

---

ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

## PicoC-Compiler

### Übersetzung einer Untermenge von C in den Befehlssatz der RETI-CPU

BACHELORARBEIT

*Abgabedatum:* 28<sup>th</sup> April 2022

*Author:*  
Jürgen Mattheis

*Gutachter:*  
Prof. Dr. Scholl

*Betreuung:*  
M.Sc. Seufert

---

Eine Bachelorarbeit am Lehrstuhl für  
Betriebssysteme

---

---

---

## **ERKLÄRUNG**

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel verwendet habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt wurde.

---

---

# Inhaltsverzeichnis

0.0.1	Umsetzung von Pointern . . . . .	9
0.0.1.1	Referenzierung . . . . .	9
0.0.1.2	Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen . . . . .	11
0.0.2	Umsetzung von Arrays . . . . .	12
0.0.2.1	Initialisierung von Arrays . . . . .	12
0.0.2.2	Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	17
0.0.2.3	Zuweisung an Arrayindex . . . . .	22
0.0.3	Umsetzung von Structs . . . . .	25
0.0.3.1	Deklaration und Definition von Structtypen . . . . .	25
0.0.3.2	Initialisierung von Structs . . . . .	27
0.0.3.3	Zugriff auf Structattribut . . . . .	30
0.0.3.4	Zuweisung an Structattribut . . . . .	33
0.0.4	Umsetzung des Zugriffs auf Derived Datatypes im Allgemeinen . . . . .	35
0.0.4.1	Anfangsteil für Globale Statische Daten und Stackframe . . . . .	37
0.0.4.2	Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes . . . . .	39
0.0.4.3	Schlusssteil für die verschiedenen Derived Datatypes . . . . .	42

---

---

# Abbildungsverzeichnis

1	Veranschaulichung des Zugriffs auf Derived Datatypes . . . . .	36
---	--	----

---

---

# Codeverzeichnis

0.1	PicoC-Code für Pointer Referenzierung . . . . .	9
0.2	Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung . . . . .	9
0.3	Symboltabelle für Pointer Referenzierung . . . . .	10
0.4	PicoC-Mon Pass für Pointer Referenzierung . . . . .	10
0.5	RETI-Blocks Pass für Pointer Referenzierung . . . . .	11
0.6	PicoC-Code für Pointer Dereferenzierung . . . . .	11
0.7	Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung . . . . .	12
0.8	PicoC-Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung . . . . .	12
0.9	PicoC-Code für Array Initialisierung . . . . .	13
0.10	Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung . . . . .	13
0.11	Symboltabelle für Array Initialisierung . . . . .	14
0.12	PicoC-Mon Pass für Array Initialisierung . . . . .	15
0.13	RETI-Blocks Pass für Array Initialisierung . . . . .	17
0.14	PicoC-Code für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	17
0.15	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	18
0.16	PicoC-Mon Pass für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	20
0.17	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	22
0.18	PicoC-Code für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	22
0.19	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	22
0.20	PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	23
0.21	RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	24
0.22	PicoC-Code für die Deklaration eines Structtyps . . . . .	25
0.23	Abstract Syntax Tree für die Deklaration eines Structtyps . . . . .	25
0.24	Symboltabelle für die Deklaration eines Structtyps . . . . .	27
0.25	PicoC-Code für Initialisierung von Structs . . . . .	27
0.26	Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs . . . . .	28
0.27	PicoC-Mon Pass für Initialisierung von Structs . . . . .	29
0.28	RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Structs . . . . .	30
0.29	PicoC-Code für Zugriff auf Structattribut . . . . .	30
0.30	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut . . . . .	30
0.31	PicoC-Mon Pass für Zugriff auf Structattribut . . . . .	32
0.32	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut . . . . .	33
0.33	PicoC-Code für Zuweisung an Structattribut . . . . .	33
0.34	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut . . . . .	33
0.35	PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Structattribut . . . . .	34
0.36	RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut . . . . .	35
0.37	PicoC-Code für den Anfangsteil . . . . .	37
0.38	Abstract Syntax Tree für den Anfangsteil . . . . .	37
0.39	PicoC-Mon Pass für den Anfangsteil . . . . .	38
0.40	RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil . . . . .	39
0.41	PicoC-Code für den Mittelteil . . . . .	39
0.42	Abstract Syntax Tree für den Mittelteil . . . . .	39
0.43	PicoC-Mon Pass für den Mittelteil . . . . .	40
0.44	RETI-Blocks Pass für den Mittelteil . . . . .	42
0.45	PicoC-Code für den Schlussteil . . . . .	42
0.46	Abstract Syntax Tree für den Schlussteil . . . . .	43
0.47	PicoC-Mon Pass für den Schlussteil . . . . .	43

0.48 RETI-Blocks Pass für den Schlussteil . . . . .	45
---	----

---

---

# Tabellenverzeichnis

---

---

# Definitionsverzeichnis



---

---

# Grammatikverzeichnis

## 0.0.1 Umsetzung von Pointern

### 0.0.1.1 Referenzierung

Die **Referenzierung** (z.B. `&var`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.1 erklärt.

```
1 void main() {
2     int var = 42;
3     int *pntr = &var;
4 }
```

Code 0.1: PicoC-Code für Pointer Referenzierung

Der Knoten `Ref(Name('var'))` repräsentiert im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.2 eine **Referenzierung** `&var` und der Knoten `PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))` repräsentiert einen Pointer `*pntr`.

```
1 File
2   Name './example_pntr_ref.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10        Assign(Alloc(Writable(), PntrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr')),
11              ↪ Ref(Name('var')))
12      ]
13   ]
```

Code 0.2: Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung

Bevor man einem **Pointer** eine **Adresse** (z.B. `&var`) zuweisen kann, muss dieser erstmal **definiert** sein. Dafür braucht es einen Eintrag in der **Symboltabelle** in Code 0.3.

Die **Größe** eines Pointers (z.B. eines Pointers auf ein Array von `int`: `pntr = int *pntr[3]`), die ihm **size**-Feld der **Symboltabelle** eingetragen ist, ist dabei immer: `size(pntr) = 1`.

```
1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
7       name:                Name('main')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('5'))
10      size:                 Empty()
```

```

11     },
12     Symbol
13     {
14         type qualifier:      Writeable()
15         datatype:           IntType('int')
16         name:               Name('var@main')
17         value or address:    Num('0')
18         position:           Pos(Num('2'), Num('6'))
19         size:               Num('1')
20     },
21     Symbol
22     {
23         type qualifier:      Writeable()
24         datatype:           PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))
25         name:               Name('ptr@main')
26         value or address:    Num('1')
27         position:           Pos(Num('3'), Num('7'))
28         size:               Num('1')
29     }
30 ]

```

Code 0.3: Symboltabelle für Pointer Referenzierung

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 0.4 wird der Knoten `Ref(Name('var'))` durch die Knoten `Ref(GlobalRead(Num('0')))` und `Assign(GlobalWrite(Num('1')), Tmp(Num('1')))` ersetzt. Im Fall, dass in `Ref(exp)` das `exp` vielleicht nicht direkt ein `Name('var')` enthält und `exp` z.B. ein `Subscr(Attr(Name('var')))` ist, sind noch weitere Anweisungen zwischen den Zeilen 11 und 12 nötig, die sich in diesem Beispiel um das Übersetzen von `Subscr(exp)` und `Attr(exp)` nach dem Schema in Subkapitel 0.0.4.2 kümmern.

```

1 File
2   Name './example_ptr_ref.picoc_mon',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       // Assign(Name('var'), Num('42'))
8       Exp(Num('42'))
9       Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10      // Assign(Name('ptr'), Ref(Name('var')))
11      Ref(Global(Num('0')))
12      Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13      Return(Empty())
14    ]
15  ]

```

Code 0.4: PicoC-Mon Pass für Pointer Referenzierung

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.5 werden die **PicoC-Knoten** `Ref(Global(Num('0')))` und `Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_pntr_ref.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Assign(Name('pntr'), Ref(Name('var')))
17        # Ref(Global(Num('0')))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI IN1 0;
20        ADD IN1 DS;
21        STOREIN SP IN1 1;
22        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
23        LOADIN SP ACC 1;
24        STOREIN DS ACC 1;
25        ADDI SP 1;
26        # Return(Empty())
27        LOADIN BAF PC -1;
28      ]
29    ]

```

Code 0.5: RETI-Blocks Pass für Pointer Referenzierung

### 0.0.1.2 Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen

Die **Dereferenzierung** (z.B. `*var`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.6 erklärt.

