Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Abstrakte Interpretation

Phillip Raffeck, Florian Schmaus, Simon Schuster

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

Sommersemester 2020

Programmverifikation mittels formaler Methoden

- Ziel: *bewiesenermaßen* korrektes Verhalten von Programmen
  - bisher: nichtfunktionale Eigenschaften
  - jetzt: semantische, *funktionale* Eigenschaften
- Werkzeuge: Astrée & Frama-C
- Grundvoraussetzung: Regeln zum logischen Schließen
  - In unserer Konfiguration (an sich mächtiger):
  - Astrée: Abstrakte Interpretation über der Intervallsemantik
  - Frama-C: wp-Kalkül
- Vorgehen: grobe *Beweisidee* zum Erreichen des Ziels
  - Astrée: Kurvendiskussion, Funktionalanalysis
  - Frama-C: Induktion über Datenstrukturen

Grenzen formaler Verifikation

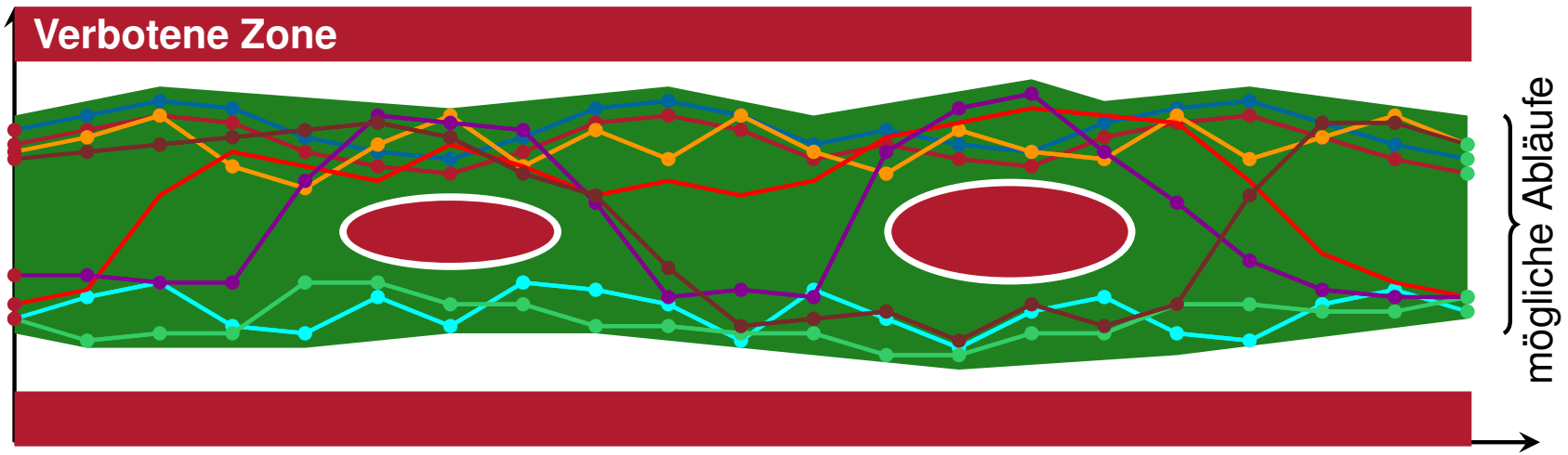
- Wunsch: komplett automatisiertes Beweisen
- *Gödelsches Unvollständigkeitstheorem* (1931)

  „Jedes hinreichend mächtige formale System ist entweder widersprüchlich oder unvollständig.“
- *Satz von Rice* (1953)

  Es ist nicht möglich, eine beliebige nicht-triviale Eigenschaft der erzeugten Funktion einer Turing-Maschine algorithmisch zu entscheiden.
  - siehe einführende Erklärung zur Unentscheidbarkeit des Halteproblems [2]
- Teilweise enormer menschlicher Aufwand nötig
  - Werkzeugunterstützung trotzdem sinnvoll

  ⇝ Astrée & Frama-C

Abstrakte Interpretation



- Abstrakte Interpretation (engl. *abstract interpretation*)
  - Betrachtet eine abstrakte Semantik (engl. *abstract semantics*)
    - Sie umfasst alle Fälle der konkreten Programmsemantik
  - Ist die abstrakte Semantik sicher ⇒ konkrete Semantik ist sicher

Astrée [1]

- Ziel: Nachweis der Abwesenheit von Laufzeitfehlern
- Findet *alle* potentiellen Laufzeitfehler
- Leider auch *falsch-positive*

  ⇝ **Gödelsches Unvollständigkeitstheorem**

Programm ist korrekt, wenn

- Astrée keine Alarme meldet
- Oder für alle Alarme nachgewiesen, dass falsch-positiv

Astrée weist nach

- Überschreitung von Array-Grenzen
- Ganzzahldivision durch Null
- Ungültige Dereferenzierung, arithmetische Überläufe
- Ungültige Gleitkommaoperationen
- Unerreichbarer Code
- Lesezugriff auf nicht initialisierte Variabeln
- Verletzung benutzerdefinierter Zusicherungen
  $\rightsquigarrow$ `assert()`

Einschränkungen

- Rekursion prinzipiell erlaubt, wird aber nicht analysiert
  - ⇝ für Rekursionsergebnis werden keine Einschränkungen ermittelt
- Auswertungsreihenfolge in C nicht vollständig spezifiziert
  - ⇝ *eine* bestimmte Ordnung wird angenommen
    - stimmt nicht notwendigerweise mit Compiler überein
    - optionale Warnung durch Astrée
- Funktionen der Standard-C-Bibliothek werden nicht erkannt
  - ⇝ mitgelieferte Stubs nutzen
- Dynamischer Speicher nicht erlaubt
  - ⇝ kein `malloc()`
    - keine Einschränkung im sicherheitskritischen Echtzeitbereich

Semantik

Astrée nimmt an, dass folgende semantische Regeln gelten:

1. Der C99-Standard
2. Implementierungsabhängiges Verhalten
   - Größe von Datentypen
   - Gleitkommastandard
   - ...
3. Benutzerdefinierte Einschränkungen
   - z. B. ob statische Variablen mit 0 initialisiert werden
4. Außerdem *benutzerspezifizierte Zusicherungen*

   ⇝ und da wird es interessant ☺

Benutzerdefinierte Zusicherungen

`__ASTREE_known_fact((B))`

- Analyzer nimmt an, dass `B` gegeben ist
- Analyzer warnt, falls `B` *nie wahr werden kann*
- `__ASTREE_known_range((V; [a, b]))` $\leadsto$ Wertebereich

