

Application Performance Management

Frühling 2022

JIT-Kompilierung

Zoltán Majó

Agenda

Im Fokus heute: Kompilierung in der VM

- Mehrstufige Kompilierung
- Segmentierung des Codespeichers
- Caching von Programmprofilen

Agenda

Im Fokus heute: Kompilierung in der VM

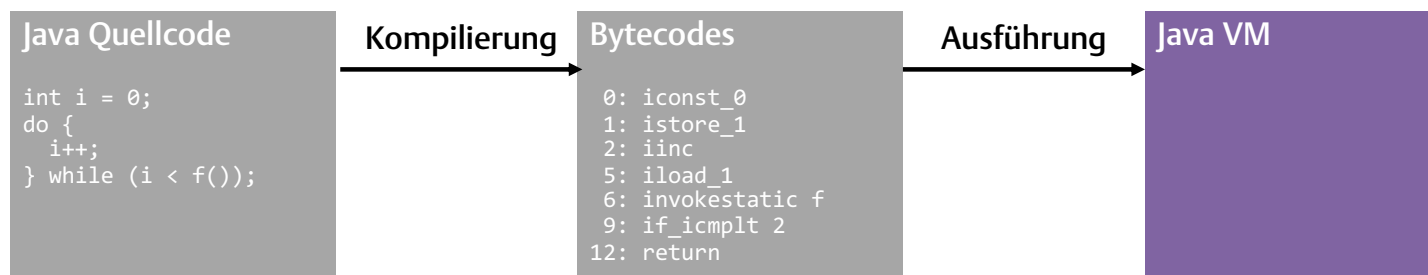
- Mehrstufige Kompilierung – Tiered compilation
- Segmentierung des Codespeichers – Segmented code cache
- Caching von Programmprofilen – Profile caching

ab Java 8

ab Java 9

in der Zukunft
(vielleicht)

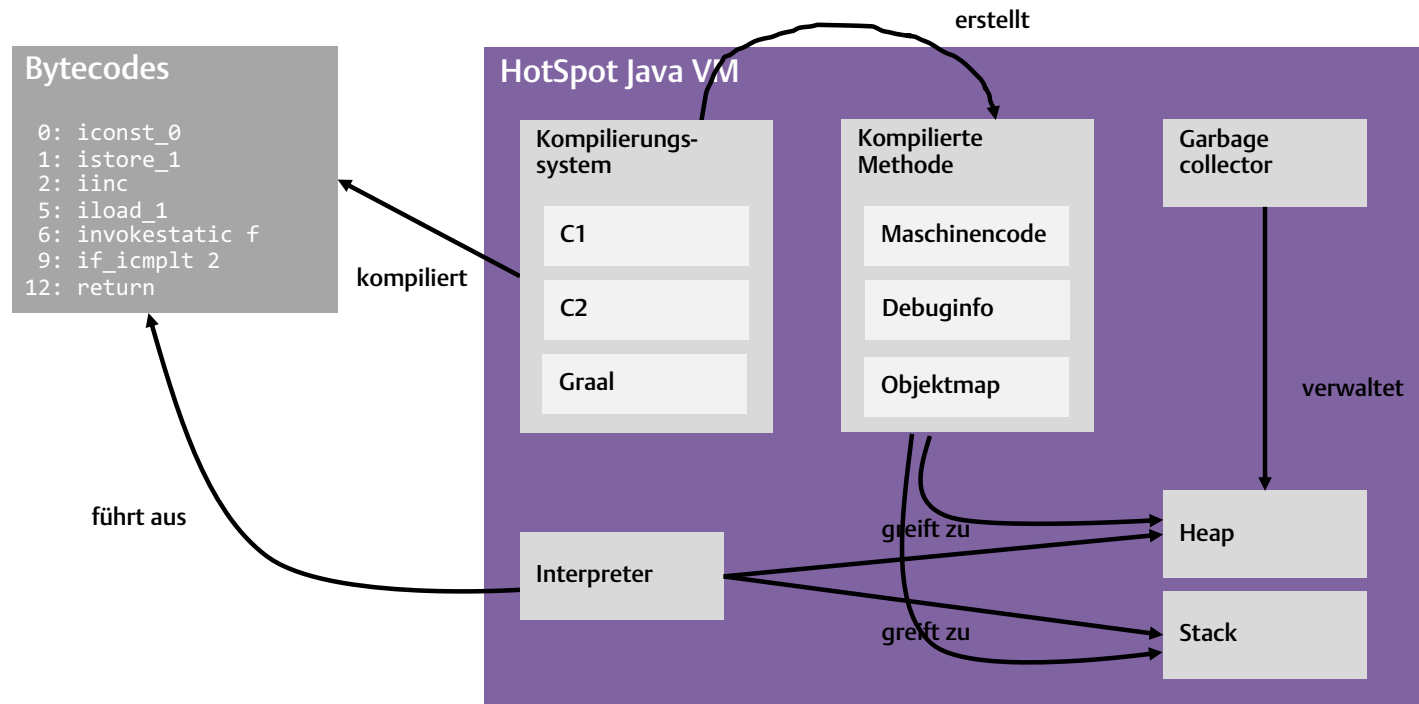
Kompilierung **für** die Java VM



Bemerkungen

- Kompilierung passiert „**ahead-of-time**“ (sicher vor der Ausführung)
- Bytecodes: Instruktionen für eine **abstrakte** Maschine (die JVM)
- Details der tatsächlichen (**auf einer physischen Maschine**) sind der JVM überlassen

Kompilierung **in** der JVM

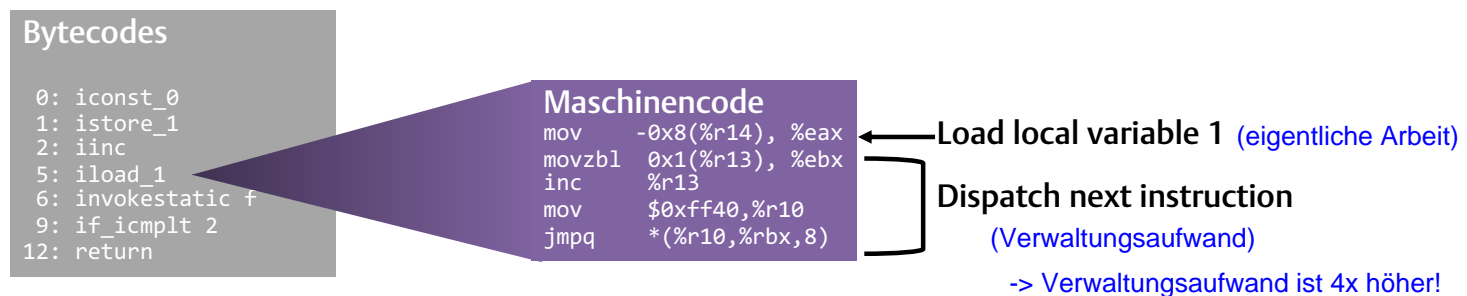


langsam im Vergleich zum compilierten Code

Interpretierung

Template-based interpreter

- Zuordnung Bytecode-Instruktion Maschinencode-Snippet



Kompilierungssystem: Leistungsverbesserung von etwa 100X

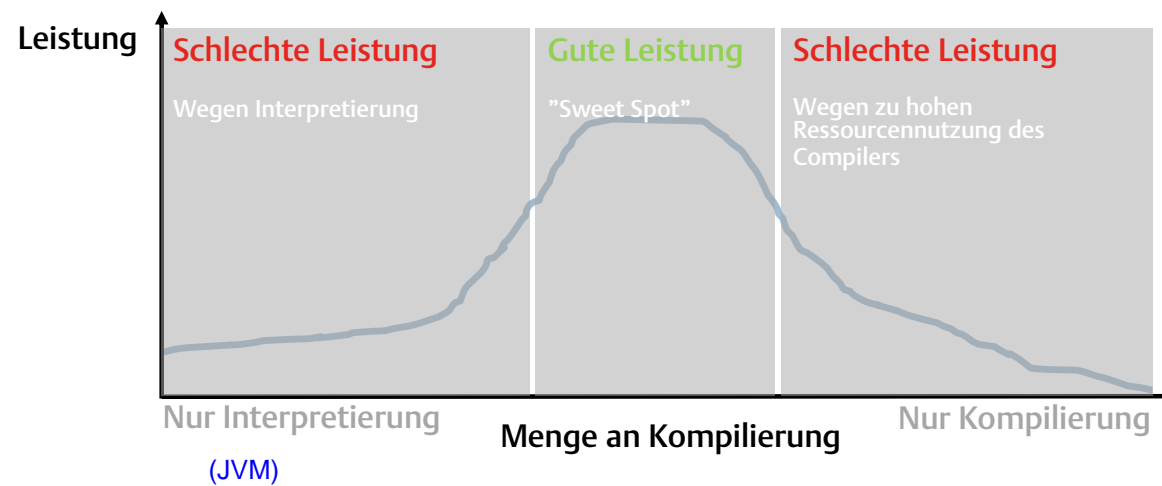
Kompilierung: Just-in-time (JIT)

JIT-Kompilierung passiert während Programmausführung

Kompromiss zwischen der **Ressourcennutzung des Compilers**
und der
Leistung des generierten Codes

Kompromiss

Kompiler ist nebenläufig und, darum wird Program langsamer.



