

Verlässliche Echtzeitsysteme

Verifikation nicht-funktionaler Eigenschaften

Peter Ulbrich, Peter Wägemann

Lehrstuhl für Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

<https://www4.cs.fau.de>

KW52 2020



Wiederholung: Verifikationsverfahren

Abstraktion

Beispiel	Testfall	Clang Address Sanitizer	Clang Static Analyser	Astrée	framaC, Isabelle
Ebene	μ -Code	μ -Code + Instrumentierung	Zwischensprache / AST	Abstrakte Programmsemantik	Abstrakte Semantik + Kontrakt
Technik	return()	assert()	Symbolische Ausführung / Erreichbarkeitsanalyse	Abstrakte Interpretation	Abstrakte Interpretation / Verifikation
Konkrete Maschine	CPU	CPU	Compiler	Analyzer	Prover

dynamisch statisch unsicher sicher

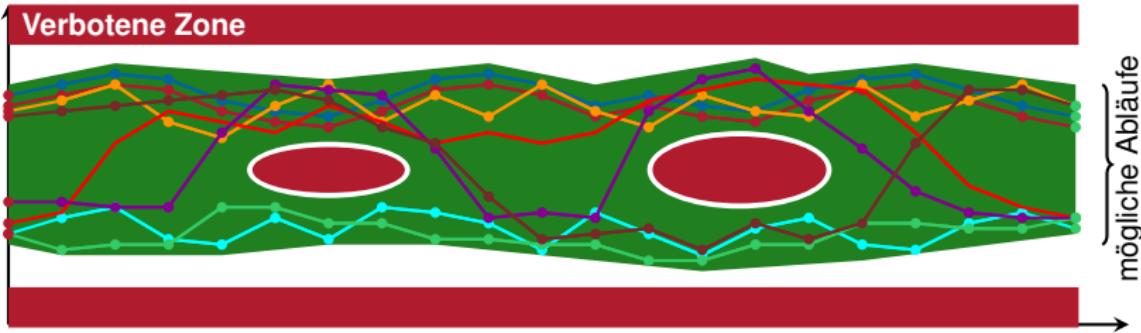
■ Statisch versus dynamisch

- Nutzung der konkreten/abstrakten Programmsemantik (siehe Folien VIII/15 ff)
- Konkrete Ausführung (Maschine) hängt jedoch von der Betrachtungsebene ab!

■ Sicher versus unsicher

- Vollständigkeit der Analyse (sicher \rightarrow 100 %, siehe Folien VIII/20 ff)
- Steht im Bezug zu einer bestimmten Spezifikation (z.B. C-Standard bei Astrée)





- Abstrakte Interpretation (engl. *abstract interpretation*)
 - Betrachtet eine abstrakte Semantik (engl. *abstract semantics*)
 - Sie umfasst alle Fälle der konkreten Programmsemantik
 - Sicherheitszonen beschreiben fehlerhafte Zustände
 - Ist die abstrakte Semantik sicher \Rightarrow konkrete Semantik ist sicher

Übersicht und Problemstellung

Abstrakte Interpretation für Laufzeitfehler ist nicht genug!

- Bislang stand Verifikation des korrekten Verhaltens im Vordergrund
 - **Abstrakte Interpretation:**
Abwesenheit von Laufzeitfehlern (Sprachstandard, nicht-funktional)



- Bislang stand Verifikation des korrekten Verhaltens im Vordergrund
 - **Abstrakte Interpretation:**
Abwesenheit von Laufzeitfehlern (Sprachstandard, nicht-funktional)



Dies ist **notwendig** jedoch **nicht hinreichend**

- Einfluss nicht-funktionaler Eigenschaften der Ausführungsumgebung
 - Anwendung ist in die Umwelt eingebettet!
 - Exemplarisch: **Speicherverbrauch** und **Laufzeit**

- Bislang stand Verifikation des korrekten Verhaltens im Vordergrund

- **Abstrakte Interpretation:**

- Abwesenheit von Laufzeitfehlern (Sprachstandard, nicht-funktional)



Dies ist **notwendig** jedoch **nicht hinreichend**

- Einfluss nicht-funktionaler Eigenschaften der Ausführungsumgebung

- Anwendung ist in die Umwelt eingebettet!

- Exemplarisch: **Speicherverbrauch** und **Laufzeit**



Einhaltung bestimmter **nicht-funktionaler Eigenschaften** garantieren?

- Speicherverbrauch: **Worst-Case Stack Usage** (WCSU, siehe 7 ff)

- Laufzeit: **Worst-Case Execution Time** (WCET, siehe 15 ff)

- Messung versus statische Analyse

1 Speicherverbrauch

- Überblick
- Messbasierte Bestimmung
- Analytische Bestimmung

2 Ausführungszeit

- Überblick
- Messbasierte WCET-Analyse
- Statische WCET-Analyse

3 Zusammenfassung





Betrachtung des Speicherverbrauchs nach Lokalität

■ Festwertspeicher (engl. *Read Only Memory, ROM*)

- Umfasst die Übersetzungseinheiten (Funktionen und Konstanten)
- Architekturabhängig (Wortbreite, Optimierungsstufe, Inlining, ...)
- Größe ist dem Compiler/Linker statisch bekannt:

```
gcc -Wl,-Map,PROGRAM.map *.o -o PROGRAM
```





Betrachtung des Speicherverbrauchs nach Lokalität

■ Festwertspeicher (engl. *Read Only Memory, ROM*)

- Umfasst die Übersetzungseinheiten (Funktionen und Konstanten)
- Architekturabhängig (Wortbreite, Optimierungsstufe, Inlining, ...)
- Größe ist dem Compiler/Linker statisch bekannt:

```
gcc -Wl,-Map,PROGRAM.map *.o -o PROGRAM
```

■ Direktzugriffspeicher (engl. *Random Access Memory, RAM*)

- In eingebetteten Systemen typischerweise statisch allokiert (globale Variablen & Stapspeicher-Konfiguration)
- Permanenter Verbrauch (architekturabhängig) ebenso statisch bekannt





Betrachtung des Speicherverbrauchs nach Lokalität

■ Festwertspeicher (engl. *Read Only Memory, ROM*)

- Umfasst die Übersetzungseinheiten (Funktionen und Konstanten)
- Architekturabhängig (Wortbreite, Optimierungsstufe, Inlining, ...)
- Größe ist dem Compiler/Linker statisch bekannt:

```
gcc -Wl,-Map,PROGRAM.map *.o -o PROGRAM
```

■ Direktzugriffspeicher (engl. *Random Access Memory, RAM*)

- In eingebetteten Systemen typischerweise statisch allokiert (globale Variablen & Stapspeicher-Konfiguration)
- Permanenter Verbrauch (architekturabhängig) ebenso statisch bekannt

Dynamischer Speicher in eingebetteten Systemen

Wird typischerweise auf den Stapspeicher (engl. *Stack*) abgebildet



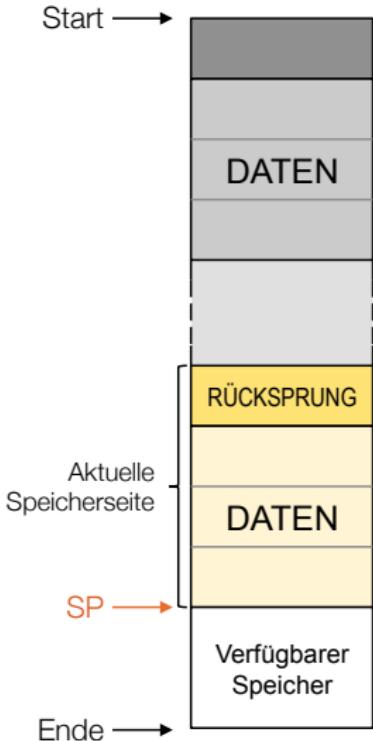
Der Stapselspeicher (Stack)

Dynamische Nutzung von Speicher ist eingebetteten Systemen



Stapselspeicher wird verwendet für:

