

# Verlässliche Echtzeitsysteme

Übungen zur Vorlesung

Abstrakte Interpretation

Phillip Raffeck, Tim Rheinfels, Simon Schuster, Peter Wägemann

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

Wintersemester 2022

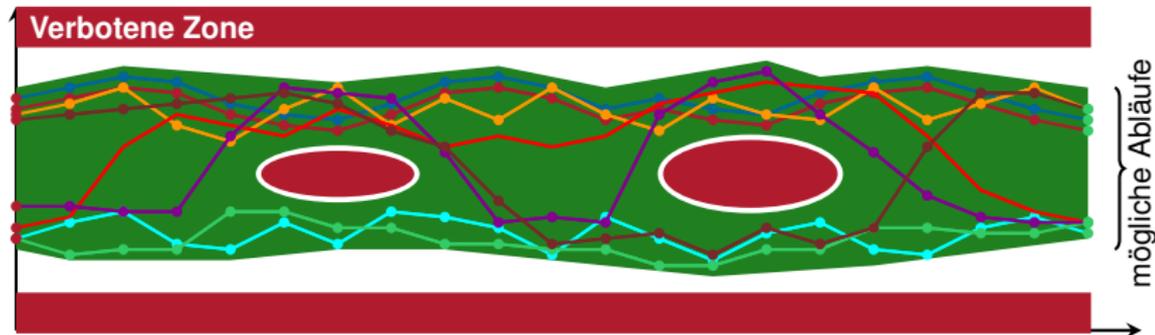


- Ziel: *bewiesenermaßen* korrektes Verhalten von Programmen
  - bisher: nichtfunktionale Eigenschaften
  - jetzt: semantische, *funktionale* Eigenschaften
- Werkzeuge: Astrée & Frama-C
- Grundvoraussetzung: Regeln zum logischen Schließen
  - In unserer Konfiguration (an sich mächtiger):
  - Astrée: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



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

- Ziel: Nachweis der Abwesenheit von Laufzeitfehlern
- Findet *alle* potentiellen Laufzeitfehler
- Leider auch *falsch-positiv*  
→ **Gödelsches Unvollständigkeitstheorem**

## Programm ist korrekt, wenn

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



- Überschreitung von Array-Grenzen
- Ganzzahldivision durch Null
- Ungültige Dereferenzierung, arithmetische Überläufe
- Ungültige Gleitkommaoperationen
- Unerreichbarer Code
- Lesezugriff auf nicht initialisierte Variablen
- Verletzung benutzerdefinierter Zusicherungen  
~> `assert()`



- 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



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))`

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

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

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



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

- Modelliert Veränderung der Variablen V1 bis Vn

→ Braucht man um Stubs zu bauen

- Beispiele
  - Emulation von Sensoren
  - Beschreibung des Verhaltens von Bibliotheksfunktionen
- Kein *effect* → 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



## `__ASTREE_volatile_input((V))`

- Zeigt an, dass V sich jederzeit ändern kann

↪ Modelliert Eingabe von außen

## `__ASTREE_volatile_input((Vp, r))`

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



- Viele Echtzeitsysteme endlosschleifenbasiert
- Allerdings durch andere Umstände begrenzt
- 1kHz Ausführungsfrequenz, Neustart nach 7 Tagen  $\leadsto$  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 }
```

⇒ Wert von `state_log` begrenzt



- 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 }
```



```
__ASTREE_analysis_log(()
```

- Gibt Zustand der Analyse an dieser Stelle aus

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

- Zeigt Zustand der Analyse in Bezug auf einzelne Variablen an

```
__ASTREE_print("text")
```

- Gibt Text aus



# Analyse untersuchen

The screenshot shows the Astrée IDE interface. The main window displays the original source code of `main.c` with annotations. The code is as follows:

```
346
347
348 int main(void) {
349     int i = 0;
350     _ASTREE_modify((i; [1,20]));
351     _ASTREE_log_vars((i));
352     i += 20;
353     _ASTREE_log_vars((i));
354     _ASTREE_assert((i > 10 && i < 100));
355
356
357 /**
358
```

The bottom panel shows the analysis results, including error messages and execution logs. The error messages are:

