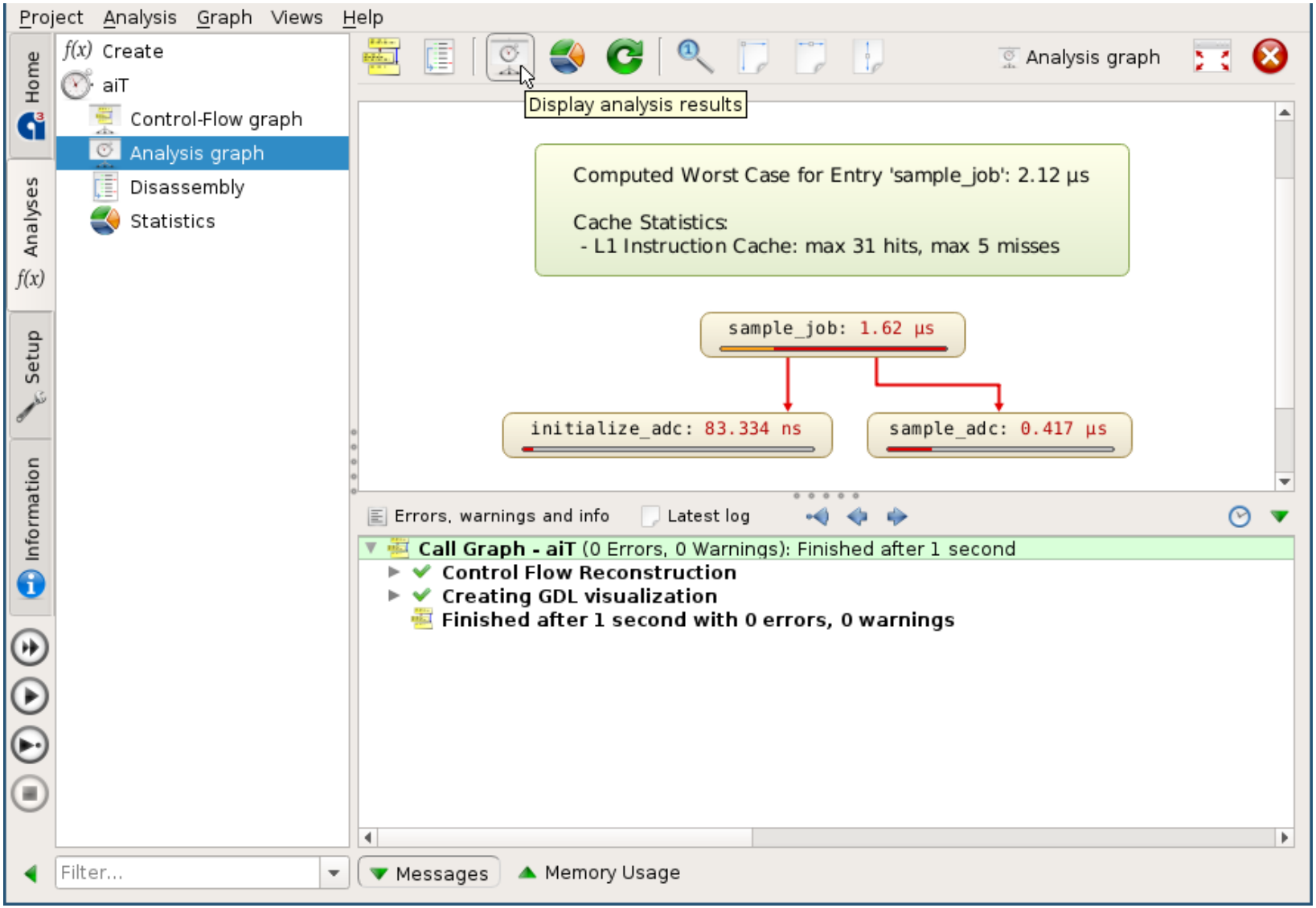
AbsInt aiT



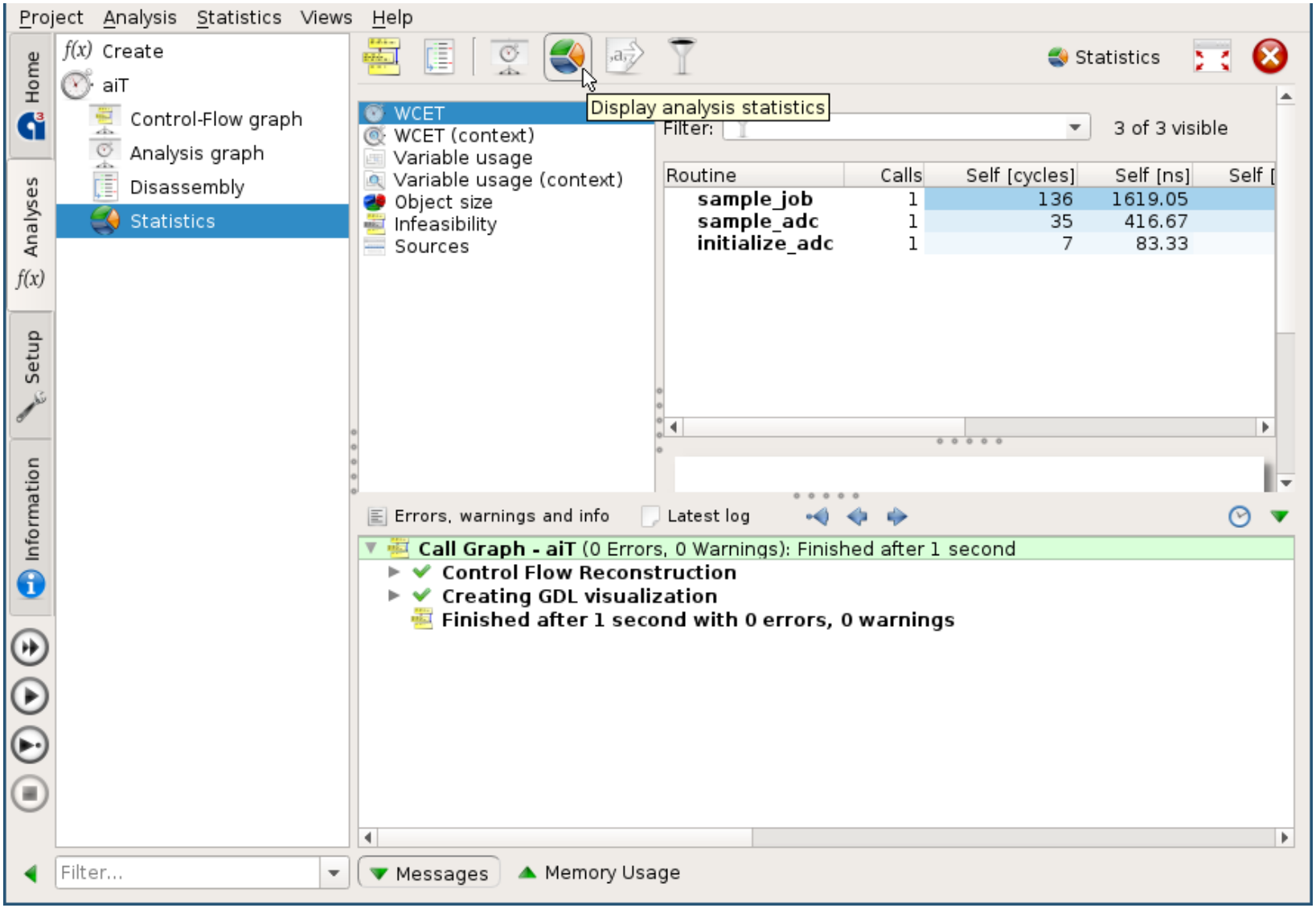
Analyse starten



Analyse untersuchen



Analyse untersuchen



Annotationen

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

Beispiele:

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

Annotationen

- Manche Codestücke sind nicht analysierbar

→ Ausführungszeit annotieren

Natürlich nur sinnvoll, wenn WCET bereits bekannt

Beispiel:

