



FACHBEREICH 12 – INFORMATIK UND MATHEMATIK  
SOFTWARE ENGINEERING UND PROGRAMMIERSPRACHEN

Masterarbeit

# Optimierung mittels der Auswahl von String Repräsentationen in Java Bytecode

Markus Wondrak

2. November 2014

# Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt durch meine eigene Unterschrift, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen genommen sind, als solche kenntlich gemacht haben. Die Versicherung bezieht sich auch auf in der Arbeit gelieferte Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

---

(Markus Wondrak)

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Werkzeuge</b>	<b>4</b>
2.1	Java Bytecode . . . . .	4
2.2	WALA . . . . .	5
2.2.1	IR . . . . .	6
2.2.2	Shrike . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Optimierte Stringtypen</b>	<b>8</b>
3.1	SubstringString . . . . .	8
3.2	StringListBuilder . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Analyse</b>	<b>11</b>
4.1	Datenstrukturen . . . . .	11
4.1.1	Datenfluss Graph . . . . .	11
4.1.2	Label . . . . .	14
4.1.3	Konventionen . . . . .	17
4.2	Algorithmus . . . . .	18
4.2.1	Motivation . . . . .	18
4.2.2	Die Bubble . . . . .	19
4.2.3	Umsetzung des Algorithmus . . . . .	20
4.2.4	Umgang mit mehreren Labels . . . . .	22
4.2.5	Phi-Knoten . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Transformation</b>	<b>25</b>
5.1	Lokale Variablen . . . . .	25
5.1.1	Optimierte Variablen . . . . .	25
5.1.2	Variablen zu Value Numbers . . . . .	25
5.2	Bytecode Generierung . . . . .	28
5.2.1	Informationen des TypeLabels . . . . .	28
5.2.2	Konvertierung . . . . .	29



---

5.2.3	Optimierung . . . . .	31
5.3	Schwierigkeiten . . . . .	32
5.3.1	Innere Archive (JARs) . . . . .	32
5.3.2	Typisierung von generiertem Bytecode . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Auswertung</b>	<b>34</b>
6.1	Vorraussetzungen . . . . .	34
6.1.1	Java Microbenchmarking Harness . . . . .	34
6.1.2	Test Durchführungen . . . . .	35
6.2	Benchmarks . . . . .	36
6.2.1	Example Parser . . . . .	36
6.2.2	Xalan . . . . .	38
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>50</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Java Bytecode Beispiel . . . . .	5
5.1	Lokale Variable für Definition . . . . .	26
6.1	Example Parser . . . . .	36
6.2	Ergebnis des Example Parser Benchmark . . . . .	37
6.3	Ergebnis des checkAttribQName Benchmark . . . . .	39
6.4	Ergebnis des instantiateURI Benchmarks . . . . .	40
6.5	Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (positive Dezimal- zahl) . . . . .	43
6.6	Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (negative Dezimal- zahl) . . . . .	44
6.7	Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (positive Ganzzahl) . . . . .	45
6.8	Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (positive Dezimal- zahl) . . . . .	46
6.9	Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (positive Dezimal- zahl) . . . . .	48

# List of Algorithms

1	Erstellung des Datenflussgraphen . . . . .	12
2	Vererbung des Labels . . . . .	21
3	labelConnectedRefs . . . . .	22
4	Simulation des Stacks . . . . .	27
5	needsConversationTo(Label) . . . . .	30

# 1 Einleitung

Die Verwendung von optimierten Datentypen beim Entwickeln eines Programms ist schwierig. Die eingesetzten Implementierungen von Standarddatentypen decken zumeist allgemeine Fälle ab, sind aber nicht optimal für spezielle Szenarien. Zudem sind spezielle optimierte Datentypen den Anwendern meist nicht oder zumindest nur begrenzt bekannt. So wird bei der Entwicklung von Software der Datentyp verwendet oder zwischen den Datentypen gewählt, der dem Entwickler bekannt ist. Dabei ist nicht nur die fehlende Kenntnis über diese optimierten Typen ein Grund für das Übergehen ebendieser. Die Entscheidungsfindung bis hin zu Wahl einer Entscheidung für oder gegen einen speziellen Typ verzögert die Arbeit während der Entwicklung von Systemen.

Ein weiteres Problem ergibt sich bei der Betrachtung von Altsystemen. Bei bereits lang bestehenden Anwendung, besteht das Problem der Wartbarkeit von eingesetzten Datentypen. Durch die Weiterentwicklung von eingesetzten Bibliothek können Optimierungspotentiale erst nach der aktiven Entwicklung von einzelnen Modulen entstehen. Hierbei ergibt sich wieder das Problem, dass diese Potentiale bekannt und auch richtig umgesetzt werden.

Ziel dieser Arbeit ist es daher zu untersuchen, ob sich Programme durch Auswahl und Substitution von alternativen Datentypen automatisiert optimieren lassen. Zu diesem Zweck soll ein System erstellt werden, dass mittels statischer Codeanalyse und automatischer Transformation eine Optimierung eines Programms durchführt.

Diese Untersuchung kann allerdings keine allumfassende Auswertung bereitstellen und wird sich auf die Optimierung der Laufzeit des `java.lang.String` Datentyps der *Java* Plattform und der Programmiersprache *Java* beschränken. Nach der Auswertung soll eine Aussage darüber möglich sein, ob diese Optimierungen möglich sind. Daher sollen die beiden Hypothesen untersucht werden:

1. Der String Datentyp bietet viele Möglichkeiten der Optimierung
2. Das automatische Ersetzen durch alternative Datentypen führt zu einem Performance Gewinn



Im Rahmen dieser Arbeit soll ein System erstellt werden, dass String Operationen in einem gegebenen Java Programm mit einer entsprechenden optimierten Version auf Basis des Java Bytecodes ersetzt. Dabei soll das System anhand statischer Code Analyse die Stellen lokalisieren, an denen eine Optimierung angewendet werden kann, und mittels der Transformation des Bytecodes des Programms diese Optimierungen anwenden. Als Ergebnis wird ein lauffähiges Programm erwartet, dass bei gleicher Eingabe eine geringere Ausführungszeit besitzt als das originale Programm.

In Kapitel 2 werden die Werkzeuge und Grundlagen beschrieben, auf denen das in dieser Arbeit entwickelte System aufbaut. Darauf folgt Kapitel 3, welches die optimierten String Typen vorstellt die in dieser Arbeit entwickelt wurden. Kapitel 4 erläutert den Analyse Prozess des Systems, indem die Datenstrukturen sowie der Algorithmus für die statische Code Analyse beschrieben wird. In Kapitel 5 wird basierend auf den Analyse Ergebnissen die Transformation des Bytecodes beschrieben. Kapitel 6 widmet sich der Auswertung der Tests in Form von Benchmarks und begründet diese Ergebnisse. Kapitel 7 zieht ein Fazit und beschreibt mögliche Weiterentwicklungen des Systems.



## 2 Werkzeuge

In den folgenden Abschnitten sollen die verwendeten Werkzeuge kurz vorgestellt werden. Dabei handelt es sich sowohl um den Java Bytecode, als auch um die Software Bibliothek *WALA*, auf deren API das in dieser Arbeit entwickelte System basiert.

### 2.1 Java Bytecode

Die Plattformunabhängigkeit, die in Java geschriebenen Programmen zugesprochen wird, ist vor allem mit der Rolle der Java Virtual Machine zu erklären. Java Programme werden in einen Zwischencode, den Java Bytecode, übersetzt, welcher von der System spezifischen JVM ausgeführt wird. Dabei ist Programmiersprache Java nicht die einzige in Bytecode übersetzbare Sprache. Es existieren neben den bekanntesten Scala, Jython, Groovy, JavaScript noch viele weitere. Einmal in Bytecode übersetzt können, in diesen Sprachen geschriebene, Programme auf jeder, der Java Spezifikation entsprechenden, JVM ausgeführt werden.

Bytecode ist eine Sammlung von Instruktionen welche durch *opcodes* von 2 Byte Länge definiert werden. Zusätzlich können noch 1 bis  $n$  Parameter verwendet werden. Die Sprache ist Stack-orientiert, das bedeutet, dass von Operationen verwendete Parameter über einen internen Stack übergeben werden. Als Beispiel dient der folgende Bytecode:



```
ICONST 5    // legt den konstanten int Wert 5 auf den
             Stack
ILOAD 1      // lädt die lokale integer Variable 1 und
             legt sie auf den Stack
IADD        // addiert die ersten beiden Werte auf dem
             Stack und legt das Ergebnis auf den Stack
ISTORE 2     // speichert den Wert auf dem Stack in der
             Variable 2
```

Abbildung 2.1: Java Bytecode Beispiel

Dabei existiert der Stack nur als Abstraktion für den eigentlichen Prozessor im Zielsystem. Wie die jeweilige JVM den Stack in der Ziel Plattform umsetzt ist nicht definiert. Die Instruktionen lassen sich in folgende Kategorien einordnen:

- Laden und Speichern von lokalen Variablen (ILOAD, ISTORE)
- Arithmetische und logische ausdrücke (IADD)
- Object Erzeugung bzw. Manipulation (NEW, PUTFIELD)
- Stack Verwaltung (POP, PUSH)
- Kontrollstruktur (IFEQ, GOTO)
- Methoden Aufrufe (INVOKEVIRTUAL, INVOKESTATIC)

## 2.2 WALA

Bei *WALA* handelt es sich um die "T.J. Watson Library for Analysis". Eine ehemals von IBM entwickelte Bibliothek für die statische Codeanalyse von Java- und JavaScript Programmen. Das Framework übernimmt dabei das Einlesen von *class* Dateien und stellt eine Repräsentation, die sogenannte *Intermediate Representation*, des Bytecodes zur Verfügung. Diese IR stellt die zentrale Datenstruktur dar und soll in diesem Abschnitt detailliert beschrieben werden.

Für die Manipulation des Bytecodes existiert innerhalb des Frameworks ein Unterprojekt, das diese Aufgabe übernimmt: Shrike. Im Zweiten Abschnitt soll diese API kurz vorgestellt werden.



### 2.2.1 IR

Die *Intermediate Representation* (IR) ist eine Abstraktion zum Stack basierten Bytecode. Ein IR ist in Single Static Assignment Form, welche sich dadurch auszeichnet, dass jeder Variablen immer genau **einmal** ein Wert zugewiesen wird. Zusätzlich besteht die IR aus dem Kontrollflussgraphen der Methode, welcher wiederum aus Basic Blocks zusammengesetzt ist. Ein Basic Block ist eine Zusammenfassung von aufeinander folgende Instruktionen, welche in jedem Fall nach einander ausgeführt werden.

Die Variablen innerhalb des IRs nennt WALA *value numbers*. Diese beziehen sich immer auf eine Referenz, allerdings kann sich eine Referenz auf mehrere tatsächliche value numbers in der IR beziehen. Dies folgt aus der SSA Form, wird eine Variable im Bytecode zweimal ein Wert zugewiesen, wird diese doppelte Zuweisung in der SSA Form durch das Einführen einer neuen value number entfernt. Die Operationen werden auch nur mit Bezug auf die value numbers beschrieben.

Da die Zwischendarstellung vom Stack abstrahieren soll, werden auch alle Operationen, die den Stack betreffen (wie z.B. LOAD, STORE, PUSH oder POP) nicht in diese Repräsentation übernommen. Dabei werden die Bytecode Indices der übrig gebliebenen Instruktionen berücksichtigt und alle anderen Stellen in dem beinhaltenden Array mit `null` Werten aufgefüllt. Instruktionen werden von Objekten vom Typ `SSAInstruction` und dessen Untertypen dargestellt.

Die Verwaltung der value numbers wird von einem Typ namens `SymbolTable` übernommen. Es kommt bei der IR Erstellung zum Einsatz, wenn bei der Simulation des Bytecodes neue Variablen verwendet werden, um neue value numbers zu erzeugen.

Aufgrund der SSA Form der IR lässt sich für jede value number genau eine Definition bestimmen. Zu diesem Zweck bietet WALA den Typ `DefUse` an, welcher für jedes IR-Objekt erstellt werden kann. Er ermöglicht einen einfachen Zugriff auf die Instruktionen, die eine value number definiert (*def*; z.B. als Rückgabe aus einem Methodenaufruf), und eine Menge an Instruktionen, die die entsprechende value number verwenden (*use*; z.B. als Rückgabewert in einem `RETURN` Statement).

Besitzt ein Block im Kontrollflussgraphen mehrere eingehende Kanten und werden aus diesen Vorgänger Blöcken Variablen mitgebracht die synonym in diesem Block verwendet werden, werden in SSA-Form sogenannte  $\phi$  Funktionen verwendet. Eine Instruktion der Form  $v_3 = \phi(v_1, v_2)$  sagt aus, dass im



Folgenden die Referenz  $v_3$  sowohl  $v_1$ , als auch  $v_2$  sein kann. Da die statische Code Analyse nicht feststellen kann von welchem Block aus dieser Block betreten wurde, werden diese  $\phi$ -Funktionen verwendet, um die Zusammenführungen von mehreren Variablen aus Vorgängerblöcken darzustellen.

Das IR und das dazugehörige DefUse Objekt werden in dem System internen Datentyp `AnalyzedMethod` zusammengefasst.

