

NAT32 und Casting für IML

Marco Romanutti^{1,2} und Benjamin Meyer^{1,2}

¹Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW, Brugg

²Schlussbericht

Im Modul Compilerbau wird eine Erweiterung für die bestehende Sprache IML spezifiziert und implementiert. Die Implementierung beinhaltet einen neuen Datentyp für natürliche Zahlen, sowie eine Möglichkeit den Datentyp INT32 in den neuen Datentypen zu casten und umgekehrt.

1 Erweiterung

1.1 Einleitung

Unter natürlichen Zahlen werden die positiven, ganzen Zahlen und 0 verstanden:

$$\mathbb{N} = \{0; 1; 2; 3; \dots\}$$

Die IML soll um einen neuen Datentyp NAT32 erweitert werden. Der neue Datentyp soll solche positiven, ganzen Zahlen bis Länge 32 in Binärdarstellung abbilden können. Es sollen die bestehenden Operationen unterstützt werden. Ausserdem soll ein explizites Casting zwischen dem bestehenden Datentyp INT32 und dem neuen Datentyp NAT32 möglich sein.

1.2 Lexikalische Syntax

Für den neuen Datentyp wird das Keyword (TYPE, NAT32) und ein Castingoperator hinzugefügt.

Datentyp:	NAT32	(TYPE, NAT32)
Brackets:	[]	LBRACKET, RBRACKET

Casting ist nur von (TYPE, INT32) zu (TYPE, NAT32) und umgekehrt möglich. Als Castingoperator werden rechteckige Klammern (nachfolgend Brackets genannt) verwendet. Innerhalb der Brackets befindet sich der Zieldatentyp ¹.

¹zum Beispiel [INT32]

1.3 Grammatikalische Syntax

Das nachfolgende Code-Listing zeigt, wie der neue Datentyp NAT32 eingesetzt werden kann.

```
// Deklaration
var natIdent1 : nat32;
var natIdent2 : nat32;
var natIdent3 : nat32;

// Initialisierung
natIdent1 init := [nat32] 50;
natIdent2 init := [nat32] 10;
natIdent3 init := natIdent1 + natIdent2;

// Casting von INT32 nach NAT32
var intIdent1 : int32;
intIdent1 init := 30;
natIdent3 := [nat32] intIdent1;

call functionWithNatParam([nat32] intIdent1);

// Casting von NAT32 nach INT32
var intIdent2 : int32;
intIdent2 init := [int32] natIdent3;

call functionWithIntParam([int32] natIdent3);
```

Literale werden standardmässig als INT32 interpretiert - ein NAT32-Literal bedingt vorab deshalb den Castingoperator. Falls zwei Datentypen nicht gecastet werden können, wird ein Kompilierungsfehler geworfen. Folgendes Code-Listing zeigt ein solches Beispiel mit dem bestehenden Datentyp bool:

```
// Deklaration
var boolIdent : bool;
boolIdent init := false;
var natIdent : nat32;
// Throws type checking error:
natIdent init := [nat32] boolIdent
```

Unsere Erweiterung unterstützt keine impliziten Castings. Weitere Code-Beispiele sind im Anhang zu finden.

1.4 Änderungen an der Grammatik

Zusätzlich zu den bestehenden Operatoren wurde ein neuer `castOpr` erstellt, welcher anstelle des Nichtterminal-Symbol `factor` verwendet werden kann.

```
castOpr := LBRACKET TYPE RBRACKET
```

Das bestehende Nichtterminal-Symbol `factor` wird um diese neue Produktion ergänzt:

```
factor := LITERAL
| IDENT [INIT | exprList]
| castOpr factor
| monadicOpr factor
| LPAREN expr RPAREN
```

1.5 Kontext- und Typen-Einschränkungen

Der `TYPE` zwischen `LBRACKET` und `RBRACKET` muss vom Datentyp `INT32` oder `NAT32` sein. Ein Casting zum Typ `bool` oder vom Typ `bool` zu `INT32` resp. `NAT32` führt zu einem Kompilierungsfehler.

