

# Verbesserte Optimierung von Integer-Konvertierungen und VHDL-Codeerzeugung mittels Bitbreitenanalyse

Bachelorarbeit von

**Marcel Hollerbach**

an der Fakultät für Informatik



<b>Erstgutachter:</b>	Prof. Dr.-Ing. Gregor Snelting
<b>Zweitgutachter:</b>	Prof. Dr. rer. nat. Bernhard Beckert
<b>Betreuende Mitarbeiter:</b>	M.Sc. Andreas Fried



# Zusammenfassung

Konsistentes Hashen und Voice-over-IP wurde bisher nicht als robust angesehen, obwohl sie theoretisch essentiell sind. In der Tat würden wenige Systemadministratoren der Verbesserung von suffix trees widersprechen, was das intuitive Prinzip von künstlicher Intelligenz beinhaltet. Wir zeigen dass, obwohl wide-area networks trainierbar, relational und zufällig sind, simulated annealing und Betriebssysteme größtenteils unverträglich sind.

Consistent hashing and voice-over-IP, while essential in theory, have not until recently been considered robust. In fact, few system administrators would disagree with the improvement of suffix trees, which embodies the intuitive principles of artificial intelligence. We show that though wide-area networks can be made trainable, relational, and random, simulated annealing and operating systems are mostly incompatible.

Ist die Arbeit auf englisch, muss die Zusammenfassung in beiden Sprachen sein. Ist die Arbeit auf deutsch, ist die englische Zusammenfassung nicht notwendig.

Das Titelbild ist von [http://www.flickr.com/photos/x-ray\\_delta\\_one/4665389330/](http://www.flickr.com/photos/x-ray_delta_one/4665389330/) und muss durch ein zum Thema passendes Motiv ausgetauscht werden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Introduction</b>	<b>7</b>
<b>2. Basics</b>	<b>9</b>
2.1. cparser / libfirm . . . . .	9
2.1.1. Number representation . . . . .	9
2.2. Lattice . . . . .	9
2.3. Fixed point iteration . . . . .	9
<b>3. Design &amp; Implementation</b>	<b>11</b>
3.1. Bitwidth analysis . . . . .	11
3.1.1. Definition: Value prediction . . . . .	12
3.1.2. Difference to VRP . . . . .	14
3.2. Stable Conversion nodes . . . . .	14
<b>4. Evaluation</b>	<b>17</b>
4.1. General runtime . . . . .	17
4.2. Usage in vhdl generation . . . . .	17
4.3. Improvements over VRP . . . . .	17
4.4. Widening & narrowing . . . . .	17
<b>5. Conclusion</b>	<b>19</b>
5.1. x86 generation & vhdl generation . . . . .	19
5.2. Further improvements . . . . .	19
5.3. Additional analyzer usage . . . . .	19
<b>A. Sonstiges</b>	<b>27</b>
A.1. Anmeldung . . . . .	27
A.2. Antrittsvortrag . . . . .	27
A.3. Abgabe . . . . .	28
A.4. Abschlussvortrag . . . . .	28
A.5. Gutachten . . . . .	29
A.6. Bewertung . . . . .	29
A.7. L <sup>A</sup> T <sub>E</sub> X Features . . . . .	30
A.7.1. Schriftformatierungen . . . . .	30
A.7.2. Rand und Platz . . . . .	30



# 1. Introduction

The problem to solve is called bitwidth analysis. The bitwidth with a data word can be seen as the bits that are actually used in the runtime of the source code. Lets take the following example:

```
int arr[4];

for (int i = 0; i < 4; i++) {
    int res = (i << 4) + i*i;
    arr[i] = res;
}
```

After running the bitwidth analysis, every operation has a attached information structure which indicates how many bits are actually used by the code. The developed algorithm applied to the the code results in something like this:  
 $i \in 0..3$ ;  $res \in 0..90$ ;





## **2. Basics**

### **2.1. cparser / libfirm**

#### **2.1.1. Number representation**

### **2.2. Lattice**

### **2.3. Fixed point iteration**



## 3. Design & Implementation

### 3.1. Bitwidth analysis

The analysis is a data flow analysis. The analysis attaches a  $(int, boolean)$  tuple to every meaningful node. A node is considered meaningful if the node has an integer style mode. We will reference the first value as *stable bits* and the second bit as *is positive*.