```

1 void main() {
2   int var = 42;
3   int *pntr = &var;
4   *pntr;
5 }

```

Code 0.6: PicoC-Code für Pointer Dereferenzierung

Der Knoten `Deref(Name('var'))` repräsentiert im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.7 eine **Dereferenzierung** `*var`.

```

1 File
2   Name './example_pntr_deref.ast',
3   [
4     FunDef

```

```

5      VoidType 'void',
6      Name 'main',
7      [],
8      [
9          Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10         Assign(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('ptr')),
11             ↪ Ref(Name('var')))
12     ]
13 ]

```

Code 0.7: Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung

Im **PicoC-Shrink Pass** in Code 0.8 wird ein Trick angewendet, bei dem jeder Knoten `Deref(Name('ptr'), Num('0'))` einfach durch den Knoten `Subscr(Name('ptr'), Num('0'))` ersetzt wird. Der Trick besteht darin, dass der **Dereferenzoperator** (z.B. `*(var + 1)`) sich identisch zum **Operator für den Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `var[1]`) verhält<sup>1</sup>. Damit spart man sich viele vermeidbare **Fallunterscheidungen** und **doppelten Code** und kann die **Dereferenzierung** (z.B. `*(var + 1)`) einfach von den Routinen für einen **Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `var[1]`) übernehmen lassen.

```

1 File
2   Name './example_ptr_deref.picoc_shrink',
3   [
4       FunDef
5         VoidType 'void',
6         Name 'main',
7         [],
8         [
9             Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10            Assign(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('ptr')),
11                ↪ Ref(Name('var')))
12        ]
13 ]

```

Code 0.8: PicoC-Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung

## 0.0.2 Umsetzung von Arrays

### 0.0.2.1 Initialisierung von Arrays

Die **Initialisierung** eines **Arrays** (z.B. `int ar[2][1] = {{3+1}, {4}}`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.9 erklärt.

<sup>1</sup>In der Sprache  $L_C$  gibt es einen Unterschied bei der Initialisierung bei z.B. `int *var = "string"` und z.B. `int var[1] = "string"`, der allerdings nichts mit den beiden Operatoren zu tun hat, sondern mit der **Initialisierung**, bei der die Sprache  $L_C$  verwirrenderweise die eckigen Klammern `[]` genauso, wie beim **Operator für den Zugriff auf einen Arrayindex**, vor den Bezeichner schreibt (z.B. `var[1]`), obwohl es ein **Derived Datatype** ist.

```

1 void main() {
2   int ar[2][1] = {{3+1}, {4}};
3 }
4
5 void fun() {
6   int ar[2][2] = {{3, 4}, {5, 6}};
7 }

```

Code 0.9: PicoC-Code für Array Initialisierung

Die **Initialisierung** eines **Arrays** `int ar[2][1] = {{3+1}, {4}}` wird im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.10 mithilfe der Komposition `Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')), Name('ar')), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]), Array([Num('4')]))])` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_array_init.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')),
10          ↪ Name('ar')), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
11          ↪ Array([Num('4')]))])
12       ],
13     FunDef
14       VoidType 'void',
15       Name 'fun',
16       [],
17       [
18         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('2')], IntType('int')),
19          ↪ Name('ar')), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'), Num('6')]))])
20       ]
21   ]

```

Code 0.10: Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung

Bei der **Initialisierung** eines **Arrays** wird zuerst `Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')))` ausgewertet, da eine Variable zuerst definiert sein muss, bevor man sie verwenden kann<sup>2</sup>. Das **Definieren** der Variable `ar` erfolgt mittels der **Symboltabelle**, die in Code 0.11 dargestellt ist.

Bei Variablen auf dem **Stackframe** wird ein Array **rückwärts** auf das Stackframe geschrieben und auch die **Adresse des ersten Elements** als Adresse des Arrays genommen. Dies macht den **Zugriff auf einen Arrayindex** in Subkapitel 0.0.2.2 deutlich unkomplizierter, da man so nicht mehr zwischen **Stackframe** und **Globalen Statischen Daten** beim **Zugriff auf einen Arrayindex** unterscheiden muss, da es Probleme macht, dass ein **Stackframe** in die entgegengesetzte Richtung wächst, verglichen mit den **Globalen**

<sup>2</sup>Das widerspricht der üblichen Auswertungsreihenfolge beim **Zuweisungsoperator** `=`, der **rechtsassoziativ** ist. Der **Zuweisungsoperator** `=` tritt allerdings erst später in Aktion.

### Statischen Daten<sup>3</sup>.

Das **Größe** des Arrays datatype ar[dim<sub>1</sub>]...[dim<sub>k</sub>], die ihm size-Feld des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist, berechnet sich dabei aus der **Mächtigkeit** der einzelnen **Dimensionen** des Arrays multipliziert mit der **Größe** des **grundlegenden Datentyps** der einzelnen **Arrayelemente**:  $\text{size}(\text{datatype}(\text{ar})) = \left(\prod_{j=1}^n \text{dim}_j\right) \cdot \text{size}(\text{datatype})^a$ .

<sup>a</sup>Die **Funktion type** ordnet einer **Variable** ihren **Datentyp** zu. Das ist notwendig, weil die **Funktion size** nur bei einem **Datentyp** als **Funktionsargument** die **Größe** dieses **Datentyps** als **Zielwert** liefert

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
7       name:                Name('main')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('5'))
10      size:                 Empty()
11    },
12    Symbol
13    {
14      type qualifier:      Writeable()
15      datatype:            ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int'))
16      name:                Name('ar@main')
17      value or address:    Num('0')
18      position:            Pos(Num('2'), Num('6'))
19      size:                 Num('2')
20    },
21    Symbol
22    {
23      type qualifier:      Empty()
24      datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('fun'), [])
25      name:                Name('fun')
26      value or address:    Empty()
27      position:            Pos(Num('5'), Num('5'))
28      size:                 Empty()
29    },
30    Symbol
31    {
32      type qualifier:      Writeable()
33      datatype:            ArrayDecl([Num('2'), Num('2')], IntType('int'))
34      name:                Name('ar@fun')
35      value or address:    Num('3')
36      position:            Pos(Num('6'), Num('6'))
37      size:                 Num('4')
38    }
39  ]

```

Code 0.11: Symboltabelle für Array Initialisierung

<sup>3</sup>Wenn man beim **GCC GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project** einen Stackframe mittels des **GDB GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project** beobachtet, sieht man, dass dieser es genauso macht.

Im **Pioco-Mon Pass** in Code 0.12 werden zuerst die **Logischen Ausdrücke** in den Blättern des Teilbaums, der beim **Array-Initializers Container-Knoten** `Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]), Array([Num('4')])])` anfängt nach dem **Depth-First-Search** Schema, von **links-nach-rechts** ausgewertet und auf den **Stack** geschrieben<sup>4</sup>.

Im finalen Schritt muss zwischen **Globalen Statischen Daten** bei der `main`-Funktion und **Stackframe** bei der Funktion `fun` unterschieden werden. Die auf den Stack ausgewerteten Expressions werden mittels der Komposition `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))`, die in Tabelle ?? genauer beschrieben ist, versetzt in der selben Reihenfolge zu den **Globalen Statischen Daten** bzw. auf den **Stackframe** geschrieben.

Der **Trick** ist hier, dass egal wieviele Dimensionen und was für einen Datentyp das **Array** hat, man letztendlich immer das gesamte Array erwischt, wenn man einfach die **Größe des Arrays** viele **Speicherzellen** mit z.B. der **Komposition** `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` verschiebt.

In die Knoten `Global('0')` und `Stackframe('3')` wurde hierbei die **Startadresse** des jeweiligen Arrays geschrieben, sodass man nach dem **PicoC-Mon Pass** nie mehr Variablen in der **Symboltabelle** nachsehen muss und gleich weiß, ob sie in Bezug zu den **Globalen Statischen Daten** oder dem **Stackframe** stehen.