- Lokale Variablen und Zwischenwerte
- Funktionsparameter
- Rücksprungadressen



Der Stapselspeicher (Stack)

Dynamische Nutzung von Speicher ist eingebetteten Systemen

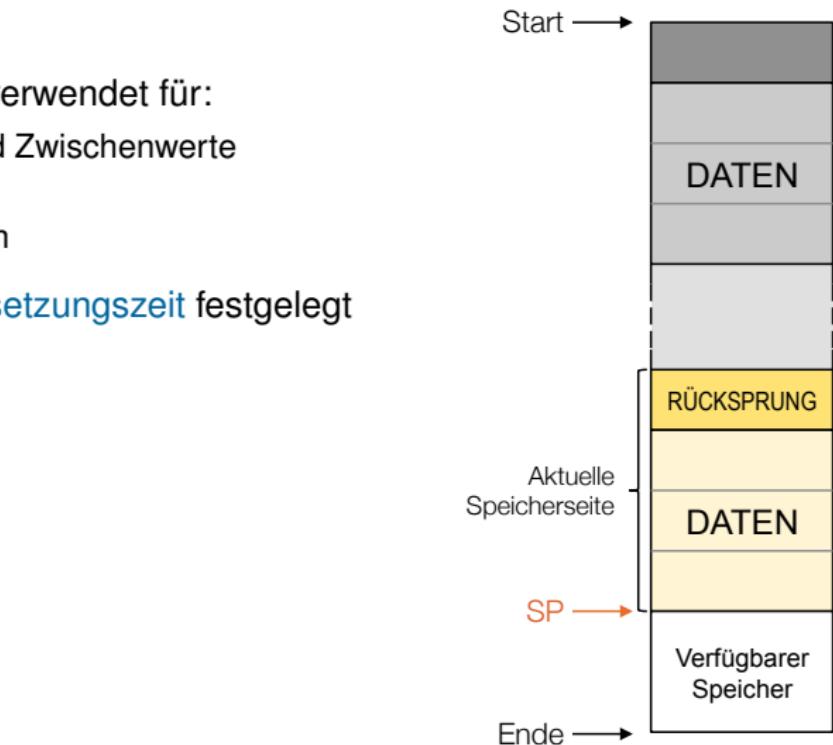


Stapselspeicher wird verwendet für:

- Lokale Variablen und Zwischenwerte
- Funktionsparameter
- Rücksprungadressen



Größe wird zur **Übersetzungszeit** festgelegt



Der Stapselspeicher (Stack)

Dynamische Nutzung von Speicher ist eingebetteten Systemen

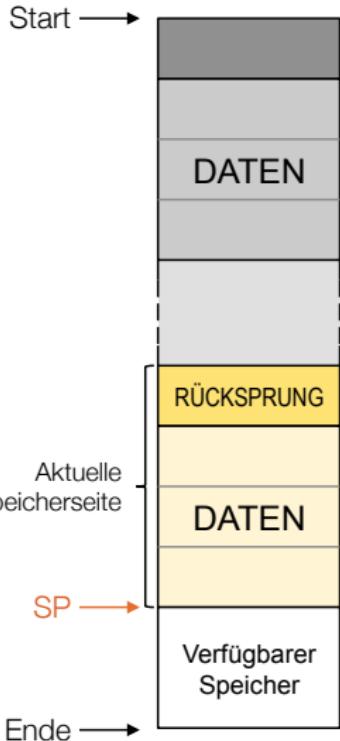
- ☞ Stapelspeicher wird verwendet für:

- Lokale Variablen und Zwischenwerte
- Funktionsparameter
- Rücksprungadressen

- ⚠ Größe wird zur **Übersetzungszeit** festgelegt

Fehlerquelle Stapelspeicher

- Unterdimensionierung \leadsto **Überlauf**
- Größenbestimmung \approx Halteproblem



Problem: Maximaler Speicherverbrauch

Fallbeispiel: Stellwerk Hamburg-Altona [7]



Elektronisches Stellwerk

- Hersteller: Siemens
- Simis-3216 (i486)
- Inbetriebnahme: 12. März 1995
- Kosten: 62,6 Mio DM
- Ersetzte 8 Stellwerke (1911-52)





■ Elektronisches Stellwerk

- Hersteller: Siemens
- Simis-3216 (i486)
- Inbetriebnahme: 12. März 1995
- Kosten: 62,6 Mio DM
- Ersetzte 8 Stellwerke (1911-52)



Dynamische Verwaltung der Stellbefehle auf dem Stapelspeicher

- Initial 3.5 KiB \leadsto **zu klein** schon für normalen Verkehr
- Fehlerbehandlungsroutine fehlerhaft \leadsto **Endlosschleife**
- Notabschaltung durch Sicherungsmaßnahmen (fail-stop)

Problem: Maximaler Speicherverbrauch

Fallbeispiel: Stellwerk Hamburg-Altona [7]



■ Elektronisches Stellwerk

- Hersteller: Siemens
- Simis-3216 (i486)
- Inbetriebnahme: 12. März 1995
- Kosten: 62,6 Mio DM
- Ersetzte 8 Stellwerke (1911-52)



Dynamische Verwaltung der Stellbefehle auf dem Stapelspeicher

- Initial 3.5 KiB \leadsto zu klein schon für normalen Verkehr
- Fehlerbehandlungsroutine fehlerhaft \leadsto Endlosschleife
- Notabschaltung durch Sicherungsmaßnahmen (fail-stop)

Ausfall am Tag der Inbetriebnahme

Kein Schienenverkehr für **2 Tage**, 2 Monate Notfahrplan



Bestimmung des Stapelspeicherverbrauchs



Überabschätzung führt zu unnötigen Kosten



Bestimmung des Stapselspeicherverbrauchs

👉 Überabschätzung führt zu unnötigen Kosten

⚠ Unterabschätzung des Speicherverbrauchs führt zu Stapelüberlauf

- Schwerwiegendes und komplexes Fehlermuster
- Undefiniertes Verhalten, **Datenfehler** oder Programmabsturz
- Schwer zu finden, reproduzieren und beheben!



Bestimmung des Stapelspeicherverbrauchs

☞ Überabschätzung führt zu unnötigen Kosten

⚠ Unterabschätzung des Speicherverbrauchs führt zu Stapelüberlauf

- Schwerwiegendes und komplexes Fehlermuster
- Undefiniertes Verhalten, **Datenfehler** oder Programmabsturz
- Schwer zu finden, reproduzieren und beheben!

■ Voraussetzungen für sinnvolle Analyse

- Zyklische Ausführungspfade vermeiden
- Keine **Rekursion**, **Funktionszeiger**, **dynamischer Speicher**



Bestimmung des Stapspeicherverbrauchs

☞ Überabschätzung führt zu unnötigen Kosten

⚠ Unterabschätzung des Speicherverbrauchs führt zu Stapelüberlauf

- Schwerwiegendes und komplexes Fehlermuster
- Undefiniertes Verhalten, **Datenfehler** oder Programmabsturz
- Schwer zu finden, reproduzieren und beheben!

■ Voraussetzungen für sinnvolle Analyse

- Zyklische Ausführungspfade vermeiden
- Keine **Rekursion**, **Funktionszeiger**, **dynamischer Speicher**

⚠ Analyse gängiger Compiler

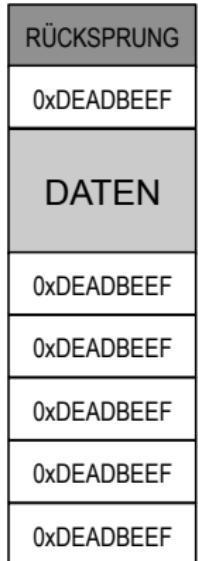
- `gcc -fstack-usage` ist **nicht genug**
- Richtwert bei der Entwicklung einzelner Funktionen

Messung des Stapelspeicherverbrauchs

Analog zum dynamischen Testen (siehe Folie VII/19 ff.)