Tabelle ?? zeigt die unterstützten Typumwandlungen der verschiedenen Datentypen. Typumwandlungen, welche zu potentiellen Laufzeitfehler führen, sind mit * gekennzeichnet. Der Datentyp `INT32` umfasst einen Wertebereich von -2147483648 bis 2147483647 , wobei das Most Significant Bit (MSB) für das Vorzeichen verwendet wird. Weil der Datentyp `NAT32` nur positive, ganze Zahlen und die Zahl 0 darstellt, wird kein Vorzeichenbit benötigt. Der Wertebereich verschiebt sich dadurch auf 0 bis 4294967295 . Falls bei Typumwandlungen der Wert ausserhalb des Wertebereichs des Zieldatentyps liegt, führt dies zu einem Laufzeitfehler. Bei der Umwandlung von `NAT32` nach `INT32` kann ein solcher Laufzeitfehler beispielsweise auftreten, falls es sich um einen Wert > 2147483647 handelt. Falls negative Werte von `INT32` nach `NAT32` umgewandelt werden, resultiert ebenfalls ein Laufzeitfehler.

Table 1: Casting zwischen Datentypen

Quell- \ Zieldatentyp	int32	nat32	bool
int32	✓	✓*	✗
nat32	✓*	✓	✗
bool	✗	✗	✗

2 Aufbau Compiler

Der Compiler basiert auf der IML (V2) und ist in Java geschrieben.

2.1 Scanner

Literale werden standardmässig als `INT32` interpretiert - ein `NAT32`-Literal bedingt vorab deshalb den Castingoperator. Vom Scanner werden Literale als `long` in Java eingelesen. Dieser kann Werte von -9223372036854775808 bis 9223372036854775808 annehmen und deckt somit den gesamten Wertebereich der beiden Datentypen `INT32` und `NAT32` ab. Die Überprüfung, ob der Wert innerhalb des gültigen Wertebereichs des jeweiligen Datentyps liegt, erfolgt zum Zeitpunkt der Code-Generierung.

2.2 Parser

Der neu eingeführte `castOpr` und die neue Produktion `factor := castOpr factor` sind im Abstrakten Syntax Tree (AST) abgebildet. Abbildung ?? zeigt die Umwandlung von der konkreten in die abstrakte Syntax.

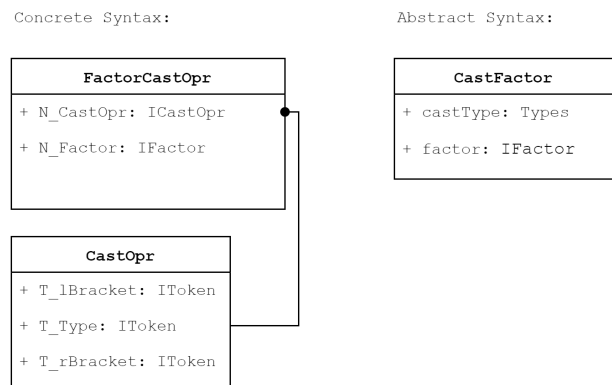


Figure 1: Umwandlung von der konkreten in die abstrakte Syntax

2.3 Statische Analyse

Scope checking

Für Routinen und Variablen liegen unterschiedliche Namespaces vor. Namen für Routinen und Variablen können deshalb identisch sein. Es wird zwischen globalen und lokalen Namespaces unterschieden: Bei lokalen Namespaces werden die Variable innerhalb einer Routine definiert und haben dort ihre Gültigkeit. Globale Variablen dürfen nicht denselben Namen haben wie lokalen Variablen. Überladene Signaturen für Routinen² wurde in dieser Implementation nicht umgesetzt.

Bei `FunCallFactor`, `ProcCallCmd`, `DebugIn` und `AssignCmd` muss überprüft werden, ob die Parameter den richtigen `LValue`, resp. `RValue` besitzen. Folgende Kombinationen sind dabei allgemein erlaubt:

Bei einem `AssignCmd` muss der Ausdruck links zudem zwingend ein `LValue` sein. Bei einem `DebugIn` muss

²selber Name, unterschiedliche Parameterlisten

Table 2: LRValue-Kombinationen

Callee	Caller	Resultat
LValue	LValue	Valid
RValue	LValue	Valid (LValue dereferenzieren)
RValue	RValue	Valid
LValue	RValue	LRValueError \neq

es sich ebenfalls um einen LValue handeln, damit der Input-Wert dieser Variable zugewiesen werden kann.

Innerhalb des Scope checkings wird zudem überprüft, ob die Anzahl der erwarteten Parameter mit der Anzahl übergebener Parameter übereinstimmt.