`assert((B))`/`__ASTREE_assert((B))`

- Analyzer erzeugt Alarm, falls `B` *nicht immer wahr ist*
- Analyzer nimmt danach an, dass `B` gilt
- `B` kann nicht von der Form `e1 ? e2 : e3` sein
- `__ASTREE_global_assert(())` $\leadsto$ gesamtes Programm
- `__ASTREE_check((B))` $\leadsto$ keine Annahme über `B` danach

- `B` muss seiteneffektfrei sein
- *Doppelte Klammerung ist wichtig!*

Beispiel

```
1  #include <astree.h> // Astree-Makros ggf. abschalten
2
3  float filter(Alpha_State *s, float val) {
4    __ASTREE_known_fact((val == val)); // known_fact(!isnan(val))
5    __ASTREE_known_fact((-10.0f < val && val < 10.0f));
6    __ASTREE_known_fact((s->val == s->val));
7    __ASTREE_known_fact((FLT_MIN < s->val
8                         && s->val < FLT_MAX));
9    __ASTREE_assert((0.0f < s->alpha));
10   __ASTREE_assert((s->alpha < 1.0f));
11
12   float residual = val - s->val;
13   s->val = s->val + s->alpha * residual;
14
15   __ASTREE_assert((s->val == s->val));
16   // ...
17   return s->val;
18 }
```

Stubs

`__ASTREE_modify((V1, ..., Vn[;effect]))`

- Modelliert Veränderung der Variablen `V1` bis `Vn`

$\rightsquigarrow$ Braucht man um Stubs zu bauen

- Beispiele
  - Emulation von Sensoren
  - Beschreibung des Verhaltens von Bibliotheksfunktionen
- Kein *effect* $\rightsquigarrow$ kompletter Wertebereich (inklusive Nan, +/-Inf)

Beispiel

```
1 #ifdef __ASTREE__
2 __ASTREE_modify((x; full_range)); // alles außer NaN, +/-Inf
3 __ASTREE_modify((x; [10, 20])) // Einschränkung auf Intervall
4 #else
5 // ... Implementierung
6 #endif
```

Schleifen ausrollen

- Astrée beschreibt abstrakte Semantik
- Frage: Wie viele Schleifendurchgänge betrachten?

⇝ Astrée versucht Aufwand zu vermeiden

⇝ Schleifen werden (standardmäßig) einmal ausgerollt

- Konsequenz:

Beispiel

```
1 unsigned int i = 0;
2 unsigned int j = 20;
3 while (j > 0) { --j; ++i; }
```

- Astrée kann nicht zeigen, daß die Schleife terminiert (☞ Satz von Rice)

⇝ Annahme für weitere Analyse: `i` läuft über

Lösung:

```
1 __ASTREE_unroll((30))
2 while (j > 0) { --j; ++i; }
```

Verzweigungen

- Dito bei Verzweigungen
- Astrée betrachtet normalerweise nur den schlimmsten Fall aller Zweige

↝ Pessimistisches Ergebnis

- Falls Betrachtung der unterschiedlichen Pfade erforderlich:
- Lösung: Analyse vorübergehend aufspalten:

Verzweigungsanalyse

```
1 __ASTREE_partition_control
2 if (...) { ... }
3 else { ... }
4 ...
5 __ASTREE_partition_merge_last(());
```

- Auch für Schleifen, `switch` und Funktionsaufrufe
- `__ASTREE_partition_merge` verschmilzt *alle* Partitionen

↝ Blick ins Handbuch: es gibt noch weitere Tricks

volatile

`__ASTREE_volatile_input((V))`

- Zeigt an, dass `V` sich jederzeit ändern kann

$\rightsquigarrow$ Modelliert Eingabe von außen

`__ASTREE_volatile_input((Vp, r))`

- p ist Pfad in der Variablen,
  z. B. `V.a[3-4].b` $\rightsquigarrow$ Variable `V`, Arrayelemente `a[3]` und `a[4]`, Struct-Element b
  - `[i]` $\rightsquigarrow$ Element `i`
  - `[i-j]` $\rightsquigarrow$ Elemente `i` bis `j`
  - `[]` $\rightsquigarrow$ alle Elemente
- `r` schränkt Wertebereich ein `[i, j]` $\rightsquigarrow$ von `i` bis `j`

Exkurs: Beschränkte Laufzeit

- Viele Echtzeitsysteme endlosschleifenbasiert
- Allerdings durch andere Umstände begrenzt
- 1kHz Ausführungsfrequenz, Neustart nach 7 Tagen $\rightsquigarrow$ 604,800,000 Ticks
- `__ASTREE_max_clock((N))` legt Obergrenze für (virtuelle) Clock
- `__ASTREE_wait_for_clock(())` wartet auf nächsten Clock-Tick

```
1 __ASTREE_max_clock((10)); // maximale Anzahl Clock-Ticks
2 void main(void) {
3   int state_log = 0;
4   while (1) {
5     state_log = increment_state(state_log);
6     __ASTREE_wait_for_clock(()); // auf naechsten Clock-Tick warten
7   }
8 }
```

$\Rightarrow$ Wert von `state_log` begrenzt

Exkurs: Asynchrone Programme

- Astrée modelliert auch asynchrone Ausführung von Aufgaben
- Keine Annahmen über Scheduler oder Prioritäten
- `automatic-shared-variables` muss auf `yes` stehen

```
1  int x, y;
2  volatile int s;
3
4  void t1(void) {
5    x = 1; s = 1; x = 0;
6  }
7
8  void t2(void) {
9    if (s > 0) {
10     y = -1;
11   } else {
12     y = 1;
13   }
14 }
15
16 void main(void) {
17   x = y; // synchroner Teil
18   __ASTREE_asynchronous_loop((t1(), t2()));
19 }
```