### Anpassungen

In WALA werden beim Erstellen des IR für alle Konstanten mit demselben Wert dieselbe value numbers erzeugt. Da für die *Analyse* verschiedenen Referenzen getrennt untersucht werden mussten, wurde für die Erzeugung einer value number für eine Konstante der eingebaute caching Mechanismus umgangen.

Darüber hinaus war für die *Transformation* die Information nötig, an welcher Stelle im Bytecode eine entsprechende Konstante erzeugt wird (z.B. mittels LCD). Um dies zu Erreichen wurde dieser Bytecode Index während dem Durchlaufen der Instruktionen innerhalb der `SymbolTable` gespeichert, sodass er beim Klienten des IRs zur Verfügung steht.

Da diese Änderungen nicht in den Haupt Branch von WALA eingepflegt werden durften, benötigt das System den Fork des WALA Projektes <sup>1</sup>.

#### 2.2.2 Shrike

Shrike ist ein Unterprojekt innerhalb des WALA Frameworks. Shrike übernimmt dabei das Lesen und das Schreiben von Bytecode aus bzw. in class Dateien. Dabei wird es zum einen beim Erstellen eines IR aus einer Methode verwendet, zum Anderen bietet es eine "Patch-based API an um den Bytecode einer eingelesenen Methode zu verändern. Dies geschieht über das Einfügen von `Patches`, welche über einen entsprechenden `MethodEditor` überall im Bytecode einer Methode eingefügt werden oder auch ursprüngliche Instruktionen komplett ersetzen. Zusätzlich enthält es einen `Verifier`, der erzeugten Bytecode überprüft, so dass ungültige Stack Zustände oder Typfehler noch während der Manipulation erkannt werden können.

In dem von mir entwickelten System werden alle Bytecode Manipulationen mit Hilfe von Shrike umgesetzt.

---

<sup>1</sup>Dieser ist unter <http://github.com/wondee/WALA> zu finden.

## 3 Optimierte Stringtypen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei alternative String Typen die Optimierungen der ursprünglichen `java.lang.String` API darstellen. Diese Typen umgehen das Design der String Repräsentationen in Java, die *nicht veränderbare* Objekte darstellen. Durch diesen Umstand führen alle Manipulationsoperationen auf String Typen dazu, dass die Daten auf denen diese Objekte basieren (ein `char` Array, dass die einzelnen Zeichen der Zeichenkette hält) kopiert werden müssen. Es sind über die hier vorgestellten Typen durchaus weitere Optimierungen für den String Typ denkbar, doch wurden im Rahmen dieser Arbeit nur diese beiden Typen betrachtet. Diese Typen befinden sich im Maven Artefakt *faststring-core*.

### 3.1 SubstringString

Der Typ `de.unifrFrankfurt.faststring.core.SubstringString` dient als Optimierung für die Methode `java.lang.String.substring(..)`. Dabei dient das `char` Array als Daten für die repräsentierte Zeichenkette. Zusätzlich besitzt der Typ zwei Zeiger `start` und `end` die jeweils auf den Anfang und das Ende der repräsentierten Zeichenkette zeigen. Beim Aufruf von `substring` auf eine Instanz dieses Typs wird jeweils eine neue Instanz erzeugt, der eine Referenz auf das `char` Array, sowie die neu errechneten Zeiger auf den Anfang und das Ende der neu errechneten Zeichenkette, übergeben.

Um eine größere Kompatibilität mit der ursprünglichen String API zu erlangen wurden zusätzliche Methode, die einfach auf der neuen Datenstruktur zu implementieren waren zu diesem Typ hinzugefügt. Dazu gehört zum einen das `java.lang.CharSequence` Interface, zum anderen einige weitere Methoden, die gewöhnlich im Zusammenhang mit `substring` aufgerufen werden.

Zu den Methoden aus dem `CharSequence` Interface gehören:

- `length()`: Implementiert durch `ende - start`
- `charAt(i)`: Implementiert durch `value[start + i]`



- `subSequence(start, end)`: Implementiert durch `substring(start, end)`

Zusätzliche Methoden werden benötigt um eine Umwandlung von einem `String` zu einem `SubstringString`, sowie in die andere Richtung, zu ermöglichen. Dazu gehören:

- `<init>(String)`: Konstruktor um eine neue Instanz mit dem Wert der übergebenen Strings zu erzeugen.
- `String toString()`: überschriebene `java.lang.Object.toString()` Methode um eine Umwandlung von einem `SubstringString` zu einem `String` zu ermöglichen.
- `SubstringString valueOf(String)`: statische Factory Methode zum statischen Erzeugen einer neuen Instanz. (Wird für einfachere Bytecode-Generierung verwendet)

## 3.2 StringListBuilder

String Konkatination in Java kann mit dem `+` Operator vorgenommen werden. Allerdings wird in zahlreichen Java Coding Guidelines der `StringBuilder` bzw. `StringBuffer` als Alternative für den `+` Operator empfohlen. Grund für die Empfehlung ist, dass, wie bereits beschrieben, die Manipulationen von Strings zu dem Kopieren der Zeichen des `char` Arrays führt. Angesichts dieser Problematik werden der auf Strings angewandte `+` Operator seit Java 6 zu einem Aufruf von `StringBuilder.append()` kompiliert.

Die `StringBuilder` Implementierung basiert auf einem `char` Array, welches mit den über `append` übergebenen Zeichenketten befüllt wird. Ist dieses Array voll, so wird ein neues Array mit doppelter Größe angelegt und die Werte des alten Array in das neue kopiert.

Diesen Kopiervorgang umgeht der `de.unifrankfurt.faststring.core.StringListBuilder` indem er eine verkettete Liste von Strings verwaltet und dieser bei jedem `append` Aufruf ein neues Element hinzufügt. Als Anker werden Kopf sowie das Letzte Element der Liste gespeichert.

Allerdings erfüllt dieser Datentyp nicht den eigentlichen Kontrakt des `java.lang.StringBuilder`. Der `StringListBuilder` erfüllt den Zweck Instanzen vom Typ `SubstringString` zu konkatinieren. Daher existiert auch nur die Methode `append(SubstringString)`.



Da die Absicht dieses Typs weniger die Konvertierung innerhalb des Programmflusses, als die komplette lokale Ersetzung des ursprünglichen `StringBuilders` innerhalb einer Methode. Daher werden die Methoden zur Konvertierung wie im `SubstringString` nicht benötigt. Zusätzlich existieren die Methoden:

- `<init>()`: Default Konstruktor
- `<init>(SubstringString)`: Zum Erzeugen einer Instanz mit einer Vorbelegung.
- `toString()`: wie auch `java.lang.StringBuilder.toString()` erzeugt die Methode den erstellten String.

## 4 Analyse

Das Folgende Kapitel beschreibt den Analyse Algorithmus, des von mir entworfenen Systems. Im ersten Abschnitt sollen die verwendeten Datenstrukturen vorgestellt und beschrieben werden. Der zweite Abschnitt beschreibt den eigentlichen Algorithmus.

### 4.1 Datenstrukturen

Für den Algorithmus wurden zwei grundlegende Datenstrukturen entworfen. Der *Datenflussgraph* repräsentiert den Datenfluss der Referenzen innerhalb einer Methode und wird im ersten Abschnitt vorgestellt. Zu optimierende Referenzen werden in diesem Graphen mit sogenannten *Labels* versehen. Dieser Datentyp soll im zweiten Abschnitt beschrieben werden.

#### 4.1.1 Datenfluss Graph

Eine auf einem IR basierende Methode wird vom System mittels eines Datenflussgraphen repräsentiert. Dieser wird vor der eigentlichen Analyse aus einer gegebenen Methode und einer Menge an initialen Referenzen vom `DataFlowGraphBuilder` erzeugt. Der Graph ist gerichtet und setzt sich aus zwei verschiedenen Knoten zusammen:

- **Reference:** eine value number aus dem IR
- **InstructionNode:** eine Instruktion aus dem IR

Sei im Folgenden der Datenflussgraph  $G = (V, E)$ ,  $R$  die Menge aller **Reference** Knoten und  $I$  die Menge aller **InstructionNodes**.

Im Graph gilt  $\forall (x, y) \in V, (x \in R \wedge y \in I) \vee (x \in I \wedge y \in X)$ . Eine Kante  $i \in I, r \in R, (i, r)$  beschreibt eine *Definition*, die aussagt, dass die Referenz  $r$  durch die Instruktion  $i$  definiert wird. Ein Kante  $i \in I, r \in R, (r, i)$  ist eine *Benutzung* (im folgenden *Use* genannt).





**Reference** Knoten werden für jede betroffene value number erzeugt. Für die Erstellung von `InstructionNode` Objekten steht die `InstructionNodeFactory` zur Verfügung, die für eine gegebene `SSAInstruction` eine entsprechende `InstructionNode` erstellt. Um für dieselbe `SSAInstruction` immer dasselbe `InstructionNode` Objekt zu garantieren verwendet die Factory einen internen Cache, der eine Abbildung  $SSAInstruction \rightarrow InstructionNode$  verwaltet und für jede `SSAInstruction` prüft ob für diese bereits eine `InstructionNode` erstellt wurde.

Die Erstellung eines `DataFlowGraphs` beginnt immer mit einer Menge an initialen **Reference** Objekten. Ausgehend von dieser Startmenge werden über das `DefUse`-Objekt des betroffenen IRs die Definition und alle Uses in den Datenflussgraphen eingefügt. Algorithmus 1 beschreibt die Erstellung des Graphen. Die verwendete Queue Implementierung ist eine auf einem `java.util.LinkedHashSet` basierende Eigenentwicklung mit dem Namen `de.unifrankfurt.faststring.analysis.util.`

---

**Algorithm 1** Erstellung des Datenflussgraphen
 

---

```

1:  $q \leftarrow \text{new Queue}(\text{initialReferences})$ 
2:  $g \leftarrow \text{new DataFlowGraph}()$ 
3: while not  $q.\text{isEmpty}()$  do
4:    $r \leftarrow q.\text{remove}()$ 
5:   if not  $g.\text{contains}()$  then
6:      $\text{def} \leftarrow \text{defUse}.\text{getDef}(r)$ 
7:      $\text{uses} \leftarrow \text{defUse}.\text{getUses}(r)$ 
8:      $\text{newInd}.\text{add}(\text{def})$ 
9:      $\text{newInd}.\text{add}(\text{uses})$ 
10:     $r.\text{setDef}(\text{factory}.\text{create}(\text{def}))$ 
11:    for  $\text{ins} \in \text{defUse}.\text{getUses}(r)$  do
12:       $r.\text{addUse}(\text{factory}.\text{create}(\text{ins}))$ 
13:    end for
14:    for  $\text{ins} \in \text{newIns}$  do
15:       $q.\text{add}(\text{ins}.\text{getConnectedRefs}())$ 
16:    end for
17:     $g.\text{add}(r)$ 
18:  end if
19: end while
20: return  $g$ 

```

---



Jeder **InstructionNode** besitzt eine Definition, die Nummer der Referenz die diese Instruktion erzeugt und eine Liste von Uses, die Nummern der Referenzen die es benutzt. Darüber hinaus noch Informationen zu Bytecode Spezifika, die im Kapitel 5.1 betrachtet werden.

Für verschiedene **SSAInstruction** Typen existieren entsprechende **InstructionNode** Subtypen. Allerdings können nicht alle dieser Typen einer **SSAInstruction** zugeordnet werden können. Im Folgenden sollen die wichtigsten Knotentypen vorgestellt werden. Es existieren darüber hinaus weitere Typen von Instruktionen für die das System zur Zeit keine Unterstützung bietet, da es ausschließlich für komplexe Objekte ausgelegt ist.

Ein weiteren Subtyp bildet die **LabelableNode**. Dieser Typ stellt eine speziellen Knoten dar, der mit einem Label markiert und damit auch optimiert werden kann.

### **MethodCallNode**

Eine **MethodCallNode** repräsentiert einen Methoden Aufruf. Es besitzt, wenn vorhanden, eine Definition, welche den Rückgabewert repräsentiert, einen Receiver, wenn es keine statische Methode ist und eine Liste an Parametern. Zusätzlich die aufgerufene Methode. Dieser Typ ist eine **LabelableNode**.

### **ContantNode**

Dieser Knoten Typ stellt eine Konstanten Definition dar. Er besitzt ausschließlich die Definition, welcher Referenz diese Konstante zugewiesen wird. Für diesen Typ existiert keine entsprechende **SSAInstruction**.

### **ParameterNode**

Die **ParameterNode** stellt eine Definition eines Parameters der Methode dar. Wird eine Variable innerhalb der Methode als Parameter in der Methoden Signatur deklariert, wird deren Definition als **ParameterNode** im Datenflussgraphen repräsentiert. Für diesen Typ existiert keine entsprechende **SSAInstruction**.

### **NewNode**

Dieser Typ entspricht einer **NEW** Anweisung, die ein neues Objekt eines gegebenen Typen erstellt. Es besitzt eine Definition und den Typ des instanziierten Objekts. Dieser Typ ist eine **LabelableNode**.



## ReturnNode

**ReturnNode** Typen sind **RETURN** Anweisungen. Die besitzen ausschließlich eine Referenz als Use. Diejenige Referenz, die sie aus der Methode zurückgeben. Dieser Typ kann keine Definition darstellen.