■ Messung (Water-Marking, Stack Canaries)

- Stapelspeicher wird vorinitialisiert (z.B. 0xDEADBEEF)
- Maximaler Verbrauch der Ausführung
 ~ höchste Speicherstelle ohne Wasserzeichen
- Auf Rücksprungadressen anwendbar



Messung des Stapelspeicherverbrauchs

Analog zum dynamischen Testen (siehe Folie VII/19 ff.)

- **Messung** (Water-Marking, Stack Canaries)
 - Stapelspeicher wird **vorinitialisiert** (z.B. 0xDEADBEEF)
 - Maximaler Verbrauch **der Ausführung**
→ höchste Speicherstelle ohne Wasserzeichen
 - Auf Rücksprungadressen anwendbar
- Systemüberwachung zur Laufzeit
 - Verfahren gut geeignet zur dynamischen Fehlererkennung
 - **Stack Check** (o.ä.) in AUTOSAR, OSEK, ...

RÜCKSPRUNG
0xDEADBEEF
DATEN
0xDEADBEEF



Messung des Stapelspeicherverbrauchs

Analog zum dynamischen Testen (siehe Folie VII/19 ff.)

■ Messung (Water-Marking, Stack Canaries)

- Stapelspeicher wird **vorinitialisiert** (z.B. 0xDEADBEEF)
- Maximaler Verbrauch **der Ausführung**
 ~ höchste Speicherstelle ohne Wasserzeichen
- Auf Rücksprungadressen anwendbar

■ Systemüberwachung zur Laufzeit

- Verfahren gut geeignet zur dynamischen Fehlererkennung
- **Stack Check** (o.ä.) in AUTOSAR, OSEK, ...



Keine Aussagen zum maximalen Speicherverbrauch

- Liefert nur den konkreten Verbrauch der Messungen
- **Fehleranfällig** und **aufwendig**
- Keine Garantien möglich!

RÜCKSPRUNG
0xDEADBEEF
DATEN
0xDEADBEEF



```
1 unsigned int function(unsigned char a, unsigned char b) {  
2     unsigned int c;  
3     unsigned char d;  
4     /* code */  
5     return c;  
6 }
```



Ausführungsbedingungen bestimmen tatsächlichen Speicherbedarf



```
1 unsigned int function(unsigned char a, unsigned char b) {  
2     unsigned int c;  
3     unsigned char d;  
4     /* code */  
5     return c;  
6 }
```



Ausführungsbedingungen bestimmen tatsächlichen Speicherbedarf

- Speicherausrichtung (engl. *alignment*) von Variablen und Parametern
 - Abhängig von Binärschnittstelle (engl. *Application Binary Interface, ABI*)
 - In diesem Beispiel 16 Byte (und mehr)



```
1 unsigned int function(unsigned char a, unsigned char b) {  
2     unsigned int c;  
3     unsigned char d;  
4     /* code */  
5     return c;  
6 }
```



Ausführungsbedingungen bestimmen tatsächlichen Speicherbedarf

- Speicherausrichtung (engl. *alignment*) von Variablen und Parametern
 - Abhängig von **Binärschnittstelle** (engl. *Application Binary Interface, ABI*)
 - In diesem Beispiel 16 Byte (und mehr)
- Aufrufort der Funktion unbekannt
 - Segmentierung kann zu nahen und fernen Aufrufen führen
 - Rücksprungadressen unterschiedlicher Größen



```
1 unsigned int function(unsigned char a, unsigned char b) {  
2     unsigned int c;  
3     unsigned char d;  
4     /* code */  
5     return c;  
6 }
```



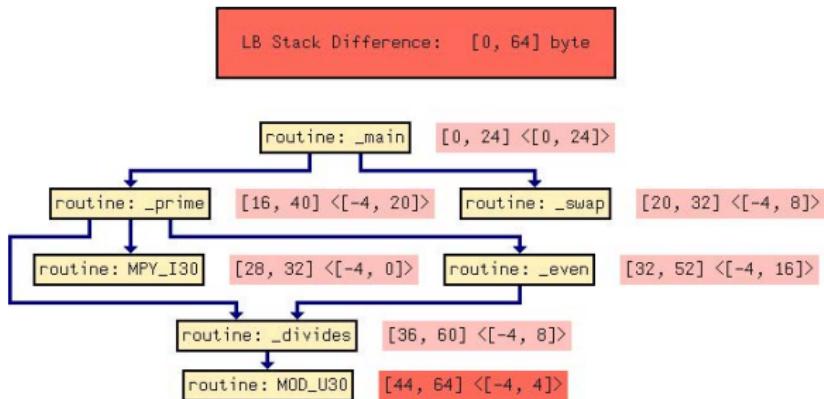
Ausführungsbedingungen bestimmen tatsächlichen Speicherbedarf

- Speicherausrichtung (engl. *alignment*) von Variablen und Parametern
 - Abhängig von **Binärschnittstelle** (engl. *Application Binary Interface, ABI*)
 - In diesem Beispiel 16 Byte (und mehr)
- Aufrufort der Funktion unbekannt
 - Segmentierung kann zu nahen und fernen Aufrufen führen
 - Rücksprungadressen unterschiedlicher Größen
- Inline-Ersetzung der Funktion (kein Stapelverbrauch für Aufruf)



Bestimmung des maximalen Stapelspeicherverbrauchs

Durch abstrakte Interpretation des Programmcodes [1]

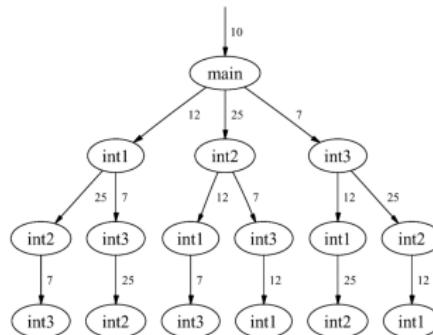


- Statische Analyse des **Kontrollfluss-** und **Aufrufgraphen**
 - Pufferüberlauf als weitere Form von Laufzeitfehler
 - Vorgehen analog zum Korrektheitsnachweis
- Weist **Abwesenheit** von Pufferüberläufen nach
 - Pfadanalyse \leadsto maximaler Speicherverbrauch
 - Ausrollen von Schleifen (siehe Folie X/32)
 - Partitionierung und Werteanalyse (siehe Folie X/33)



Systemweite Stackverbrauchsanalyse

Abstrakte Interpretation unter Berücksichtigung von Interrupts [5]



Problem systemweiter Stackverbrauchsanalyse

- Interrupts werden auf aktuellem Stack ausgeführt
- **Verschachtelte Interrupts** möglich



Lösung: abstrakte Interpretation erstellt **Interrupt-Preemption-Graph**

- Bestandteile der abstrakten Domäne
 - Register der Interrupt-Maskierung
 - Status-Register
 - Stackpointer
- Traversierung des Interrupt-Preemption-Graph \leadsto **WCSU**