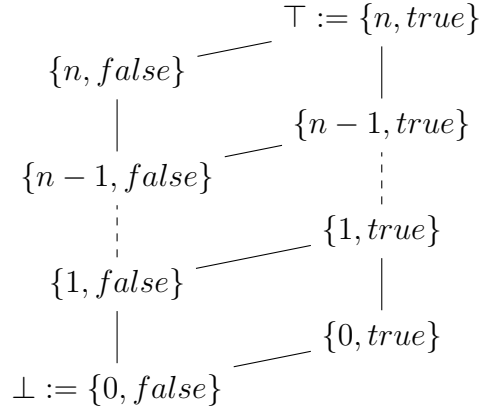
**Bit representation** The stable bits are indicating how many bits are stable, and therefore not used. The second value of the tuple indicates if the value will ever reach negative numbers or not. And thus indicate at least one stable bit at the highest position. However, the second value is only meaningful for modes that allow signs.

**Range representation** There is also a second way of interpreting the two values. The stable bits can define a minimum and maximum range. The maximum number is reached if the stable bits are just always zero. If the mode is signed and the node is not positive, then the minimum number is reached by assuming all stable bits are one. Otherwise the minimum range is 0. We can define the following min max definitions for the ranges:

$$\begin{aligned} max_{bitwidth}(x) &= \begin{cases} 2^{stable\_digits-1} - 1 & mode.signed \\ 2^{stable\_digits} - 1 & Otherwise \end{cases} \\ min_{bitwidth}(x) &= \begin{cases} 2^{stable\_digits-1} & mode.signed \text{ and } is\_positive \\ 0 & Otherwise \end{cases} \end{aligned}$$

**Analysis** The analysis works as a fixed point iteration. Therefore we use 3.1 as lattice. The values of the lattice are representing the tuples from the analysis.

As a first step, we iterate over every single node and initialize the node with  $\top$  and mark it as *dirty*. If the node is constant, we calculate its bitwidth. Nodes with the



**Abbildung 3.1.:** The definition of a upper bound compare node

opcodes *Const*, *Size* and *Address* are considered constant.

The second step consists of recalculating every *dirty* node in the graph. if  $node.bitwidth < computed\_bitwidth$ , the computed bitwidth is memorized as new bitwidth of the node and every successor of the node is marked as dirty. The used rules for recalculating the nodes are described in REFERENCE TO TABLE

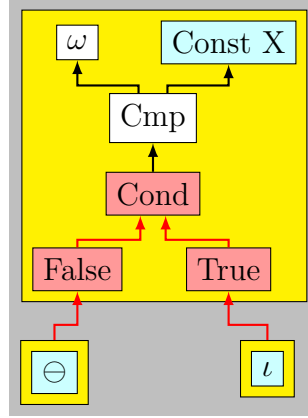
### 3.1.1. Definition: Value prediction

In addition to the normal analysis results, the fixed point iteration can insert additional confirm nodes. Those confirm nodes help making the analysis more accurate. First of all we need a few definitions for easier understanding:

#### Definition: True / false Blocks

**Definition: Upper bounds** A compare node is defining a upper bound if  $node.relation = <$  and the node at  $node.right$  is constant. For nodes where this is given we define  $\omega := node.left$  and the *true block* is called  $\iota$ . A visualization of the definition is given at 3.2. A compare node is also defining a upper bound if it can be transformed into a construct that matches the definition. For example with switching the right and left nodes, while turning the relation.

#### Definition: Predecessor in a certain block



**Abbildung 3.2.:** The definition of a upper bound compare node

$$\phi(a, b) := \forall X \prec a \wedge X.block = b$$

$\phi$  returns every node that is a direct predecessor of  $a$  and located in block  $b$ .

**Definition: Constant dependencies**

$$\xi(a) := \begin{cases} a \cap \xi(c) & , \text{If there is only one not constant dependency } c \\ \emptyset & , \text{otherwise.} \end{cases}$$

If  $a$  has only one not constant dependency node  $c$ , then  $\xi$  returns the element  $a$  and  $\xi(c)$ . Otherwise it returns a empty set.

**Upper bounds for block execution** The values that are calculated in a node are (even if the fixed point iteration is not stable yet) possible values. The iteration starts at  $\top$  and moves into the direction of  $\perp$ . This means that our range of possible values starts at something like  $[0, 0]$ , moving towards  $[n, -n] : n > 0, n \leq \max(mode)$  with each iteration. For a  $\omega$  node this means that there can be a recalculation, (new and old bitwidth is notated as the value range  $\hat{x}$  and  $x$ ) where the compare relation is true for  $x$  but not anymore for  $\hat{x}$ . This means that  $\hat{x}$  is the upper bound for  $\iota$ . Thus we can insert a confirm node between every node  $e \in \phi(\omega, \iota)$  and  $\omega$ .