```

1 File
2   Name './example_array_init.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Assign(Name('ar'), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
8         ↪   Array([Num('4')])])])
9         Exp(Num('3'))
10        Exp(Num('1'))
11        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
12        Exp(Num('4'))
13        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
14        Return(Empty())
15      ],
16    Block
17      Name 'fun.0',
18      [
19        // Assign(Name('ar'), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'),
20        ↪   Num('6')])])])
21        Exp(Num('3'))
22        Exp(Num('4'))
23        Exp(Num('5'))
24        Exp(Num('6'))
25        Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
26        Return(Empty())
27      ]
28    ]
29  ]

```

Code 0.12: PicoC-Mon Pass für Array Initialisierung

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.13 werden die **Kompositionen** `Exp(exp)` und `Assign(Global(Num('0')))`,

<sup>4</sup>Da der **Zuweisungsoperator** = **rechtsassoziativ** ist und auch rein **logisch**, weil man nichts zuweisen kann, was man noch nicht berechnet hat.



Stack(Num('2')) bzw. Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')) durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_array_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Assign(Name('ar'), Array([Array([BinOp(Num('3')), Add('+'), Num('1'))]),
8         ↪   Array([Num('4')]))])
9         # Exp(Num('3'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 3;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Exp(Num('1'))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI ACC 1;
16        STOREIN SP ACC 1;
17        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
18        LOADIN SP ACC 2;
19        LOADIN SP IN2 1;
20        ADD ACC IN2;
21        STOREIN SP ACC 2;
22        ADDI SP 1;
23        # Exp(Num('4'))
24        SUBI SP 1;
25        LOADI ACC 4;
26        STOREIN SP ACC 1;
27        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
28        LOADIN SP ACC 1;
29        STOREIN DS ACC 1;
30        LOADIN SP ACC 2;
31        STOREIN DS ACC 0;
32        ADDI SP 2;
33        # Return(Empty())
34        LOADIN BAF PC -1;
35      ],
36    Block
37      Name 'fun.0',
38      [
39        # // Assign(Name('ar'), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'),
40        ↪   Num('6')]))])
41        # Exp(Num('3'))
42        SUBI SP 1;
43        LOADI ACC 3;
44        STOREIN SP ACC 1;
45        # Exp(Num('4'))
46        SUBI SP 1;
47        LOADI ACC 4;
48        STOREIN SP ACC 1;
49        # Exp(Num('5'))
50        SUBI SP 1;
51        LOADI ACC 5;
52        STOREIN SP ACC 1;
53        # Exp(Num('6'))

```

```

52     SUBI SP 1;
53     LOADI ACC 6;
54     STOREIN SP ACC 1;
55     # Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
56     LOADIN SP ACC 1;
57     STOREIN BAF ACC -2;
58     LOADIN SP ACC 2;
59     STOREIN BAF ACC -3;
60     LOADIN SP ACC 3;
61     STOREIN BAF ACC -4;
62     LOADIN SP ACC 4;
63     STOREIN BAF ACC -5;
64     ADDI SP 4;
65     # Return(Empty())
66     LOADIN BAF PC -1;
67 ]
68 ]

```

Code 0.13: RETI-Blocks Pass für Array Initialisierung

### 0.0.2.2 Zugriff auf einen Arrayindex

Der **Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `ar[0]`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.14 erklärt.

```

1 void main() {
2     int ar[1] = {42};
3     ar[0];
4 }
5
6 void fun() {
7     int ar[3] = {1, 2, 3};
8     ar[1+1];
9 }

```

Code 0.14: PicoC-Code für Zugriff auf einen Arrayindex

Der **Zugriff auf einen Arrayindex** `ar[0]` wird im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.15 mithilfe des **Container-Knotens** `Subscr(Name('ar'), Num('0'))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_array_access.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('ar')),
10              ↪ Array([Num('42')]))
11       ]
12     ]

```

```

11     ],
12     FunDef
13     VoidType 'void',
14     Name 'fun',
15     [],
16     [
17         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')), Name('ar')),
18             ↪ Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
19         Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
20     ]

```

Code 0.15: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf einen Arrayindex

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 0.16 wird vom **Container-Knoten** `Subscr(Name('ar'), Num('0'))` zuerst im **Anfangsteil 0.0.4.1** die **Adresse** der Variable `Name('ar')` auf den **Stack** geschrieben. Bei den **Globalen Statischen Daten** der `main`-Funktion wird das durch die Komposition `Ref(Global(Num('0')))` dargestellt und beim **Stackframe** der Funktion `fun` wird das durch die Komposition `Ref(Stackframe(Num('2')))` dargestellt.

In nächsten Schritt, dem **Mittelteil 0.0.4.2** wird die **Adresse** ab der das **Arrayelement** des Arrays auf das Zugriffen werden soll anfängt berechnet. Dabei wurde im **Anfangsteil** bereits die **Anfangsadresse** des Arrays, in dem dieses **Arrayelement** liegt auf den **Stack** gelegt. Da ein **Index** auf den Zugriffen werden soll auch durch das Ergebnis eines **komplexeren Ausdrucks**, z.B. `ar[1 + var]` bestimmt sein kann, indem auch **Variablen** vorkommen können, kann dieser nicht während des **Kompilierens** berechnet werden, sondern muss zur **Laufzeit** berechnet werden.

Daher muss zuerst der Wert des **Index**, dessen Adresse berechnet werden soll bestimmt werden, z.B. im einfachen Fall durch `Exp(Num('0'))` und dann muss die **Adresse des Index** berechnet werden, was durch die Komposition `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` dargestellt wird. Die Bedeutung der Komposition `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` ist in Tabelle ?? dokumentiert.

Zur **Adressberechnung** ist es notwendig auf die **Dimensionen** (z.B. `[Num('3')]`) des Arrays, auf dessen **Arrayelement** zugegriffen wird, zugreifen zu können. Daher ist der **Arraydatentyp** (z.B. `ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))`) dem **Container-Knoten** `Ref(exp, datatype)` als verstecktes Attribut `datatype` angehängt. Das versteckte Attribut wird während des Kompiliervorgangs im **Piocc-Mon Pass** dem **Container-Knoten** `Ref(exp, datatype)` angehängt.

Je nachdem, ob mehrere `Subscr(exp, exp)` eine Komposition bilden (z.B. `Subscr(Subscr(Name('var'), Num('1')), Num('1'))`) ist es notwendig mehrere **Adressberechnungsschritte für den Index** `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` einzuleiten und es muss auch möglich sein, z.B. einen **Attributzugriff** `var.attr` und eine **Zugriff auf einen Arrayindex** `var[1]` miteinander zu kombinieren, was in Subkapitel 0.0.4.2 allgemein erklärt ist.

Im letzten Schritt, dem **Schlusssteil 0.0.4.3** wird der **Inhalt** des **Index**, dessen **Adresse** in den vorherigen Schritten berechnet wurde, nun auf den **Stack** geschrieben, wobei dieser die **Adresse** auf dem Stack ersetzt, die es zum Finden des **Index** brauchte. Dies wird durch den Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` dargestellt. Je nachdem, welchen **Datentyp** die Variable `ar` hat und auf welchen **Unterdatentyp** folglich im **Kontext** zuletzt zugegriffen wird, abhängig davon wird der **Schlusssteil** `Exp(Stack(Num('1')))` auf eine andere Weise verarbeitet (siehe Subkapitel 0.0.4.3). Der **Unterdatentyp** ist dabei ein verstecktes Attribut des `Exp(Stack(Num('1')))`-Knoten.

Der einzige **Unterschied**, je nachdem, ob der **Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `ar[1]`) in der `main`-

Funktion oder der Funktion `fun` erfolgt, ist eigentlich nur beim **Anfangsteil**, beim Schreiben der **Adresse** der Variable `ar` auf den **Stack** zu finden, bei dem unterschiedliche **RETI-Instructions** für eine Variable, die in den **Globalen Statischen Daten** liegt und eine Variable, die auf dem **Stackframe** liegt erzeugt werden müssen.

Die Berechnung der **Adresse**, ab der ein **Arrayelement** eines Arrays `datatype ar[dim1]...[dimn]` abgespeichert ist, kann mittels der Formel 0.0.1:

$$\text{ref}(\text{ar}[\text{idx}_1] \dots [\text{idx}_n]) = \text{ref}(\text{ar}) + \left( \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=i+1}^n \text{dim}_j \right) \cdot \text{idx}_i \right) \cdot \text{size}(\text{datatype}) \quad (0.0.1)$$

aus der Betriebssysteme Vorlesung<sup>a</sup> berechnet werden<sup>b</sup>.

Die Kompositionen `Ref(Global(Num('0')))` und `Ref(Stackframe(Num('2')))` repräsentiert dabei den Summanden `ref(ar)` in der Formel.

Die Komposition `Exp(Num('2'))` repräsentiert dabei einen **Subindex** (z.B. `i` in `a[i][j][k]`) beim **Zugriff auf ein Arrayelement**, der als Faktor `idxi` in der Formel auftaucht.

Der Komposition `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` repräsentiert dabei einen ausmultiplizierten Summanden  $\left( \prod_{j=i+1}^n \text{dim}_j \right) \cdot \text{idx}_i \cdot \text{size}(\text{datatype})$  in der Formel.

Die Komposition `Exp(Stack(Num('1')))` repräsentiert dabei das Lesen des **Inhalts** `M[ref(ar[idx1]...[idxn])]` der Speicherzelle an der finalen **Adresse** `ref(ar[idx1]...[idxn])`.

<sup>a</sup>Scholl, „Betriebssysteme“.

<sup>b</sup>`ref(exp)` steht dabei für die Berechnung der **Adresse** von `exp`, wobei `exp` z.B. `ar[3][2]` sein könnte.