1 Speicherverbrauch

- Überblick
- Messbasierte Bestimmung
- Analytische Bestimmung

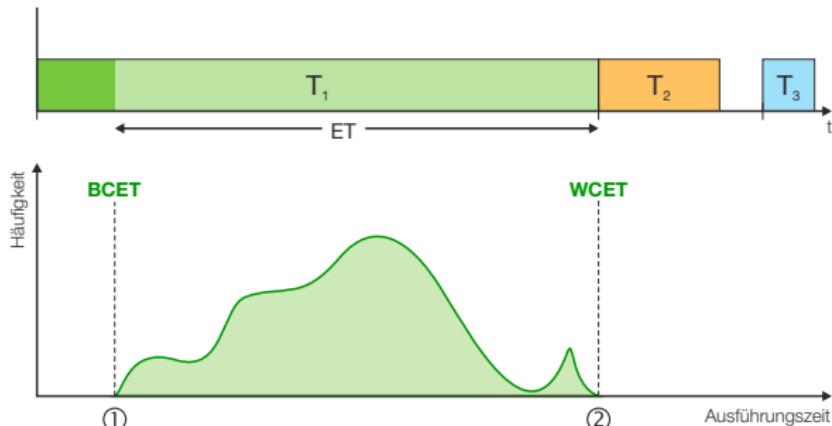
2 Ausführungszeit

- Überblick
- Messbasierte WCET-Analyse
- Statische WCET-Analyse

3 Zusammenfassung

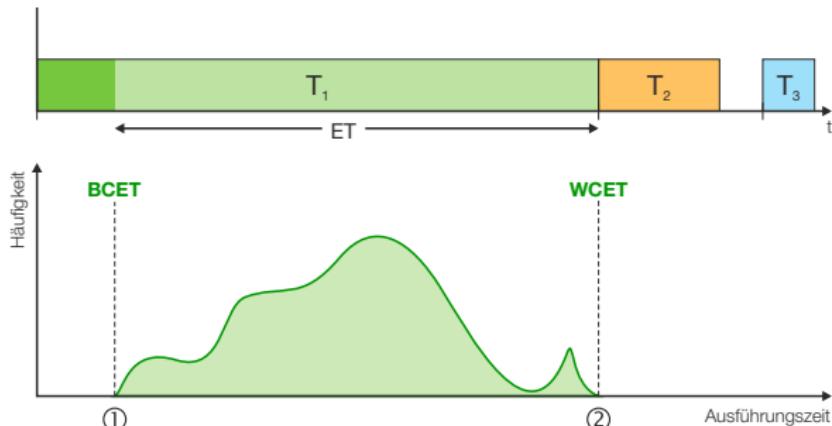


Die maximalen Ausführungszeiten



- Alle sprechen von der maximalen Ausführungszeit (e)
 - *Worst Case Execution Time (WCET)* e_i (vgl. [6] Folie III-2/28)

Die maximalen Ausführungszeit



- Alle sprechen von der maximalen Ausführungszeit (e)
 - *Worst Case Execution Time (WCET)* e_i (vgl. [6] Folie III-2/28)
- Tatsächliche Ausführungszeit bewegt sich zwischen:
 - 1 bestmöglicher Ausführungszeit (*Best Case Execution Time, BCET*)
 - 2 schlechtest möglicher Ausführungszeit (besagter *WCET*)

Bestimmung der WCET – eine Herausforderung

Wovon hängt die maximale Ausführungszeit ab?

Beispiel: Bubblesort

```
void bubbleSort(int a[],int size) {  
    int i,j;  
  
    for(i = size - 1; i > 0; --i) {  
        for (j = 0; j < i; ++j) {  
            if(a[j] > a[j+1]) {  
                swap(&a[j],&a[j+1]);  
            }  
        }  
    }  
  
    return;  
}
```



Beispiel: Bubblesort

```
void bubbleSort(int a[],int size) {  
    int i,j;  
  
    for(i = size - 1; i > 0; --i) {  
        for (j = 0; j < i; ++j) {  
            if(a[j] > a[j+1]) {  
                swap(&a[j],&a[j+1]);  
            }  
        }  
    }  
  
    return;  
}
```

Programmiersprachenebene:

- Anzahl der Schleifendurchläufe hängt von der Größe des Feldes a[] ab
 - Anzahl der Vertauschungen (swap) hängt von dessen Inhalt
- ⚠ Exakte Vorhersage ist kaum möglich
- Größe und Inhalt von a[] kann zur Laufzeit variieren
 - Welches ist der längste Pfad?

Beispiel: Bubblesort

```
void bubbleSort(int a[],int size) {  
    int i,j;  
  
    for(i = size - 1; i > 0; --i) {  
        for (j = 0; j < i; ++j) {  
            if(a[j] > a[j+1]) {  
                swap(&a[j],&a[j+1]);  
            }  
        }  
    }  
  
    return;  
}
```

Programmiersprachenebene:

- Anzahl der Schleifendurchläufe hängt von der Größe des Feldes a[] ab
 - Anzahl der Vertauschungen (swap) hängt von dessen Inhalt
- ⚠ Exakte Vorhersage ist kaum möglich
- Größe und Inhalt von a[] kann zur Laufzeit variieren
 - Welches ist der längste Pfad?

■ Maschinenprogrammebene:

- Ausführungszeit der Elementaroperationen (ADD, LOAD, ...)
- ⚠ Prozessorabhängig und für moderne Prozessoren sehr schwierig
- Cache ↗ Liegt die Instruktion/das Datum im schnellen Cache?
 - Pipeline ↗ Wie ist der Zustand der Pipeline an einer Instruktion?
 - Out-of-Order-Execution, Branch-Prediction, Hyper-Threading, ...



- Idee: Prozessor selbst ist das präziseste Hardware-Modell
 - Dynamische Ausführung und Beobachtung der Ausführungszeit

- 👉 **Idee:** Prozessor selbst ist das präziseste Hardware-Modell
 - Dynamische Ausführung und Beobachtung der Ausführungszeit
- **Messbasierte WCET-Analyse:**
 - **Intuitiv** und **gängige Praxis** in der Industrie
 - Weiche/feste Echtzeitsysteme erfordern keine sichere WCET
 - Einfach umzusetzen, verfügbar und anpassbar
 - Verschafft leicht **Orientierung** über die tatsächliche Laufzeit
 - **Geringer Aufwand** zur Instrumentierung (Plattformwechsel)
 - Eingeschränkte Verfügbarkeit statischer Analysewerkzeuge (HW-Plattform)
 - **Sinnvolle Ergänzung** zur statischen WCET-Analyse (s. IX/20ff)
 - **Validierung** statisch bestimmter Werte
 - Ausgangspunkt für die Verbesserung der statischen Analyse

- ☞ **Idee:** Prozessor selbst ist das präziseste Hardware-Modell
 - Dynamische Ausführung und Beobachtung der Ausführungszeit
- **Messbasierte WCET-Analyse:**
 - **Intuitiv** und **gängige Praxis** in der Industrie
 - Weiche/feste Echtzeitsysteme erfordern keine sichere WCET
 - Einfach umzusetzen, verfügbar und anpassbar
 - Verschafft leicht **Orientierung** über die tatsächliche Laufzeit
 - **Geringer Aufwand** zur Instrumentierung (Plattformwechsel)
 - Eingeschränkte Verfügbarkeit statischer Analysewerkzeuge (HW-Plattform)
 - **Sinnvolle Ergänzung** zur statischen WCET-Analyse (s. IX/20ff)
 - **Validierung** statisch bestimmter Werte
 - Ausgangspunkt für die Verbesserung der statischen Analyse



Das Richtigste zu messen ist das Problem!



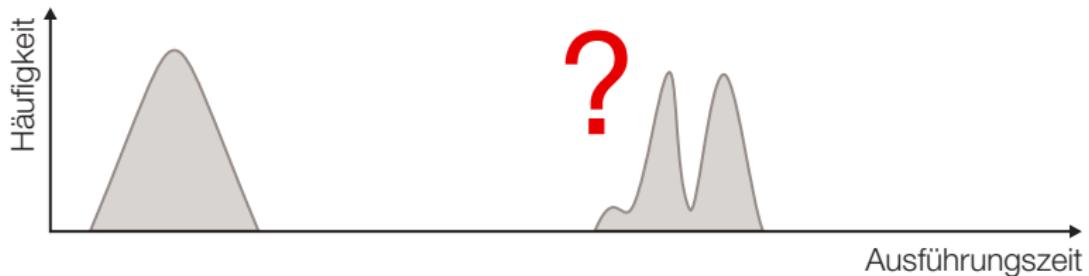
Herausforderungen der Messung

- ☞ Messungen umfassen stets das **Gesamtsystem**
 - Hardware, Betriebssystem, Anwendung(en), ...
- ⚠ **Fluch** und **Segen**