Wie man in das „Sweet Spot“ kommt

Zwei Mechanismen

- ➔ 1. Auswahl kompilierter Methoden
- 2. Auswahl Compileroptimierungen

1. Auswahl kompilierter Methoden

Nur oft ausgeführte Methoden werden kompiliert

- „Heisse Methoden“

Profilieren der Methodenausführung

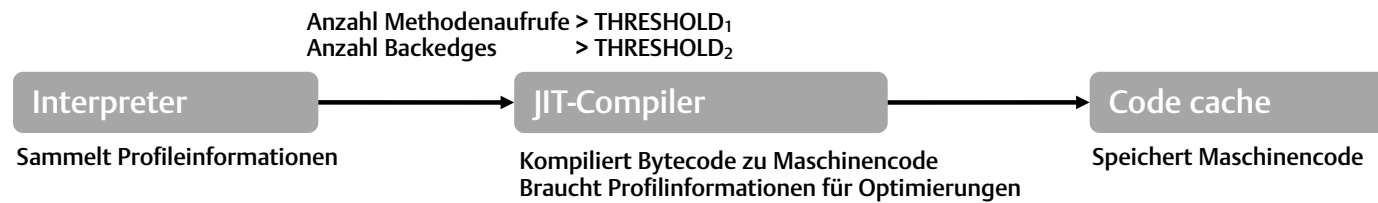
- Anzahl Methodenaufrufe
- Anzahl „Backedges“ (relevant auch für On-Stack Replacement)

Viel mehr vom „Verhalten“ einer Methode wird erfasst

- Profiling ist eine Voraussetzung für die meisten Kompileroptimierungen
- Mehr dazu später

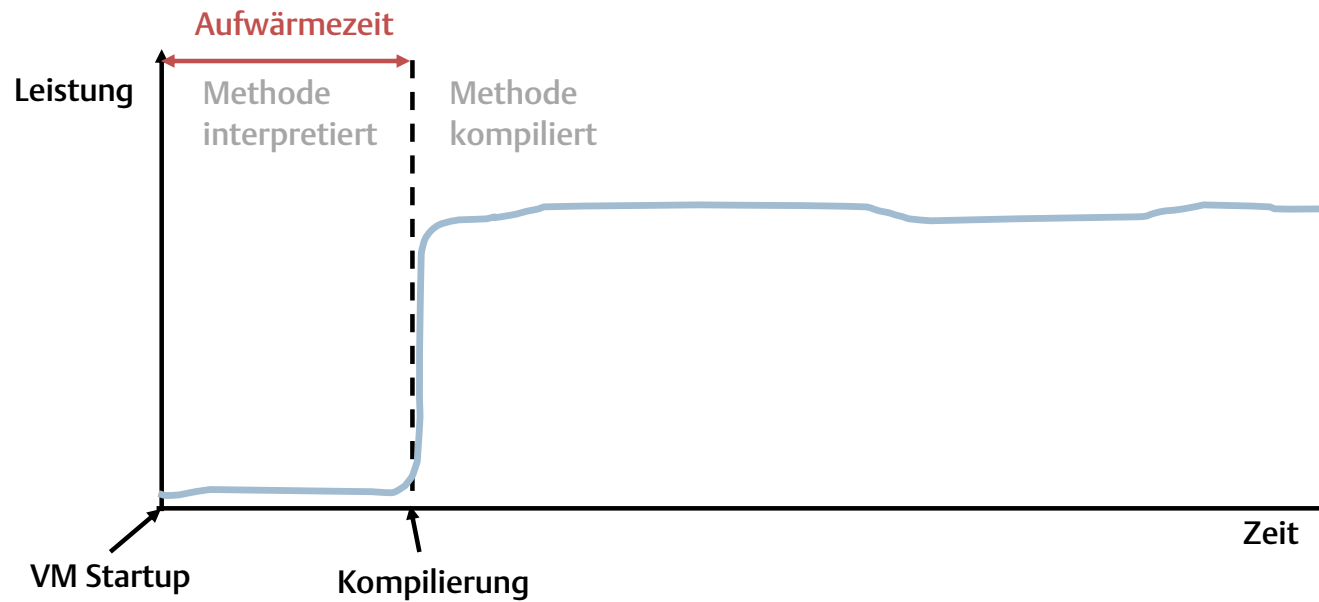
Das Leben einer Methode...

...in der HotSpot Java VM



Auswirkung auf die Leistung

Aus der Perspektive einer Methode



Wie kommt man zum „Sweet Spot“

Zwei Mechanismen

- ➔ 1. Auswahl kompilierter Methoden
- 2. Auswahl Compileroptimierungen

2. Auswahl Compileroptimierungen

1. C1 Compiler

braucht wenig Ressourcen

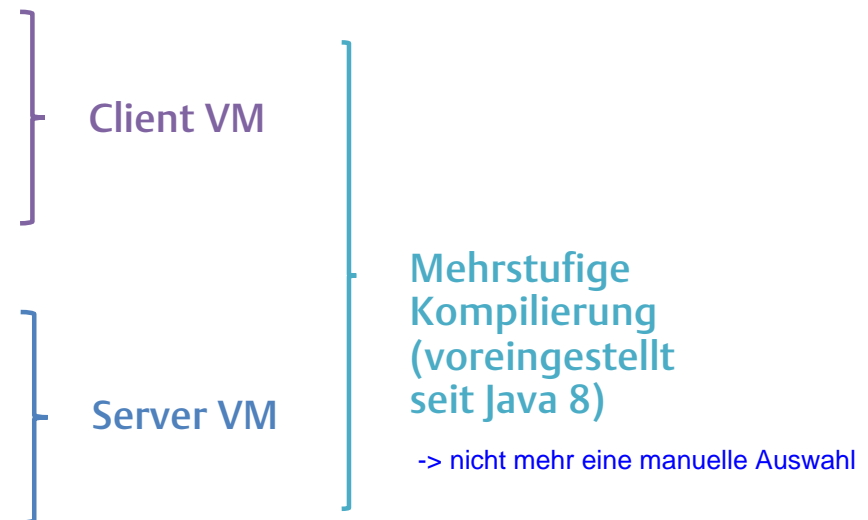
- Wenige Optimierungen
- Schnelle Kompilierung
- Niedriger Speichergebrauch

2. C2 Compiler

- Aggressiv optimierender Compiler
- Hohe Ressourcennutzung
- Hohe Leistung des generierten Codes

3. Graal Compiler (heute out of scope)

- Experimentell ab Oracle JDK 10
- Verfügbar als **Ersatz von C2** in der Graal VM



Mehrstufige Kompilierung

„Tiered Compilation“

Kombiniert das Nutzen vom

- Interpreter: schneller VM Start
- C1 Compiler: schnelle Kompilierung
- C2 Compiler: hohe Leistung

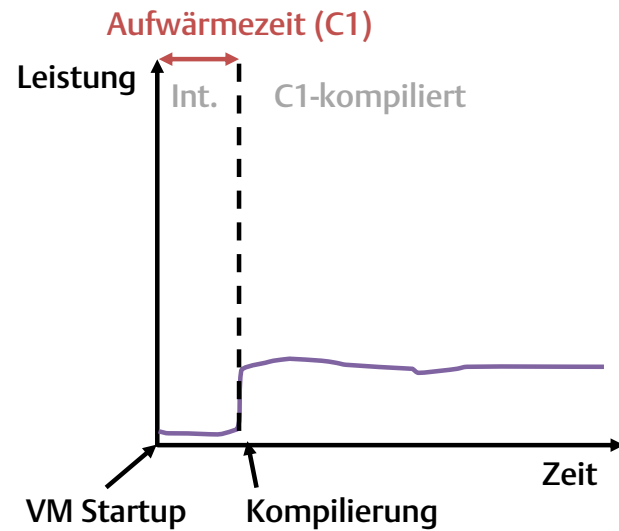
Tier 0

Tier 1

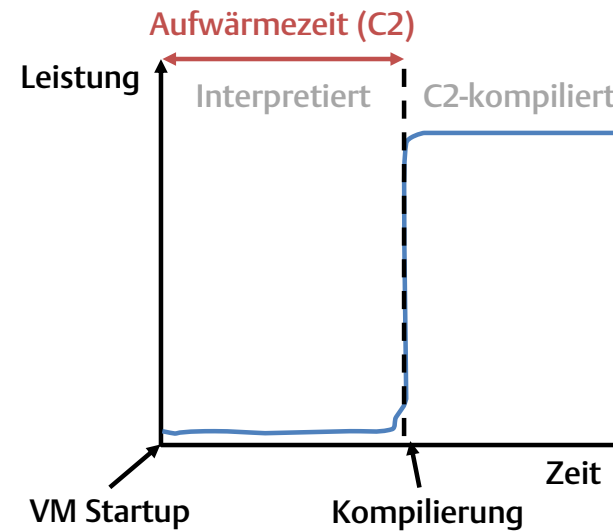
Tier 2

Nutzen der mehrstufigen Kompilierung

Client VM (C1)

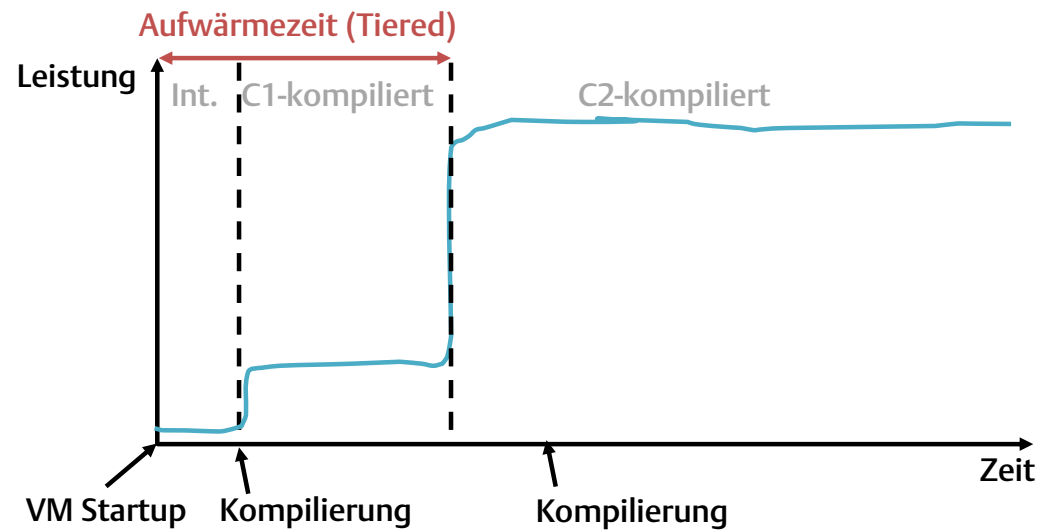


Server VM (C2)



Nutzen der mehrstufigen Kompilierung (Forts.)