```

1 File
2   Name './example_array_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Assign(Name('ar'), Array([Num('42')]))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
11        Ref(Global(Num('0')))
12        Exp(Num('0'))
13        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
14        Exp(Stack(Num('1')))
15        Return(Empty())
16      ],
17    Block
18      Name 'fun.0',
19      [
20        // Assign(Name('ar'), Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
21        Exp(Num('1'))
22        Exp(Num('2'))
23        Exp(Num('3'))
24        Assign(Stackframe(Num('2')), Stack(Num('3')))
25        // Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))

```

```

26     Ref(Stackframe(Num('2')))
27     Exp(Num('1'))
28     Exp(Num('1'))
29     Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
30     Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
31     Exp(Stack(Num('1')))
32     Return(Empty())
33 ]
34 ]

```

Code 0.16: PicoC-Mon Pass für Zugriff auf einen Arrayindex

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.17 werden die **Kompositionen** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_array_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Assign(Name('ar'), Array([Num('42')]))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
17        # Ref(Global(Num('0')))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI IN1 0;
20        ADD IN1 DS;
21        STOREIN SP IN1 1;
22        # Exp(Num('0'))
23        SUBI SP 1;
24        LOADI ACC 0;
25        STOREIN SP ACC 1;
26        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
27        LOADIN SP IN1 2;
28        LOADIN SP IN2 1;
29        MULTI IN2 1;
30        ADD IN1 IN2;
31        ADDI SP 1;
32        STOREIN SP IN1 1;
33        # Exp(Stack(Num('1')))
34        LOADIN SP IN1 1;
35        LOADIN IN1 ACC 0;
36        STOREIN SP ACC 1;
37        # Return(Empty())
38        LOADIN BAF PC -1;

```

```

39 ],
40 Block
41   Name 'fun.0',
42   [
43     # // Assign(Name('ar'), Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
44     # Exp(Num('1'))
45     SUBI SP 1;
46     LOADI ACC 1;
47     STOREIN SP ACC 1;
48     # Exp(Num('2'))
49     SUBI SP 1;
50     LOADI ACC 2;
51     STOREIN SP ACC 1;
52     # Exp(Num('3'))
53     SUBI SP 1;
54     LOADI ACC 3;
55     STOREIN SP ACC 1;
56     # Assign(Stackframe(Num('2')), Stack(Num('3')))
57     LOADIN SP ACC 1;
58     STOREIN BAF ACC -2;
59     LOADIN SP ACC 2;
60     STOREIN BAF ACC -3;
61     LOADIN SP ACC 3;
62     STOREIN BAF ACC -4;
63     ADDI SP 3;
64     # // Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
65     # Ref(Stackframe(Num('2')))
66     SUBI SP 1;
67     MOVE BAF IN1;
68     SUBI IN1 4;
69     STOREIN SP IN1 1;
70     # Exp(Num('1'))
71     SUBI SP 1;
72     LOADI ACC 1;
73     STOREIN SP ACC 1;
74     # Exp(Num('1'))
75     SUBI SP 1;
76     LOADI ACC 1;
77     STOREIN SP ACC 1;
78     # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
79     LOADIN SP ACC 2;
80     LOADIN SP IN2 1;
81     ADD ACC IN2;
82     STOREIN SP ACC 2;
83     ADDI SP 1;
84     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
85     LOADIN SP IN1 2;
86     LOADIN SP IN2 1;
87     MULTI IN2 1;
88     ADD IN1 IN2;
89     ADDI SP 1;
90     STOREIN SP IN1 1;
91     # Exp(Stack(Num('1')))
92     LOADIN SP IN1 1;
93     LOADIN IN1 ACC 0;
94     STOREIN SP ACC 1;
95     # Return(Empty())

```

```

96     LOADIN BAF PC -1;
97   ]
98 ]

```

Code 0.17: RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Arrayindex

### 0.0.2.3 Zuweisung an Arrayindex

Die **Zuweisung** eines Wertes an einen **Arrayindex** (z.B. `ar[2] = 42;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.18 erläutert.

```

1 void main() {
2   int ar[2];
3   ar[2] = 42;
4 }

```

Code 0.18: PicoC-Code für Zuweisung an Arrayindex

Im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.19 wird eine **Zuweisung** an einen **Arrayindex** `ar[2] = 42;` durch die Komposition `Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))
10        Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
11      ]
12   ]

```

Code 0.19: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 0.20 wird zuerst die **rechte** Seite des **rechtsassoziativen** Zuweisungsoperators `=`, bzw. des **Container-Knotens** der diesen darstellt ausgewertet: `Exp(Num('42'))`.

Danach ist das Vorgehen, bzw. sind die Kompositionen, die dieses darauffolgende Vorgehen darstellen: `Ref(Global(Num('0'))), Exp(Num('2'))` und `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` identisch zum **Anfangsteil** und **Mittelteil** aus dem vorherigen Subkapitel 0.0.2.2. Es wird die **Adresse** des **Index**, dem das Ergebnis der Ausdrucks auf der rechten Seite des **Zuweisungsoperators** `=` zugewiesen wird berechnet, wie in Subkapitel 0.0.2.2.

Zum Schluss stellt die **Komposition** `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))`<sup>5</sup> die Zuweisung `=` des Ergebnisses des Ausdrucks auf der **rechten** Seite der Zuweisung zum **Arrayindex**, dessen **Adresse** im Schritt danach berechnet wurde dar.

<sup>5</sup>Ist in Tabelle ?? genauer beschrieben ist

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))
8         // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
9         Exp(Num('42'))
10        Ref(Global(Num('0')))
11        Exp(Num('2'))
12        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
13        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
14        Return(Empty())
15      ]
16    ]

```

Code 0.20: PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.21 werden die **Kompositionen** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` und `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))
8         # // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
9         # Exp(Num('42'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 42;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Ref(Global(Num('0')))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI IN1 0;
16        ADD IN1 DS;
17        STOREIN SP IN1 1;
18        # Exp(Num('2'))
19        SUBI SP 1;
20        LOADI ACC 2;
21        STOREIN SP ACC 1;
22        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
23        LOADIN SP IN1 2;
24        LOADIN SP IN2 1;
25        MULTI IN2 1;
26        ADD IN1 IN2;
27        ADDI SP 1;
28        STOREIN SP IN1 1;
29        # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))

```



```
30      LOADIN SP IN1 1;  
31      LOADIN SP ACC 2;  
32      ADDI SP 2;  
33      STOREIN IN1 ACC 0;  
34      # Return(Empty())  
35      LOADIN BAF PC -1;  
36  ]  
37  ]
```

Code 0.21: RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex

## 0.0.3 Umsetzung von Structs

### 0.0.3.1 Deklaration und Definition von Structtypen

Die **Deklaration** eines neuen **Structtyps** (z.B. `struct st {int len; int ar[2];};`) und die **Definition** einer Variable mit diesem **Structtyp** (z.B. `struct st st_var;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.22 erläutert.

```

1 struct st {int len; int ar[2];};
2
3 void main() {
4     struct st st_var;
5 }
```

Code 0.22: PicoC-Code für die Deklaration eines Structtyps

Bevor irgendwas definiert werden kann, muss erstmal ein **Structtyp** deklariert werden. Im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.24 wird die **Deklaration eines Structtyps** `struct st {int len; int ar[2];};` durch die Komposition `StructDecl(Name('st'), [Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('len')), Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))])` dargestellt.

Die **Definition** einer Variable mit diesem **Structtyp** `struct st st_var;` wird durch die Komposition `Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var'))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_decl_def.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('len'))
8         Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Exp(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var'))))
16      ]
17  ]
```

Code 0.23: Abstract Syntax Tree für die Deklaration eines Structtyps

Für den **Structtyp** selbst wird in der **Symboltabelle**, die in Code 0.24 dargestellt ist ein Eintrag mit dem **Schlüssel** `st` erstellt. Die Felder dieses Eintrags `type_qualifier`, `datatype`, `name`, `position` und `size` sind wie üblich belegt, allerdings sind in dem `value_address`-Feld die Attribute des **Structtyps** `[Name('len@st'), Name('ar@st')]` aufgelistet, sodass man über den **Structtyp** `st` die **Attribute** des Structtyps in der **Symboltabelle** nachschlagen kann. Die Schlüssel der **Attribute** haben einen **Suffix** `@st` angehängt, der eine Art **Scope** innerhalb des **Structtyps** für seine Attribut darstellt. Es gilt foglich, dass **innerhalb** eines **Structtyps**

zwei Attribute nicht gleich benannt werden können, aber dafür zwei **unterschiedliche Structtypen** ihre Attribute gleich benennen können.