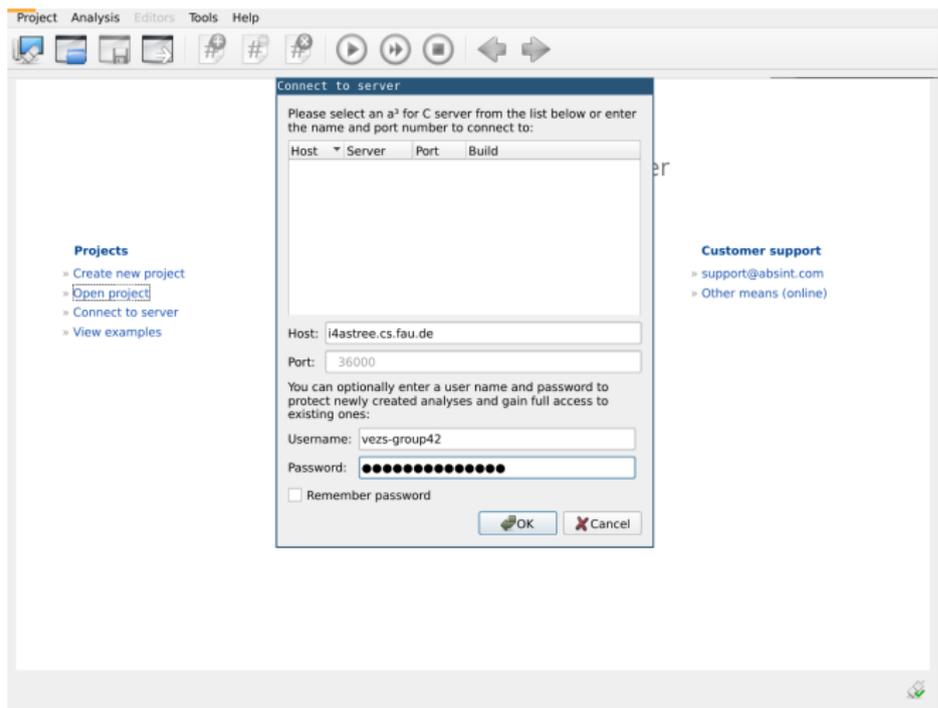
```
ASTREE_alarm((raise_at caller;check_stdlib_limits)); at clib.c:1409.26-80
ASTREE_alarm((raise_at caller;check_stdlib_limits)); at clib.c:1380.25-79
ASTREE_alarm((raise_at caller;check_stdlib_limits)); at clib.c:1369.25-79
ASTREE_alarm((raise_at caller;check_stdlib_limits)); at clib.c:1358.25-79
ASTREE_alarm((raise_at caller;check_stdlib_limits)); at clib.c:1347.25-79
```

The execution logs are:

```
/* Domains: Pointers, and Guard domain, and Packed (Octagons), and High_passband_domain(10), and Sec
No ambiguity due to side effects in expressions
/* Executing <main> */
[ log:
call#main@348:
direct =
<init: i : initialized >
<integers (intv+cong+bitfield+set): i in [1, 20] /\ != 0 >
Equivalence Class:i:{i;}
i does not depend on itself
at main.c:351.1-24 ]
[ log:
call#main@348:
direct =
<init: i : initialized >
<integers (intv+cong+bitfield+set): i in [21, 40] /\ != 0 >
Equivalence Class:i:{i;}
i does not depend on itself
|i| <= 1.*(20. + clock *0.) + 20. <= 72000040.
at main.c:353.1-24 ]
[ call#main@348 at main.c:348.0-396.1
```