Mehrstufige Kompilierung



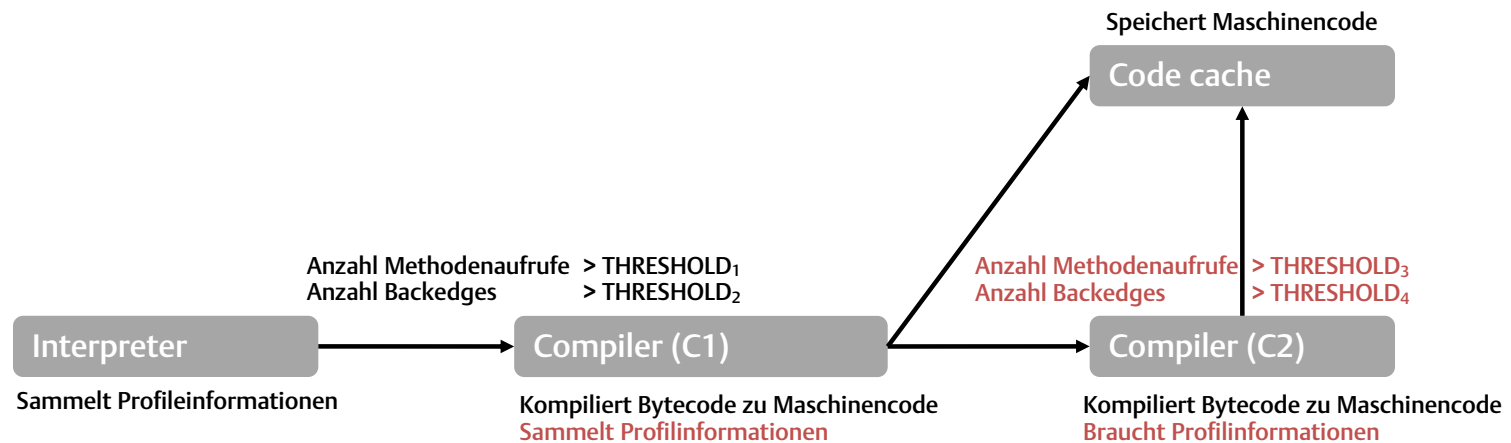
Bemerkung

$$\text{Aufw\u00e4rmezeit (C1)} < \text{Aufw\u00e4rmezeit (Tiered)} \leq \text{Aufw\u00e4rmezeit (C2)}$$

Begr\u00fcndung: schnelleres Profiling
-> C1 ist profiled

Das Leben einer Methode mit Tiered Compilation

(Geschichte von vorher ergänzt)



Zusammenfassung: Tiered Compilation

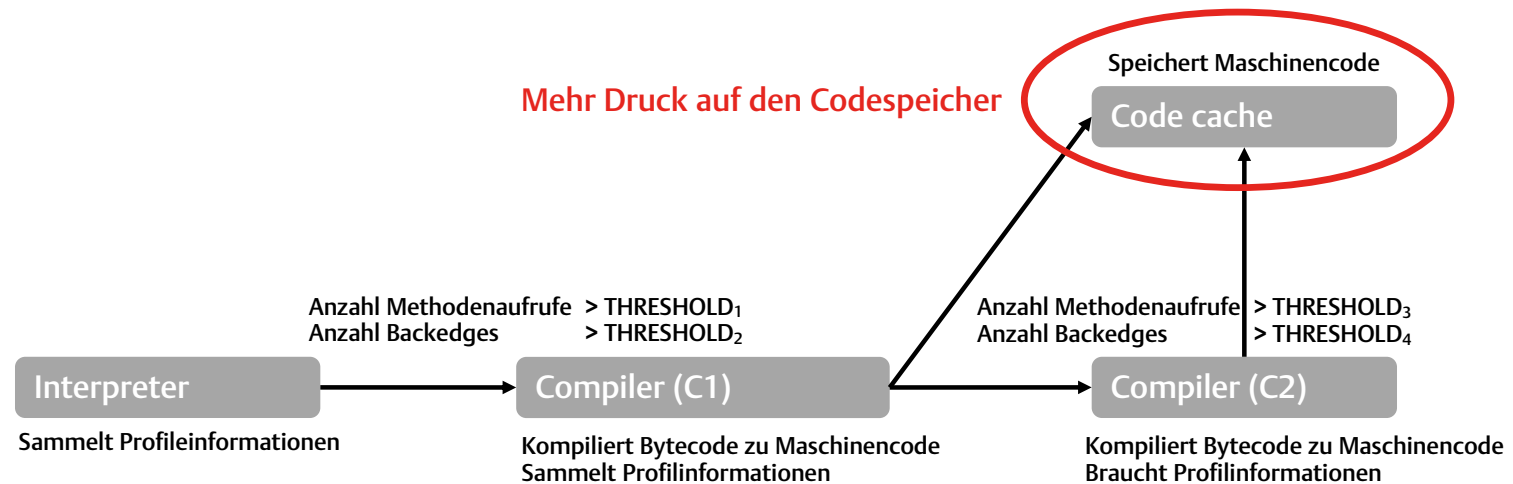
Kombiniert Nutzen vom Interpreter, C1 und C2

- Bessere Leistung der VM

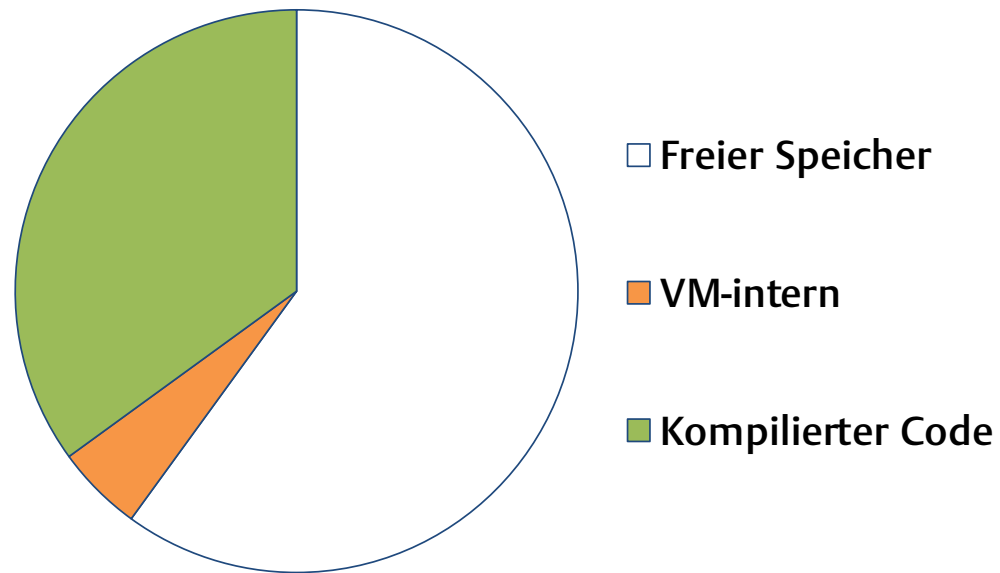
Nachteile

- Komplexe Implementierung und Konfigurierung
- Mehr Druck auf den Codespeicher

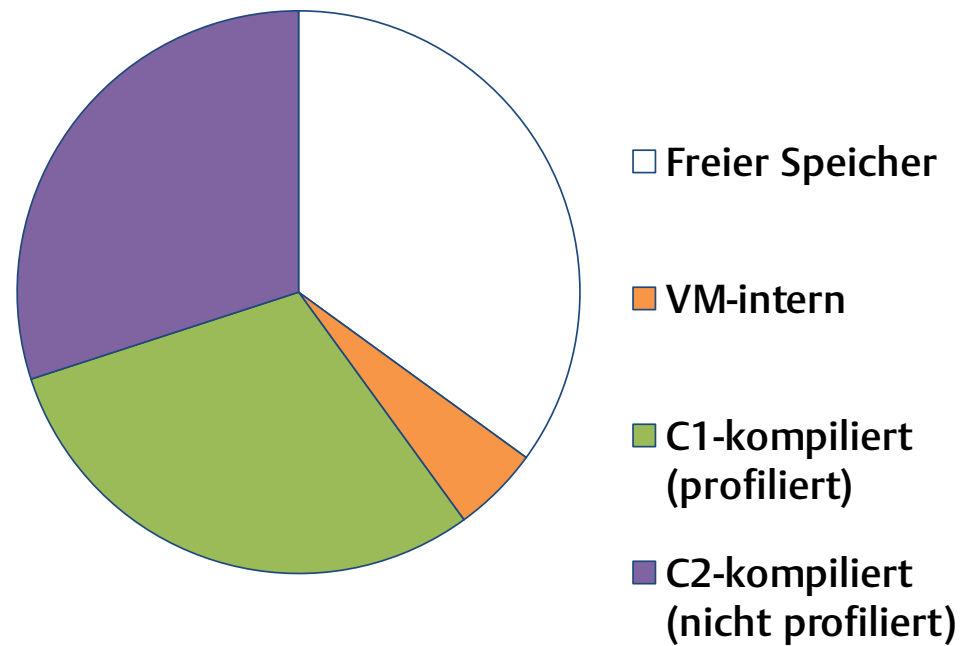
Das Leben einer Methode mit Tiered Compilation