**Moving upper bounds backwards** The confirms we have inserted between  $\omega$  and its successors are not the only thing we can insert. We can also insert a confirm node between every  $\phi(\xi(\omega), \iota)$ . Important here is, the predecessors of  $\omega$ . Those confirms are then also inserted above conversation nodes, which is not possible using the normal construct insertion code provided by libFIRM

### 3.1.2. Difference to VRP

There is already a analysis that is doing something similar, it is called value range propagation. The difference from VRP to BA is that in VRP each iteration is trying to predict the exact range after each operation. While BA tries to predict the unused bits after each operation. This little detail is mainly showing up in speed of the fixed point iteration, VRP converges way slower than BA. Details for this are given in the evaluation chapter 4.

## 3.2. Stable Conversion nodes

A conversion of a data word can result in two different results. First the bitwise representation stays the same. Second, the bitwise representation also gets mapped. We call the first case *Stable Conversion node*.

**Finding stable conversion nodes** Stable conversion nodes can be found using the bitwidth analysis. As described before, the analysis maps every node in the tree to a tuple. First number is the number of stable bits, which describes a upper bound for the numbers that will be written into the data word. The second number is a boolean flag and indicates if the number is going to be greater than 0 or not. If we now can see that the number range from the successor is the same as the one of the conversion node, then we can declare the conversion as stable.

**Removing conversion nodes** In case we found a stable conversion node, then we can say that this node only exists for syntax rules, there is no semantical value in them. Removing those nodes also has the advantage of helping other analysis. The confirm insertion algorithm of libFIRM is searching for assertions that can be made based on looking at compare nodes. This works quite well. However, a construction like TODO does not work. After removing the conversion node, the analysis can find a assertion based on the compare node. This also helps the branch prediction, dead code elimination.

However, for really removing the conversion nodes, we need to find situations where we can eliminate the conversion node. One was already seen in the example. A compare node with a constant node as second operand. Another situation is a arithmetical operation with a constant and conversion node as operands.

### Compare-Conversion optimization

### **Arithmetical-Conversion optimization**





## **4. Evaluation**

### **4.1. General runtime**

### **4.2. Usage in vhdl generation**

### **4.3. Improvements over VRP**

### **4.4. Widening & narrowing**



## **5. Conclusion**

**5.1. x86 generation & vhdl generation**

**5.2. Further improvements**

**5.3. Additional analyzer usage**



# Literaturverzeichnis



# Erklärung

Hiermit erkläre ich, Marcel Hollerbach, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis beachtet habe.

---

Ort, Datum

---

Unterschrift





# Danke

Ich danke meinen Eltern, meinem Hund und sonst niemandem.



# A. Sonstiges

## A.1. Anmeldung

Üblicherweise melden wir eine Arbeit erst an, wenn der Student mit dem Schreiben begonnen hat, also nach der Implementierung. Das verringert die Bürokratie und den Stress, der mit verpassten Deadlines kommt.

Außerdem ist ein Abbrechen nach der Anmeldung ein offizieller Akt für den es wiederum Fristen gibt:

Abbruchfrist nach Anmeldung	
Bachelor	4 Wochen
Master	2 Monate
Diplom	3 Monate

Nach dieser Frist muss die abgebrochene Arbeit mit 5,0 bewertet werden.

Das ISS empfiehlt, dass Studenten sich zusätzlich selbst im Studienportal anmelden. Das könnte die Eintragung der Note beschleunigen.

## A.2. Antrittsvortrag

Bei internen Arbeiten jeglicher Art ist ein Antrittsvortrag optional. Bei externen Arbeiten ist ein Antrittsvortrag Pflicht.

Dauer: 15 Minuten + 5 Minuten Fragezeit.

Ein Antrittsvortrag sollte nach der Einarbeitungsphase stattfinden, wenn man einen Überblick hat und weiß was man vorhat. Im Antrittsvortrag kann man abtasten was

Prof. Snelting von dem Thema hält und wo man Schwerpunkte setzen oder erweitern sollte.

## A.3. Abgabe

	Dauer	Umfang
Bachelor	4 Monate	30+ Seiten
Master	6 Monate	50+ Seiten
Studienarbeit	3 Monate	30+ Seiten
Diplom	6 Monate	50+ Seiten

Man kann eine "4.0 Bescheinigung" bekommen, bspw. für die Masteranmeldungen.

Abzugeben sind jeweils 4 gedruckte Exemplare der Arbeit, das Dokument als pdf Datei und entstandener Code und andere Artefakte. Außerdem könnten spätere Studenten dankbar sein für T<sub>E</sub>X-Sourcen.