- 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





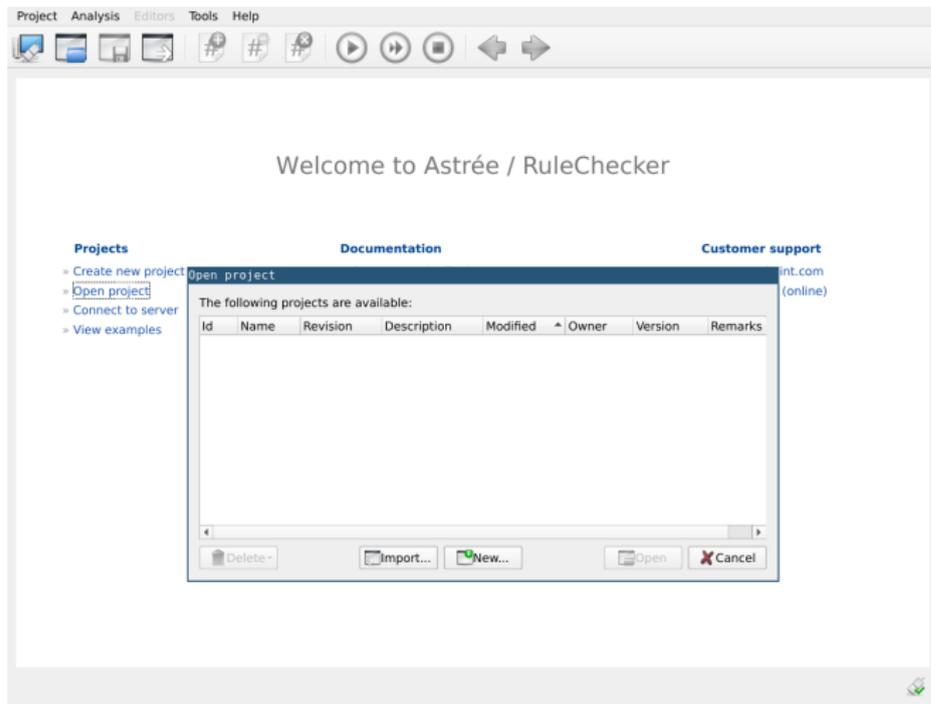
Host i4astree.cs.fau.de

Benutzer vezs-groupXX

Port 36000

Passwort Beliebig wählbar

# Projekt anlegen



■ „Import...“

■ Projekt aus Vorgabedatei `astree-cfg/vezs.dax` importieren



# Quelldateien konfigurieren

Project Analysis Editors Tools Help

Preprocessor

Use the built-in preprocessor

Operating system: None

Sources

Insert files for preprocessing:

- Default configuration
- gaussian.c

Base directory: /home/raffeck/vezs-example

Language: C

Include paths:

- /raffeck/vezs-example/07\_Verifikation/include

Macro definitions:

- \_ASTREE\_

Automatic includes:

Preprocess Find suitable includes

Project Summary Resource Monitor

Errors: 0

Code locations with alarms:

- Run-time errors: 0
- Flow anomalies: 0
- Rule violations: 0

Memory locations with alarms:

- Data races: 0

Reached code: n/a

Duration: n/a

▲ Output ▲ Findings ▲ Not reached ▲ Data flow ▲ Watch ▲ Search

## Quelltextdateien und Includepfade definieren



# Analyse starten

Start analysis

Start analysis & Preprocess

The screenshot shows the Astrée analysis tool interface. The top menu bar includes 'Project', 'Analysis', 'Editors', 'Tools', and 'Help'. The toolbar contains several icons, with two red boxes highlighting the 'Start analysis' (play button) and 'Start analysis & Preprocess' (play button with a square) icons. Red arrows point from the text labels above to these icons.

The interface is divided into several sections:

- Configuration:** Includes 'Preprocessor', 'Parser', 'Analyzer', and 'Annotations'.
- Results:** Includes 'Overview' (selected), 'Call graph', and 'Reports'.
- Files:** Shows 'Preprocessed' and 'Original' tabs, with files 'clib.c' and 'gaussian.c' listed.
- Findings/C:** A table showing 'Count Name' and '21 Alarms'.
- Alarms (21 findings):** A pie chart showing the distribution of findings.
- Output:** A text area showing the analysis results, including 'Starting postprocessing...', 'Postprocessing project with id 17 revision 1 terminated successfully on 2020/06/30 a', and 'Analysis used not more than 380 MB (RSS 195 MB) of memory (total analysis time 0:28 m'. It also includes a 'Result summary' section with statistics on errors, anomalies, and durations.

At the bottom, there are status indicators for 'Output', 'Findings', 'Not reached', 'Data flow', 'Watch', and 'Search'.



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



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