Analyse untersuchen

`__ASTREE_analysis_log(())`

- Gibt Zustand der Analyse an dieser Stelle aus

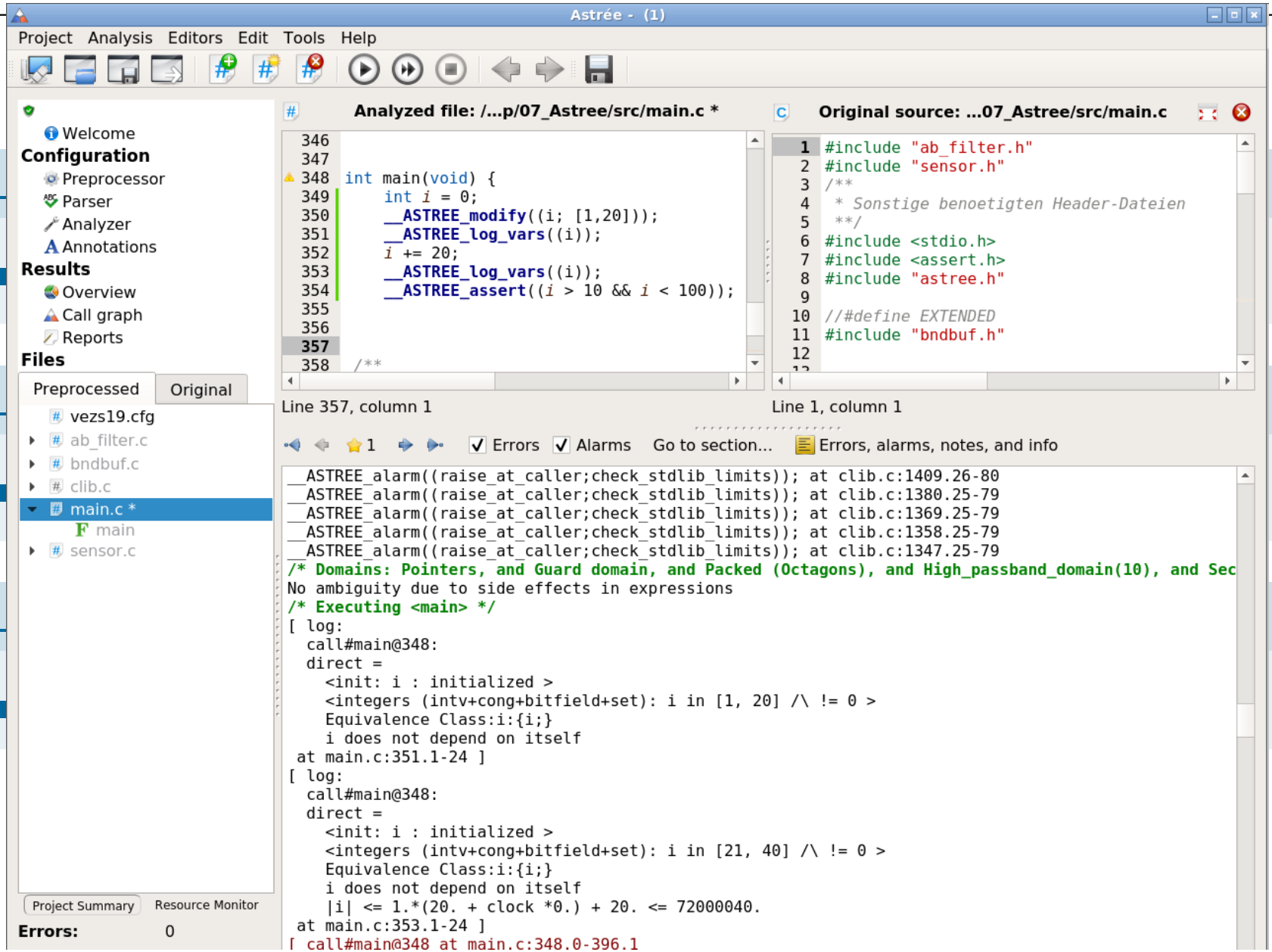
`__ASTREE_log_vars((V1, ..., Vn))`

- Zeigt Zustand der Analyse in Bezug auf einzelne Variabeln an

`__ASTREE_print(("text"))`

- Gibt Text aus

Analyse untersuchen



Analyse untersuchen

`__ASTREE_analysis_log(())`

- Gibt Zustand der Analyse an dieser Stelle aus

`__ASTREE_log_vars((V1, ..., Vn))`

- Zeigt Zustand der Analyse in Bezug auf einzelne Variabeln an

`__ASTREE_print(("text"))`

- Gibt Text aus

Astrée verwenden

- Astrée im CIP:

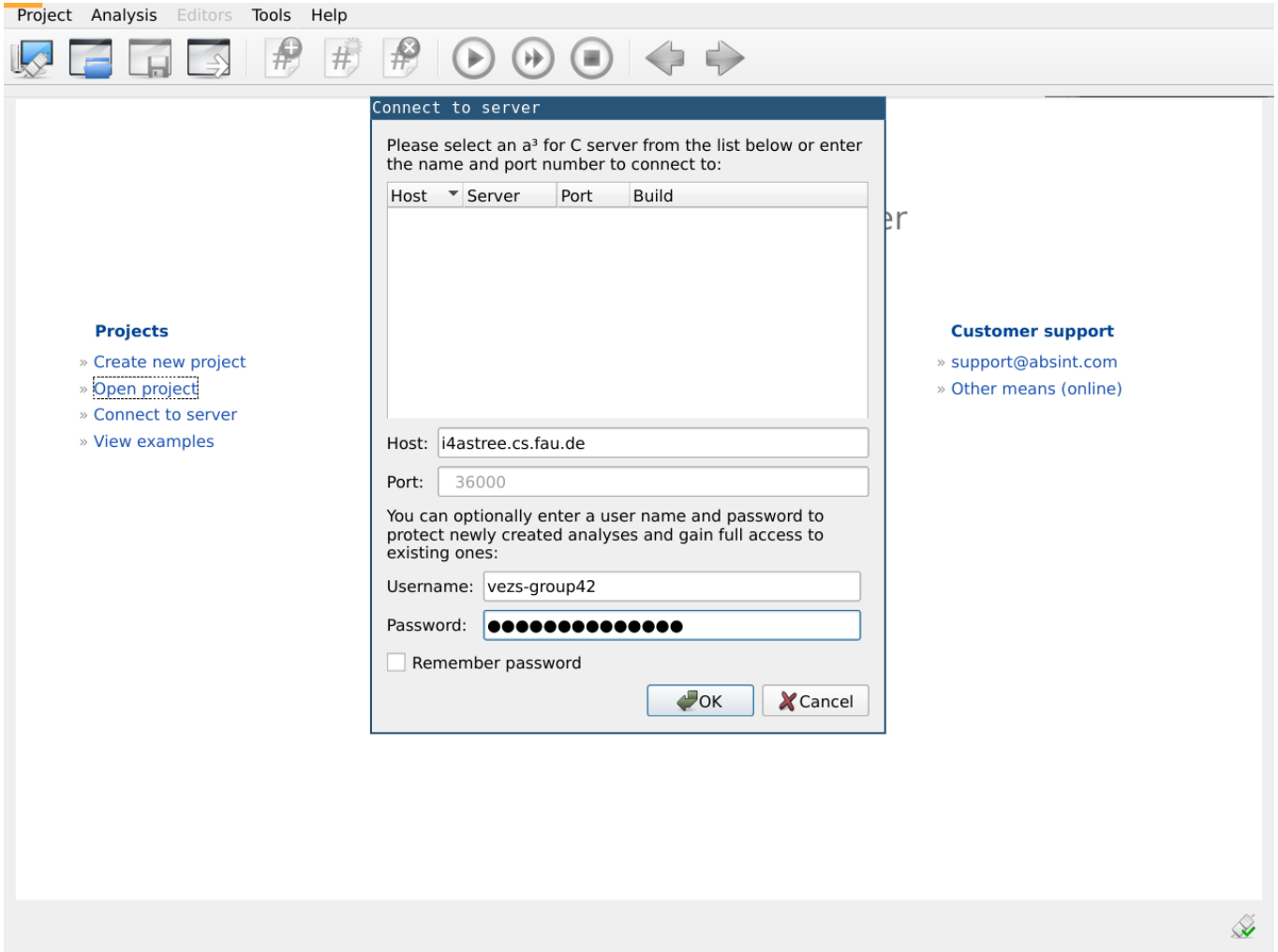
  `% /proj/i4ezs/tools/astree_c/bin/a3c`