## PhiNode

Die **PhiNode** steht für eine  $\phi$ -Instruktion aus dem IR. Sie besitzt eine Referenz als Definition und 2 bis  $n$  Uses. Dieser Typ ist eine **LabelableNode**.

### 4.1.2 Label

Das *Label* entspricht einer Markierung, mit der Knoten in einem Datenflussgraphen versehen werden können. Dabei steht ein Label (oder **TypeLabel**, wie der Datentyp im System heißt) für einen Optimierten Typ. Die Semantik hinter einem markierten Knoten ist, dass diese Referenz bzw. Instruktion durch den entsprechenden Optimierten Typ ersetzt werden kann.

Es kann nicht für alle **InstructionNodes** ein Label gesetzt werden. Genauer gesagt lassen sich ausschließlich für die Knotentypen **MethodCallNode**, **NewNode** und **PhiNode** ein Label setzen, da sich nur diese Instruktionen in einen optimierten Typ umwandeln lassen.

Das **TypeLabel** beinhaltet alle Regeln, die für die Verwendung eines Optimierten Typen existieren. Dazu gehören

- der Originale, sowie der Optimierte Typ
- die Methoden für die Optimierungen im optimierten Typ angeboten werden
- alle Methoden die darüber hinaus vom Optimierten Typ unterstützt werden
- Methoden, die den optimierten Typ als Rückgabewert zurückgeben
- zu dem beschriebenen Label kompatible Label

Dabei werden die Aspekte dieser Liste durch Methoden des Interface abgedeckt. Im System lassen sich Label Definition auf 2 Arten erstellen:

1. Durch das Implementieren des Interfaces **TypeLabel**



## 2. Durch das Erstellen einer `.type` Datei

Zwar unterstützt das Kommandozeilen Tool zur Zeit nur die zweite Variante, programmatisch lässt sich allerdings auch die erste Alternative umsetzen. Im Folgenden sollen die beiden Möglichkeiten zur Definition eines `TypeLabels` betrachtet werden.

### Das `TypeLabel` Interface

Das Interface beinhaltet alle Methoden, die der Analyse- und Transformationsprozess benötigt. In diesem Kapitel sollen zunächst nur die Methode betrachtet werden, die für den Analyse Algorithmus verwendet werden, die Übrigen werden im Abschnitt 5.2.1 betrachtet.

`canBeUsedAsReceiverFor(MethodReference)` Legt fest, ob eine markierte Referenz als Empfänger für den übergebenen Methodenaufruf dienen kann.

`canBeUsedAsParamFor(MethodReference, int)` Bestimmt, ob eine markierte Referenz als Parameter in dem gegebenen Methodenaufruf an der entsprechenden Stelle (der `int` Parameter) verwendet werden kann.

`canBeDefinedAsResultOf(MethodReference)` Sagt aus, ob die gegebene Methode einen optimierten Typ zurückgeben kann. Dies impliziert, dass der Methodenaufruf selber auch markiert ist.

`findTypeUses(AnalyzedMethod)` Gibt eine Menge an `Reference` Objekten zurück, auf denen innerhalb der gegebenen Methode eine der von der Optimierung betroffenen Methode aufgerufen wird. Für diesen Algorithmus existiert bereits eine Implementierung in der Klasse `BaseTypeLabel`.

`compatibleWith(TypeLabel)` Gibt an, ob das übergebene Label kompatibel mit diesem Label ist.

Alle diese Methoden werden von den `InstructionNode` Implementierungen verwendet. Wie genau das passiert wird im Abschnitt *Algorithmus* beschrieben.



### Das .type Dateiformat

Da das Implementieren des Interfaces eher komplex ist, wurde für die einfachere Definition eines Types ein Datei Format entwickelt, welches von der Komplexität des Interfaces abstrahieren soll. In dieser werden nicht die Regeln selbst, sondern die Fakten beschrieben, aus denen die Regeln für den Algorithmus hergeleitet werden können, beschrieben.

Aus einer Datei im `type` Format wird mittels eines internen Parsers ein `TypeLabelConfig` Objekt erzeugt, welches als `TypeLabel` Objekt für den Algorithmus fungiert.

Für die inhaltliche Struktur der Datei wurde JSON (JavaScript Object Notation) gewählt eine Darstellung anzubieten, die sowohl für Menschen als auch für das Programm leicht zu lesen und zu verstehen ist. Die Attribute innerhalb der Datei werden im Folgenden beschrieben:

**name** Der Name des Labels

**originalType** Der voll qualifizierte Name des zu ersetzenden Typs

**optimizedType** Der voll qualifizierte Name des zu optimierten Typs

**methodDefs** Liste von Methoden, diesen wird eine ID vergeben um sie im folgenden über diese ID zu referenzieren. Ein Eintrag in dieser Liste setzt sich zusammen aus:

**id** eine eindeutige ID für die diese Methode

**desc** die Beschreibung dieser Methode. Dies ist ein eigenes Objekt und besteht aus den Attributen:

**name** der Name der Methode

**signature** der Signatur der Methode. Zusammengesetzt aus der Parameterliste und der Rückgabewert. Die Typen müssen dabei in der internen JVM Form angegeben werden. (Beispiel: `"(I)Ljava/lang/String;"`, ein Parameter vom Typ `int` und Rückgabewert vom Typ `java.lang.String`)

**affectedMethods** Liste von Methoden IDs. Für diese Methoden existieren optimierte Varianten in dem optimierten Typen.

**supportedMethods** Liste von Methoden IDs. Diese Methoden werden auch vom optimierten Typ unterstützt. Es handelt sich bei diesen aber nicht um Optimierungen.



**producingMethods** Liste von Methoden IDs. Alle diesen Methoden erzeugen in ihrer optimierten Variante optimierte Typen.

**compatibleLabel** Liste von Strings. Alle Labels die mit diesem Label kompatibel sind.

**parameterUsage** Ein Objekt. Dabei ist jeder key die ID einer Methode und der entsprechende value eine Liste von Ganzzahlen. Ein Eintrag bedeutet, dass diese Methode mit einem Optimierten Typ als Parameter mit diesem Index umgehen kann.

**optimizedParams** Ein Objekt. Dabei ist jeder key die ID einer Methode und der entsprechende value eine Parameter Liste in interner JVM Notation. Wird bei einer Optimierung einer Methode eine andere Parameter Liste erwartet als die ursprüngliche der originalen Methode, so muss die neue Signatur an dieser Stelle angegeben werden.

**staticFactory** Ein String. Der Name einer statischen Factory Methode mit einem Übergabeparameter vom Typ des Originalen Typs. Diese muss einen entsprechenden Optimierten Typ zurückgeben.

**toOriginalType** Ein String, Der Name einer Methode ohne Parameter, die aus dem optimierten Objekt, ein entsprechendes vom Originalen Typ zurückgibt.

### 4.1.3 Konventionen

Bei dem Erstellen von optimierten Typen sind einige Konventionen zu befolgen. Das System rechnet damit, dass diese Annahmen befolgt werden. Diese Regeln sind im Folgenden beschrieben.

#### Methodennamen

Wird eine Methode als *effectedMethod* deklariert, wird der optimierte Gegensatz durch den Namen identifiziert. Wenn z.B. die Methode `f()` aus dem Typ `A` optimiert werden soll, so muss in dem optimierten Typ `AOpt` eine Methode `f()` existieren. Besitzt die originale Methode eine Parameterliste, so muss diese mit derer der optimierten Methode in Anzahl und Typen übereinstimmen.



Eine Ausnahme bildet dabei die Verwendung von ebenfalls optimierten Parametern. In diesem Fall muss im Feld *optimizedParams* in der *type* Datei ein entsprechender Eintrag erfolgen.

## 4.2 Algorithmus

In diesem Abschnitt soll die Idee hinter dem Analyse Algorithmus sowie dessen Implementierung vorgestellt werden. Hierzu wird zunächst das Konzept der "Bubbleörläutert um danach die Umsetzung dieses Konzepts im eigentlich Algorithmus zu betrachten.

### 4.2.1 Motivation

Optimierte Referenzen sind im Falle von String Objekten nicht kompatibel mit den Originalen. So treten Probleme in den Folgenden Szenarien auf:

**Referenz als Methoden Parameter** Die Signatur der optimierten Methode, wird nicht verändert, da es dazu führen würde, dass Klienten Code, der diese Methode weiterhin mit dem originalen Typ aufruft, nicht mehr kompilieren würde.

**Referenz als Rückgabewert** Ein ähnliches Problem existiert, wenn die Referenz zurückgegeben wird. Die Signatur der Methode definiert den Originalen Typ als Rückgabebetyp und das zurückgeben eines anderen Typs als eben dieser definierte würde zu Laufzeitfehlern führen.

**Methodenaufruf auf Referenz** Wird diese optimierte Referenz als Empfänger von einer Methode verwendet, die nicht zu den optimierten oder unterstützten Methoden dieses optimierten Typs gehört, würde es zu Laufzeitfehlern kommen, da diese aufzurufende Methode nicht im optimierten Typ vorhanden ist.

**Feld Zugriff (GETFIELD, PUTFIELD)** Wird die optimierte Referenz in ein oder aus einem Feld innerhalb eines Objektes (oder in ein statisches Feld einer Klasse) gesetzt, stimmt auch in diesem Szenario der Typ des optimierten und des originalen Objekts nicht überein.

**Array Zugriff** Bei dem Zugriff auf ein Array, sowohl lesend als auch schreibend, existiert eine Unstimmigkeit mit dem Typ des Arrays.



**Referenz Aufruf Parameter** Wird die Referenz als Parameter für einen Methoden Aufruf verwendet und diese Methode ist nicht in der Label Definition als Methode deklariert, die mit einem optimierten Typ umgehen kann, dann erwartet diese Methode den originalen Typ und nicht den optimierten.

Erweitert allerdings der optimierte Typ seinen originalen Typ so wäre, durch den Polymorphismus, der optimierte Typ genauso wie der originale verwendbar. Allerdings ist der Typ `java.lang.String` final, was bedeutet, dass von diesem Typ nicht abgeleitet werden kann. Darüber hinaus bieten sich Ableitungen für Optimierungen nicht an, da das dynamische dispatchen zusätzlichen Aufwand für die JVM darstellt, da zunächst die Implementierung des Methode zu lokalisieren.

Aus diesem Grund müssen in den Code Konvertierungen in und vom optimierten Typ eingefügt werden. Eine Konvertierung zum optimierten Typ muss vor dem zu optimierenden Methodenaufruf erfolgen. Eine Umwandlung vom optimierten Typ allerdings muss vor einer nicht kompatiblen Benutzung dieser Referenz erfolgen um bei dieser den originalen Typ zu verwenden.

### 4.2.2 Die Bubble

Da Konvertierungen zusätzliche Laufzeit erfordern, muss es das Ziel sein die Anzahl der durchgeführten Konvertierungen zu minimieren. Dies wird erreicht indem man den Bereich, in dem ein optimierter Typ statt des originalen innerhalb der Methode verwendet maximiert. Dieser Bereich, in dem ein optimierter, statt des originalen, Typs für eine Referenz verwendet wird, wird im Folgenden *Bubble* genannt.

Die Bubble entsteht mittels der Markierung von Knoten im Datenflussgraphen. Es wird für jede gegebene Instanz vom Typ `TypeLabel` eine Bubble auf dem Graphen erzeugt. Dabei kann ein Knoten immer nur mit einem Label markiert sein, daher kann ein Knoten immer nur Teil einer Bubble sein.

Ziel des Algorithmus ist es diese Bubble so groß wie zu definieren. Als Anfangszustand werden alle zu optimierenden Methodenaufrufe mit dem zu verarbeitenden Label markiert.





### 4.2.3 Umsetzung des Algorithmus

Als Eingabe für den Algorithmus dient ein Objekt vom Typ `DataFlowGraph`, der den bereits beschriebenen Datenflussgraphen darstellt. Zum Erstellen des Graphen werden wie in 4.1.1 beschrieben zunächst initiale Referenzen benötigt. Diese Referenzen werden über die Methode `Set<Reference> findTypeUses(AnalyzedMethod)` ermittelt, welche sich in der abstrakten Klasse `BaseTypeLabel` befindet. Diese Methode ist auch Teil des `TypeLabel` Interfaces. Grundlage dieser Ermittlung sind die von der in der Label Definition definierten *effectedMethods*, also derjenigen Methoden für die dieses Label eine Optimierung darstellt. Die `findTypeUses` Methode erstellt für jede Referenz, auf der in der gegebenen Methode eine der *effectedMethods* aufgerufen wird, ein `Reference` Objekt. Dabei wird für jede value number genau ein Referenz Objekt erzeugt. Die erstellten Referenzen werden dem verwendeten Label markiert.

Die Implementierung des Algorithmus befindet sich als statische Methode in der Klasse `LabelAnalyzer`. Ausgehend von den initial markierten Knoten, wird jeweils die Definition sowie alle Uses einer Referenz betrachtet, ob diese mit dem Label der Referenz markiert werden können. Der Algorithmus 2 beschreibt die Implementierung dieser Vererbung des Labels. Als Queue findet wieder die `de.unifrFrankfurt.faststring.analysis.util.UniqueQueue` Verwendung.