Zum Drucken empfehlen wir Katz Copy<sup>1</sup> am Kronenplatz, weil wir in Sachen Qualität dort die besten Erfahrungen gemacht haben. Bitte keine Spiralbindung, da sich das schlecht Stapeln lässt. Farbdruck ist nicht verpflichtend, solange in Schwarzweiß noch alle Grafiken lesbar sind.

## A.4. Abschlussvortrag

Die Abschlusspräsentation dauert für Bachelorarbeiten 15 Minuten zuzüglich mind. 10 Minuten für Fragen. Bei Masterarbeiten sind 20–25 Minuten für den Vortrag vorgesehen.

Der Vortrag soll innerhalb von vier Wochen nach Abgabe erfolgen, entsprechend Prüfungsordnung. Die Arbeit muss mindestens einen Tag vor dem Abschlussvortrag abgegeben sein, damit sich Prof. Snelting vorbereiten kann.

Am besten direkt im Anschluß den Vortrag ausarbeiten und ein oder zwei Wochen nach Abgabe halten. Der Präsentationstermin muss ein bis zwei Monate im Voraus geplant werden, denn Prof. Snelting hat üblicherweise einen vollen Terminkalender.

---

<sup>1</sup><http://www.katz-copy.com/>

## A.5. Gutachten

Der Prüfer erstellt ein Gutachten zur Arbeit. Um das Gutachten einzusehen muss ein Antrag beim Prüfungsamt gestellt werden. Der Betreuer bzw. Prüfer darf das Gutachten nur mit genehmigtem Gutachten zeigen. Mündliche Auskunft zur Note ist allerdings möglich.

## A.6. Bewertung

- Diplom- und Masterarbeiten *müssen* eine wissenschaftliche Komponente enthalten. Bachelorarbeit *sollten*, aber zum Bestehen ist es nicht notwendig. Wissenschaftlich ist was über reine Implementierungs- bzw. Softwareentwicklungsaufgaben hinausgeht. Üblicherweise findet man theoretische Betrachtungen zu Korrektheit und Effizienz. Willkürliche Daumenregel: Ohne Formel, keine Wissenschaft.
- Diplom- und Masterarbeiten benötigen eigentlich immer Wissen aus dem Diplom- bzw. Masterstudium. Falls das Wissen aus Vordiplom bzw. Bachelor ausreicht, sollte man nochmal darüber nachdenken.
- Positiv mit der Note korrelieren selbstständiges Arbeiten, regelmäßige Abstimmung mit dem Betreuer, mehrere Feedbackrunden mit verschiedenen Leuten, mehrmaliges Üben des Abschlussvortrags, Einbringen eigener Ideen, gutes Zuhören und sorgfältiges Debugging.
- Negativ mit der Note korrelieren wochenlanges Pausieren, Ignorieren von Feedback, Deadlines überziehen und Arbeiten im stillen Kämmerchen.

Disclaimer: Nein, es gibt keinen konkreten Notenschlüssel. Die obigen Punkte sind nur grobe Richtlinien und für niemanden in irgendeiner Weise bindend.

## A.7. $\text{\LaTeX}$ Features

### A.7.1. Schriftformatierungen

	serif	sans-serif	fixed-width
normal	Medium <b>Bold</b>	Medium <b>Bold</b>	Medium <b>Bold</b>
italic	<i>Medium <b>Bold</b></i>	<i>Medium <b>Bold</b></i>	<i>Medium <b>Bold</b></i>
slanted	<i>Medium Bold</i>	<i>Medium <b>Bold</b></i>	<i>Medium <b>Bold</b></i>
small-capital	MEDIUM <b>Bold</b>	MEDIUM <b>Bold</b>	MEDIUM <b>Bold</b>

Math fonts: *absXYZ*, absXYZ, **absXYZ**, absXYZ, *absXYZ*, absXYZ, and  $\mathcal{XYZ}$ .

### A.7.2. Rand und Platz

Viele Benutzer von  $\text{\LaTeX}$  wollen Ränder und Seitengröße anpassen. Dazu empfehlen wir erstmal die KOMA Script Dokumentation (`koma-script.pdf`) zu lesen, insbesondere Kapitel 2.2. Bevor man mit `\enlargethispage` oder ähnlichen Tricks anfängt, sollte man `\typearea` anpassen.

Falls die Arbeit auf Englisch verfasst wird, sollte man wissen, dass Absätze im Englischen üblicherweise anders formatiert werden. Im Deutschen macht man eine Leerzeile zwischen Absätzen. Im Englischen wird stattdessen die erste Zeile eines Absatzes eingerückt.