Jedes der **Attribute** [Name('len@st'), Name('ar@st')] erhält auch einen eigenen Eintrag in der **Symboltabelle**, wobei die Felder `type_qualifier`, `datatype`, `name`, `value_address`, `position` und `size` wie üblich belegt werden. Die Felder `type_qualifier`, `datatype` und `name` werden z.B. bei Name('ar@st') mithilfe der Attribute von `Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))]` belegt.

Für die **Definition** einer Variable `st_var@main` mit diesem **Structtyp** `st` wird ein Eintrag in der **Symboltabelle** angelegt. Das `datatype`-Feld enthält dabei den Namen des **Structtyps** als Komposition `StructSpec(Name('st'))`, wodurch jederzeit alle wichtigen Informationen zu diesem **Structtyp**<sup>6</sup> und seinen **Attributen** in der **Symboltabelle** nachgeschlagen werden können.

Die **Größe** einer Variable `st_var`, die ihm `size`-Feld des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist und mit dem **Structtyp** `struct st {datatype1 attr1; ... datatypen attrn;}`<sup>a</sup> definiert ist (`struct st st_var;`), berechnet sich dabei aus der Summe der **Größen** der einzelnen **Datentypen** `datatype1 ... datatypen` der **Attribute** `attr1, ... attrn` des **Structtyps**:  $size(st) = \sum_{i=1}^n size(datatype_i)$ .

<sup>a</sup>Hier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache *L<sub>PicoC</sub>* nicht die fragwürdige Designentscheidung, auch die eckigen Klammern `[]` für die Definition eines Arrays **vor** die Variable zu schreiben von *L<sub>C</sub>* übernommen. Es wird so getann, als würde der komplette **Datentyp** immer **hinter** der Variable stehen: `datatype var`.

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type_qualifier:      Empty()
6       datatype:            IntType('int')
7       name:                Name('len@st')
8       value_or_address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('15'))
10      size:                 Num('1')
11    },
12    Symbol
13    {
14      type_qualifier:      Empty()
15      datatype:            ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))
16      name:                Name('ar@st')
17      value_or_address:    Empty()
18      position:            Pos(Num('1'), Num('24'))
19      size:                 Num('2')
20    },
21    Symbol
22    {
23      type_qualifier:      Empty()
24      datatype:            StructDecl(Name('st'), [Alloc(Writable(), IntType('int'),
25      ↪ Name('len'))Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')),
26      ↪ Name('ar'))])
27      name:                Name('st')
28      value_or_address:    [Name('len@st'), Name('ar@st')]
29      position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
30      size:                 Num('3')

```

<sup>6</sup>Wie z.B. vor allem die **Größe** bzw. **Anzahl an Speicherzellen**, die dieser **Structtyp** einnimmt.

```

29     },
30     Symbol
31     {
32         type qualifier:      Empty()
33         datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
34         name:                Name('main')
35         value or address:    Empty()
36         position:            Pos(Num('3'), Num('5'))
37         size:                Empty()
38     },
39     Symbol
40     {
41         type qualifier:      Writeable()
42         datatype:            StructSpec(Name('st'))
43         name:                Name('st_var@main')
44         value or address:    Num('0')
45         position:            Pos(Num('4'), Num('12'))
46         size:                Num('3')
47     }
48 ]

```

Code 0.24: Symboltabelle für die Deklaration eines Structtyps

### 0.0.3.2 Initialisierung von Structs

Die **Initialisierung eines Structs** wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.25 erklärt.

```

1 struct st1 {int *attr[2];};
2
3 struct st2 {int attr1; struct st1 attr2;};
4
5 void main() {
6     int var = 42;
7     struct st2 st = {.attr1=var, .attr2={.attr={{&var, &var}}}};
8 }

```

Code 0.25: PicoC-Code für Initialisierung von Structs

Im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.26 wird die **Initialisierung eines Structs** `struct st1 st = {.attr1=var, .attr2={.attr={{&var, &var}}}}` mithilfe der **Komposition** `Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1'), Name('st'), Struct(...)))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_init.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st1',
6       [
7         Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))),
7         ↪ Name('attr'))
8     ],

```

```

9      StructDecl
10      Name 'st2',
11      [
12          Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('attr1'))
13          Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st1')), Name('attr2'))
14      ],
15      FunDef
16      VoidType 'void',
17      Name 'main',
18      [],
19      [
20          Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
21          Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st2')), Name('st')),
22              ↳ Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')), Assign(Name('attr2'),
23              ↳ Struct([Assign(Name('attr'), Array([Array([Ref(Name('var')),
24              ↳ Ref(Name('var'))]))]))]))))
25      ]
26  ]

```

Code 0.26: Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 0.27 wird die **Komposition** `Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')), Struct(...))` auf fast dieselbe Weise ausgewertet, wie bei der **Initialisierung eines Arrays** in Subkapitel 0.0.2.1 daher wird um keine Wiederholung zu betreiben auf Subkapitel 0.0.2.1 verwiesen. Um das ganze interessanter zu gestalten wurde das Beispiel in Code 0.25 so gewählt, dass sich daran eine komplexere, mehrstufige Initialisierung mit **verschiedenen** Datentypen erklären lässt.

Der **Struct-Initializer** Teilbaum `Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')), Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))]))`, der beim **Struct-Initializer Container-Knoten** anfängt, wird auf dieselbe Weise nach dem **Depth-First-Search** Prinzip von **links-nach-rechts** ausgewertet, wie es bei der **Initialisierung eines Arrays** in Subkapitel 0.0.2.1 bereits erklärt wurde.

Beim **Iterieren** über den **Teilbaum**, muss beim **Struct-Initializer** nur beachtet werden, dass bei den `Assign(lhs, exp)`-Knoten, über welche die **Attributzuweisung** dargestellt wird (z.B. `Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))))` der Teilbaum beim rechten `exp` Attribut weitergeht.

Im Allgemeinen gibt es beim **Initialisieren** eines **Arrays** oder **Structs** im Teilbaum auf der **rechten Seite**, der beim jeweiligen obersten **Initializer** anfängt immer nur 3 Fälle, man hat es auf der **rechten Seite** entweder mit einem **Struct-Initializer**, einem **Array-Initializer** oder einem **Logischen Ausdruck** zu tun. Bei **Array-** und **Struct-Initializer** wird einfach über diese nach dem **Depth-First-Search** Schema von **links-nach-rechts** iteriert und die Ergebnisse der **Logischen Ausdrücken** in den **Blättern** auf den **Stack** gespeichert. Der Fall, dass ein **Logischer Ausdruck** vorliegt erübrigt sich damit.

```

1 File
2   Name './example_struct_init.picoc_mon',
3   [
4       Block
5       Name 'main.0',
6       [

```

```

7      // Assign(Name('var'), Num('42'))
8      Exp(Num('42'))
9      Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10     // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')),
    ↪ Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'),
    ↪ Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))]))
11     Exp(Global(Num('0')))
12     Ref(Global(Num('0')))
13     Ref(Global(Num('0')))
14     Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))
15     Return(Empty())
16 ]
17 ]

```

Code 0.27: PicoC-Mon Pass für Initialisierung von Structs

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.28 werden die **Kompositionen** `Exp(exp)`, `Ref(exp)` und `Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_struct_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')),
    ↪ Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'),
    ↪ Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))]))
17        # Exp(Global(Num('0')))
18        SUBI SP 1;
19        LOADIN DS ACC 0;
20        STOREIN SP ACC 1;
21        # Ref(Global(Num('0')))
22        SUBI SP 1;
23        LOADI IN1 0;
24        ADD IN1 DS;
25        STOREIN SP IN1 1;
26        # Ref(Global(Num('0')))
27        SUBI SP 1;
28        LOADI IN1 0;
29        ADD IN1 DS;
30        STOREIN SP IN1 1;
31        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))
32        LOADIN SP ACC 1;
33        STOREIN DS ACC 3;

```

```

34     LOADIN SP ACC 2;
35     STOREIN DS ACC 2;
36     LOADIN SP ACC 3;
37     STOREIN DS ACC 1;
38     ADDI SP 3;
39     # Return(Empty())
40     LOADIN BAF PC -1;
41 ]
42 ]

```

Code 0.28: RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Structs

### 0.0.3.3 Zugriff auf Structattribut

Der **Zugriff auf ein Structattribut** (z.B. `st.y`;) wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.29 erklärt.