Type checking

Das Casten zwischen zwei Datentypen ist nur für bestimmte Typen erlaubt (vgl. Tabelle ??). Zusätzlich sind bei der Abarbeitung des AST nur die folgenden Typen erlaubt:

Table 3: Erlaubte Typen

Klasse	Types
AddExpr, MultExpr, RelExpr	int32, nat32 *
BoolExpr, IfCmd	bool
AssignCmd	int32, nat32, bool *
FunCallFactor, ProcCallFactor	Typ von Caller muss Typ von Callee entsprechen
MonadicFactor	NOTOPR: bool
	ADDOPR: int32, nat32
CastFactor	Typ von Factor und Typ von CastFactor müssen castable sein

Bei Einträgen, die mit * gekennzeichnet sind, müssen LValue und RValue vom selben Typ sein. Beim der Typenüberprüfung innerhalb vom CastFactor wird überprüft, ob der Typ vom CastFactor und jener des zugehörigen factors gecasted werden können (vgl. Tabelle ??). Die effektive Typ-Konversion wird erst bei der Code-Generierung durchgeführt.

Initialization checking

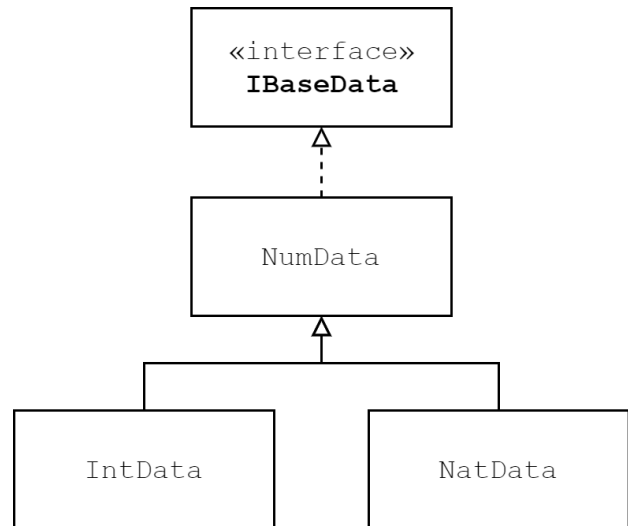
2.4 Virtuelle Maschine

Grundlage für die Code-Generierung ist der Abstract Syntax Tree (AST). Vom Root-Knoten ausgehend fügt jeder Knoten seinen Code zum Code-Array.

Im Falle eines Castings zwischen zwei Datentypen befindet sich an mindestens einer Stelle in der AST Struktur ein CastFactor-Element. Von diesem Element aus wird der Datentyp des zugehörigen factor geändert, indem dessen Attribut castFactor geändert wird. Dieses Attribut übersteuert den eigentlichen

Datentyp des Elements innerhalb des AST. Weil der factor gemäss Grammatik unterschiedliche Produktionen besitzt (vgl. Änderungen an der Grammatik), muss die Typanpassung rekursiv weitergegeben werden. Die Rekursion wird durch Literale oder Expressions unterbrochen, wie am Beispiel in Anhang ?? aufgezeigt.

In der virtuellen Maschine wurde ein neuer generischer Typ NumData eingeführt. Dieser wird für die Konversion zwischen Daten vom Typ IntData³ und NatData⁴ verwendet. Abbildung ?? zeigt die Klassenhierarchie dieser Typen.

**Figure 2:** Daten in VM

Beim Dereferenzieren muss im Falle eines Castings der Datentyp von bereits typisierten Daten auf dem Stack geändert werden. Anhang ?? zeigt ein Beispiel, bei welchem der Datentyp aufgrund des neu propagierten Attributs castType umgewandelt wird.

2.5 Code Generierung

3 Vergleich mit anderen Programmiersprachen

3.1 Ganzzahlige Werte

In Java wird bei Zuweisungen die Länge einer Zahl in Bitdarstellung überprüft: Beim Datentyp long wird beispielsweise geprüft, ob der Wert als ganzzahliger Wert von 32-bit Länge dargestellt werden kann. Falls dies nicht der Fall ist, wird ein Fehler zur Kompilierungszeit geworfen. Das MSB wird als Vorzeichenbit verwendet, womit rund die Hälfte der vorzeichenlos darstellbaren long-Werte entfällt, resp. zur Darstellung von negativen Zahlen eingesetzt wird. Falls bei fortlaufenden Berechnungen Wertebereiche unter-

³für den Datentyp INT32

⁴für den Datentyp NAT32

resp. überschritten werden, führt dies zu einem arithmetischen Überlauf. Abbildung ?? zeigt den Überlauf bei ganzzahligen, vorzeichenbehafteten Datentypen (am Beispiel von Bitlänge 3 + 1).