---

**Algorithm 2** Vererbung des Labels
 

---

```

1:  $q \leftarrow \text{new Queue}(\text{initialReferences})$ 
2:  $g \leftarrow$  der übergebene Datenflussgraph
3: while not  $q.\text{isEmpty}()$  do
4:    $r \leftarrow q.\text{remove}()$ 
5:   if  $r.\text{label}$  is not null then
6:      $def \leftarrow r.\text{getDef}()$ 
7:     if  $def.\text{canProduce}(r.\text{label})$  then
8:        $\text{labelConnectedRefs}(def)$ 
9:     end if
10:    for  $use$  in  $r.\text{getUses}()$  do
11:      if  $use.\text{canUseAt}(r.\text{label}, \text{useIndex})$  then
12:         $\text{labelConnectedRefs}(use)$ 
13:      end if
14:    end for
15:  end if
16: end while
17: return  $g$ 

```

---

Eine wichtige Rolle während des Vererbungsprozesses spielen dabei die Methoden `boolean Labelable.canProduce(TypeLabel)` und `boolean Labelable.canUseAt(TypeLabel, int)`. Diese beiden Methoden bestimmen für eine Referenz ob ein Label auf eine Definition oder eine Benutzung vererbt werden kann.

`canProduce` sagt aus ob eine Instruktion eine optimierte Referenz definieren kann. Die Implementierungen der `canProduce` Methode sehen für die einzelnen `Labelable` Subtypen wie folgt aus:

**SingleNode** gibt immer `true` zurück

**ConditionalBranchNode** gibt immer `false` zurück

**MethodCallNode** Delegation an die Methode `canBeDefinedAsResultOf` des übergebenen Label Objekts.

Die Methode `canUseAt` betrifft dagegen nur Benutzungen von Referenzen. Die Semantik hinter der Methode ist ob diese Instruktion eine optimierte Referenz verwenden kann. Der Index stellt dabei den Parameter Index das an dem



diese Referenz in dieser Instruktion verwendet wird. Die Implementierung dieser Methode sieht für die einzelnen `Labelable` Subtypen wie folgt aus:

**SingleNode** gibt immer `false` zurück

**ConditionalBranchNode** gibt immer `true` zurück

**MethodCallNode** Wenn die Methode nicht statisch und der Index 0 ist, wird an die Methode `canBeUsedAsReceiverFor` delegiert, andernfalls an die Methode `canBeUsedAsParamFor`.

Ist für eine Instruktion die Prüfung für die entsprechende Methode positiv, wird diese Instruktion an die Hilfsfunktion `labelConnectedRefs` weitergeleitet. Diese Methode ist im folgenden dargestellt:

---

**Algorithm 3** `labelConnectedRefs`

---

```
1: node.setLabel(label)
2: for ref in node.getLabelableRefs() do
3:   if ref.getLabel() is not null then
4:     ref.setLabel(label)
5:     q.add(ref)
6:   end if
7: end for
```

---

Wobei sowohl die Queue *q*, als auch das betreffende `TypeLabel` *label* aus dem umgebenen Kontext im Algorithmus 2 auch in dieser Funktion zur Verfügung stehen.

#### 4.2.4 Umgang mit mehreren Labels

Es ist möglich für die Analyse mehrere Labels für die Analyse zu verwenden. Diese lassen sich dem `MethodAnalyzer` als `Collection` im Konstruktor zusammen mit der zu analysierenden Methode übergeben. Vor der Analyse werden zuerst alle Referenzen identifiziert von denen eine zu optimierende Methode verwendet wird. Diese Referenzen werden zu einer Menge an Referenzen vereint. Die auf diese Weise erzeugten Referenzen besitzen wie in 4.2.3 beschrieben jeweils das Label für das die Referenz erzeugt wurde.

Ein Problem ergibt sich, stellt man der Analyse mehrere Labels zur Verfügung, die allerdings Optimierungen für dieselbe Methode des selben Typs



beschreiben. Die erzeugten initial erzeugten Referenz-Objekte, welche die zu optimierende Methode verwenden, werden bei ihrer Erzeugung mit dem entsprechenden Label markiert. Dieses Implementierungsdetail führt dazu, dass die entsprechenden Referenzen mit demjenigen Label markiert werden, welches zuerst verarbeitet wird. Dieses wird immer das Label sein, welches einen geringeren Index in der Liste von Labels besitzt.

Stellt man der Methode nun zwei unterschiedliche Labels zur Verfügung, die allerdings den selben originalen Typen verwenden, ergibt sich ein anderes Problem, wenn innerhalb der analysierten Methode auf einer Referenz sowohl die eine als auch die andere Methode aufgerufen wird. Da das System jeder Referenz in einer Methode nur ein Label zuweisen kann, kann diese Referenz, welche beide Methoden der beiden TypeLabels verwendet, nur mit einem der TypeLabels markiert werden. In diesem Szenario wird wieder dasjenige Label für die Markierung verwendet, welches den niedrigeren Index innerhalb der Liste besitzt.

Nachdem der Datenflussgraph initial erzeugt wurde, wird der Algorithmus wie in 4.2.3 beschrieben ausgeführt. Da Labels nur auf Knoten vererbt werden, gilt dass der entsprechende Knoten dasjenige Label erhält, welches zuerst auf diesen Knoten vererbt wird.

### 4.2.5 Phi-Knoten

$\phi$ -Instruktionen innerhalb des Datenflussgraphen erfordern, aufgrund ihrer Eigenheiten, eine besondere Behandlung. Da sie keine Instruktionen im eigentlichen Sinne darstellen, sondern nur ein Zeiger alias für andere Referenzen darstellen, lassen sich diese Knoten auch nicht optimieren. Obwohl sie selber nicht optimiert werden können, so lässt sich doch über diese Knoten hinweg ein Label vererben. Allerdings sollte unterschieden werden zwischen denjenigen verbundenen Referenzen, für die eine Markierung tatsächlich sinnvoll und für welche eher weniger sinnvoll ist.

Daher sollten diejenigen Referenzen markiert werden, für die auch Optimierungspotenzial besteht. Wohingegen diejenigen Referenzen, für die keinerlei Optimierung notwendig ist, auch keine Markierung erhalten sollten.

Wenn das System beim Vererben der Markierung einen  $\phi$ -Knoten als Instruktion verarbeitet, wird dieser auf den  $\phi$  Stapel gelegt und alle verbundenen Referenzen für die weitere Verarbeitung vorgemerkt. Nachdem alle Referenzen verarbeitet wurden, wird dieser Stapel durchlaufen. Für jede `PhiInstructionNode` in diesem Stapel wird entschieden ob und mit welchem Label diese Instruk-



tion markiert wird. Diese Entscheidung wird über die Häufigkeit einer Label-Markierung in der Menge aller verbundenen Referenzen getroffen.

Seien  $L = \{l_1, \dots, l_n\}$  alle Labels der aktuellen Analyse, inklusive des Labels für keine Optimierung, in ihrer natürlichen Reihenfolge und die Funktion  $\text{anzahl} : L \rightarrow \mathbb{N}$  die Anzahl der Markierungen aller verbundenen Referenzen. Dann ist  $m = \max(\{\text{anzahl}(l_i) | l_i \in L\})$  die Markierung für den verarbeiteten  $\phi$ -Knoten, wenn  $m$  eindeutig ist. Ist das Maximum nicht eindeutig so wird aus der Menge der Labels mit der größten Häufigkeit, dasjenige gewählt, welches den geringsten Index besitzt.

# 5 Transformation

In diesem Kapitel sollen die Überlegungen und der Prozess der Bytecode Transformation, auf Basis der Resultate aus dem Analyse Prozess, vorgestellt werden. Es wird zunächst auf die Beschaffung der nötigen Informationen eingegangen, um im Anschluss die Regeln, nach denen Bytecode generiert oder manipuliert wird, erläutert.

Ziel der Transformation ist es zum Einen an den Grenzen der Bubble Konvertierungen zwischen den Originalen und den optimierten Typen in den Sourcecode einzufügen. Zum Anderen müssen Uses markierte Uses in entsprechende optimierte Versionen umgewandelt werden.

## 5.1 Lokale Variablen

### 5.1.1 Optimierte Variablen

Um originale lokale Variablen im Bytecode nicht mit den optimierten Versionen zu überschreiben wurde eine Abbildung geschaffen, die jeder lokalen Variable ein Tupel zuweist:  $l \rightarrow (L, l')$ , wobei  $l$  die originale lokale,  $L$  ein Label und  $l'$  die optimierte Variable für das Label  $L$  darstellt. So ist sichergestellt, dass optimierte und die entsprechende originale Referenz in zwei verschiedenen Lokalen geführt werden. Darüber hinaus ist diese Trennung wichtig, da die JVM die Plätze für lokale Variablen typisiert und daher nicht an verschiedenen Stellen im Programm verschiedene Typen in derselben lokalen Variable gespeichert werden können.

### 5.1.2 Variablen zu Value Numbers

Da der IR mit den beinhalteten value numbers eine Abstraktion des eigentlichen Bytecodes darstellt, fehlt auch jeglicher Bezug zu den eigentlichen lokalen Variablen, die von einer spezifischen value number dargestellt wird. Darüber hinaus muss für Definition einer Instruktion das **STORE** (schreibt die auf dem



Stack liegende Referenz in die gegebene lokale Variable) und für alle Uses entsprechende LOADs (liest die gegebene lokale Variable) im Bytecode lokalisiert werden. Diese Informationen sind nötig, da im Falle von Optimierungen, die für die entsprechende Instruktion erzeugt werden, die optimierten statt die originalen Referenzen geladen werden müssen.

Diese Informationen werden in der `InstructionNode` gehalten. Beim erzeugen eines solchen Objekts wird in der `InstructionNodeFactory` zum einen versucht die lokalen zu den verwendeten value numbers zu erschließen und zum anderen die auf Position im Bytecode zu schließen an der die entsprechenden Werte auf den Stack gelegt werden.

Der IR, der aus einer class-Datei erzeugt wird besitzt ein privates Feld `localMap` vom Typ `com.ibm.wala.ssa.IR.SSA2LocalMap`, welche in ihrer einzigen Implementierung (der `com.ibm.wala.ssa.SSABuilder.SSA2LocalMap`) eine private Methode mit Signatur `int[] findLocalsForValueNumber(int, int)`, welche für eine gegebenen Bytecode Index und value number alle möglichen lokalen Variablen für diese value number an der gegebenen Stelle zurückgibt. Um diese Methode trotz aller Zugriffsbeschränkungen aufzurufen wurde eine Methode in *Groovy* geschrieben um auf diese Methode zuzugreifen. Beim Suchen nach lokalen Variablen muss zwischen value numbers als Definition und als Use unterschieden werden. Das folgende Beispiel beschreibt das Problem bei Definitionen:

```
INVOKEVIRTUAL org/example/SomeType.f()I // index 1
ISTORE 5 // index 2
```

Abbildung 5.1: Lokale Variable für Definition

Die lokale Variable der Definition der `INVOKEVIRTUAL` Instruktion ist zum Zeitpunkt des Methodenaufrufs noch nicht bekannt. Erst im Index 2 wird dieser Wert der lokalen Variablen 5 zugewiesen.

Um nun die Stellen zu finden an denen Variablen auf den Stack gelegt oder vom Stack gepoppt werden wurde eine einfache Stacksimulation eingeführt, wie sie in Algorithmus 4 zu sehen ist.




---

**Algorithm 4** Simulation des Stacks
 

---

```

1:  $size \leftarrow$  Höhe des Stacks zum Zeitpunkt der Instruktion
2:  $index \leftarrow$  Index der betroffenen Referenz innerhalb des Stacks
3:  $bcIndex \leftarrow$  Bytecode Index der betroffenen Instruktion
4: while  $actBlock.getPredNodes() = 1$  do
5:    $actBlock \leftarrow callGraph.getBlockFor(bcIndex)$ 
6:   while  $bcIndex > actBlock.getFirstInstructionIndex()$  do
7:      $bcIndex \leftarrow bcIndex - 1$ 
8:      $instruction \leftarrow instructions[bcIndex]$ 
9:     if  $instruction.getPushedCount() > 0$  then
10:       $size \leftarrow size - 1$ 
11:      if  $index == size$  then
12:        return  $bcIndex$ 
13:      end if
14:    end if
15:     $size \leftarrow size + instruction.getPoppedCount()$ 
16:  end while
17: end while
18: return  $-1$  // kein Index gefunden
  
```

---

Dieser Algorithmus funktioniert für Definitionen, also das Suchen von **STORE** Instruktionen, ähnlich. Der Unterschied liegt dabei ausschließlich im Inkrementieren (statt Dekrementieren) der  $bcIndex$  Variable und dem umgekehrten Verhalten beim *push* bzw. *pop* von Werten auf bzw. vom Stack.

Diese Informationen werden in dem entsprechenden **InstructionNode** Objekt gespeichert. Zu diesem Zweck besitzt dieser Typ drei Abbildungen ( $\mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ ), die zum Zeitpunkt der Erstellung befüllt werden:

**localMap** bildet eine value number auf eine lokale Variable ab

**loadMap** bildet eine lokale Variable auf einen Bytecode Index ab, an dem diese Variable auf den Stack geladen wurde

**storeMap** bildet eine lokale Variable auf einen Bytecode Index ab, an dem **STORE** diese Referenz in die entsprechende Variable schreibt





## 5.2 Bytecode Generierung

Die Generierung von neuem und die Manipulation von bestehendem Bytecode wird von einer Instanz der Klasse `MethodTransformer` vorgenommen. Als Eingabe dient eine Instanz vom Typ `TransformationInfo`, welche auf einem `AnalysisResult` basiert und Informationen über die verwendeten lokalen Variablen zur Verfügung stellt. Diese Informationen sind zum einen die verwendeten Variablen, als auch die Abbildung von originalen Lokalen zu optimierten.