Gebrauch des Code Cache (JDK 6 und 7)



Gebrauch des Code Cache (ab JDK 8 mit Tiered Compilation)

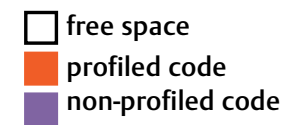
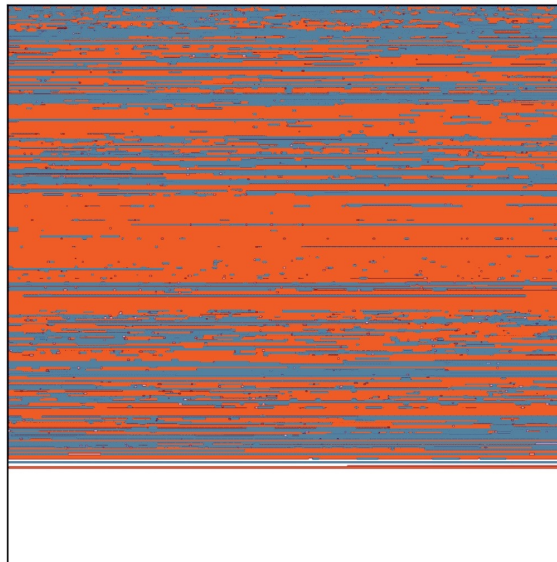


Herausforderungen

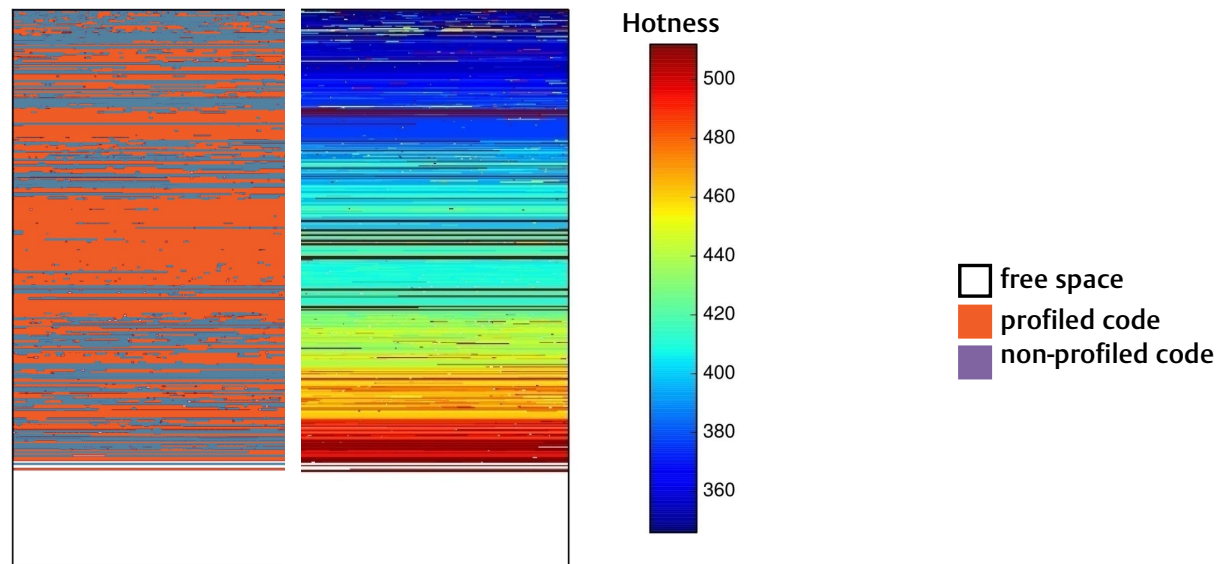
Mit Tiered Compilation VM generiert 4X mehr Code als ohne

All Code ist in einem Code Cache gespeichert

- Hohe Fragmentierung
- Schlechte Lokalität



Gebrauch des Code Cache



Gebrauch des Code Cache

Design: Typen vom kompilierten Code

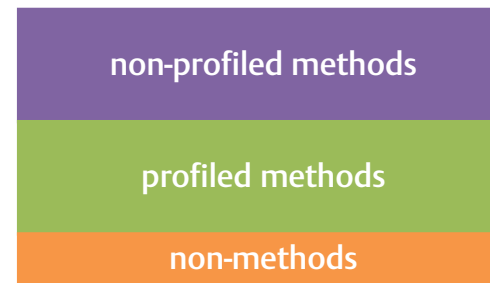
	Optimierungsgrad	Grösse	Kosten	Lebensdauer
➔ Non-method code	optimiert	klein	niedrig	ewig
Profiled code (C1)	instrumentiert	mittel	niedrig	limitiert
Non-profiled code (C2)	hochoptimiert	gross	hoch	lang