```

1 struct pos {int x; int y;};
2
3 void main() {
4     struct pos st = {.x=4, .y=2};
5     st.y;
6 }

```

Code 0.29: PicoC-Code für Zugriff auf Structattribut

Im **Abstract Syntax Tree** in Code 0.30 wird der **Zugriff auf ein Structattribut** `st.y` mithilfe der **Komposition** `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('x'))
8         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('y'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
16              ↪ Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
17        Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
18      ]
19    ]

```

Code 0.30: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 0.31 wird die Komposition  $\text{Exp}(\text{Attr}(\text{Name}('st'), \text{Name}('y')))$  auf ähnliche Weise ausgewertet, wie die Komposition, die einen **Zugriff auf ein Arrayelement**  $\text{Exp}(\text{Subscr}(\text{Name}('ar'), \text{Num}('0')))$  in Subkapitel 0.0.2.2 darstellt. Daher wird hier, um Wiederholung zu vermeiden nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsten auf das Subkapitel 0.0.2.2 verwiesen.

Die Komposition  $\text{Exp}(\text{Attr}(\text{Name}('st'), \text{Name}('y')))$  wird genauso, wie in Subkapitel 0.0.2.2 durch Kompositionen ersetzt, die sich in **Anfangsteil** 0.0.4.1, **Mittelteil** 0.0.4.2 und **Schlusssteil** 0.0.4.3 aufteilen lassen. In diesem Fall sind es  $\text{Ref}(\text{Global}(\text{Num}('0')))$  (**Anfangsteil**),  $\text{Ref}(\text{Attr}(\text{Stack}(\text{Num}('1')), \text{Name}('y')))$  (**Mittelteil**) und  $\text{Exp}(\text{Stack}(\text{Num}('1')))$  (**Schlusssteil**). Der **Anfangsteil** und **Schlusssteil** sind genau gleich, wie in Subkapitel 0.0.2.2.

Nur für den **Mittelteil** wird eine andere Komposition  $\text{Ref}(\text{Attr}(\text{Stack}(\text{Num}('1')), \text{Name}('y')))$  gebraucht. Diese Komposition  $\text{Ref}(\text{Attr}(\text{Stack}(\text{Num}('1')), \text{Name}('y')))$  erfüllt die Aufgabe die **Adresse**, ab der das **Attribut** auf das zugegriffen wird anfängt zu berechnen. Dabei wurde die **Anfangsadresse** des **Structs** indem dieses Attribut liegt bereits vorher auf den **Stack** gelegt.

Im Gegensatz zur Komposition  $\text{Ref}(\text{Subscr}(\text{Stack}(\text{Num}('2')), \text{Stack}(\text{Num}('1'))))$  beim **Zugriff auf einen Arrayindex** in Subkapitel 0.0.2.2, muss hier vorher nichts anderes als die **Anfangsadresse** des **Structs** auf dem **Stack** liegen. Das **Structattribut** auf welches zugegriffen wird steht bereits in der Komposition  $\text{Ref}(\text{Attr}(\text{Stack}(\text{Num}('1')), \text{Name}('y')))$ , nämlich  $\text{Name}('y')$ . Den **Structtyp**, dem dieses Attribut gehört, kann man aus dem versteckten Attribut **datatype** herauslesen. Das versteckte Attribut wird während des Kompiliervorgangs im **PiocC-Mon Pass** dem **Container-Knoten**  $\text{Ref}(\text{exp}, \text{datatype})$  angehängt.

Die Berechnung der **Adresse**, für eine Folge von **Zugriffen auf Structattribute**  $\text{st.attr}_{1,j_1} \dots \text{attr}_{n,j_n}$  mehrerer **Structs**  $\text{struct st}_i \text{ st\_var}_i$  unterschiedlicher **Structtypen**  $\text{struct st}_i \{ \text{datatype}_{i,1} \text{ attr}_{i,1}; \dots \text{datatype}_{i,m} \text{ attr}_{i,m}; \}$ , kann mittels der Formel 0.0.3:

$$\text{ref}(\text{st.attr}_{1,j_1} \dots \text{attr}_{n,j_n}) = \text{ref}(\text{st}_1) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{j_i | \text{attr}_{i,j_i}} \text{size}(\text{datatype}_{i,k}) \quad (0.0.2)$$

aus der Betriebssysteme Vorlesung<sup>a</sup> berechnet werden<sup>b</sup>.

Die Kompositionen  $\text{Ref}(\text{Global}(\text{Num}('0')))$  repräsentiert dabei den Summanden  $\text{ref}(\text{st}_1)$  in der Formel.

Der Komposition  $\text{Exp}(\text{Attr}(\text{Name}('st'), \text{Name}('y')))$  repräsentiert dabei einen Summanden  $\sum_{k=1}^{j_i | \text{attr}_{i,j_i}} \text{size}(\text{datatype}_{i,k})$  in der Formel.

Die Komposition  $\text{Exp}(\text{Stack}(\text{Num}('1')))$  repräsentiert dabei das Lesen des **Inhalts**  $M[\text{ref}(\text{st.attr}_{1,j_1} \dots \text{attr}_{n,j_n})]$  der Speicherzelle an der finalen **Adresse**  $\text{ref}(\text{st.attr}_{1,j_1} \dots \text{attr}_{n,j_n})$ .

In Unterkapitel 0.0.4.2 wird eine allgemeine Formel für **Zugriffe auf Structattribute, Arrayelemente und Pointer** erklärt.

<sup>a</sup>Scholl, „Betriebssysteme“.

<sup>b</sup> $\text{ref}(\text{exp})$  steht dabei für die Berechnung der **Adresse** von  $\text{exp}$ , wobei  $\text{exp}$  z.B.  $\text{ar}[3][2]$  sein könnte.

```
1 File
2   Name './example_struct_attr_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
```



```

6      [
7      // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8      ↪ Num('2'))]))
9      Exp(Num('4'))
10     Exp(Num('2'))
11     Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
12     // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
13     Ref(Global(Num('0')))
14     Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
15     Exp(Stack(Num('1')))
16     Return(Empty())
17 ]

```

Code 0.31: PicoC-Mon Pass für Zugriff auf Structattribut

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.32 werden die **Kompositionen** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` und `Exp(Stack(Num('1')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8       ↪ Num('2'))]))
9       # Exp(Num('4'))
10      SUBI SP 1;
11      LOADI ACC 4;
12      STOREIN SP ACC 1;
13      # Exp(Num('2'))
14      SUBI SP 1;
15      LOADI ACC 2;
16      STOREIN SP ACC 1;
17      # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
18      LOADIN SP ACC 1;
19      STOREIN DS ACC 1;
20      LOADIN SP ACC 2;
21      STOREIN DS ACC 0;
22      ADDI SP 2;
23      # // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
24      # Ref(Global(Num('0')))
25      SUBI SP 1;
26      LOADI IN1 0;
27      ADD IN1 DS;
28      STOREIN SP IN1 1;
29      # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
30      LOADIN SP IN1 1;
31      ADDI IN1 1;
32      STOREIN SP IN1 1;
33      # Exp(Stack(Num('1')))
34      LOADIN SP IN1 1;

```

```

34     LOADIN IN1 ACC 0;
35     STOREIN SP ACC 1;
36     # Return(Empty())
37     LOADIN BAF PC -1;
38 ]
39 ]

```

Code 0.32: RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut

#### 0.0.3.4 Zuweisung an Structattribut

Die **Zuweisung an ein Structattribut** (z.B. `st.y = 42;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.33 erklärt.

```

1 struct pos {int x; int y;};
2
3 void main() {
4     struct pos st = {.x=4, .y=2};
5     st.y = 42;
6 }

```

Code 0.33: PicoC-Code für Zuweisung an Structattribut

Im **Abstract Syntax Tree** wird eine **Zuweisung an ein Structattribut** (z.B. `st.y = 42;`) durch die Komposition `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('x'))
8         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('y'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
16              ↪ Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
17        Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
18      ]
19    ]

```

Code 0.34: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 0.35 wird die Komposition `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` auf ähnliche Weise ausgewertet, wie die Komposition, die einen **Zugriff auf ein Arrayelement**

`Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))` in Subkapitel 0.0.2.3 darstellt. Daher wird hier, um Wiederholung zu vermeiden nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsten auf das Unterkapitel 0.0.2.3 verwiesen.