Herausforderungen der Messung

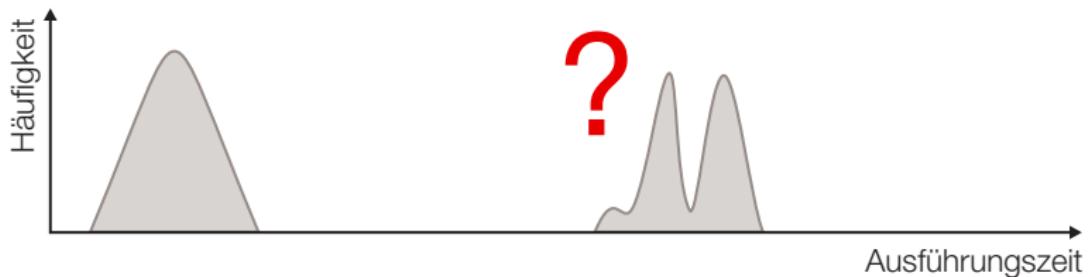
- ☞ Messungen umfassen stets das **Gesamtsystem**
 - Hardware, Betriebssystem, Anwendung(en), ...
- ⚠ **Fluch und Segen**
- Mögliches Ergebnis einer Messung:



Herausforderungen der Messung

- ☞ Messungen umfassen stets das **Gesamtsystem**
 - Hardware, Betriebssystem, Anwendung(en), ...
- ⚠ **Fluch und Segen**

- Mögliches Ergebnis einer Messung:

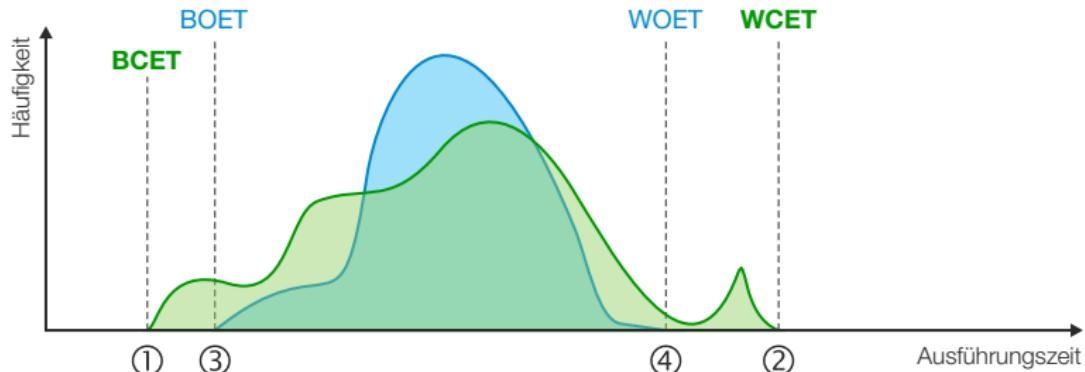


Probleme und Anomalien

- Nebenläufige Ereignisse unterbinden → Verdrängung
- Gewählte Testdaten führen nicht unbedingt zum längsten Pfad
- Seltene Ausführungsszenarien → Ausnahmefall
- Abschnittsweise WCET-Messung ↗ globalen WCET
- Wiederherstellung des **Hardwarezustandes** schwierig/unmöglich



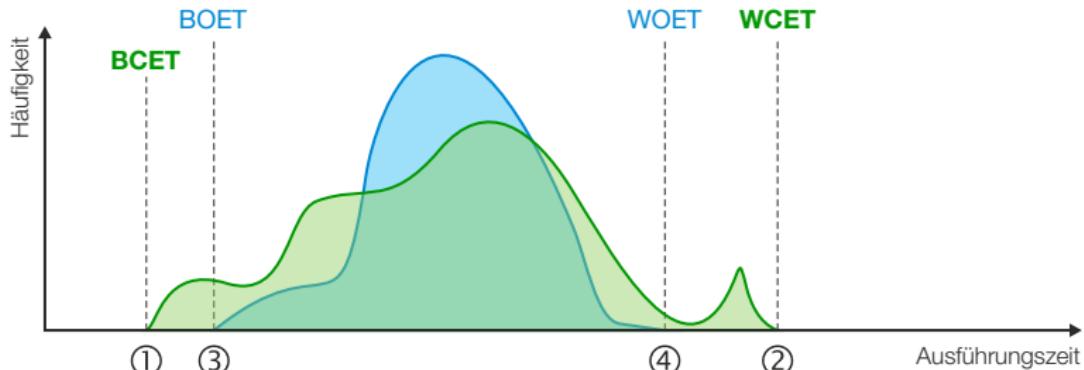
Aussagekraft messbasierter WCET-Analyse



■ Dynamische WCET-Analyse liefert **Messwerte**:

- 3 Bestmögliche beobachtete Ausführungszeit
(Best Observed Execution Time, **BOET**)
- 4 Schlechtest mögliche beobachtete Ausführungszeit
(Worst Observed Execution Time, **WOET**)

Aussagekraft messbasierter WCET-Analyse



■ Dynamische WCET-Analyse liefert **Messwerte**:

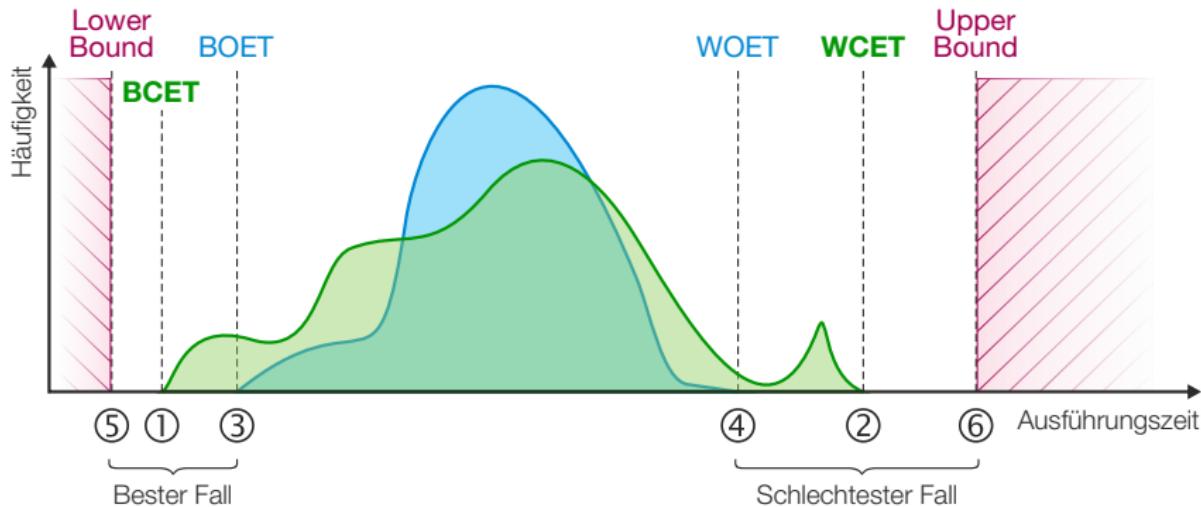
- 3 Bestmögliche beobachtete Ausführungszeit
(Best Observed Execution Time, **BOET**)
- 4 Schlechtest mögliche beobachtete Ausführungszeit
(Worst Observed Execution Time, **WOET**)



Messbasierte Ansätze unterschätzen die WCET meistens



Überblick: Statische WCET-Analyse



- Statische WCET-Analyse liefert Schranken:
 - 5 Geschätzte untere Schranke (Lower Bound)
 - 6 Geschätzte obere Schranke (Upper Bound)
- Die Analyse ist **sicher** (sound) falls $\text{Upper Bound} \geq \text{WCET}$



Problem: Längster Pfad

Beispiel: Bubblesort

```
void bubbleSort(int a[],int size) {  
    int i,j;  
  
    for(i = size - 1; i > 0; --i) {  
        for (j = 0; j < i; ++j) {  
            if(a[j] > a[j+1]) {  
                swap(&a[j],&a[j+1]);  
            }  
        }  
    }  
  
    return;  
}
```