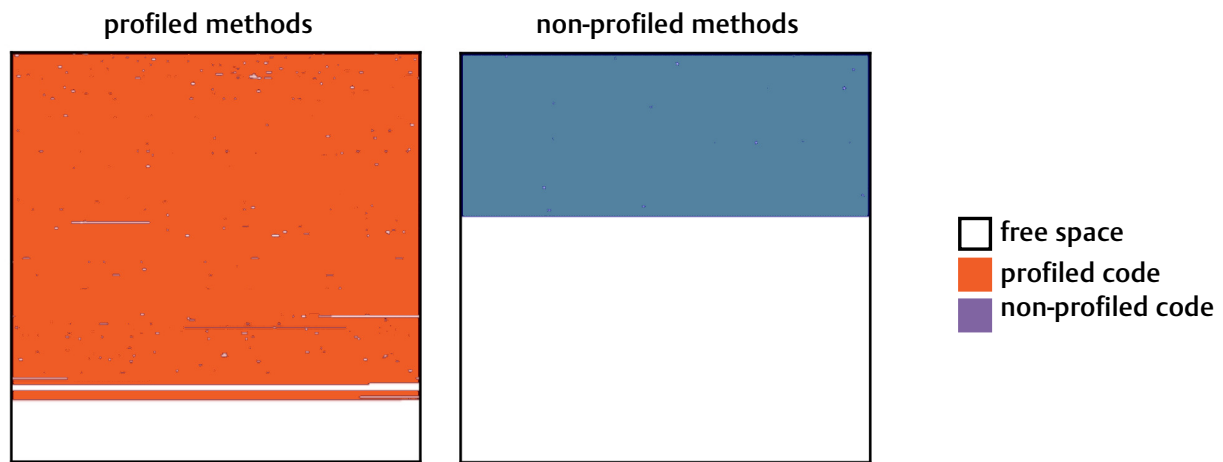
Design

Ohne Segmented Code Cache

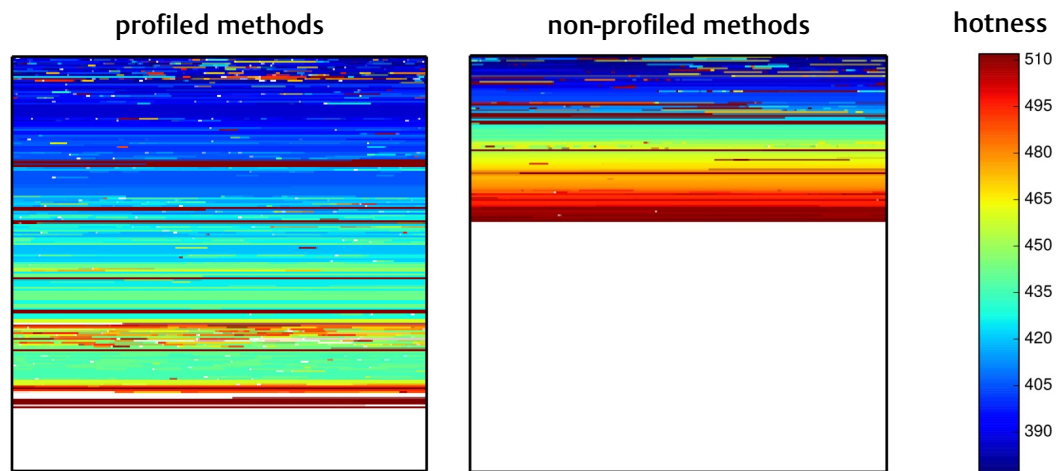


Mit Segmented Code Cache





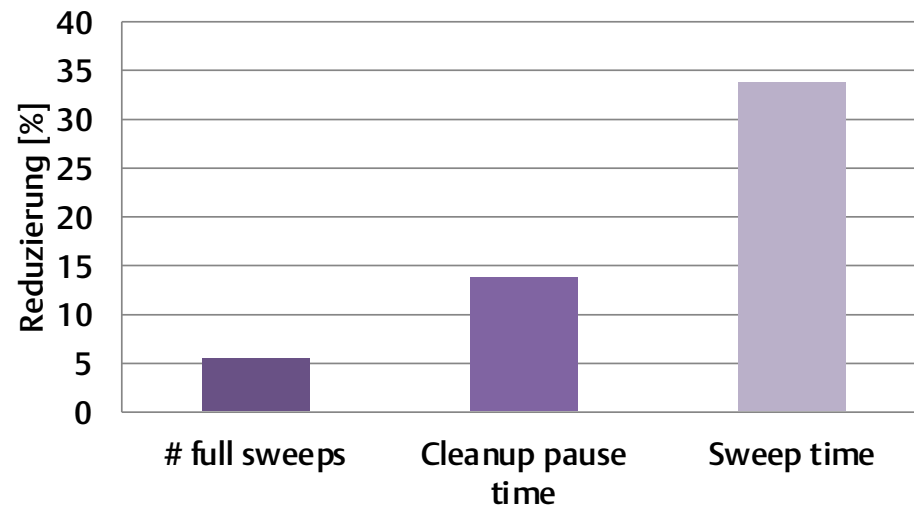
Segmented Code Cache: Resultate



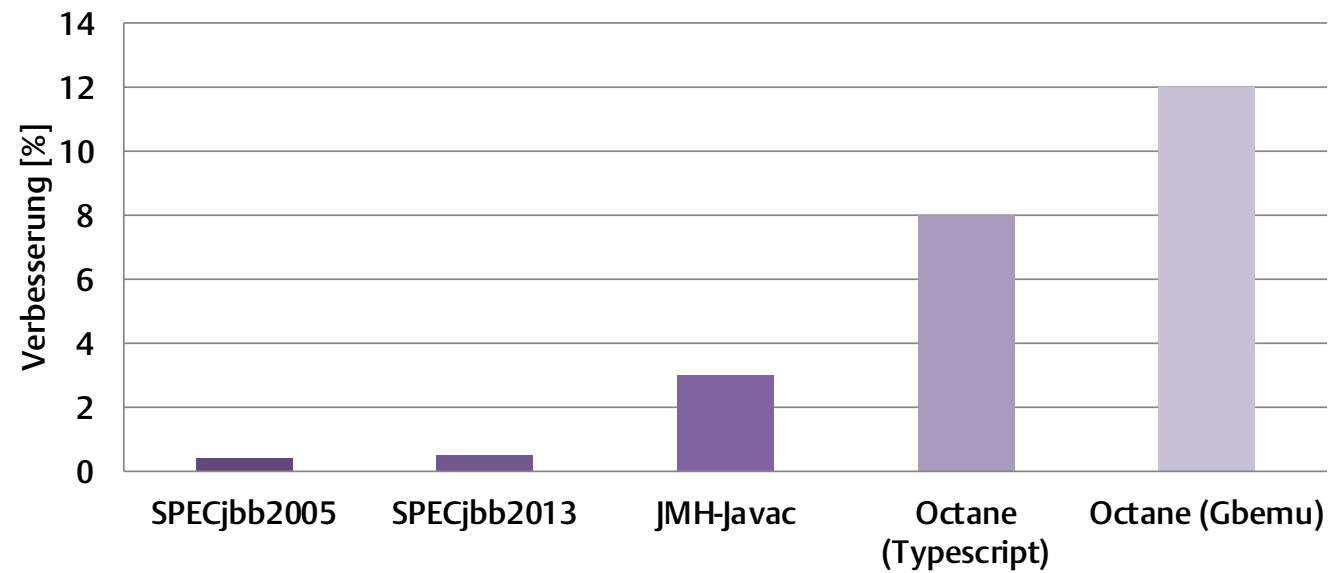
Segmented Code Cache: Resultate

Evaluation: Reaktionsgeschwindigkeit

Sweeper (GC für kompilierten Code)



Evaluation: Leistung



Segmented Code Cache (Zusammenfassung)

Segmented Code Cache verbessert **Leistung** und **Reaktionsgeschwindigkeit**

- Reduziert Fragmentierung
- Reduzierter Mehraufwand des Sweepers
- Verbesserte Codelokalität

Verfügbar mit Java 9

-XX:+SegmentedCodeCache
-XX:-SegmentedCodeCache

Agenda

Im Fokus heute: Kompilierung in der VM

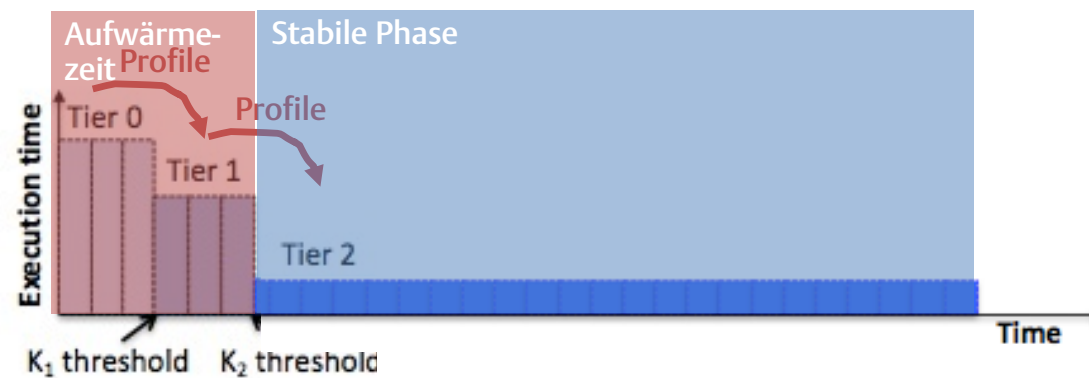
- Tiered Compilation
- Segmented Code Cache
- Profile Caching

Erwartete Leistung mit Tiered Compilation

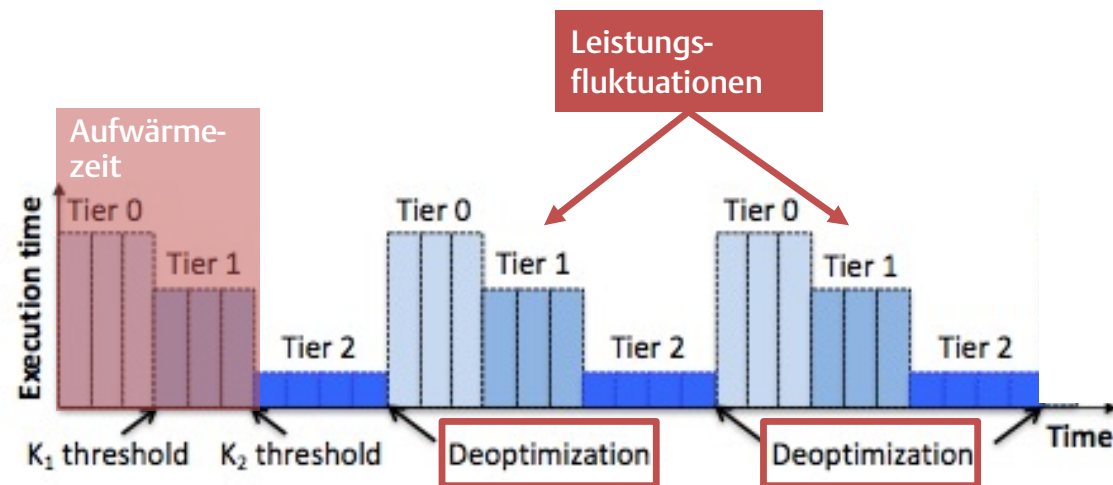
Aus der Perspektive der Ausführung einer Methode