- Anmeldung mit Benutzername und Passwort

  ⇝ Passwort wird bei der ersten Anmeldung festgelegt

- Dokumentation
  - PDF: `/proj/i4ezs/tools/astree_c/share/a3_c/help/a3c.pdf`

Anmelden



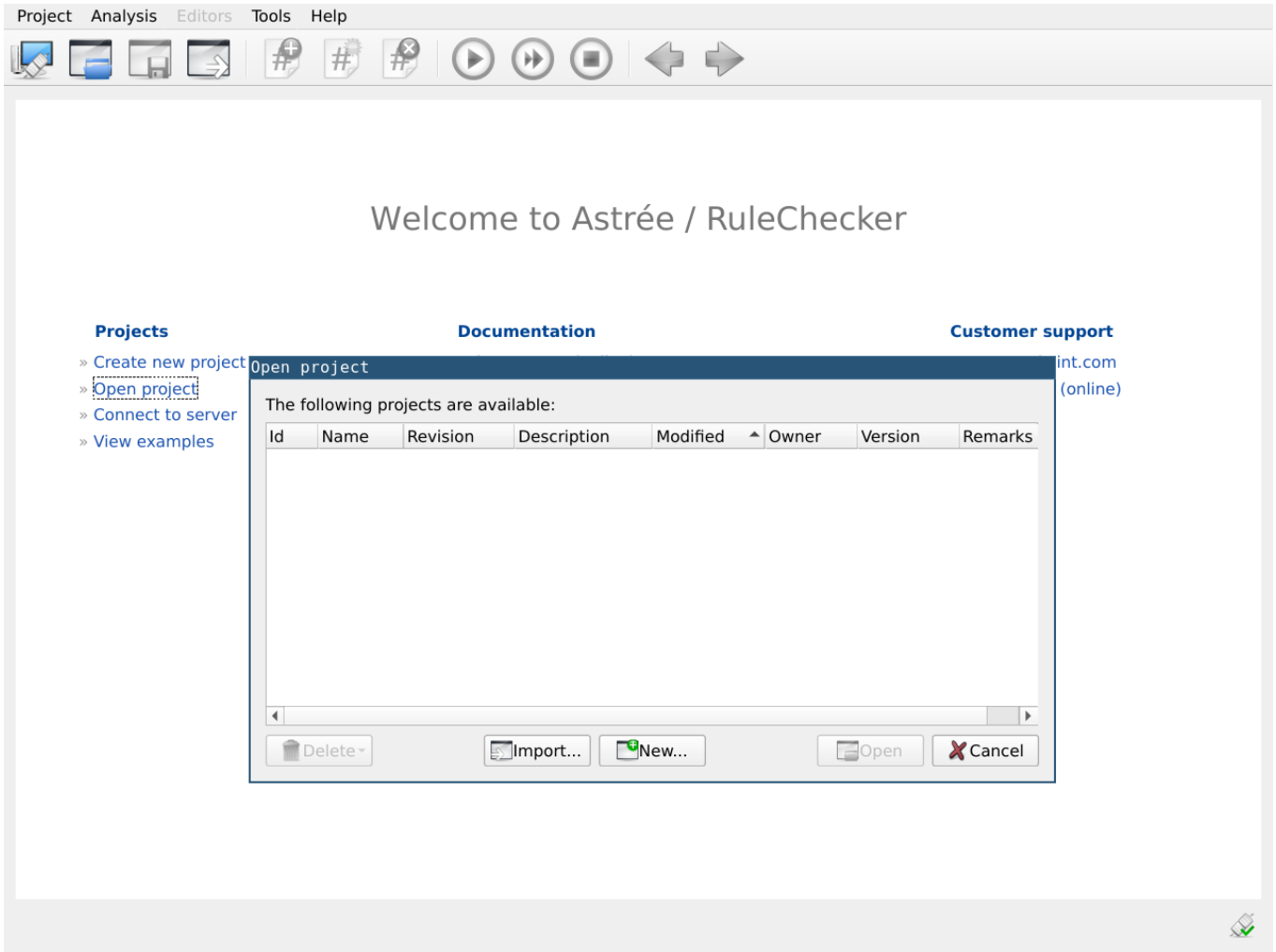
Host i4astree.cs.fau.de