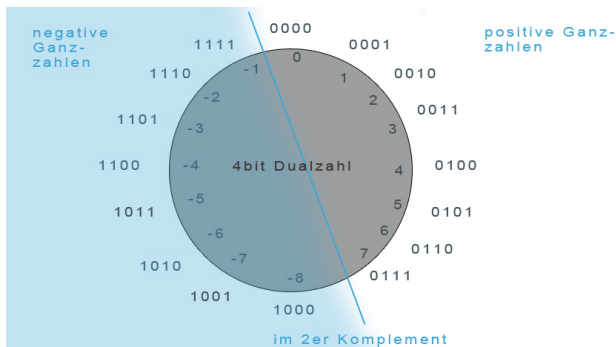


Figure 3: Überlauf mit Integerzahlen

Dadurch führt z.B. beim Datentyp `int` der Ausdruck `Integer.MAX_VALUE + 1` zum Wert `Integer.MIN_VALUE`. Dies kann dazu führen, dass mit „falschen“ Werten gerechnet wird, ohne dass der Entwickler dies bemerkt.

3.2 Fließkommazahlen

Im Gegensatz zur Darstellung im Zweierkomplement, welche für Integer-Typen in Java verwendet werden, werden Fließkommazahlen intern nach IEEE Standard dargestellt. Anders als bei der Zweierkomplement-Darstellung sieht dieses Format spezielle, konstante Werte vor. So sind in Java beispielsweise Konstanten für `Double.POSITIVE_INFINITY`, `Double.NEGATIVE_INFINITY` und `Double.NaN` definiert.

4 Designentscheidungen

4.1 Spezifiziertes Verhalten

Der neue Datentyp `NAT32` unterstützt die bestehenden Operationen aus IML⁵. Sofern sich die einzelnen Operanden und auch das Resultat im Wertebereich⁶ befinden, entspricht das Verhalten vom Datentyp `NAT32` jenem vom Datentyp `INT32`. Andernfalls wird folgendes Verhalten festgelegt:

- **Wertebereich:** Wertebereichsüber- resp. Unterschreitungen resultieren in einem Laufzeitfehler⁷.

⁵Aktuell sind dies

- `MULTOPR(*, divE, modE)`
- `ADDOPR(+, -)`
- `RELOPR(<, <=, >, >=, =, /=)`
- `BOOLOPR(|, &, ^)`

⁶[0, 4294967295]

⁷Negative Zahlen entsprechen Wertebereichsunterschreitungen

Dies erhöht die Typsicherheit beim Einsatz der verschiedenen Datentypen.

- **Nachkommastellen:** Gemäss IML-Spezifikation sind als Literale nur ganzzahlige Werte erlaubt. Falls z.B. bei einer Division ein Rest resultiert, wird ein ganzzahliges Resultat zurückgegeben. Der Wert des Resultats ist abhängig von der gewählten Operation (`DivFloor`, `DivTrunc`, etc.).

4.2 Alternative Ansätze

Folgende weiteren Ansätze wurden für die Umsetzung der Erweiterung in Betracht gezogen:

- **Arithmetischer Überlauf:** Wertebereichsüber- resp. unterschreitungen resultieren in einem arithmetischen Überlauf. Gegenüber der Darstellung in Abbildung ?? müsste kein negativer Wertebereich verwendet werden und das Addieren von +1 zum grössten Darstellbaren Wert des Datentyps `NAT32` führt zum Wert 0. Weil auf ein Vorzeichenbit verzichtet werden kann, verdoppelt sich der Wertebereich gegenüber dem Datentyp `INT32`. Nachteilig ist dabei, dass der Entwickler verantwortlich ist für das Einhalten der Wertebereichsgrenzen.
- **Vordefinierte Konstanten:** Ähnlich wie bei Fließkommazahlen (vgl. Kapitel ??) könnten konstante Werte für z.B. `POSITIVE_INFINITY` und `NEGATIVE_INFINITY` vorgesehen werden. Das Verhalten bei Wertebereichsüberschreitungen müsste definiert werden. Nachteilig bei dieser Variante ist, dass der Wertebereich um die Anzahl solcher konstante Werte verringert wird.
- **Absolute Werte:** Bei dieser Variante wird bei negativen Werten deren Absolutwert verwendet. Von dieser initial angedachten Variante wurde abgesehen, weil das Verhalten schnell zu ungewollten Resultaten führen kann.