- Methode wird mit dem selben Zustand und Parameter aufgerufen

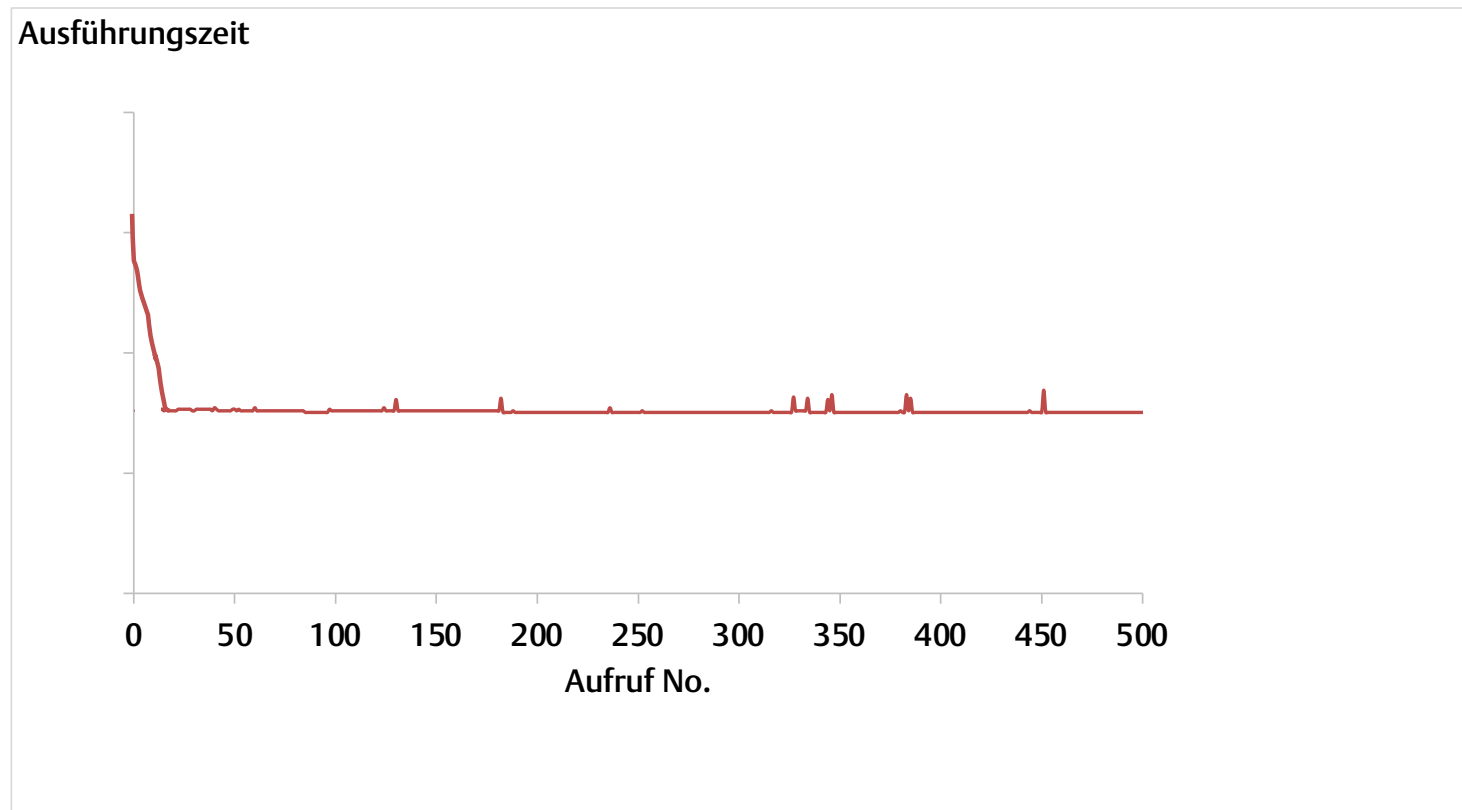
Erwartete Leistung



Eigentliche Leistung mit Tiered Compilation



Erwartete Leistung

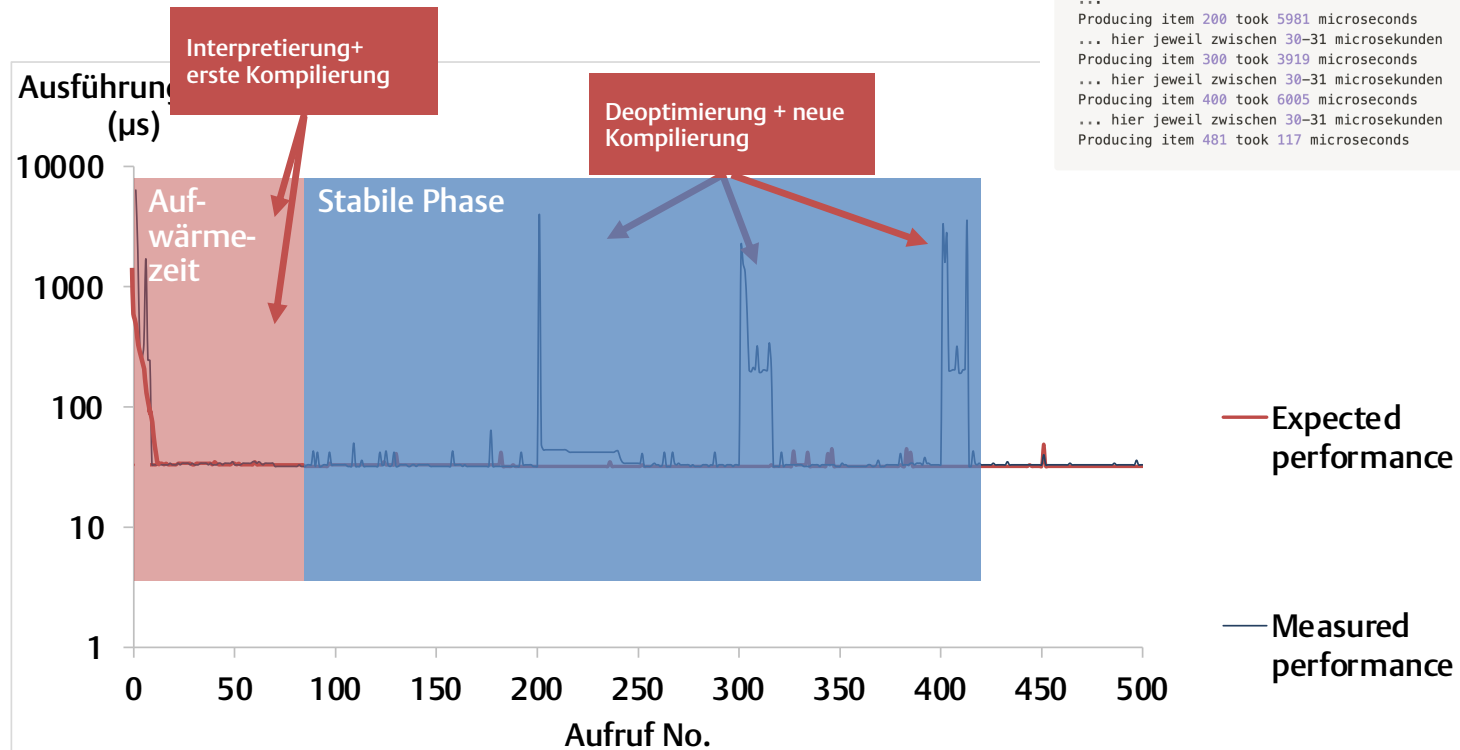


```

Producing item 0 took 7840 microseconds
Producing item 1 took 2826 microseconds
Producing item 2 took 2053 microseconds
Producing item 3 took 387 microseconds
Producing item 4 took 339 microseconds
Producing item 5 took 360 microseconds
Producing item 6 took 341 microseconds
Producing item 7 took 30 microseconds
Producing item 8 took 30 microseconds
Producing item 9 took 30 microseconds
Producing item 10 took 30 microseconds
Producing item 11 took 30 microseconds
...
Producing item 200 took 5981 microseconds
... hier jeweils zwischen 30-31 microseconds
Producing item 300 took 3919 microseconds
... hier jeweils zwischen 30-31 microseconds
Producing item 400 took 6005 microseconds
... hier jeweils zwischen 30-31 microseconds
Producing item 481 took 117 microseconds

```

Gemessene Leistung



Deoptimierungen

Compileroptimierungen basieren sich auf **optimistische Annahmen**

Annahmen basiert auf Profilinformatoren

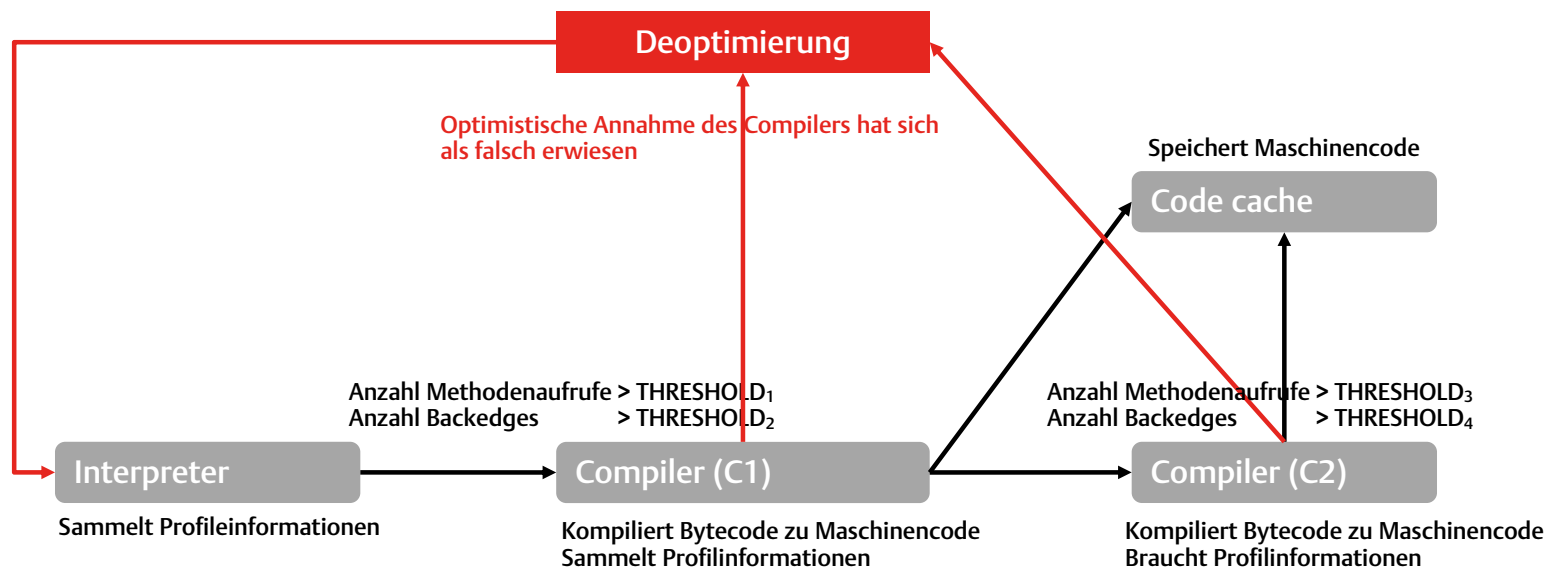
- Anzahl Methodenaufrufe und „Backedges“
- Ausgeführte Pfade in der Methode
- Typen bei Methodenaufrufen
- Typen der Methodenparameter
- Klassenhierarchie
- Und noch mehr anderes

Grundlegendes Prinzip: Vergangenheit = Zukunft

Falls optimistische Annahme des Compilers nicht mehr gilt: Deoptimierung

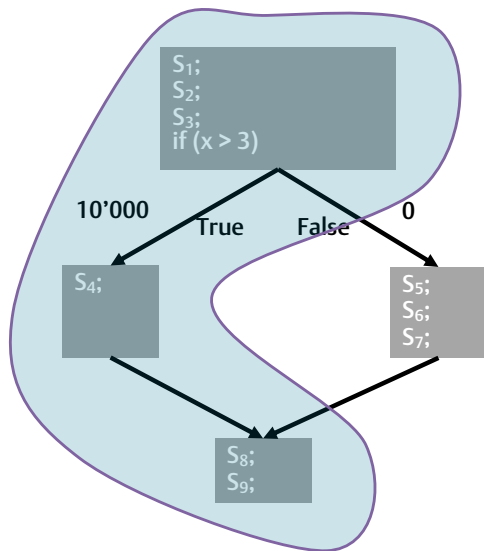
- Kompilierter Code weggeworfen
- Methode wird neu profiliert und erneut kompiliert (mit weniger optimistischen Annahmen)