Benutzer vezs-groupXX

Port 36000

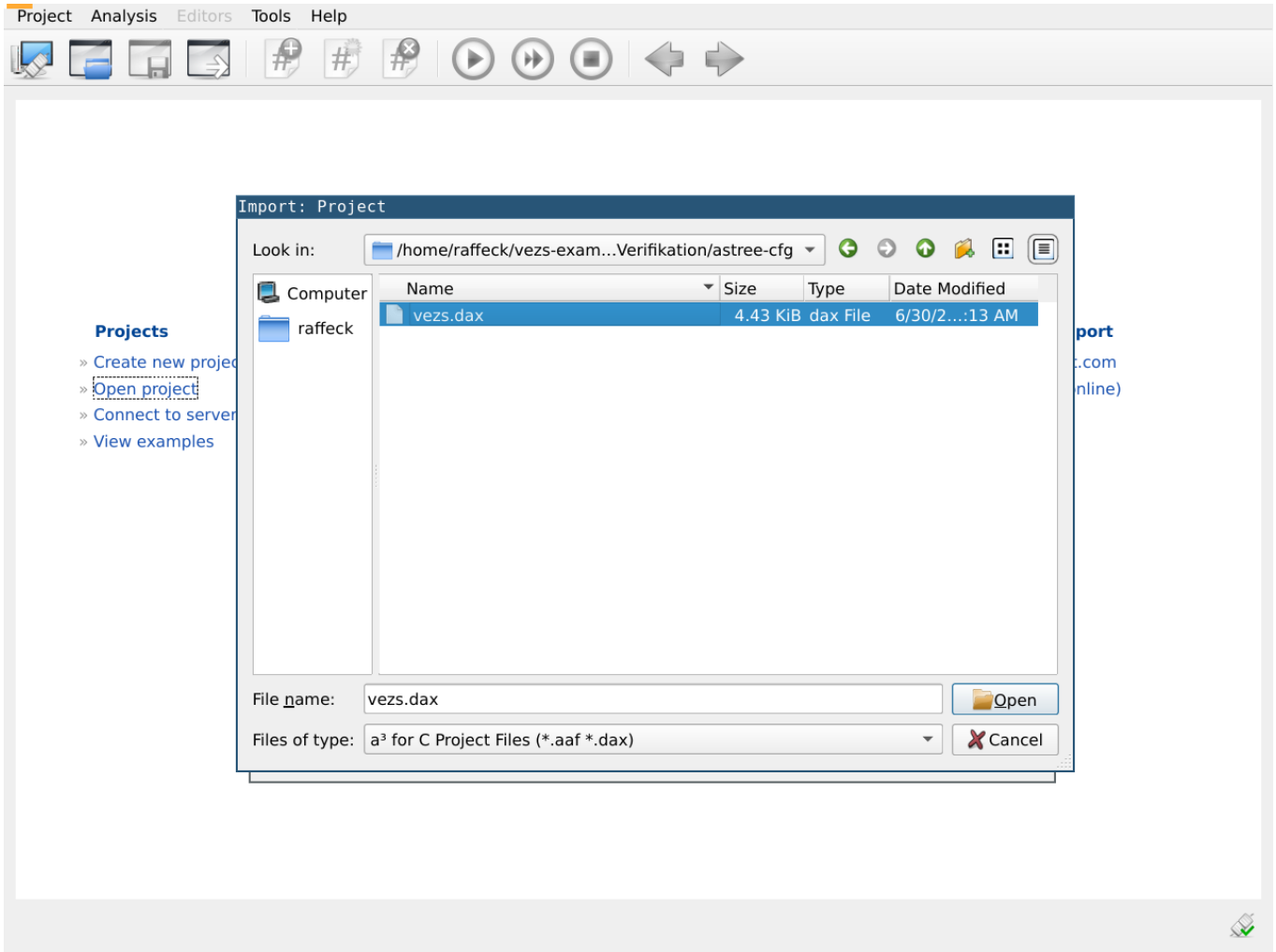
Passwort Beliebig wählbar

Projekt anlegen



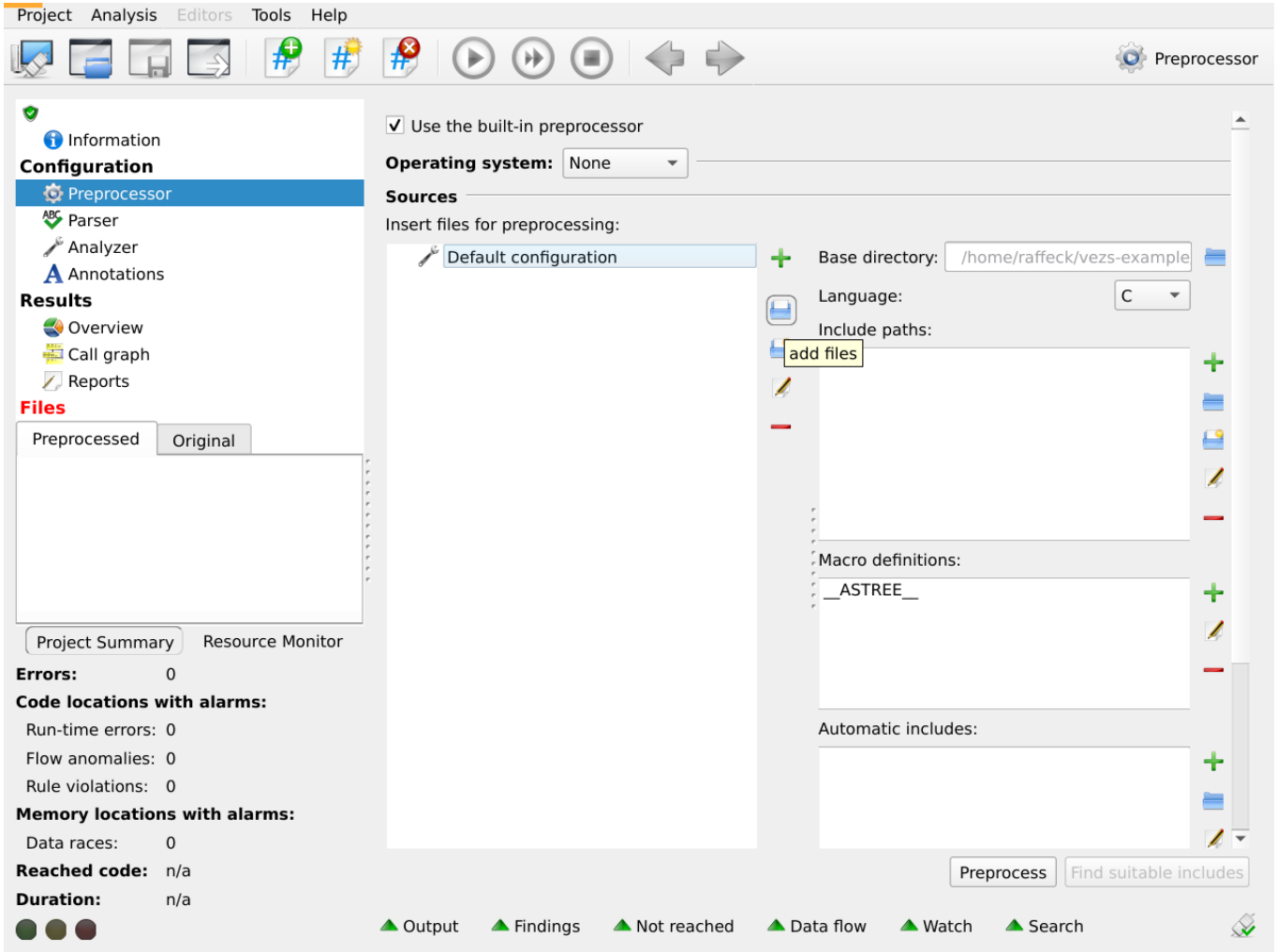
- „Import...“
- Projekt aus Vorgabedatei `astree-cfg/vezs.dax` importieren