Anhand dieser Informationen werden sowohl Konvertierungen als auch Optimierungen zu dem bestehenden Bytecode hinzugefügt. Eine Konvertierung beschreibt dabei eine Transformation von einem originalen zu einem optimierten Typ bzw. von einem optimierten Typ zu einem originalen Typ. Eine Optimierung hingegen ersetzt eine Instruktion mit einer optimierten Variante. Diese Mechanismen sollen in dem folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

### 5.2.1 Informationen des `TypeLabels`

Um Optimierungen und Konvertierungen auf bestimmten Typen umzusetzen werden verschiedene Informationen benötigt. Diese sind:

- Wie der optimierte Type heißt
- Wie ein optimierter Typ aus einem Originalen erzeugt wird
- Wie die Signatur einer optimierten Variante einer Methode aussieht

Diese Informationen werden über die `TypeLabel` Definitionen dem System zur Verfügung gestellt. Zu diesem Zweck enthält das `TypeLabel` Interface, zusätzlich zu denen in 4.1.2 vorgestellten, die folgenden Methoden:

`getOptimizedType()` Gibt ein `Class` Objekt des optimierten Typs zurück

`getOriginalType()` Gibt ein `Class` Objekt des originalen Typs zurück

`getCreationMethodName()` Definiert den Namen der statischen Methode innerhalb des optimierten Typs, die ein neues Objekt des optimierten Typs erzeugt

`getToOriginalMethodName()` Definiert den Namen der Methode, die auf einem Objekt des optimierten Typen aufgerufen werden kann um eine äquivalente Instanz des originalen Typen zu erzeugen



`getReturnType(MethodReference)` gibt den Rückgabe Typ der gegebenen Methode im optimierten Typ zurück. Der Typ wird als **String** Repräsentation in der internen JVM Form zurück gegeben. (Beispiel: `Ljava/lang/String;`)

`getParams(MethodReference)` gibt die Parameter der gegebenen Methode im optimierten Typ zurück. Die Parameter werden als **String** konkatenierte Liste umgeben mit Klammern zurück gegeben. Die Typen der Parameter werden als interne JVM Form angegeben (Beispiel: `(II)`).

### 5.2.2 Konvertierung

Konvertierungen dienen der Kompatibilität zwischen Code innerhalb und außerhalb der "Bubble". Dabei betreffen diese ausschließlich Referenzen im Datenflussgraphen. Formal lässt sich dieser Vorgang wie folgt beschreiben. Die Funktion  $label : E \rightarrow L$ , wobei  $L$  die Menge aller in dem System vorhandenen Label ist und  $E = R \cup I$ , weist jedem Knoten eine Label Markierung zu. Ein Knoten ohne Markierung bekommt das Label `KEIN_LABEL` zugewiesen. Bei der Entscheidung ob zwischen einer Instruktion  $i$  und einer Referenz  $r$  eine Konvertierung nötig ist sind zwei Entscheidungen zu treffen:

1. Handelt es sich bei der Instruktion um eine *labelable* Instruktion
2. Ist es eine Def ( $i \rightarrow r$ ) oder eine Use ( $r \rightarrow i$ ) Kante innerhalb des Graphen

Ist die betrachtete Instruktion ohnehin nicht in der Lage mit einem Label markiert zu werden, so muss nur die Referenz betrachtet werden und wenn  $label(r) \neq KEIN\_LABEL$ , dann muss eine Konvertierung an dieser Kante eingeführt werden.

Handelt es sich bei der Instruktion allerdings um eine *labelable* Instruktion, so trifft die Methode `needsConversationTo(Label)` (s. Algorithmus 5) des Objekts auf den die Kante zeigt die Entscheidung ob eine Konvertierung nötig ist.




---

**Algorithm 5** needsConversationTo(Label)
 

---

```

1: if isSameLabel(label) then
2:   return false
3: end if
4: if label  $\neq$  null then
5:   return not label.compatibleWith(this.label)
6: else
7:   return not this.label.compatibleWith(null)
8: end if
  
```

---

Konvertierungen werden von Instanzen vom Typ **Converter** durchgeführt. Dabei wird zwischen Definitions- und Use-Konvertierungen unterschieden für jeweils eigene Implementierungen der **Converter** Schnittstelle existieren. Der **Converter** nutzt dabei das *Visitor* Muster, welches für die einzelnen Instruktionsknoten implementiert wurde. Die jeweiligen *visit*-Methoden erstellen auf der zur Verfügung gestellten **ConversionPatchFactory** die Shrike Patch Objekte um die Bytecode Manipulationen durchzuführen.

Die **ConversionPatchFactory** dient der Erstellung von Shrike Patch Objekten und dem Hinzufügen dieser in den Bytecode der aktuell verarbeiteten Methode. Zusätzlich muss bei der Instanziierung eines Objektes angegeben für welche Konvertierung diese Factory verwendet wird. Zu diesem Zweck besitzt der Typ zwei Attribute vom Typ **TypeLabel**:

**from** Der Typ den ein Objekt vor der Konvertierung besitzt

**to** Der Typ in den ein Objekt konvertiert werden soll

Die Methoden, die zum Erzeugen eines Patches zur Verfügung stehen, sind die Folgenden:

**createConversationAtStart(local)** Erstellt eine Konvertierung am Anfang der Methode für die gegebene lokale Variable

**createConversationAfter(local, bcIndex)** Erstellt eine Konvertierung nach dem gegebenen Bytecode Index für die gegebene lokale Variable. Die Variablen Angabe kann auch weggelassen werden, dann wird der konvertierte Wert nicht in die entsprechende optimierte Variable gespeichert.



`createConversationBefore(local, bcIndex)` Erstellt eine Konvertierung vor dem gegebenen Bytecode Index für die gegebene lokale Variable. Die Variablen Angabe kann auch weggelassen werden, dann wird der konvertierte Wert nicht in die entsprechende optimierte Variable gespeichert.

Soll eine Konvertierung für eine Definition ohne eine gegebene lokale Variable durchgeführt werden, so wird ausschließlich Methodenaufruf zur Konvertierung zum bzw. vom optimierten Typ aufgerufen. Wird eine lokale Variable angegeben so wird zunächst die Referenz auf dem Stack mittels der DUP Anweisung verdoppelt. Nach dem Aufruf der Konvertierung Methode wird die optimierte Referenz in die entsprechende optimierte Variable gespeichert. Konvertierungen die am Anfang der Methode durchgeführt werden (was ausschließlich für Konvertierungen die Übergabeparameter betreffen) verhalten sich genauso wie Konvertierungen denen eine Variable mitgegeben wurde, mit dem Unterschied, dass anstatt der DUP Anweisung ein LOAD für die entsprechende Variable verwendet wird um die Referenz für den Methodenaufruf zu verwenden.

Wird eine Konvertierung für einen Use benötigt, muss die originale Referenz bevor sie verwendet wird, wieder in den originalen Type umgewandelt werden. Daher wird an der Stelle nachdem die betroffene Referenz auf den Stack gelegt wurde der Methodenaufruf zum Umwandeln in den originalen Typ eingefügt. Ist die lokale Variable allerdings bekannt, wird die LOAD Instruktion, die die originale Variable lädt ersetzt durch ein Laden der optimierten Variable um diese danach in einen originalen Typ zu konvertieren.

### 5.2.3 Optimierung

Für jede *labelable* Node wird, wenn sie mit einem Label markiert ist, eine Optimierung durchgeführt. Dafür sind 3 Schritte notwendig, diese werden im Folgenden beschrieben.

Primäres Ziel der Optimierungstransformation ist es, die originalen Methodenaufrufe durch die Optimierten zu ersetzen. Wie in 4.1.3 beschrieben, wird für eine Methoden Optimierung immer derselbe Name angenommen. In jedem Fall wird zunächst der Typ des Empfänger Objekts auf den des optimierten Typ gesetzt. Ist für die Parameter Liste im optimierten Typ keine Alternative angegeben, wird diejenige der originalen Methode verwendet. Der Rückgabe Typ wird ebenfalls durch das *Typelabel* bestimmt. So wird das Ziel der INVOKE Instruktion auf den optimierten Typ gesetzt.



Um die Methode auf der optimierten Referenz aufrufen zu können, muss diese, statt der originalen Referenz, zum Zeitpunkt des Methoden Aufrufs auf dem Stack vorhanden sein. Darüber hinaus müssen, wenn es sich bei den Parametern um gelabelte Referenzen handelt, auch die optimierten Parameter Referenzen, statt der originalen, auf dem Stack liegen. Daher müssen für optimierte Referenzen die **LOAD** Anweisungen, die die Referenzen für den Methodenaufruf auf den Stack legen, die optimierte statt der originalen Variablen laden.

Ist der Rückgabewert eines optimierten Methodenaufrufs ebenfalls markiert und wird mittels einer **STORE** Anweisung in eine Variable gespeichert, so muss diese Anweisung die optimierte Referenz in die entsprechende optimierte Variable speichern. Daher wird die entsprechende Anweisung (wenn die Methode als *producing* definiert ist) ersetzt durch eine **STORE** Anweisung, die die zurückgegebene Referenz in die entsprechende optimierte Variable speichert.

## 5.3 Schwierigkeiten

### 5.3.1 Innere Archive (JARs)

Um Klassen eines gegebenen Programms zu lesen und zu verarbeiten bietet WALAs Shrike die Klasse `OfflineInstrumenter` an. Diese Klasse erwartet eine JAR Datei und ermöglicht daraufhin eine Iteration über alle Klassen innerhalb dieses Archivs.

Befinden sich nun Klassen dieser Anwendung verpackt in einem Archiv innerhalb dieses Archivs, ist es dem `OfflineInstrumenter` nicht möglich diese Klassen zu finden und damit auch zu verarbeiten. Daher ist das System nicht in der Lage Klassen die nicht innerhalb des zu verarbeitenden Java-Archivs zu finden sind zu verarbeiten.

### 5.3.2 Typisierung von generiertem Bytecode

Seit Java 6 können in *class* Dateien sogenannte *Stack Map Frames* verwendet werden, welche die Typisierung des Bytecodes dieser Klasse verifizieren. Diese **Stack Map Frames** dienen der Erfassung welche lokale Variable oder Stack Position zu welcher Stelle des Programm Zählers welchen Typ enthält.

Ab der Version 7 der JVM sind diese Frames nicht mehr optional, sondern zwingend. Der von Shrike generierte Bytecode verpasst es allerdings diese Stack



---

Map Frames für den neu generierten Code anzupassen. Dadurch lässt sich das generierte Programm nur mit dem JVM Flag *-noverify* starten, welches die Typ Verifikation unterdrückt.

## 6 Auswertung

In diesem Kapitel soll das entwickelte System einer Auswertung unterzogen werden. Im ersten Abschnitt soll zunächst das verwendete Werkzeug *JMH* sowie die allgemeine Durchführung der Tests beschrieben werden. Im zweiten Abschnitt folgen dann die einzelnen Tests sowie deren Auswertungen.

Die Auswertung erfolgt von Laufzeit Benchmarks. Dabei wird die Laufzeit von optimierten Methoden vor und nach der Optimierung durch das System gemessen und diese Ergebnisse miteinander verglichen. Darüber hinaus werden diese Ergebnisse anhand der Ausgabe des Systems begründet.

### 6.1 Voraussetzungen

#### 6.1.1 Java Microbenchmarking Harness

Microbenchmarks sind auf der JVM schwierig zu Erstellen. Das liegt vor allem an der *Just-In-Time* Kompilierung von Java Bytecode. Die JVM stellt während der Laufzeit eines Programms fest, welche Abschnitte des Bytecodes häufig ausgeführt werden und kompiliert diese Teile dynamisch zu Maschinen Code. Diese Kompilierung kann auch wieder rückgängig gemacht werden, wenn der übersetzte Abschnitt nicht mehr so häufig oder in einem anderen Kontext verwendet wird. Zusätzlich erschwert die nicht deterministische Garbage Collection, während der Laufzeit, konsistente und aussagekräftige Ergebnisse.

Um diesen Problemen zu begegnen wurde das Projekt JMH verwendet. Das *Java Benchmarking Harness* (kurz JMH) ist ein Projekt innerhalb des Open-JDKs. Es dient der Unterstützung der Erstellung und Ausführung von Java Microbenchmarks. Das Framework lässt sich in den Maven Build integrieren und bietet eine annotationsbasierte Konfiguration für die in Java geschriebenen Benchmarks. Zu messende Benchmarks werden als Methoden in einer oder mehreren Java Klassen geschrieben, die eben jenen Code ausführen dessen Ausführungszeit gemessen werden soll.