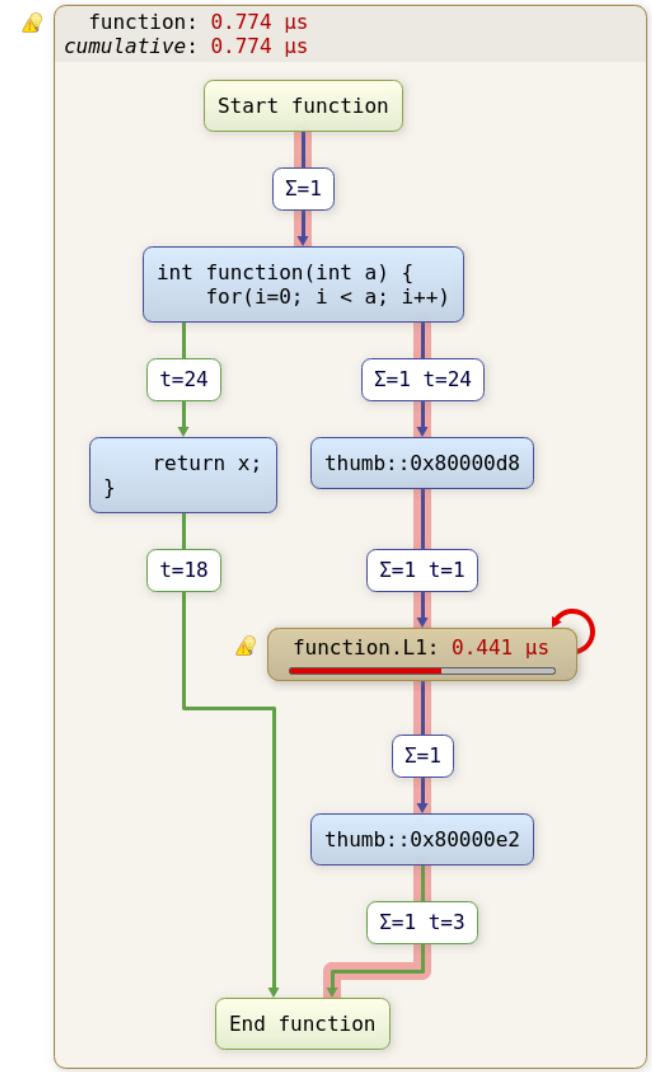
```
routine "even"{
  not analyzed;
  takes: 150 cycles;
}

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

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

- Grenzen von Hand spezifizieren

Beispiele:

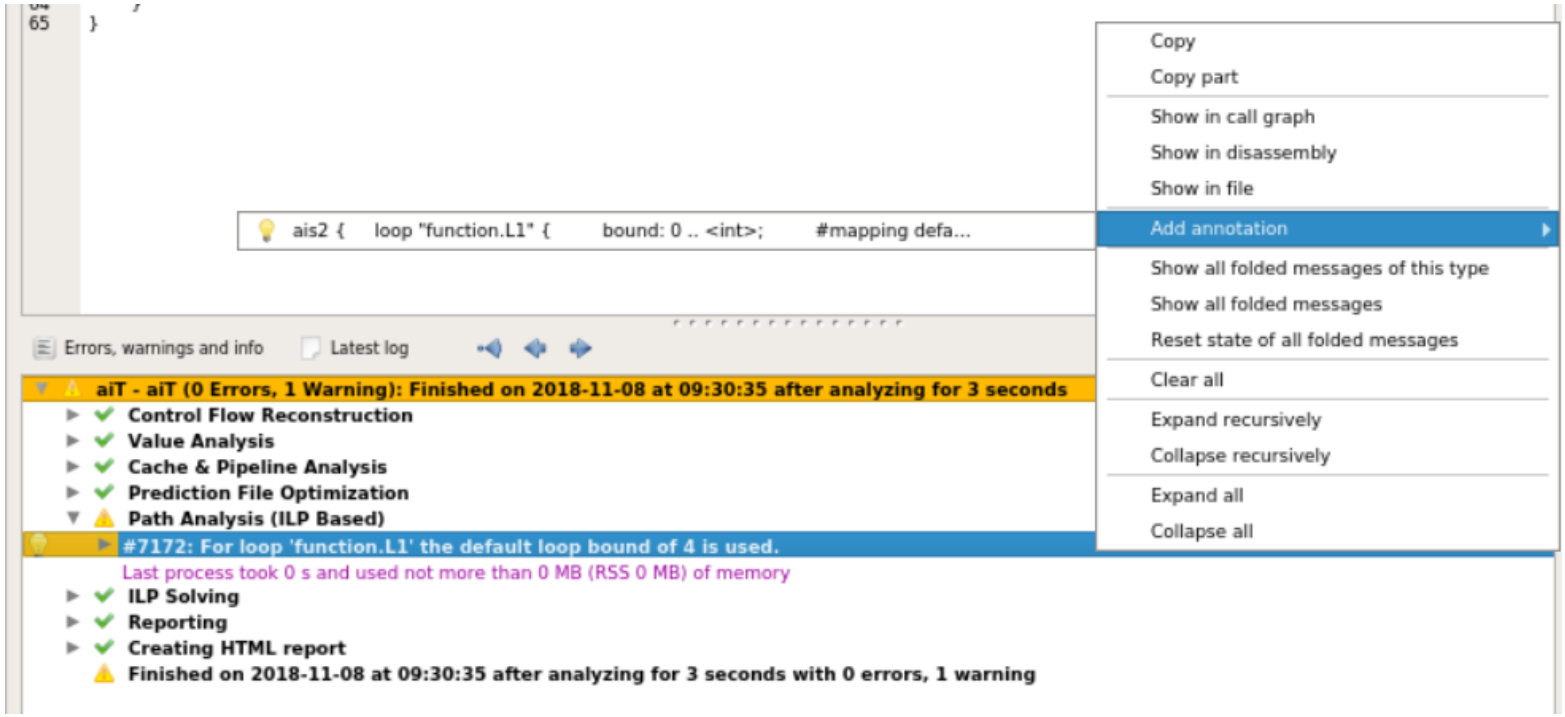
```
loop "function.L1" { bound: 0 .. 10 end; }
loop "function.L1" { bound: 10 begin; }
loop "function.L1" { bound: 10 .. inf end; }
loop "function.L1" { takes 20 ms; }
```

- Grenzen in Abhängigkeit von Registern spezifizieren

Beispiele:

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

Annotationen



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

Annotationen

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"); }
```

Annotationen

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“*

Literaturverzeichnis

[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.