Problem: Längster Pfad

Beispiel: Bubblesort

```
void bubbleSort(int a[],int size) {  
    int i,j;  
  
    for(i = size - 1; i > 0; --i) {  
        for (j = 0; j < i; ++j) {  
            if(a[j] > a[j+1]) {  
                swap(&a[j],&a[j+1]);  
            }  
        }  
  
        return;  
}
```

Aufruf: bubbleSort(a, size)

- Durchläufe, Vergleiche und Vertauschungen (engl. **Swap**)
- a = {1, 2}, size = 2
→ D = 1, V = 1, **S = 0**;
- a = {1, 3, 2}, size = 3
→ D = 3, V = 3, **S = 1**;
- a = {3, 2, 1}, size = 3
→ D = 3, V = 3, **S = 3**;



Problem: Längster Pfad

Beispiel: Bubblesort

```
void bubbleSort(int a[],int size) {  
    int i,j;  
  
    for(i = size - 1; i > 0; --i) {  
        for (j = 0; j < i; ++j) {  
            if(a[j] > a[j+1]) {  
                swap(&a[j],&a[j+1]);  
            }  
        }  
    }  
  
    return;  
}
```

Aufruf: bubbleSort(a, size)

- Durchläufe, Vergleiche und Vertauschungen (engl. **Swap**)
- $a = \{1, 2\}$, $size = 2$
→ $D = 1, V = 1, S = 0$;
- $a = \{1, 3, 2\}$, $size = 3$
→ $D = 3, V = 3, S = 1$;
- $a = \{3, 2, 1\}$, $size = 3$
→ $D = 3, V = 3, S = 3$;



Für den **allgemeinen Fall** nicht berechenbar → Halteproblem

- Wie viele Schleifendurchläufe werden benötigt?



In Echtzeitsystemen ist dieses Problem häufig lösbar

- Kanonische Schleifenkonstrukte beschränkter Größe → $\max(size)$
- Pfadanalyse → nur **maximale Pfadlänge** von belang



Berechnung der WCET?

Mit der Anzahl f_i der Ausführungen einer Kante E_i bestimmt man die WCET e durch Summation der Ausführungszeiten des längsten Pfades:

$$e = \max_P \sum_{E_i \in P} f_i e_i$$



Berechnung der WCET?

Mit der Anzahl f_i der Ausführungen einer Kante E_i bestimmt man die WCET e durch Summation der Ausführungszeiten des längsten Pfades:

$$e = \max_P \sum_{E_i \in P} f_i e_i$$

Problem: Erfordert die explizite Aufzählung aller Pfade

→ Das ist algorithmisch nicht handhabbar



Berechnung der WCET?

Mit der Anzahl f_i der Ausführungen einer Kante E_i bestimmt man die WCET e durch Summation der Ausführungszeiten des längsten Pfades:

$$e = \max_P \sum_{E_i \in P} f_i e_i$$

Problem: Erfordert die explizite Aufzählung aller Pfade

→ Das ist algorithmisch nicht handhabbar

Lösung: Vereinfachung der konkreten Pfadsemantik

- Abstraktion und Abbildung auf ein Flussproblem
(vgl. Abstrakte Semantik, VIII/20 ff)
- Flussprobleme sind mathematisch gut untersucht
- Im folgenden zwei Lösungswege: Timing Schema und IPET



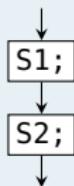


Lösungsweg₁: Timing Schema

Eine einfache Form der Sammelsemantik (siehe Folie VIII/25)

Sequenzen \leadsto Hintereinanderausführung

S1();
S2();



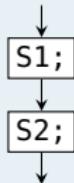


Sequenzen \leadsto Hintereinanderausführung

S1();
S2();

Summation der WCETs:

$$e_{seq} = e_{S1} + e_{S2}$$





Lösungsweg₁: Timing Schema

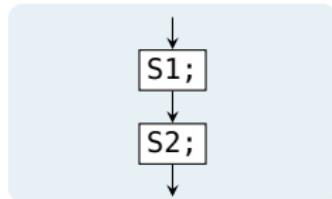
Eine einfache Form der Sammelsemantik (siehe Folie VIII/25)

Sequenzen \leadsto Hintereinanderausführung

```
S1();  
S2();
```

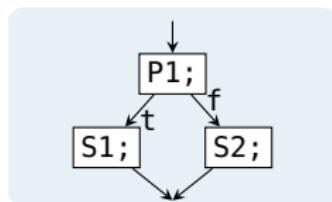
Summation der WCETs:

$$e_{seq} = e_{S1} + e_{S2}$$



Verzweigung \leadsto Bedingte Ausführung

```
if(P1())  
  S1();  
else S2();
```





Lösungsweg₁: Timing Schema

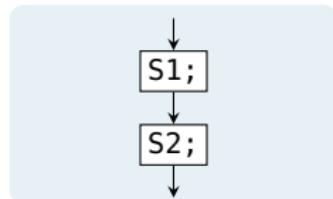
Eine einfache Form der Sammelsemantik (siehe Folie VIII/25)

Sequenzen \leadsto Hintereinanderausführung

```
S1();  
S2();
```

Summation der WCETs:

$$e_{seq} = e_{S1} + e_{S2}$$

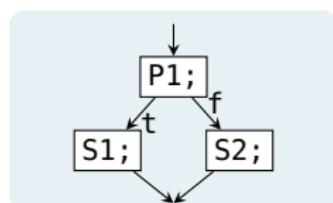


Verzweigung \leadsto Bedingte Ausführung

```
if(P1())  
  S1();  
else S2();
```

Maximale Gesamtausführungszeit:

$$e_{cond} = e_{P1} + \max(e_{S1}, e_{S2})$$





Lösungsweg₁: Timing Schema

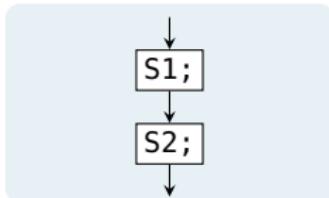
Eine einfache Form der Sammelsemantik (siehe Folie VIII/25)

Sequenzen \leadsto Hintereinanderausführung

```
S1();  
S2();
```

Summation der WCETs:

$$e_{seq} = e_{S1} + e_{S2}$$

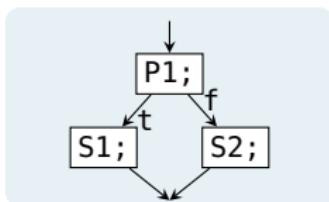


Verzweigung \leadsto Bedingte Ausführung

```
if(P1())  
  S1();  
else S2();
```

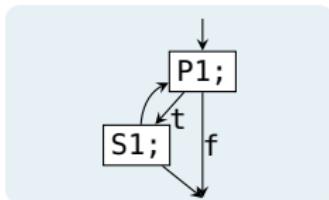
Maximale Gesamtausführungszeit:

$$e_{cond} = e_{P1} + \max(e_{S1}, e_{S2})$$



Schleifen \leadsto Wiederholte Ausführung

```
while(P1())  
  S1();
```





Lösungsweg₁: Timing Schema

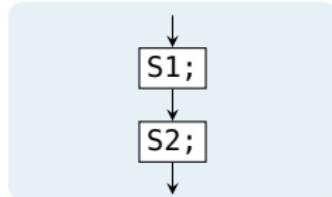
Eine einfache Form der Sammelsemantik (siehe Folie VIII/25)

Sequenzen \leadsto Hintereinanderausführung

```
S1();  
S2();
```

Summation der WCETs:

$$e_{seq} = e_{S1} + e_{S2}$$

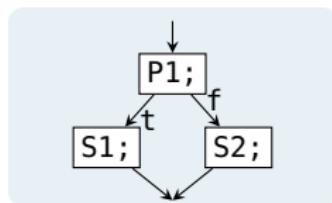


Verzweigung \leadsto Bedingte Ausführung

```
if(P1())  
  S1();  
else S2();
```