### 6.1.2 Test Durchführungen

Alle Messungen wurden mit dem im vorherigen Abschnitt vorgestellten JMH durchgeführt. Gemessen werden soll die Ausführungszeit einer Methodenausführung im originalen, sowie im Zustand nach der Anwendung des Systems auf diese Methode. Da es nicht möglich ist, dass dieselbe Klasse, welche die optimierte Methode bereitstellt, zweimal (die originale sowie die optimierte Variante) im Klassenpfad aufzuführen, müssen die Messungen jeweils für den originalen als auch den optimierten Methoden Aufruf separat durchgeführt werden. Diese Messungen fanden auf einem von der Universität bereit gestellten Rechner statt, der für Benchmarks zur Verfügung stand.

Für alle Tests wurden in einem Thread 10 Durchläufen durchgeführt. Ein Durchlauf setzt sich dabei aus Aufwärm- sowie einer Messphasen von jeweils 20 Iterationen zusammen. Daher existieren für jede Messung 200 Ergebnisse. Eine Iteration misst die Anzahl von Methoden Aufrufen in einer Sekunde und rechnet diesen Wert in einen Zeitwert um.

Als Test-Programme wurde zum eine eigens zum Testen geschriebene Methode verwendet, sowie Xalan, ein freier XSLT-Prozessor der Apache Software Foundation. Beide Programme wurden als Eingabe für das in dieser Arbeit beschriebene System verwendet und die Ausgabe für diese Auswertung verwendet.

Die Benchmarks befinden sich in dem Unterprojekt *jmh-benchmarks* welches als Maven Eigenschaft den Pfad zum Xalan bzw. ExampleParser jar erwartet und diese Bibliothek in den Klassenpfad aufnimmt. So wird entsprechend der Parameters ein Benchmark entweder für die normale oder für die optimierte Variante des Java Archivs gebaut.

Für die automatische Auswertung der Ergebnisse wurde ein Skript geschrieben, dass die folgenden Schritte jeweils für die normale, als auch für die optimierte Variante ausführt:

1. stößt die Maven Bauvorgänge für die beiden JMH-Benchmark Projekte an
2. führt die resultierenden Benchmarks aus
3. übergibt die Ausgabedatei einem R Skript um die Boxplots zu erzeugen.

Alle Benchmarks wurden mittels einer Oracle JVM in der Version 7 ausgeführt.





## 6.2 Benchmarks

In diesem Abschnitt sollen sowohl die Ergebnisse der Messungen beschrieben, als auch anhand der Ergebnisse des Systems erläutert werden.

### 6.2.1 Example Parser

Der *Example Parser* ist ein eigens für die Auswertung geschriebene Methode. Diese soll die Möglichkeit darstellen, dass Optimierungen mit dem in hier beschriebenen System möglich sind. Der Code stellt sich dabei wie folgt dar:

```
public String parse(String line) {
    StringBuilder result = new StringBuilder();

    for (int i = 0; i + 1 < line.length(); i+=2) {
        result.append(line.substring(i, i + 1));
    }

    return result.toString();
}
```

Abbildung 6.1: Example Parser

Wie dem Code zu entnehmen ist, wird hier die Methode `substring()` in Verbindung mit dem `StringBuilder` verwendet. Dieser Methode ist daher optimal für die beiden verwendeten TypeLabels, wie sie in 3 beschrieben sind.

Aufgerufen wurde diese Methode in einem Benchmark mit einem 112 langen String. Die Boxplots in Abbildung 6.2 zeigen die Dauer der Ausführung vor und nach der Optimierung durch das System.

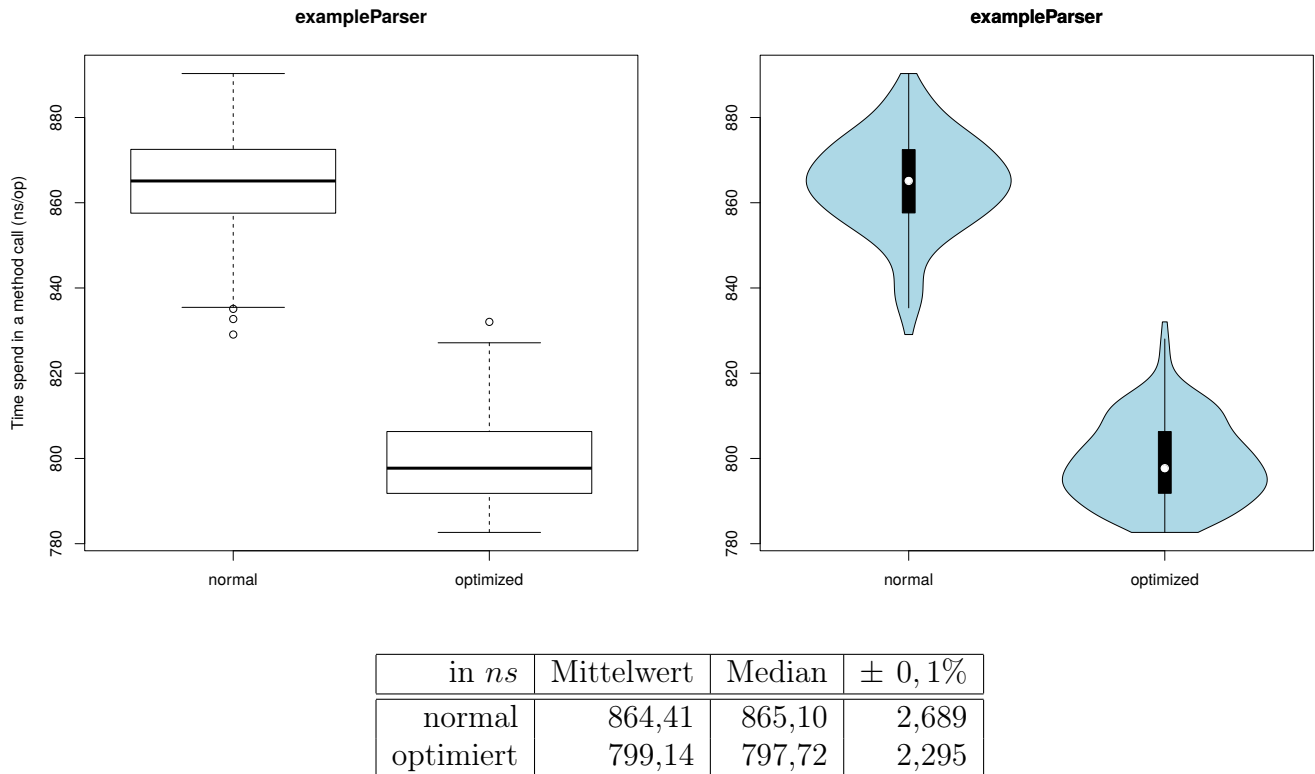


Abbildung 6.2: Ergebnis des Example Parser Benchmark

### Auswertung

Aufgrund der optimalen Abstimmung der beiden optimierten Typen `SubstringString` und `StringBuilder` aufeinander, können die beiden Referenzen auch ohne irgendwelche Konvertierungen miteinander innerhalb der Methode koexistieren. Dies führt dazu, dass erstellte `SubstringString` Referenzen direkt dem optimierten `StringBuilder` übergeben werden können.

Dieser Benchmark soll zeigen, dass eine Optimierung, wenn auch nur für eine eigens dafür entwickelte Methode möglich ist. In den folgenden Benchmarks werden realitätsnahe Methoden für den Test des System verwendet.



### 6.2.2 Xalan

Zur Auswertung des Systems wurde der freie XSLT-Prozessor XALAN verwendet. Diese lag in Form eines Java Archivs vor, dass aus dem Quellcode der Version 2.7.2 gebaut wurde.

Um geeignete Methoden für die Benchmarks zu finden, wurden die Anzahl der `substring(..)` Aufrufe pro `*.java` Datei gezählt und diese Kandidaten nach absteigender Anzahl sortiert. In diesen Kandidaten wurden diejenigen 4 Methoden als Tests verwendet, welche die meisten Aufrufe besaßen und auch ohne größeren Aufwand (öffentliche Methoden in wenig komplexen Objekten oder statisch) aus der Benchmark Methode aufrufbar waren. So viel die Wahl auf die folgenden Methoden:

`org.apache.xalan.xsltc.runtime.BasisLibrary.checkAttribQName(String)`  
Prüft ob der gegebene XML-Attribut Name syntaktisch valide ist.

`org.apache.xml.utils.URI.new(java.lang.String)` Erzeugt ein neues URI Objekt.

`org.apache.xpath.objects.XNumber.str()` Erstellt eine String Repräsentation des XNumber Objekts.

`javax.xml.xpath.XPath.compile(java.lang.String)` Kompiliert den gegebenen XPath Ausdruck in ein auswertbares XPath-Objekt.

Die eigentlich identifizierte Methode ist `tokenize` des verwendeten Lexers. Da dieser aber die Sichtbarkeit `package-private` besitzt wurde der kompletter Use Case, in dem dieser Lexer verwendet wird, für die Auswertung benutzt.

Als Eingaben dienten Werte, die der im Projekt enthaltenen Beispiel XML Dateien entnommen wurden und daher einen möglichst realen Ausführungskontext darstellen.

#### **checkAttribQName**

Diese Funktion prüft die syntaktische Validität eines XSLT-Attribut Namens. Dabei wird der Name anhand der ersten beiden ":" getrennt, was mit Hilfe der `substring` Methode geschieht.

Aufgerufen wurde diese Methode mit dem Wert `"xmlns:redirect"`. Die folgende Abbildung zeigt die Ergebnisse der Messung.

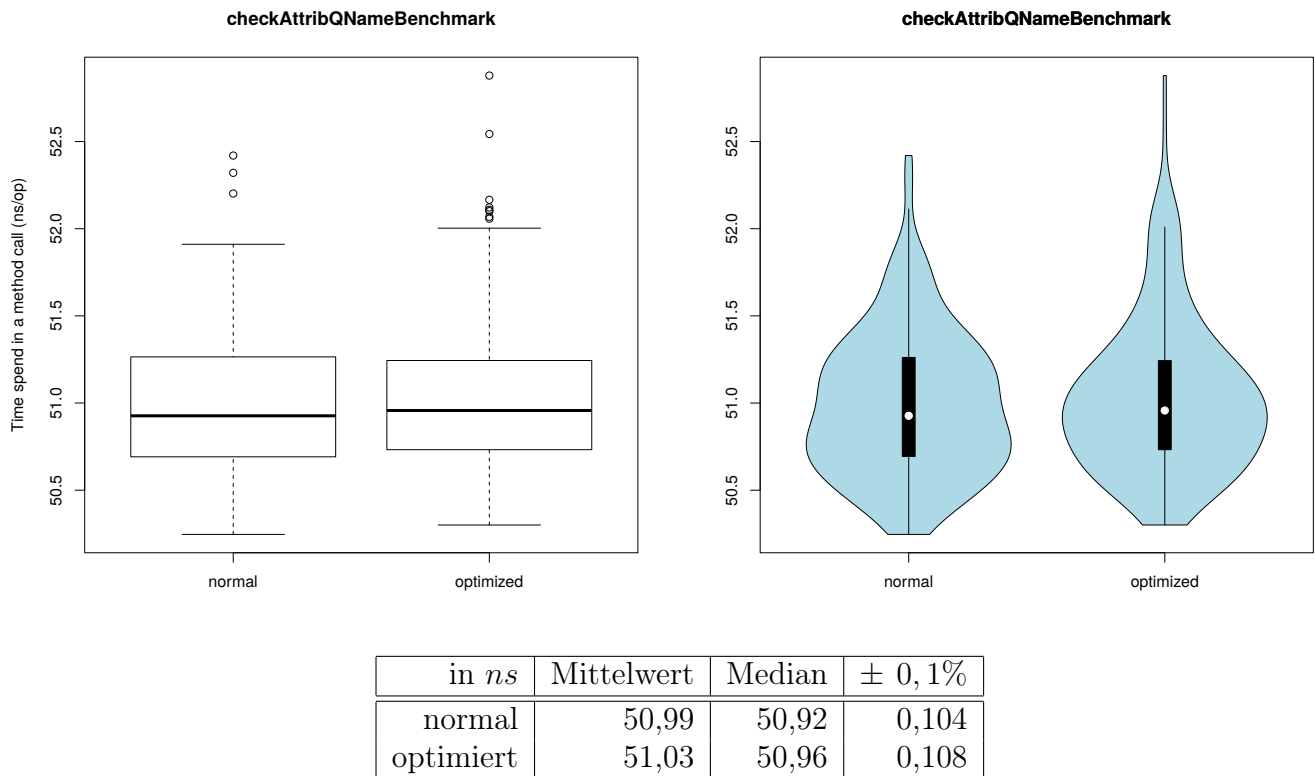


Abbildung 6.3: Ergebnis des checkAttribQName Benchmark

### Auswertung

Die optimierte Referenz wird als Parameter an die Methode übergeben. Also beginnt mit diesem Parameter Knoten die Bubble für diese Referenz und sie wird direkt zu Beginn in eine optimierten **SubstringString** konvertiert. Allerdings werden in den folgenden beiden Zeilen die auf dieser Referenz die Positionen der Doppelpunkte ermittelt. Diese Methoden werden aber nicht von dem optimierten Typ angeboten, was dazu führt, dass an beiden dieser Stellen eine Rückkonvertierung zum originalen Typ stattfinden muss.