5 Beispielprogramme

Operation:

```
program progAddition
global
var x:nat32;
var y:nat32;
var r:nat32;
var b:bool
do
x init := 4;
y init := 3;
r init := x + y;
b init := r = 7;

debugout r;
debugout b
endprogram
```

Casting:

```
program progCasting
global
var x:nat32;
var y:int32;
var r:nat32;
var b:bool
do
x init := 4;
y init := 3;
r init := x + [nat32] y;
b init := r = 7;

debugout r;
debugout b
endprogram
```

References

- [1] Wikipedia: Natürliche Zahl, https://de.wikipedia.org/wiki/Nat%C3%BCrliche_Zahl
- [2] Wikipedia: Natural numbers (engl.), https://en.wikipedia.org/wiki/Natural_number
- [3] Wikipedia: Integer (Datentyp) [https://de.wikipedia.org/wiki/Integer_\(Datentyp\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Integer_(Datentyp))

A Vollständige Grammatik

B Beispiel doppeltes Casting

IML:

```

program progDouble
global
var value:INT32
do
value init := [INT32] [NAT32] ((4 + 1) + 1)
endprogram

```

Code-Array:

```

0: AllocBlock(1)
1: UncondJump(2)
2: LoadAddrAbs(0)
3: LoadImInt(4)
4: LoadImInt(1)
5: AddInt
6: LoadImInt(1)
7: AddInt
8: Store
9: Stop

```

UML:

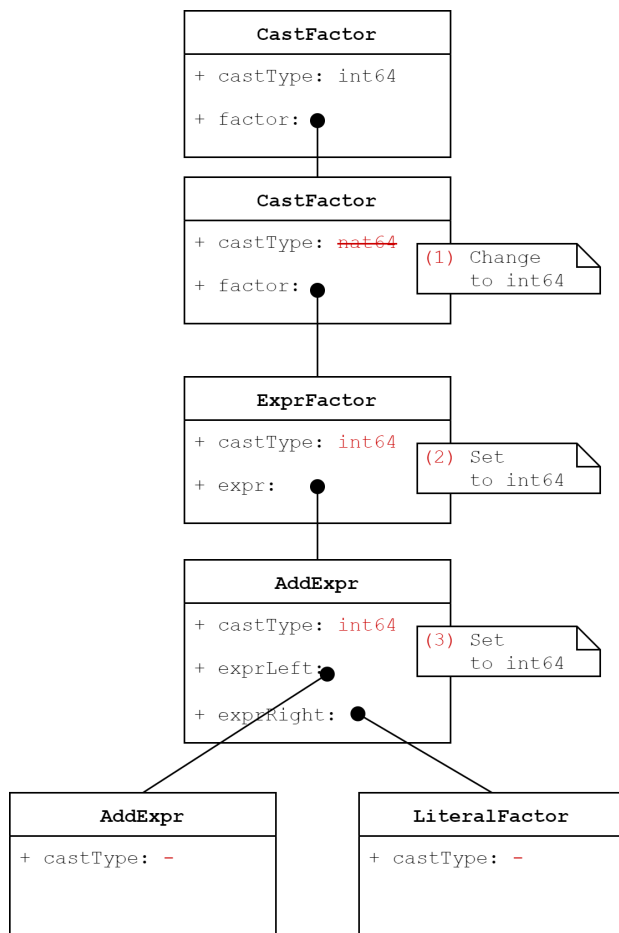


Figure 4: Auszug aus AST

C Beispiel Deref

IML:

```

program exampleCasting
global
var x:int32;
var y:nat32
do
x init := [int32] 4;
y init := [nat32] 3;
x := [int32] y
endprogram

```

Stack content:

```

0: IntData: 4
1: NatData: 3
2: IntData: 0
3: IntData: 3

```

(12) Executing instruction Store

pc: 12

sp: 4

Stack content:

```

0: IntData: 3
1: NatData: 3

```

...

Code-Array:

```

codeArrayPoiner: 14
0: AllocBlock(1)
1: AllocBlock(1)
2: UncondJump(3)
3: LoadAddrAbs(0)
4: LoadImInt(4)
5: Store
6: LoadAddrAbs(1)
7: LoadImNat(3)
8: Store
9: LoadAddrAbs(0)
10: LoadAddrAbs(1)
11: Deref
12: Store
13: Stop

```

Stack:

...

(8) Executing instruction Store

pc: 8

sp: 4

Stack content:

```

0: IntData: 4
1: NatData: 3

```

(9) Executing instruction LoadAddrAbs(0)

pc: 9

sp: 2

Stack content:

```

0: IntData: 4
1: NatData: 3
2: IntData: 0

```

(10) Executing instruction LoadAddrAbs(1)

pc: 10

sp: 3

Stack content:

```

0: IntData: 4
1: NatData: 3
2: IntData: 0
3: IntData: 1

```

(11) Executing instruction Deref

pc: 11

sp: 4