Im Gegensatz zum Vorgehen in Unterkapitel 0.0.2.3 muss hier für das Auswerten des **linken** Container-Knoten `Attr(Name('st'), Name('y'))` von `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` wie in Subkapitel 0.0.3.3 vorgegangen werden.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8           ↪ Num('2'))]))
9         Exp(Num('4'))
10        Exp(Num('2'))
11        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
12        // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
13        Exp(Num('42'))
14        Ref(Global(Num('0')))
15        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
16        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
17      ]
18    ]

```

Code 0.35: PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Structattribut

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.36 werden die **Kompositionen** `Exp(Num('42'))`, `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` und `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8           ↪ Num('2'))]))
9         # Exp(Num('4'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 4;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Exp(Num('2'))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI ACC 2;
16        STOREIN SP ACC 1;
17        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
18        LOADIN SP ACC 1;
19        STOREIN DS ACC 1;

```

```
19     LOADIN SP ACC 2;
20     STOREIN DS ACC 0;
21     ADDI SP 2;
22     # // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
23     # Exp(Num('42'))
24     SUBI SP 1;
25     LOADI ACC 42;
26     STOREIN SP ACC 1;
27     # Ref(Global(Num('0')))
28     SUBI SP 1;
29     LOADI IN1 0;
30     ADD IN1 DS;
31     STOREIN SP IN1 1;
32     # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
33     LOADIN SP IN1 1;
34     ADDI IN1 1;
35     STOREIN SP IN1 1;
36     # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
37     LOADIN SP IN1 1;
38     LOADIN SP ACC 2;
39     ADDI SP 2;
40     STOREIN IN1 ACC 0;
41     # Return(Empty())
42     LOADIN BAF PC -1;
43 ]
44 ]
```

Code 0.36: RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut

#### 0.0.4 Umsetzung des Zugriffs auf Derived Datatypes im Allgemeinen

Im Folgenden werden anhand mehrerer Beispiele die einzelnen Abschnitte **Anfangsteil**, **Mittelteil** und **Schlusssteil** bei der Kompilierung von **Zugriffen auf Arrayelemente**, **Structattribute** und **Pointer** bei gemischten Ausdrücken, wie `(*st_first.ar)[0]`; einzeln isoliert betrachtet und erläutert.

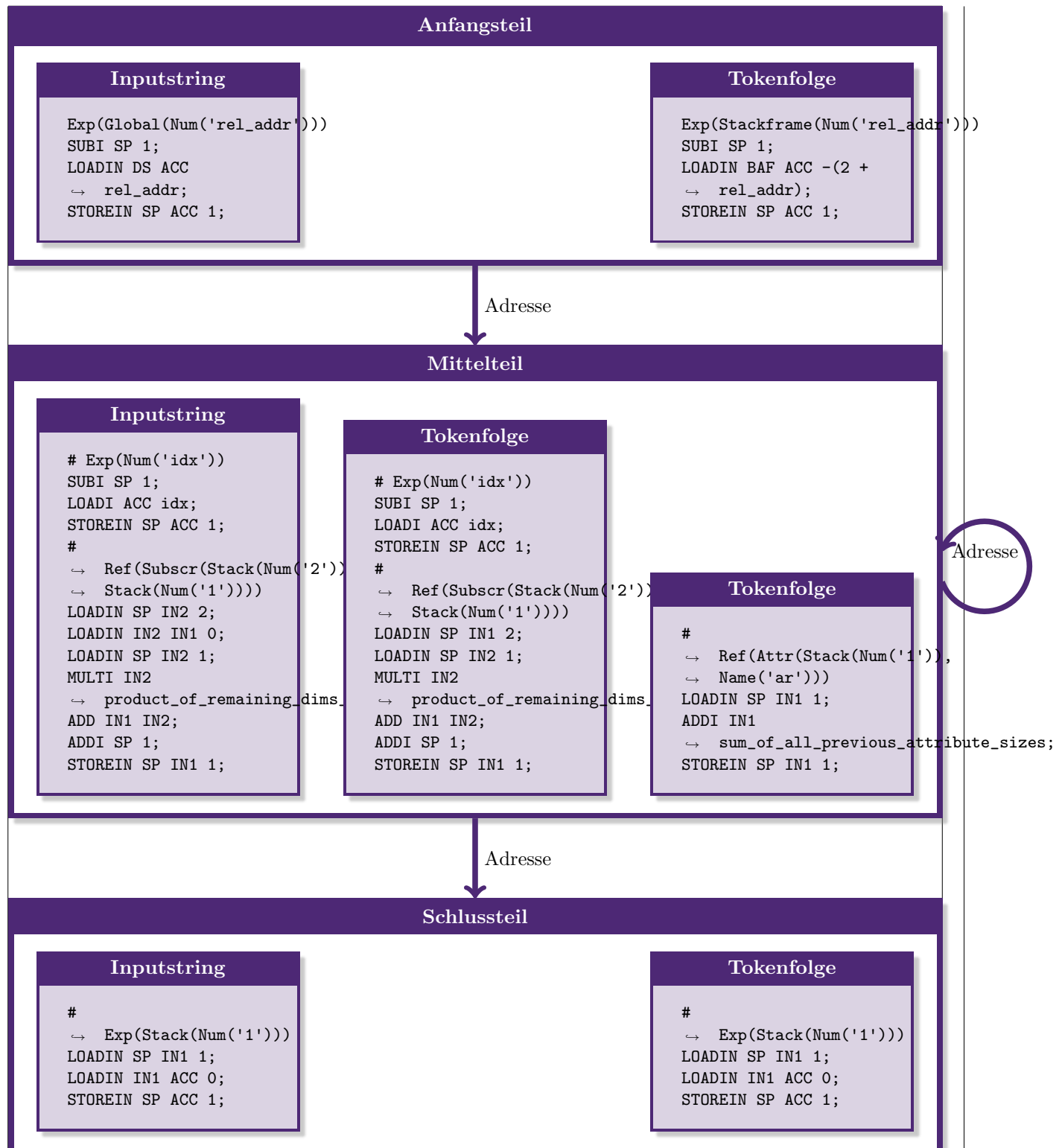


Abbildung 1: Veranschaulichung des Zugriffs auf Derived Datatypes

## 0.0.4.1 Anfangsteil für Globale Statische Daten und Stackframe

```

1 struct ar_with_len {int len; int ar[2]};
2
3 void main() {
4     struct ar_with_len st_ar[3];
5     int (*pntr2)[3];
6     pntr2;
7 }
8
9 void fun() {
10    struct ar_with_len st_ar[3];
11    int (*pntr1)[3];
12    pntr1;
13 }

```

Code 0.37: PicoC-Code für den Anfangsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'ar_with_len',
6       [
7         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('len'))
8         Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
16          ↪ Name('st_ar')))
17        Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'),
18          ↪ IntType('int')))), Name('pntr2')))
19        Exp(Name('pntr2'))
20      ],
21    FunDef
22      VoidType 'void',
23      Name 'fun',
24      [],
25      [
26        Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
27          ↪ Name('st_ar')))
28        Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
29          ↪ Name('pntr1')))
30        Exp(Name('pntr1'))
31      ]
32    ]
33  ]

```

Code 0.38: Abstract Syntax Tree für den Anfangsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
8         ↪ Name('st_ar')))
9         // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'),
10        ↪ IntType('int')))), Name('ptr2')))
11        // Exp(Name('ptr2'))
12        Exp(Global(Num('9')))
13        Return(Empty())
14      ],
15    Block
16      Name 'fun.0',
17      [
18        // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
19        ↪ Name('st_ar')))
20        // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
21        ↪ Name('ptr1')))
22        // Exp(Name('ptr1'))
23        Exp(Stackframe(Num('9')))
24        Return(Empty())
25      ]
26    ]
27  ]

```

Code 0.39: PicoC-Mon Pass für den Anfangsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
8         ↪ Name('st_ar')))
9         # // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
10        ↪ PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))), Name('ptr2')))
11        # // Exp(Name('ptr2'))
12        # Exp(Global(Num('9')))
13        SUBI SP 1;
14        LOADIN DS ACC 9;
15        STOREIN SP ACC 1;
16        # Return(Empty())
17        LOADIN BAF PC -1;
18      ],
19    Block
20      Name 'fun.0',
21      [
22        # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
23        ↪ Name('st_ar')))
24        # // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
25        ↪ IntType('int')))), Name('ptr1')))

```