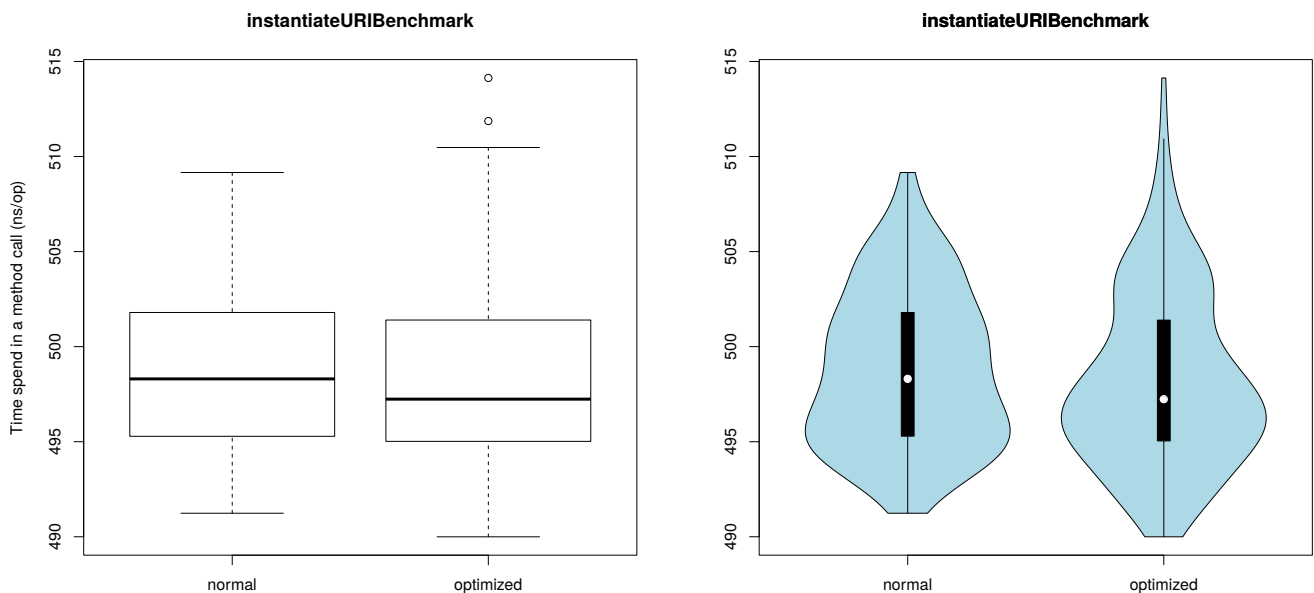
Dieser zusätzliche Aufwand sorgt dafür, dass die Optimierung des **substring** Aufrufs durch die Konvertierungen wieder ausgeglichen wird.



### instantiateURI

Bei dieser Methode handelt es sich um den Konstruktor der Klasse `org.apache.xml.utils.URI`. Dieser erwartet einen String, der die zu repräsentierende URI enthält. Der Konstruktor teilt die übergebene Zeichenkette in semantische Bausteine, wie das Protokoll, die Domain oder den Pfad. Zu diesem wird die Methode `substring` wiederholt auf den übergebenen String angewendet.

Die Messung wurde mit dem Wert `"http://xml.apache.org/xalan-j/apidocs/javax/xml/transform/package-summary.html"` durchgeführt. Die folgende Abbildung präsentiert die Ergebnisse dieses Benchmarks.



in <i>ns</i>	Mittelwert	Median	$\pm 0,1\%$
normal	498,79	498,30	0,965
optimiert	498,22	497,24	1.086

Abbildung 6.4: Ergebnis des instantiateURI Benchmarks



## Auswertung

Bei der Optimierung dieser Methode stellen sich einige Probleme dar. Die zur Optimierung verwendete Referenz wird durch einen `trim` Aufruf auf der übergebenen URI definiert. Diese Referenz wird innerhalb der Methode häufig benutzt und mit jedem `substring` Aufruf auf diese Referenz wird eben diese wieder überschrieben. Zu den sonstigen aufgerufenen Methoden auf diesen Referenzen gehören:

- `startsWith`
- `length`
- `charAt`

Wobei `length` und `charAt` auch vom Typ `SubstringString` implementiert werden. Darüber hinaus werden diese `SubstringString` Referenzen an die folgenden privaten Methoden übergeben.

- `initializeScheme(String)`
- `initializeAuthority(String)`
- `initializePath(String)`

In diesen Methoden werden wiederum unter anderem `substring` Aufrufe auf den übergebenen String ausgeführt.

All diese anderweitigen Verwendungen der optimierten Referenz sorgen dafür, dass die Bubble an diesen Stellen endet und eine Konvertierung zum originalen Typ `java.lang.String` stattfindet. Diese Konvertierungen haben allerdings negative Auswirkungen auf die Laufzeit, wodurch die Optimierungseffekte wieder aufgehoben werden.

## xNumberToString

Eine `org.apache.xpath.objects.XNumber` repräsentiert eine Zahl innerhalb eines XPath Ausdrucks. Die Methode `str():java.lang.String` wandelt die intern Verwaltete Dezimal Zahl in eine String Repräsentation dieses Wertes um. Dabei wird das Ergebnis des Ausdrucks `Double.toString(val)`, wobei `val` der aktuelle Wert des Objektes ist, einem String zu gewiesen. Dieser String wird daraufhin in ein alternatives Dezimal Zahlen Format umgewandelt:

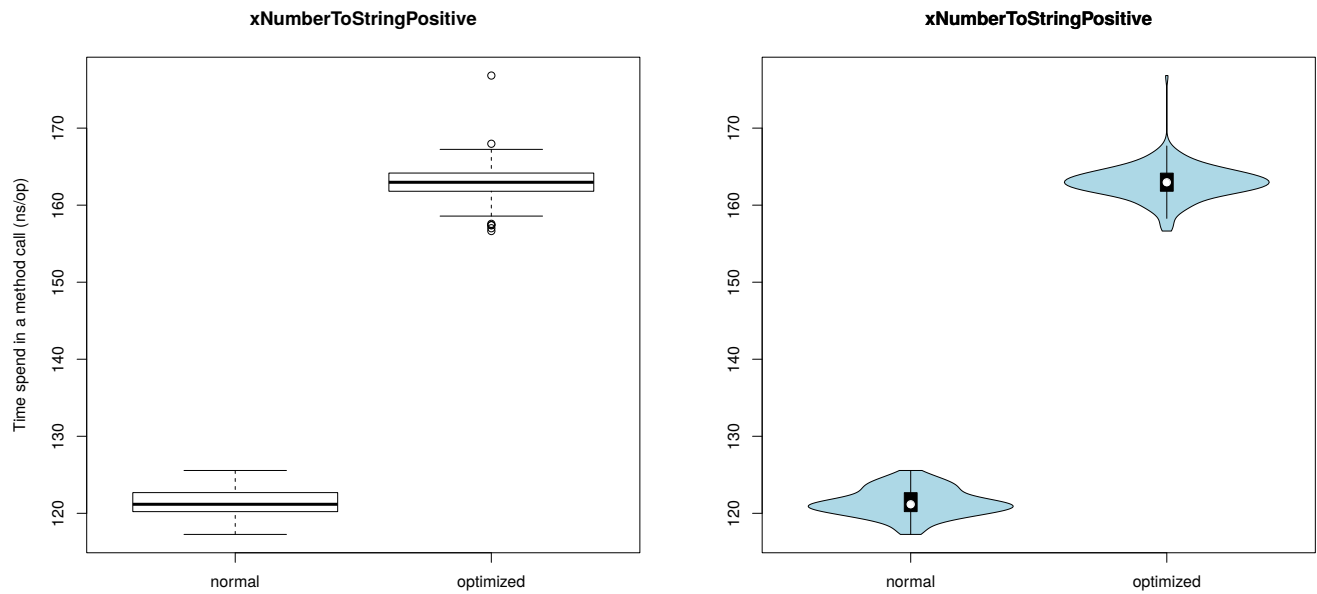


- Es werden 'NaN' bzw. 'Infinity' Strings erzeugt
- Bei Ganzzahlen wird das folgende '.0' abgeschnitten
- Für Zahlen mit Exponenten werden diese ausgeschrieben

Um die verschiedenen Teile der Verarbeitung innerhalb der Methode mit zu berücksichtigen wurde der Test mit verschiedenen Eingabe durchgeführt:

- Einer positiven Dezimalzahl (12,34)
- Einer negativen Dezimalzahl (-12,34)
- Einer positiven Ganzzahl (12)
- Einer Zahl mit negativem Exponent (0,12e-5)

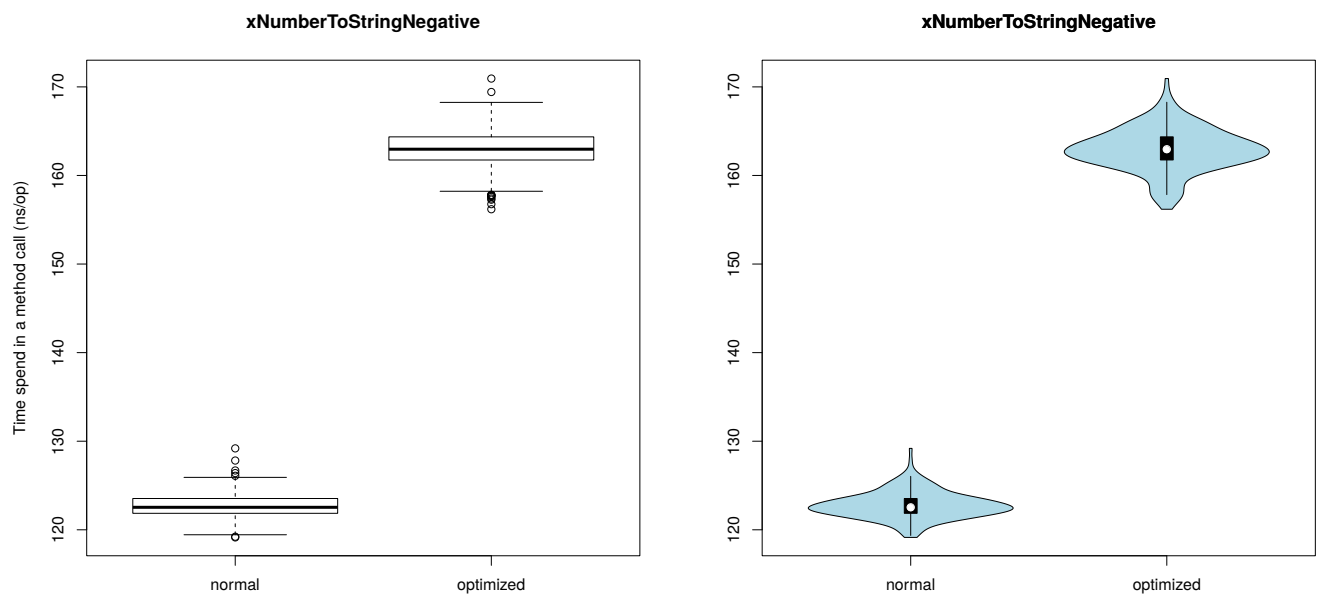
Im folgenden sind die einzelnen Testergebnisse aufgeführt. Eine Auswertung dieser Ergebnisse folgt auf diese Darstellungen.



in <i>ns</i>	Mittelwert	Median	$\pm 0,1\%$
normal	121,38	121,17	0,425
optimiert	162,93	162,97	0,518

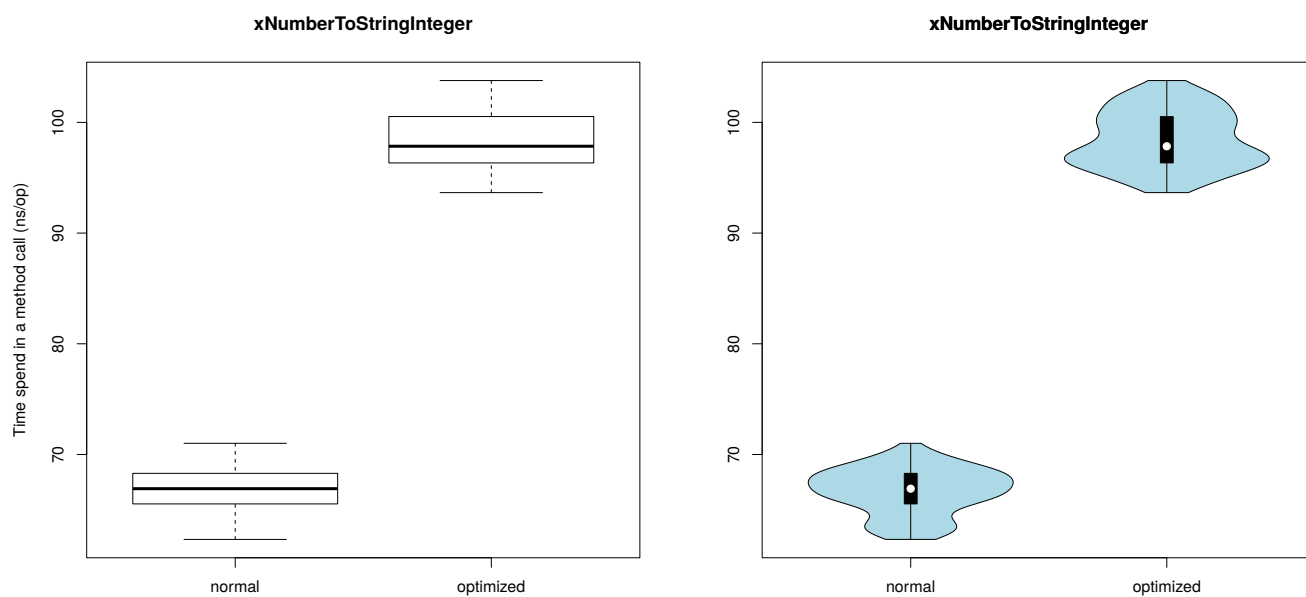
Abbildung 6.5: Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (positive Dezimalzahl)