Projekt anlegen



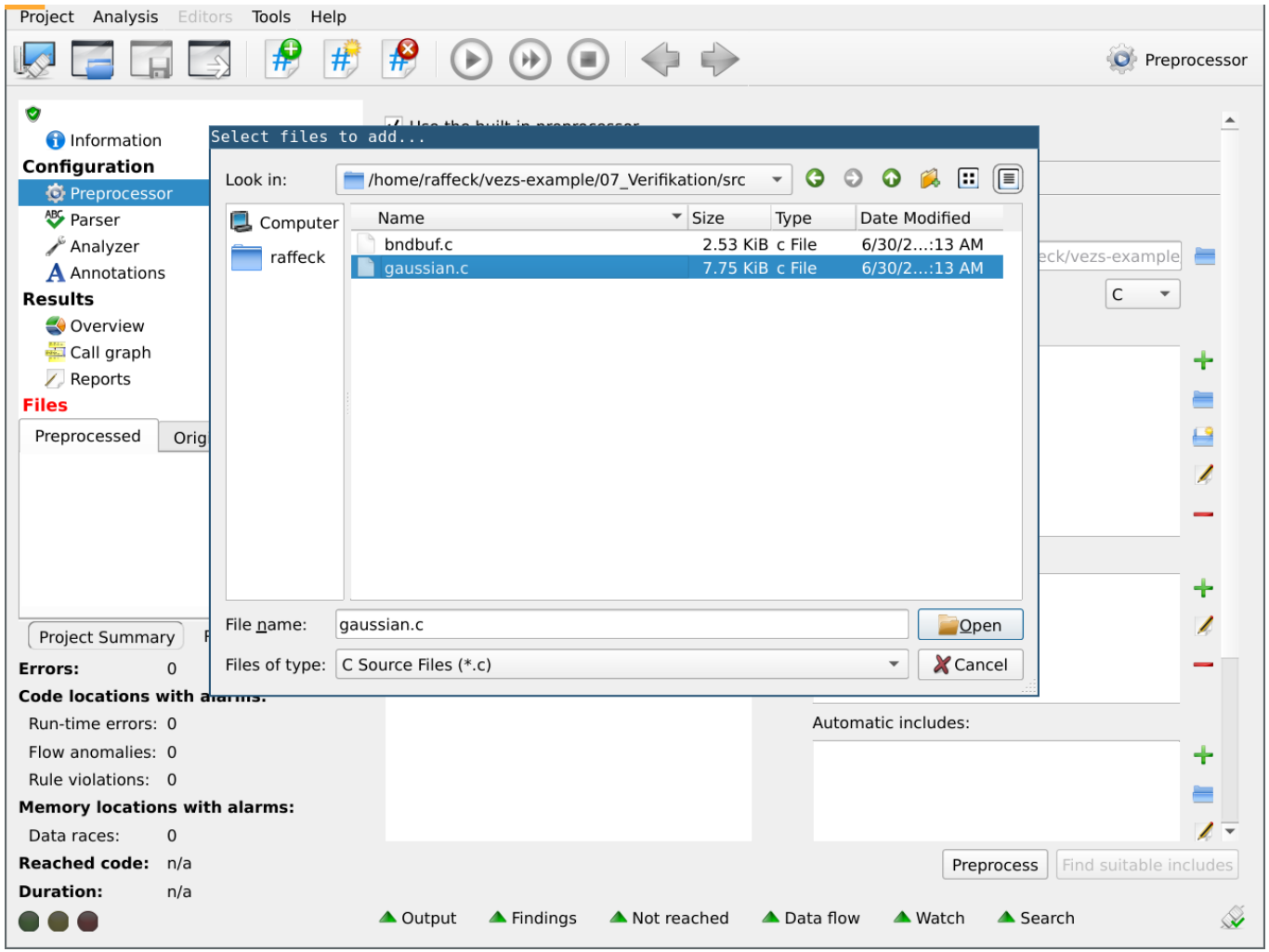
- „Import...“
- Projekt aus Vorgabedatei `astree-cfg/vezs.dax` importieren

Quelldateien konfigurieren



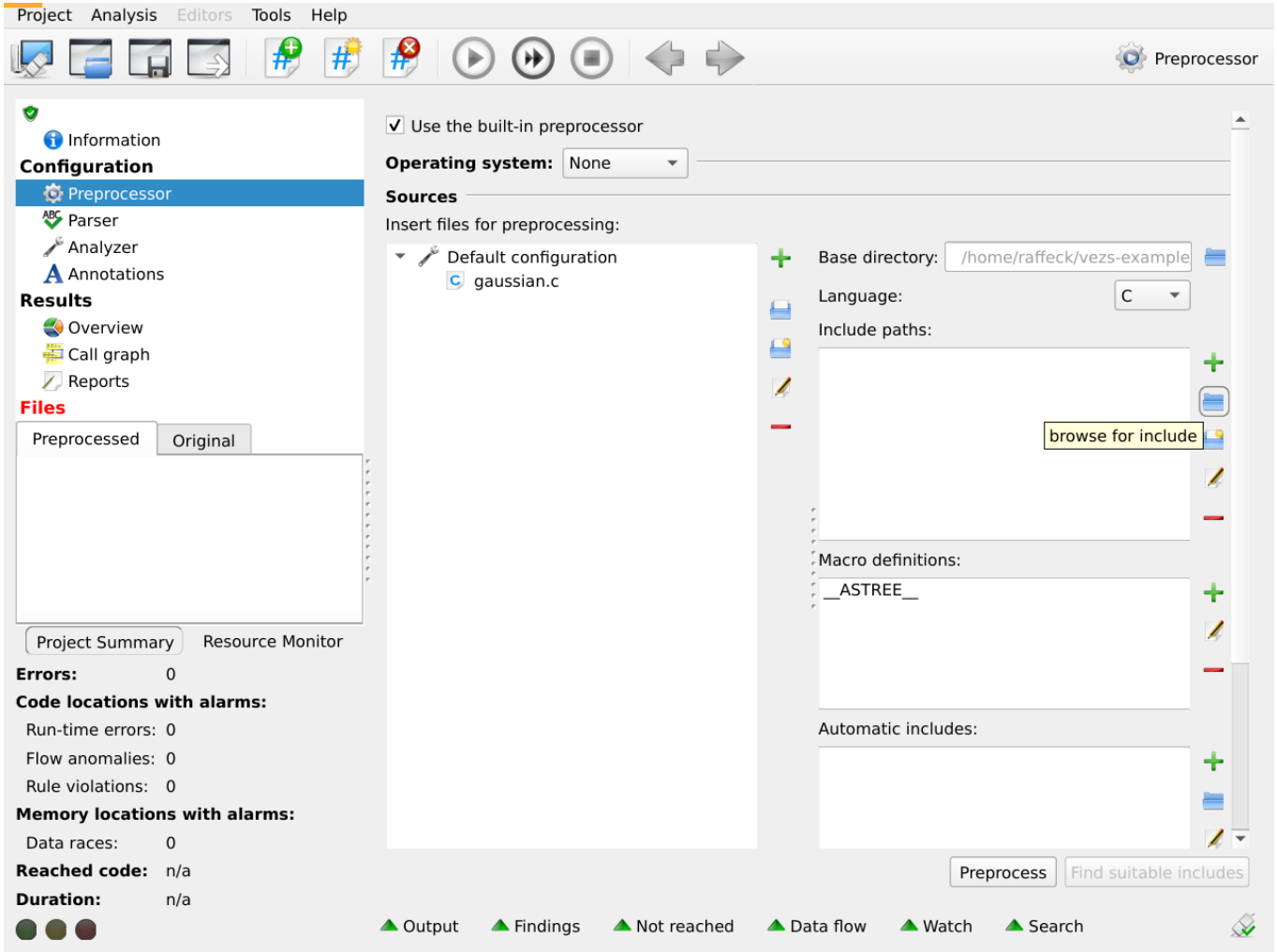
- Quelltextdateien und Includepfade definieren