Das Leben einer Methode: Komplette Geschichte



Beispieloptimierung: “Hot path”-Kompilierung

Kontrollflussgraph



Generierter Code



Vorteil:

- habe nur den Code den ich benötige (kein unnötiger Cache)
- weitere Compile-Optimierungen werden möglich

Beispiel: Producer-Methode

```
public long produce(int item)
{
    long result = 0;
    for (int i = 0; i < 100_000; ++i) {
        long[] pattern = {i, i + 1, i + 2, i + 3};
        if (item == 200) {
            result += pattern[0];
        } else if (item == 300) {
            result += pattern[1];
        } else if (item == 400) {
            result += pattern[2];
        } else {
            result += pattern[3];
        }
    }
    return result;
}
```

Synthetic producer-consumer workload

Producer

```
public long produce(int item)
{
    long result = 0;
    for (int i = 0; i < 100_000; ++i) {
        long[] pattern = {i,      i + 1,
                          i + 2, i + 3};

        if (item == 200) {
            result += pattern[0];
        } else if (item == 300) {
            result += pattern[1];
        } else if (item == 400) {
            result += pattern[2];
        } else {
            result += pattern[3];
        }
    }
    return result;
}
```

Consumer

```
public void consume(Producer prod) {
    for (int item = 0; item <= 500; ++item) {
        long result = prod.produce(item);
        // Do something with 'result'
    }
}
```

Beispieloptimierung 2: Virtual Call Inlining

Klassenhierarchie

```
class A {  
    void bar() {  
        S1;  
    }  
}
```

loaded



```
class B extends A {  
    void bar() {  
        S2;  
    }  
}
```

not loaded

Methode zum Kompilieren

```
void foo() {  
    A a = create(); // return A or B  
    a.bar();  
}
```

Compiler: Inline call?

Ja.

Beispieloptimierung 2: Virtual Call Inlining

Klassenhierarchie

```
class A {  
    void bar() {  
        S1;  
    }  
}
```

loaded



```
class B extends A {  
    void bar() {  
        S2;  
    }  
}
```

not loaded

Methode zum Kompilieren

```
void foo() {  
    A a = create(); // return A or B  
    S1;  
}
```

Compiler: Inline call?

Ja.

Nutzen vom Inlining

- Virtual Call vermieden
- Cachelokalität

Optimistische Annahme: nur A ist loaded

- Compiler merkt Abhängigkeit von Klassenhierarchie
- Wenn Hierarchie verändert: Deoptimierung

Beispieloptimierung 2: Virtual Call Inlining

Klassenhierarchie

```
class A {  
    void bar() {  
        S1;  
    }  
}
```

loaded



```
class B extends A {  
    void bar() {  
        S2;  
    }  
}
```

loaded

Methode zum Kompilieren

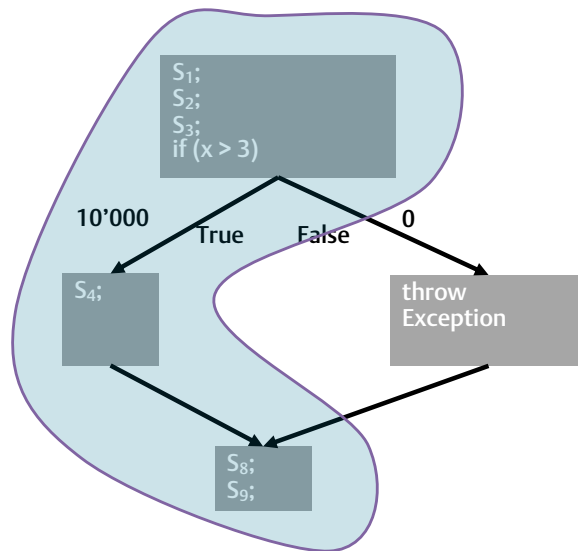
```
void foo() {  
    A a = create(); // return A or B  
    a.bar();  
}
```

Compiler: Inline call?

Nein.

Beispieloptimierung 3: Exception Handling

Kontrollflussgraph



Generierter Code



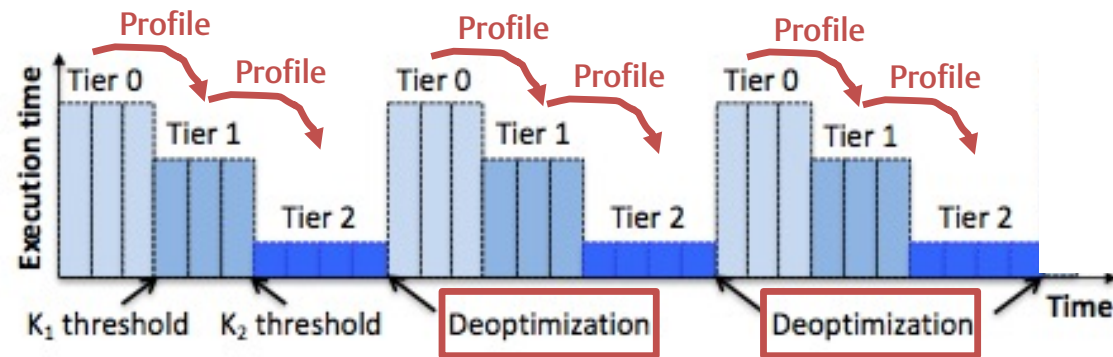
Anzahl Ausführungen Guard > Schwellwert → Rekompilierung
(evtl. mit anderen Optimierungen)

siehe z.B. Flag `OmitStackTraceInFastThrow`

Weitere interessante Experimente:

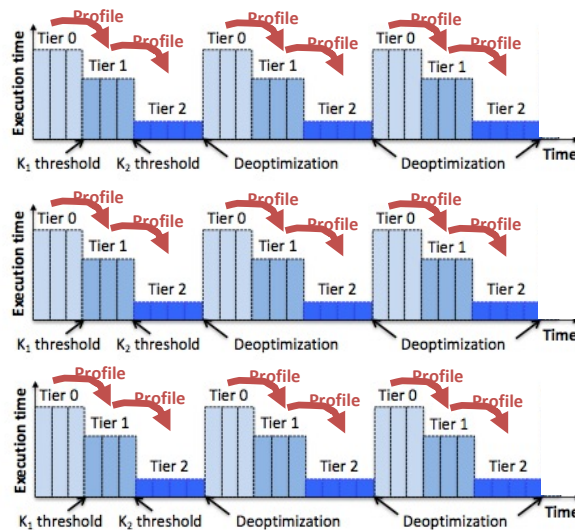
<https://www.baeldung.com/java-exceptions-performance>