Maximale Gesamtausführungszeit:

$$e_{cond} = e_{P1} + \max(e_{S1}, e_{S2})$$

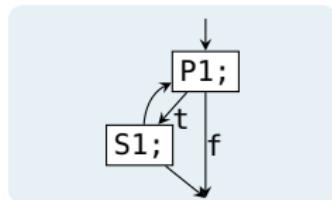


Schleifen \leadsto Wiederholte Ausführung

```
while(P1())  
  S1();
```

Schleifendurchläufe berücksichtigen:

$$e_{loop} = e_{P1} + n(e_{P1} + e_{S1})$$





■ Eigenschaften

- Traversierung des abstrakten Syntaxbaums (AST) **bottom-up**
 - An den Blättern beginnend bis zur Wurzel
- **Aggregation** der maximale Ausführungszeit nach festen Regeln
 - Für Sequenzen, Verzweigungen und Schleifen





■ Eigenschaften

- Traversierung des abstrakten Syntaxbaums (AST) **bottom-up**
 - An den Blättern beginnend bis zur Wurzel
- **Aggregation** der maximale Ausführungszeit nach festen Regeln
 - Für Sequenzen, Verzweigungen und Schleifen

■ Vorteile

- + Einfaches Verfahren mit geringem Berechnungsaufwand
- + Skaliert gut mit der Programmgröße





■ Eigenschaften

- Traversierung des abstrakten Syntaxbaums (AST) **bottom-up**
 - An den Blättern beginnend bis zur Wurzel
- **Aggregation** der maximale Ausführungszeit nach festen Regeln
 - Für Sequenzen, Verzweigungen und Schleifen

■ Vorteile

- + Einfaches Verfahren mit geringem Berechnungsaufwand
- + Skaliert gut mit der Programmgröße

■ Nachteile

- Informationsverlust durch Aggregation
 - Korrelationen (z. B. sich ausschließende Zweige) nicht-lokalen Codeteile lassen sich nicht berücksichtigen
 - Schwierige Integration mit einer separaten Hardware-Analyse
- Nichtrealisierbare Pfade (infeasible paths) nicht ausschließbar
 - ~ unnötige Überapproximation





Explizite Pfadanalyse ohne Vereinfachung nicht handhabbar



Lösungsansatz₂: Nutzung impliziter Pfadaufzählungen \leadsto Implicit Path Enumeration Technique (IPET) [3]

¹<http://gurobi.com/>

- ⚠ Explizite Pfadanalyse ohne Vereinfachung nicht handhabbar
- 👉 Lösungsansatz₂: Nutzung impliziter Pfadaufzählungen \leadsto Implicit Path Enumeration Technique (IPET) [3]
- **Vorgehen:** Transformation des Kontrollflussgraphen in ein ganzzahliges, lineares Optimierungsproblem (ILP)
 - 1 Bestimmung des **Zeitanalysegraphs** aus dem Kontrollflussgraphen
 - 2 Abbildung auf ein **lineare Optimierungsproblem**
 - 3 Annotation von **Flussrestriktionen**
 - Nebenbedingungen im Optimierungsproblem
 - 4 Lösung des Optimierungsproblems (z.B. mit Gurobi¹)
- 👉 Globale Vereinfachung des Graphen statt lokaler Aggregierung

¹<http://gurobi.com/>

Der Zeitanalysegraph (engl. *timing analysis graph*)

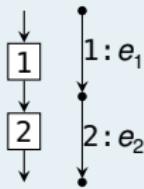
- Ein **Zeitanalysegraph (T-Graph)** ist ein gerichteter Graph mit einer Menge von Knoten $\mathcal{V} = \{V_i\}$ und Kanten $\mathcal{E} = \{E_i\}$
 - Mit genau einer **Quelle** und einer **Senke**
 - Jede Kante ist Bestandteile eines Pfads P von der Senke zur Kante
 - Jeder Kante wird ihre WCET e_i zugeordnet



Der Zeitanalysegraph (engl. *timing analysis graph*)

- Ein Zeitanalysegraph (T-Graph) ist ein gerichteter Graph mit einer Menge von Knoten $\mathcal{V} = \{V_i\}$ und Kanten $\mathcal{E} = \{E_i\}$
 - Mit genau einer Quelle und einer Senke
 - Jede Kante ist Bestandteile eines Pfads P von der Senke zur Kante
 - Jeder Kante wird ihre WCET e_i zugeordnet

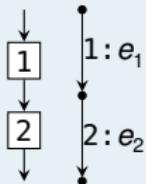
Sequenz



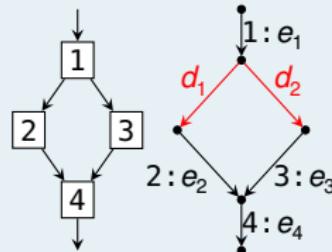
Der Zeitanalysegraph (engl. *timing analysis graph*)

- Ein Zeitanalysegraph (T-Graph) ist ein gerichteter Graph mit einer Menge von Knoten $\mathcal{V} = \{V_i\}$ und Kanten $\mathcal{E} = \{E_i\}$
 - Mit genau einer Quelle und einer Senke
 - Jede Kante ist Bestandteile eines Pfads P von der Senke zur Kante
 - Jeder Kante wird ihre WCET e_i zugeordnet
 - ⚠ Verzweigungen benötigen Dummy-Kanten d_i

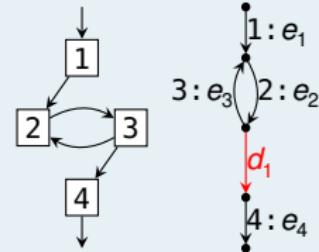
Sequenz



Verzweigung



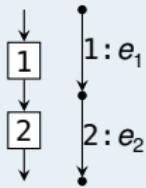
Schleife



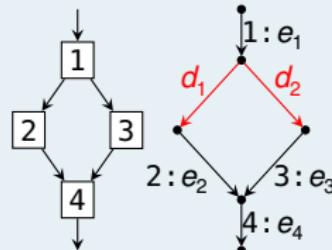
Der Zeitanalysegraph (engl. *timing analysis graph*)

- Ein Zeitanalysegraph (T-Graph) ist ein gerichteter Graph mit einer Menge von Knoten $\mathcal{V} = \{V_i\}$ und Kanten $\mathcal{E} = \{E_i\}$
 - Mit genau einer Quelle und einer Senke
 - Jede Kante ist Bestandteile eines Pfads P von der Senke zur Kante
 - Jeder Kante wird ihre WCET e_i zugeordnet
 - ⚠ Verzweigungen benötigen Dummy-Kanten d_i

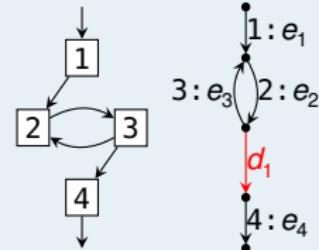
Sequenz



Verzweigung



Schleife



Graphentheorie annotiert Kosten klassischerweise **an Kanten**



Ganzzahliges Lineares Optimierungsproblem

- ☞ Zielfunktion: Maximierung des gewichteten Flusses

$$\text{WCET}_e = \max_{(f_1, \dots, f_e)} \sum_{E_i \in \mathcal{E}} f_i e_i$$

→ der Vektor (f_1, \dots, f_e) maximiert die Ausführungszeit



Ganzzahliges Lineares Optimierungsproblem

- ☞ Zielfunktion: Maximierung des gewichteten Flusses

$$\text{WCET}_e = \max_{(f_1, \dots, f_e)} \sum_{E_i \in \mathcal{E}} f_i e_i$$

→ der Vektor (f_1, \dots, f_e) maximiert die Ausführungszeit

- ☞ Nebenbedingungen: Garantieren tatsächlich mögliche Ausführungen
 - Flusserhaltung für jeden Knoten des T-Graphen

$$\sum_{E_j^+ = V_i} f_j = \sum_{E_k^- = V_i} f_k$$

- Flussrestriktionen für alle Schleifen des T-Graphen, z.B.