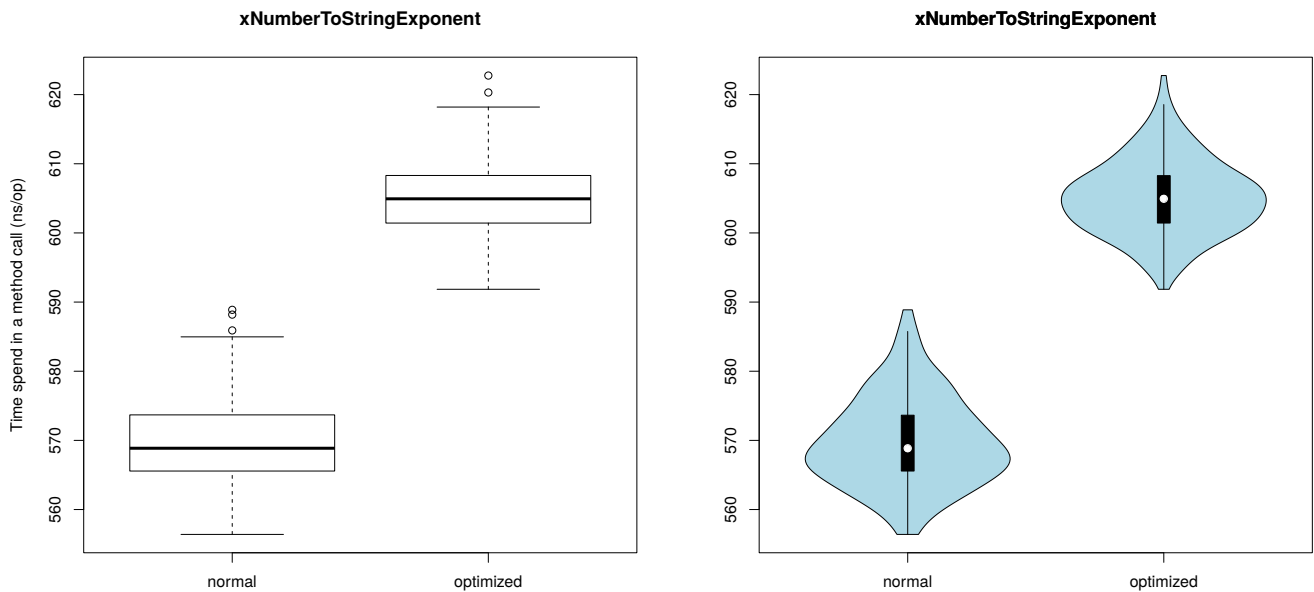
in <i>ns</i>	Mittelwert	Median	$\pm 0,1\%$
normal	122,78	122,54	0,359
optimiert	162,91	162,97	0,572

Abbildung 6.6: Ergebnis des xNumberToString Benchmarks (negative Dezimalzahl)



in <i>ns</i>	Mittelwert	Median	$\pm 0,1\%$
normal	66,69	66,91	0,488
optimiert	98,42	97,84	0,605

Abbildung 6.7: Ergebnis des `xNumberToString` Benchmarks (positive Ganzzahl)



in <i>ns</i>	Mittelwert	Median	$\pm 0,1\%$
normal	569,85	568,86	1.530
optimiert	605,16	604,93	1,291

Abbildung 6.8: Ergebnis des `xNumberToString` Benchmarks (positive Dezimalzahl)

### Auswertung

Die Implementierung dieser Methode erzeugt innerhalb der Methode eine String Repräsentation des im Objekt verwalteten Gleitkommazahl. Dieser Wert ist vom Typ `double`. Der String wird über einen Aufruf von `Double.toString(double)` erzeugt, dem der `double` Wert der Klassen Eigenschaft übergeben wird. Diese String Referenz wird innerhalb der Methode formatiert. Dies geschieht über Kontrollflüsse die abhängig von der ursprünglichen Zahl sind. Die vier Vorgestellten Benchmarks decken die verschiedenen Verarbeitungsschritte ab. Die auf der Referenz in jedem Fall aufgerufenen Methoden (abgesehen von `substring`) sind:

- `length()`



- `charAt(int)`
- `indexOf(char)`

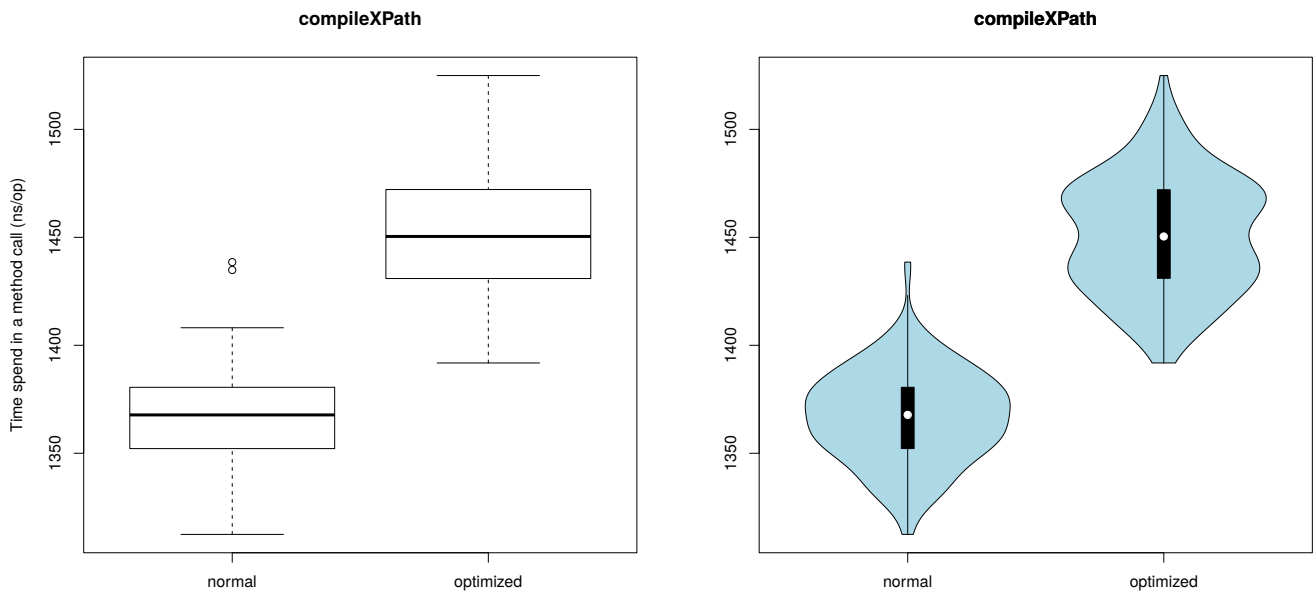
Wobei die Methode `indexOf(char)` nicht von dem optimierten Typen unterstützt wird. Da dieser Aufruf allerdings für jede Zahl  $\neq 0$  aufgerufen wird (es wird nach dem 'e' in Exponenten gesucht), muss vor diesem Aufruf jeder `SubstringString` in einen `String` konvertiert werden.

Diese Konvertierungen für jeden Aufruf, zusätzlich zu denen hin zu einem `SubstringString` und zurück zu einem `String` vor dem Zurückgeben des Strings aus der Methode, führen zu einer beträchtlichen Anstieg der Laufzeit in der optimierten Variante dieser Methode.

### **compileXPath**

Ein XPath Ausdruck (XML Path Language) stellt eine Abfrage gegen einen XML-Baum dar. Die Sprache ist ein Standard des W3C und stellt einen wichtigen Baustein bei der XML Transformation dar. Xalan bietet eine API die es ermöglicht XPath Abfragen auf DOM-Bäume auszuführen. Teil dieser API ist es einen gegebenen String in eine ausführbare Objektstruktur umzuwandeln. Zu diesem Zweck wird der gegebene String zunächst von einem Lexer in einzelne Token geteilt, die verwendet werden um den abstrakten Syntax Baum des Ausdrucks zu erstellen.

Die Methode `org.apache.xpath.compiler.Lexer.tokenize(String, Vector)` führt das Zerteilen des Eingabe Strings in einzelne Token durch. Dieser Benchmark kompiliert den XPath Ausdruck `'ex:addFunc(2, 3) + $xyz'` indem die Methode `javax.xml.xpath.XPath.compile(String)` mit dem entsprechenden String aufgerufen wird. Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse der Messung.



in <i>ns</i>	Mittelwert	Median	$\pm 0,1\%$
normal	1366,91	1367,75	5,053
optimiert	1451,09	1450,40	6,346

Abbildung 6.9: Ergebnis des `xNumberToString` Benchmarks (positive Dezimalzahl)

### Auswertung

Diese Methode ist, im Gegensatz zu den bisher betrachteten optimierten Methoden, deutlich komplexer. Die einzelnen im String gefunden Token werden einer sogenannte Tokenqueue hinzugefügt. Dies geschieht über die private Methode `addToTokenQueue`. Dabei werden bei jedem dieser Aufrufe das Ergebnis eines `substring` Aufrufs übergeben.

Eine weitere Wichtige Methode während des Erstellens der Token ist die Methode `mapNSTokens` der der Eingabe String übergeben wird. Innerhalb dieser Methode werden `substring` Aufrufe auf dem übergebenen String ausgeführt.

Abgesehen von der Übergabe als Parameter werden auf den String nur unterstützte Methoden ausgeführt:



- `length()`
- `charAt(int)`

Daher führen allein die Verwendungen als Übergabe Parameter zu Konvertierungen zurück originalen String Typ. Da diese Konvertierungen aber innerhalb einer Schleife geschieht, die über alle `chars` des String läuft führen diese Konvertierungen zu einer erheblichen Zunahme der Laufzeit.

## 7 Fazit

Dieses Kapitel fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen, zieht ein Fazit über die Ergebnisse der Auswertungen und gibt Ausblicke auf zukünftige Arbeit an dem System um die hier gezeigten Ergebnisse zu verbessern.

In dieser Arbeit wurde ein System erstellt, das anhand statische Codeanalyse und automatischer Transformation, Optimierungen anwenden kann. Es wurde die Analyse des Systems vorgestellt und das Konzept des *TypeLabels* erläutert. Das Ersetzen der originalen Datentypen durch optimierte Alternativen, sowie das hinzufügen von Code zum Konvertieren der beiden Datentypen untereinander, wurde betrachtet und beschrieben. Schließlich wurde das System, sowie die entwickelten String Optimierungen, anhand eines einfachen Beispiels und eines komplexen Software Systems (der *Xalan* Bibliothek) getestet und die Laufzeit der transformierten Programme gemessen.

Die Auswertung zeigt, dass die Optimierung mittels automatischer Transformation von Programmen nicht einfach ist. Zwar lässt sich mittels des *ExampleParser* Benchmarks zeigen, dass generell Optimierungen mit dem System möglich sind, doch ergeben sich Problematiken bei der Anwendung auf komplexere Programme, wie die *Xalan* Benchmarks belegen. Es zeigt sich, dass in komplexen Programmen die Kontexte in denen Referenzen verwendet werden einen starken Einfluss auf die Möglichkeiten des Systems nehmen, Optimierungen vorzunehmen.

Wie in den Benchmarks *instantiateURI* und *compileXPath* zu sehen ergeben sich Schwierigkeiten bei der Übergabe zu optimierende Referenzen als Parameter an Methoden zu übergeben. Da die hier erarbeitete Lösung ausschließlich intraprozeduraler Natur ist, führen derartige Benutzungen von Referenzen zwangsläufig zu zusätzlichen Konvertierungen. Der *compileXPath* Test zeigt darüber hinaus, dass zu optimierende Referenzen innerhalb des eingebetteten Methodenaufrufs ebenfalls von der Optimierung betroffen sind. Eine Implementierung eines Interprozeduralen Expansion einer *Bubble* birgt daher zusätzliches Potenzial Optimierungen effizienter zu gestalten.

Das in dieser Arbeit erstellte System bietet durch die *TypeLabel* Schnittstelle, die Möglichkeit verschiedenste Optimierungen zu verschiedensten Typen



---

zu verarbeiten. Daher ist das System nicht auf die Optimierung von Strings beschränkt. Da diese Arbeit sich ausschließlich auf die Betrachtung von Optimierungen für die String API beschränkt, wurden auch keine anderen Optionen in Erwägung gezogen. Dabei schließt das System die Anwendung alternativer Optimierungen nicht aus. Im Gegenteil ist das System anwendbar auf alle möglichen Typen des Java Typ Systems.