Profilieren mit Deoptimierungen

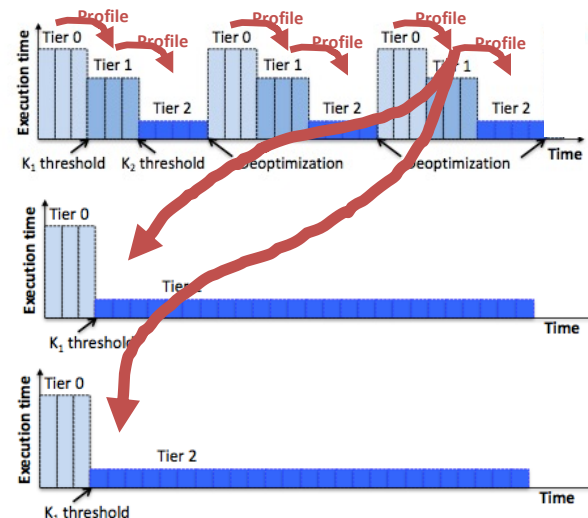


Bemerkung: Profile sind weggeworfen

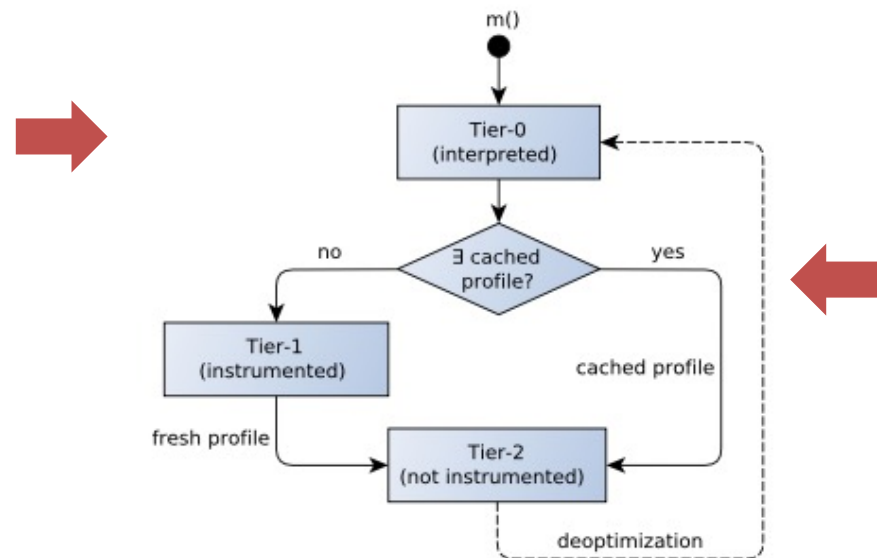
Baseline HotSpot



Profile Caching



Zustandsübergänge



Implementierung

Tiered Compilation erweitert mit neuen Zuständen

Speichern/Laden von Profilinformatoren

- Existierendes Format
- In-memory Repräsentierung

Open source

- Patch zum JDK 9 build 29

Evaluierung

8-core Xeon E5520, Ubuntu 14.04

Zwei Konfigurationen

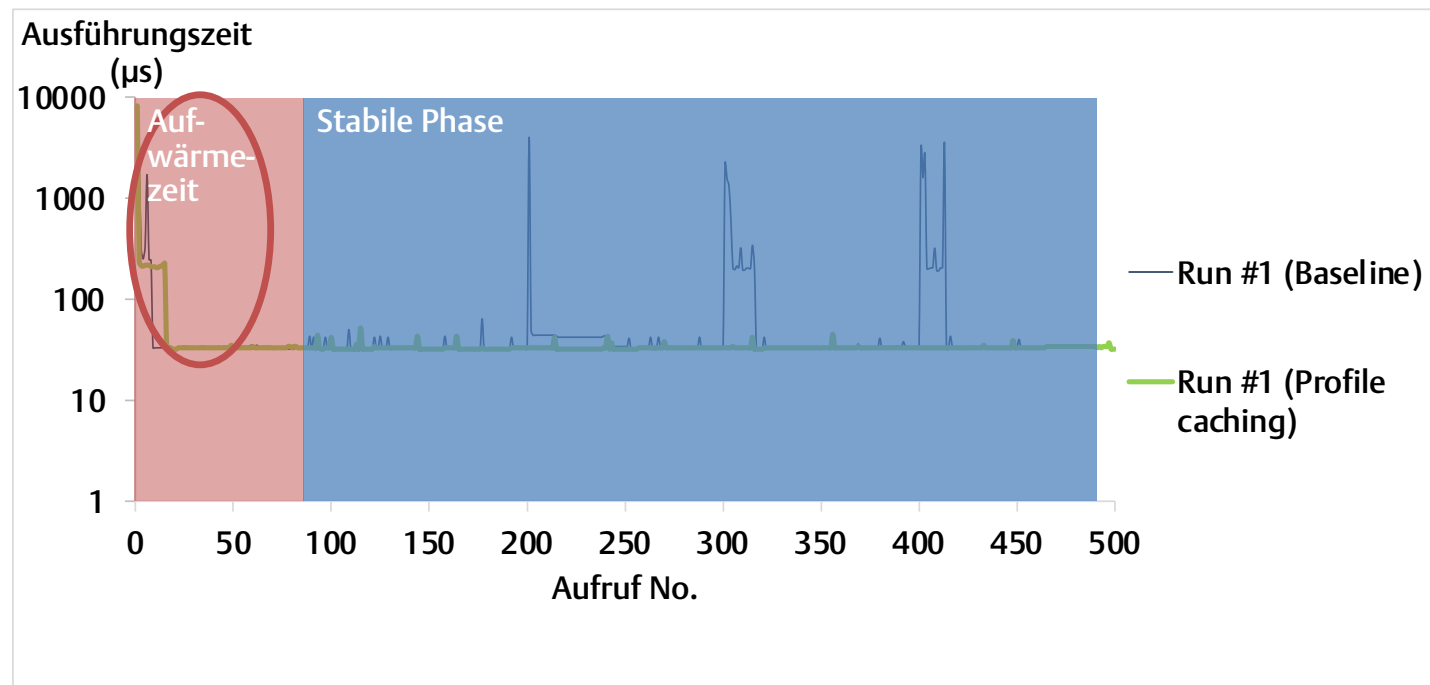
- *Baseline* = out-of-the-box VM
- *Profile caching*
 - Profile generiert mit Programm X und Input Y
 - Profile wird wiederverwendet mit (X, Y)

Producer-Consumer

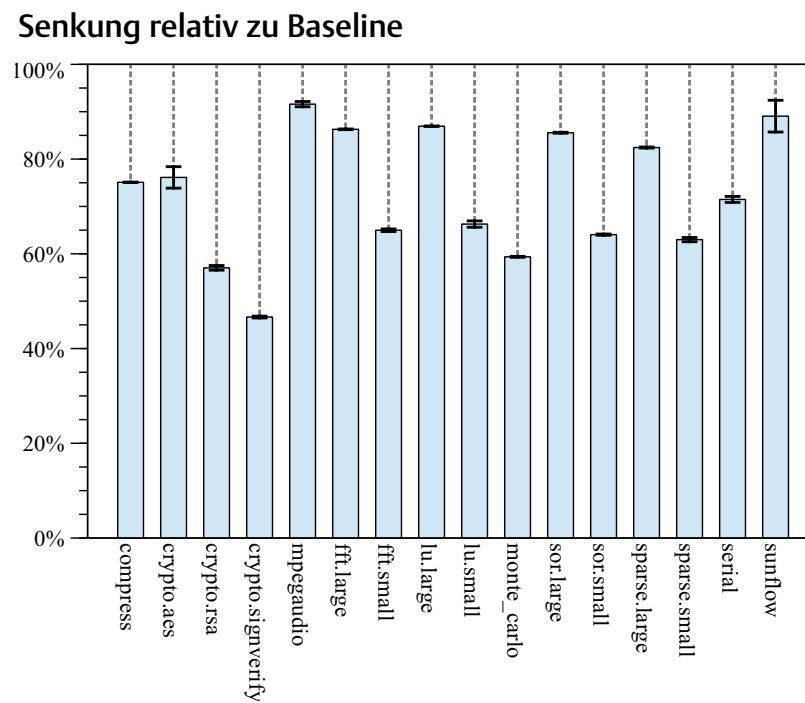
SPECjvm2008

- 16/21 Programme

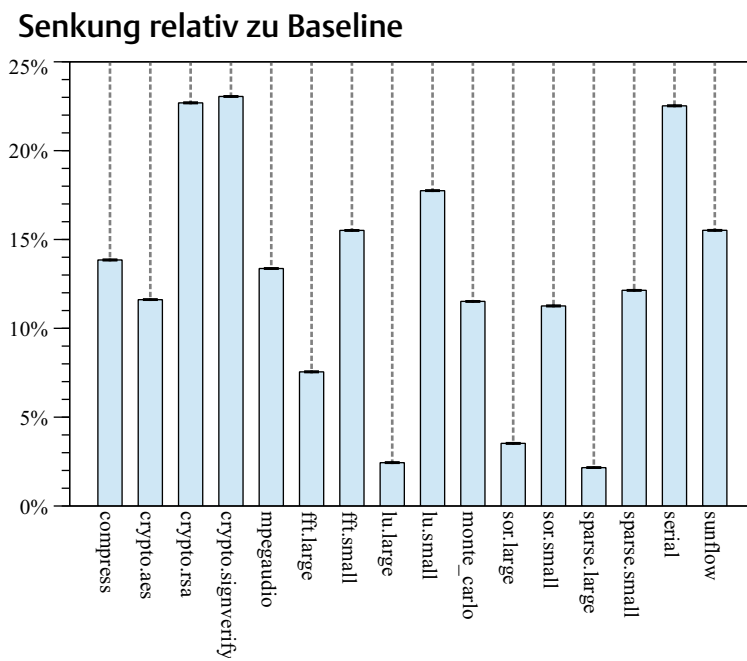
Producer-Consumer



Deoptimierungen

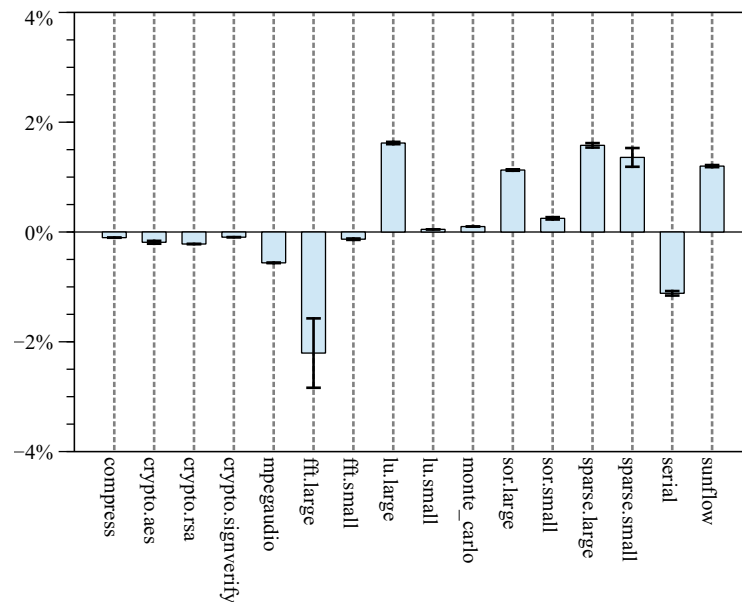


Anzahl Kompilierungen



End-to-end Leistung

Senkung relativ zu Baseline



Diskussion

Deoptimierungen immer noch verfügbar

- Falls gecachter Profil mit dem Verhalten zur Laufzeit nicht übereinstimmt

Profile Caching (Zusammenfassung)

Reduziert Leistungsfluktuationen

- Weniger Deoptimierungen
- Weniger Kompilierungen

End-to-end Laufzeit ist nicht deutlich beeinträchtigt

(Mit)wirkende

Prof. Thomas Gross (ETH Zürich)

Tobias Hartmann (Oracle)

Dr. Albert Noll (Oracle)

Marcel Mohler (ETH Zürich/Vontobel)

Zusatzmaterial

Zum Thema JIT-Kompilierung

- Fachartikel über Profile Caching: [w11/manlang_2017.pdf](#)
- Detaillierte Erklärung von Deoptimierungen und des Producer-Consumer Beispiels

Zusammenfassung

Kompilierung in der VM

- Mehrstufige Kompilierung
- Segmentierung des Codespeichers
- Deoptimierungen und Caching von Programmprofilen