$$f_2 \leq (\text{size} - 1) f_1$$

- Rückkehrkante kann nur einmal durchlaufen werden: $f_{E_e} = 1$



- Betrachtet implizit alle Pfade des Kontrollflussgraphen
 - Erzeugung des Zeitanalysegraphen
 - Überführung in ganzzahliges lineares Optimierungsproblem

- Betrachtet implizit alle Pfade des Kontrollflussgraphen
 - Erzeugung des Zeitanalysegraphen
 - Überführung in ganzzahliges lineares Optimierungsproblem
- **Vorteile**
 - + Möglichkeit komplexer Flussrestriktionen
 - z. B. sich ausschließende Äste aufeinanderfolgender Verzweigungen
 - + Nebenbedingungen für das ILP sind leicht aufzustellen
 - + Viele Werkzeuge zur Lösung von ILPs verfügbar

- Betrachtet implizit alle Pfade des Kontrollflussgraphen
 - Erzeugung des Zeitanalysegraphen
 - Überführung in ganzzahliges lineares Optimierungsproblem
- **Vorteile**
 - + Möglichkeit komplexer Flussrestriktionen
 - z. B. sich ausschließende Äste aufeinanderfolgender Verzweigungen
 - + Nebenbedingungen für das ILP sind leicht aufzustellen
 - + Viele Werkzeuge zur Lösung von ILPs verfügbar
- **Nachteile**
 - Lösen eines ILP ist im Allgemeinen **NP-hart**
 - Flussrestriktionen sind kein Allheilmittel
 - Beschreibung der Ausführungsreihenfolge ist problematisch



- ☞ Ausführungszeit von Elementaroperationen ist **essentiell**
- Die Berechnung ist alles andere als einfach, ein Beispiel:

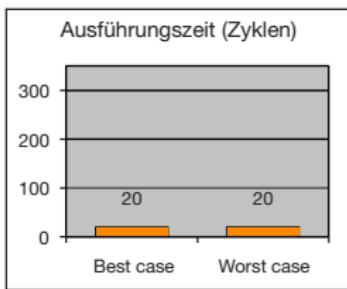
```
1 /* x = a + b */  
2 LOAD r2, _a  
3 LOAD r1, _b  
4 ADD r3, r2, r1
```



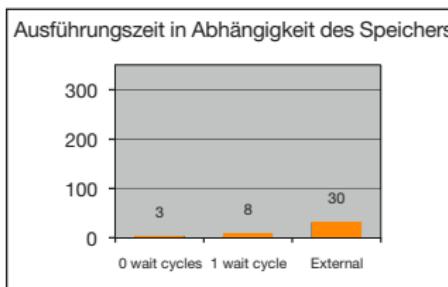
- Ausführungszeit von Elementaroperationen ist **essentiell**
- Die Berechnung ist alles andere als einfach, ein Beispiel:

```
1 /* x = a + b */  
2 LOAD r2, _a  
3 LOAD r1, _b  
4 ADD r3, r2, r1
```

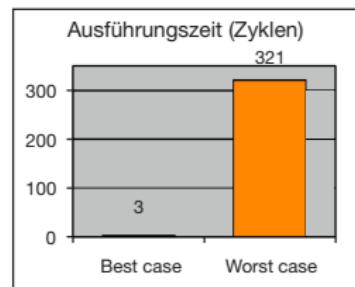
68K (1990)



MPC 5xx (2000)



PPC 755 (2001)



Quelle: Christian Ferdinand [2]



Laufzeitbedarf ist hochgradig **Hardware- und kontextspezifisch**



WCET eines Code-Schnipsels?

Werte der Grundblöcke sind Eingabe für die Flussanalyse



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 [3]

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



WCET eines Code-Schnipsels?

Werte der Grundblöcke sind Eingabe für die Flussanalyse



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 [3]

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



Äußerst pessimistisch und zum Teil falsch

- Falsch bei Laufzeitanomalien
 - WCET der Sequenz > Summe der WCETs aller Instruktionen
 - Allgemein: globale WCET > lokale WCET
 - Nicht-deterministisches Verhalten im **Hardwaremodell** (verursacht durch Abstraktion)
 - Beispiel: Pseudo-Round-Robin Cache-Ersetzungsstrategie
- 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 teilt sich in verschiedene Phasen
 - Aufteilung ist nicht dogmenhaft festgeschrieben

- ☞ 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

- ☞ 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 mittels abstrakter Interpretation/Datenflussanalyse
 - 2 Pipeline-Analyse
 - Ergebnisse der Cache-Analyse werden anschließend berücksichtigt
 - 3 Pfad-Analyse und WCET-Berechnung



1 Speicherverbrauch

- Überblick
- Messbasierte Bestimmung
- Analytische Bestimmung

2 Ausführungszeit

- Überblick
- Messbasierte WCET-Analyse
- Statische WCET-Analyse

3 Zusammenfassung



- **Dynamische Messung** \leadsto Beobachtung
 - Speicherverbrauch
 - Water-Marking \leadsto Füllstand des statischen Stapels zur Laufzeit
 - Überwachung durch Betriebssystem (Wächter)
 - Ausführungszeit
 - Durch (strukturiertes) Testen der Echtzeitanwendung
 - Betrachtung des Gesamtsystems (Software und Hardware)

- **Dynamische Messung** \leadsto Beobachtung
 - Speicherverbrauch
 - Water-Marking \leadsto Füllstand des statischen Stapels zur Laufzeit
 - Überwachung durch Betriebssystem (Wächter)
 - Ausführungszeit
 - Durch (strukturiertes) Testen der Echtzeitanwendung
 - Betrachtung des Gesamtsystems (Software und Hardware)
- **Statische Analyse** \leadsto Bestimmung einer oberen Schranke
 - Speicherverbrauch
 - Analyse des Kontroll- und Aufrufgraphen
 - Beachtung der Ausführungsbedingungen (ABI)
 - Ausführungszeit
 - **Makroskopisch:** *Was macht das Programm?*
 - **Mikroskopisch:** *Was passiert in der Hardware?*

Literaturverzeichnis

- [1] Ferdinand, C. ; Heckmann, R. ; Franzen, B. :
Static memory and timing analysis of embedded systems code.
In: *Proceedings of the 3rd European Symposium on Verification and Validation of Software Systems*, 2007, S. 07–04
- [2] Ferdinand, C. ; Heckmann, R. ; Wolff, H.-J. ; Renz, C. ; Parshin, O. ; Wilhelm, R. :
Towards model-driven development of hard real-time systems.
In: *Model-Driven Development of Reliable Automotive Services*.
Springer, 2008, S. 145–160
- [3] Puschner, P. :
Zeitanalyse von Echtzeitprogrammen.
Treitlstr. 1-3/182-1, 1040 Vienna, Austria, Technische Universität Wien, Institut für Technische Informatik, Diss., 1993
- [4] Puschner, P. ; Huber, B. :
Zeitanalyse von sicherheitskritischen Echtzeitsystemen.
<http://ti.tuwien.ac.at/rts/teaching/courses/wcet, 2012. – Lecture Notes>

- [5] Regehr, J. ; Reid, A. ; Webb, K. :
Eliminating Stack Overflow by Abstract Interpretation.
In: *ACM Transactions on Embedded Computing Systems* 4 (2005), Nr. 4, S. 751–778.
<http://dx.doi.org/10.1145/1113830.1113833>. –
DOI 10.1145/1113830.1113833. –
ISSN 1539–9087
- [6] Ulbrich, P. :
Echtzeitsysteme.
http://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V_EZS/, 2016
- [7] Weber-Wulff, D. :
More on German Train Problems.
<http://catless.ncl.ac.uk/Risks/17.02.html>.
Version: 04 1995