Quelldateien konfigurieren



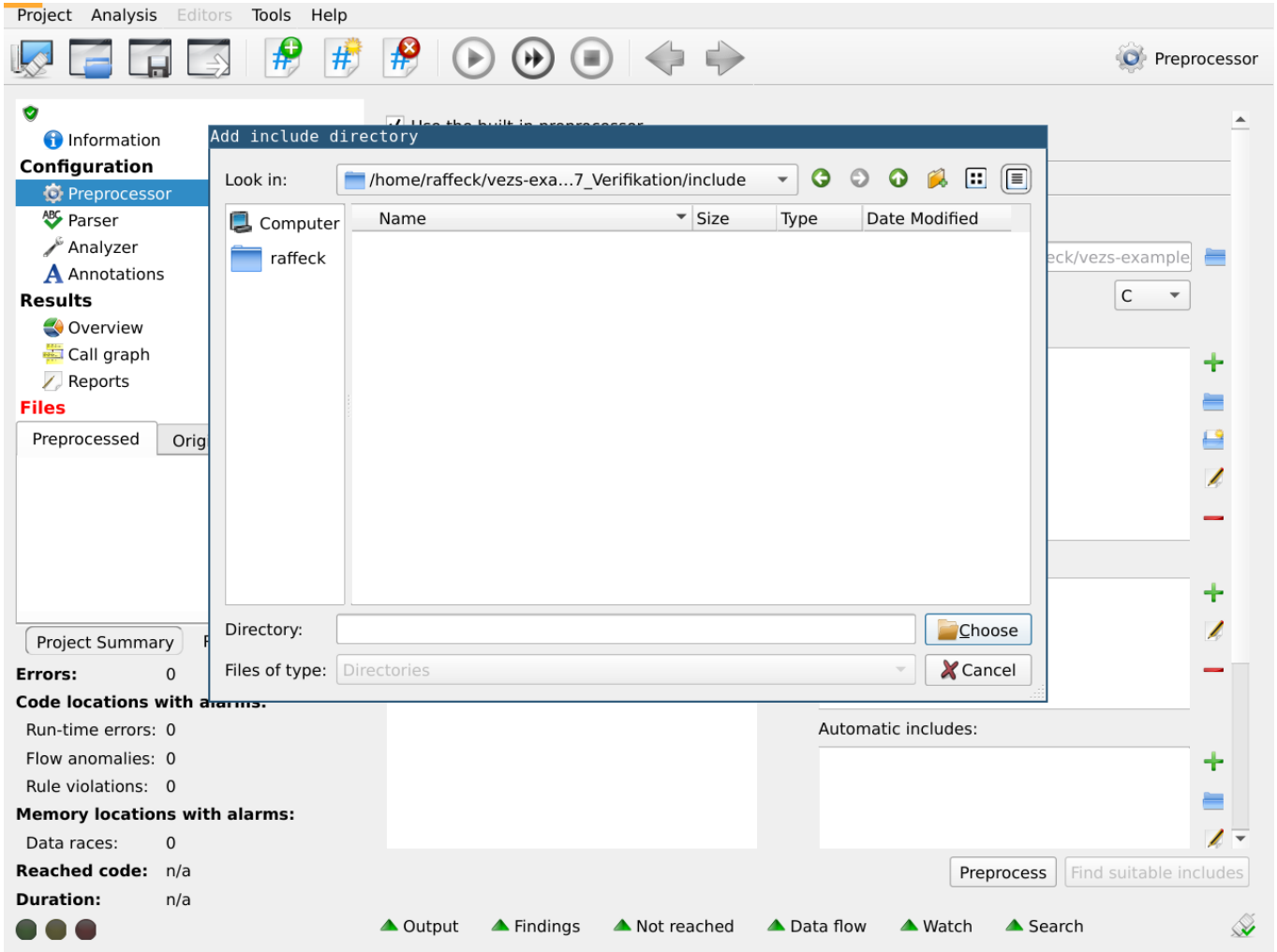
- Quelltextdateien und Includepfade definieren

Quelldateien konfigurieren



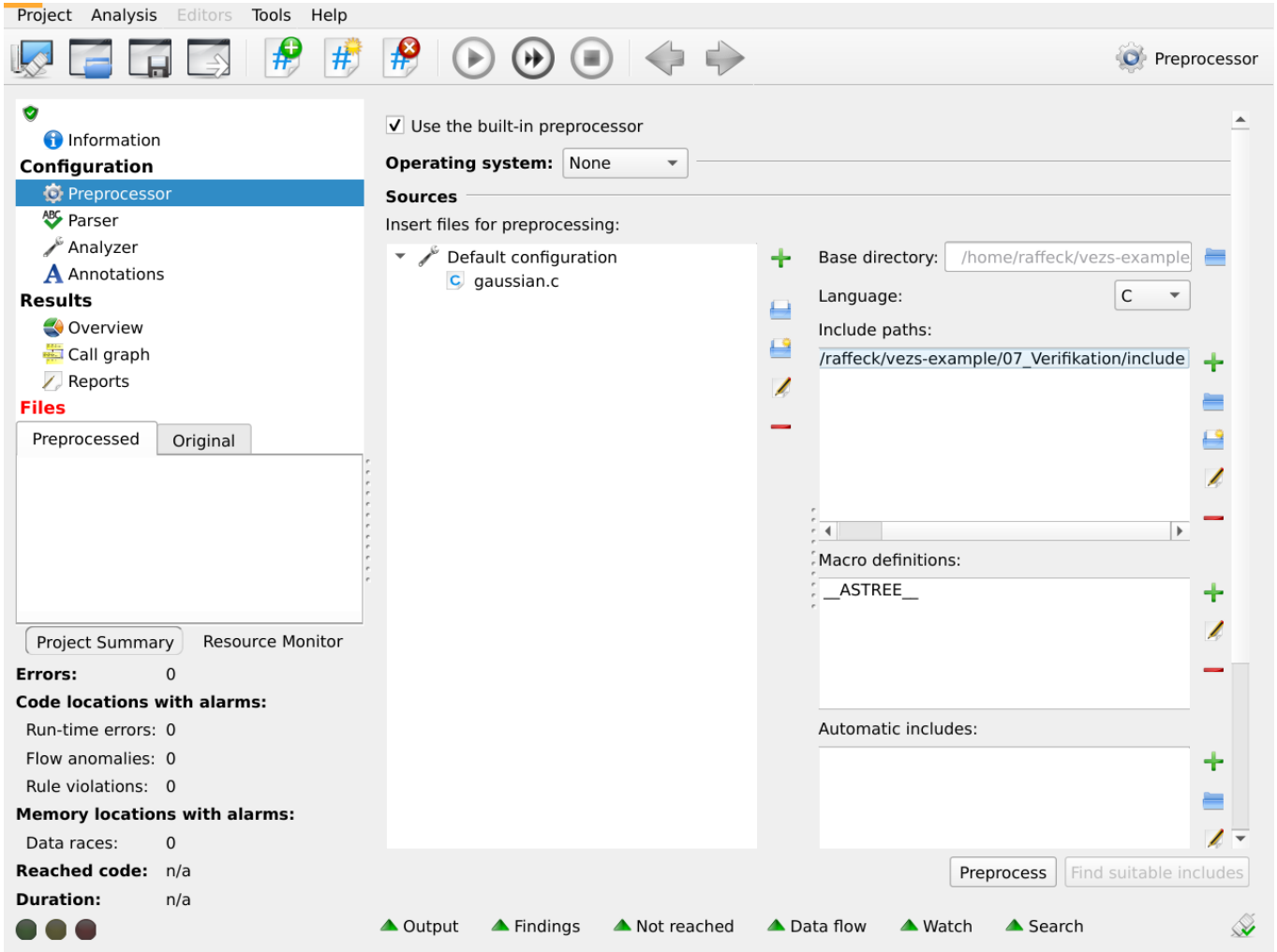
- Quelltextdateien und Includepfade definieren

Quelldateien konfigurieren



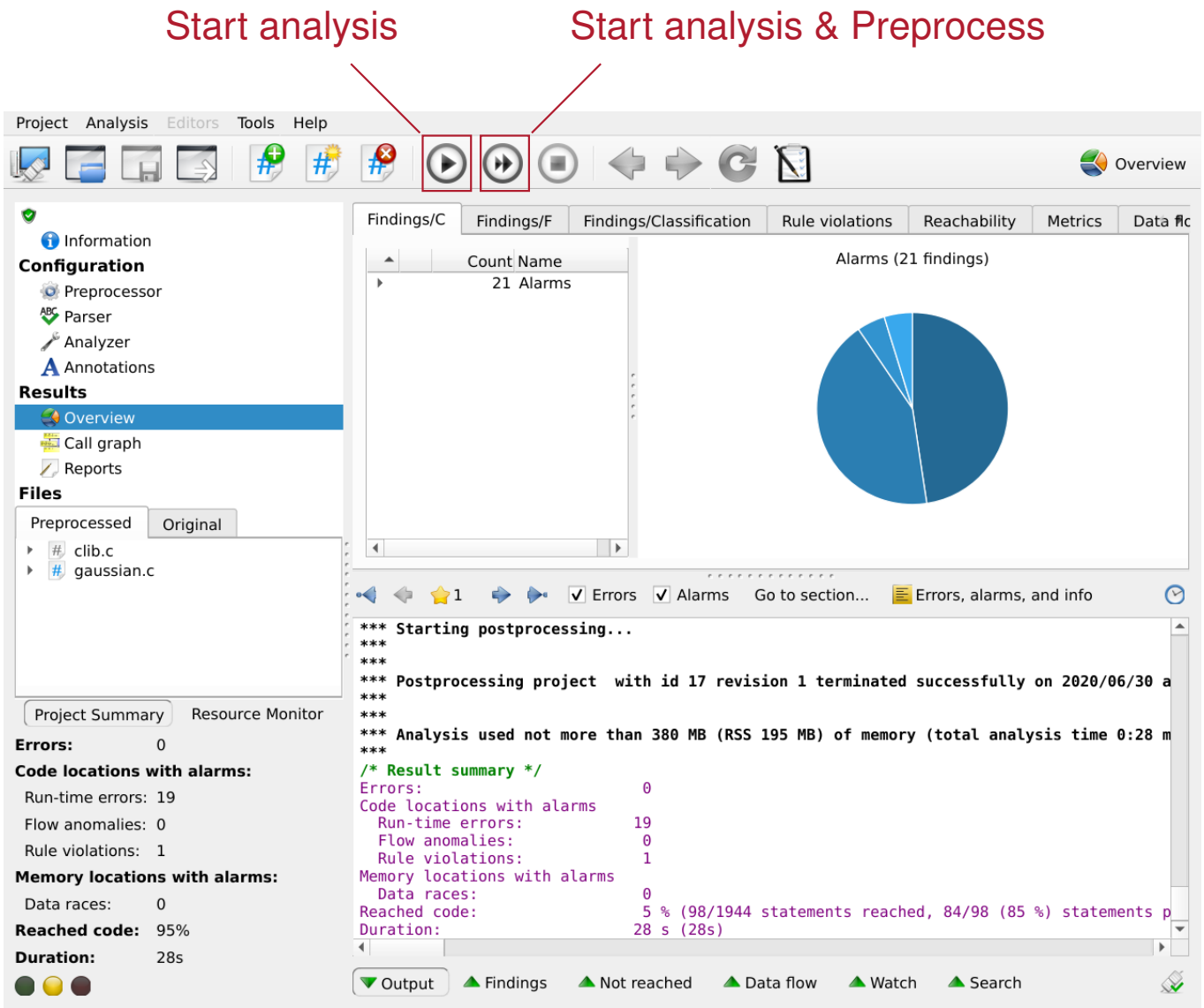
- Quelltextdateien und Includepfade definieren

Quelldateien konfigurieren



- Quelltextdateien und Includepfade definieren

Analyse starten



Literatur I

AbsInt Angewandte Informatik GmbH.
The Static Analyzer Astrée, April 2012.

Rolf Wanka.
Sachen gibt's, die gibt's gar nicht.