```

22     # // Exp(Name('pntri'))
23     # Exp(Stackframe(Num('9')))
24     SUBI SP 1;
25     LOADIN BAF ACC -11;
26     STOREIN SP ACC 1;
27     # Return(Empty())
28     LOADIN BAF PC -1;
29 ]
30 ]

```

Code 0.40: RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil

#### 0.0.4.2 Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes

```

1 struct st {int (*ar)[1]};
2
3 void main() {
4     int var[1] = {42};
5     struct st st_var = {.ar=&var};
6     (*st_var.ar)[0];
7 }

```

Code 0.41: PicoC-Code für den Mittelteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1')), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')),
8           ↪ Name('ar'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('var')),
16          ↪ Array([Num('42')]))
17        Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var')),
18          ↪ Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
19        Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('st_var'), Name('ar')), Num('0')), Num('0')))
20      ]
21    ]

```

Code 0.42: Abstract Syntax Tree für den Mittelteil



Die Berechnung der **Adresse**, für eine Folge von **Zugriffen auf Structattribute**  $st.attr_{1,j_1} \dots attr_{n,j_n}$  mehrerer **Structs**  $struct\ st_i\ st\_var_i$  unterschiedlicher **Structtypen**  $struct\ st_i\ \{datatype_{i,1}\ attr_{i,1}; \dots datatype_{i,m}\ attr_{i,m};\}$ , kann mittels der Formel 0.0.3:

$$ref(st.attr_{1,j_1} \dots attr_{n,j_n}) = ref(st_1) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{j_i | attr_{i,j_i}} size(datatype_{i,k}) \quad (0.0.3)$$

aus der Betriebssysteme Vorlesung<sup>a</sup> berechnet werden<sup>b</sup>.

Die Kompositionen  $Ref(Global(Num('0')))$  repräsentiert dabei den Summanden  $ref(st_1)$  in der Formel.

Der Komposition  $Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))$  repräsentiert dabei einen Summanden  $\sum_{k=1}^{j_i | attr_{i,j_i}} size(datatype_{i,k})$  in der Formel.

Die Komposition  $Exp(Stack(Num('1')))$  repräsentiert dabei das Lesen des **Inhalts**  $M[ref(st.attr_{1,j_1} \dots attr_{n,j_n})]$  der Speicherzelle an der finalen **Adresse**  $ref(st.attr_{1,j_1} \dots attr_{n,j_n})$ .

In Unterkapitel 0.0.4.2 wird eine allgemeine Formel für **Zugriffe auf Structattribute, Arrayelemente und Pointer** erklärt.

<sup>a</sup>Scholl, „Betriebssysteme“.

<sup>b</sup> $ref(exp)$  steht dabei für die Berechnung der **Adresse** von  $exp$ , wobei  $exp$  z.B.  $ar[3][2]$  sein könnte.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('st_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
11        Ref(Global(Num('0')))
12        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13        // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('st_var'), Name('ar')), Num('0')), Num('0')))
14        Ref(Global(Num('1')))
15        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
16        Exp(Num('0'))
17        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
18        Exp(Num('0'))
19        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
20        Exp(Stack(Num('1')))
21        Return(Empty())
22      ]
23    ]

```

Code 0.43: PicoC-Mon Pass für den Mittelteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Assign(Name('st_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
17        # Ref(Global(Num('0')))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI IN1 0;
20        ADD IN1 DS;
21        STOREIN SP IN1 1;
22        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
23        LOADIN SP ACC 1;
24        STOREIN DS ACC 1;
25        ADDI SP 1;
26        # // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('st_var'), Name('ar')), Num('0')), Num('0')))
27        # Ref(Global(Num('1')))
28        SUBI SP 1;
29        LOADI IN1 1;
30        ADD IN1 DS;
31        STOREIN SP IN1 1;
32        # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
33        LOADIN SP IN1 1;
34        ADDI IN1 0;
35        STOREIN SP IN1 1;
36        # Exp(Num('0'))
37        SUBI SP 1;
38        LOADI ACC 0;
39        STOREIN SP ACC 1;
40        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
41        LOADIN SP IN2 2;
42        LOADIN IN2 IN1 0;
43        LOADIN SP IN2 1;
44        MULTI IN2 1;
45        ADD IN1 IN2;
46        ADDI SP 1;
47        STOREIN SP IN1 1;
48        # Exp(Num('0'))
49        SUBI SP 1;
50        LOADI ACC 0;
51        STOREIN SP ACC 1;
52        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
53        LOADIN SP IN1 2;
54        LOADIN SP IN2 1;
55        MULTI IN2 1;
56        ADD IN1 IN2;
57        ADDI SP 1;

```

```

58     STOREIN SP IN1 1;
59     # Exp(Stack(Num('1')))
60     LOADIN SP IN1 1;
61     LOADIN IN1 ACC 0;
62     STOREIN SP ACC 1;
63     # Return(Empty())
64     LOADIN BAF PC -1;
65 ]
66 ]

```

Code 0.44: RETI-Blocks Pass für den Mittelteil

### 0.0.4.3 Schlussteil für die verschiedenen Derived Datatypes

```

1 struct st {int attr[2];};
2
3 void main() {
4     int ar1[1][2];
5     struct st ar2[1];
6     int var = 42;
7     int *pntr1 = &var;
8     int **pntr2 = &pntr1;
9
10    ar1[0];
11    ar2[0];
12    *pntr2;
13 }

```

Code 0.45: PicoC-Code für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr'))
8       ],
9     FunDef
10      VoidType 'void',
11      Name 'main',
12      [],
13      [
14        Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], Num('2')), IntType('int')), Name('ar1')))
15        Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))), Name('ar2')))
16        Assign(Alloc(Writable(), IntType('int')), Name('var'), Num('42'))
17        Assign(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr1')),
18              ↪ Ref(Name('var')))
19        Assign(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('2'), IntType('int')), Name('pntr2')),
20              ↪ Ref(Name('pntr1')))
21        Exp(Subscr(Name('ar1'), Num('0')))
22        Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))

```

```

21   Exp(Deref(Name('pntr2'), Num('0')))
22   ]
23 ]

```

Code 0.46: Abstract Syntax Tree für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1'), Num('2')], IntType('int')),
8         ↪ Name('ar1'))
9         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))),
10        ↪ Name('ar2'))
11        // Assign(Name('var'), Num('42'))
12        Exp(Num('42'))
13        Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
14        // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
15        Ref(Global(Num('4')))
16        Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
17        // Assign(Name('pntr2'), Ref(Name('pntr1')))
18        Ref(Global(Num('5')))
19        Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
20        // Exp(Subscr(Name('ar1'), Num('0')))
21        Ref(Global(Num('0')))
22        Exp(Num('0'))
23        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
24        Exp(Stack(Num('1')))
25        // Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))
26        Ref(Global(Num('2')))
27        Exp(Num('0'))
28        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
29        Exp(Stack(Num('1')))
30        // Exp(Subscr(Name('pntr2'), Num('0')))
31        Ref(Global(Num('6')))
32        Exp(Num('0'))
33        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
34        Exp(Stack(Num('1')))
35        Return(Empty())
36      ]
37    ]
38  ]

```

Code 0.47: PicoC-Mon Pass für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',

```

```

6      [
7      # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1'), Num('2')], IntType('int')),
8      ↪ Name('ar1'))
9      # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))),
10     ↪ Name('ar2'))
11     # // Assign(Name('var'), Num('42'))
12     # Exp(Num('42'))
13     SUBI SP 1;
14     LOADI ACC 42;
15     STOREIN SP ACC 1;
16     # Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
17     LOADIN SP ACC 1;
18     STOREIN DS ACC 4;
19     ADDI SP 1;
20     # // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
21     # Ref(Global(Num('4')))
22     SUBI SP 1;
23     LOADI IN1 4;
24     ADD IN1 DS;
25     STOREIN SP IN1 1;
26     # Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
27     LOADIN SP ACC 1;
28     STOREIN DS ACC 5;
29     ADDI SP 1;
30     # // Assign(Name('pntr2'), Ref(Name('pntr1')))
31     # Ref(Global(Num('5')))
32     SUBI SP 1;
33     LOADI IN1 5;
34     ADD IN1 DS;
35     STOREIN SP IN1 1;
36     # Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
37     LOADIN SP ACC 1;
38     STOREIN DS ACC 6;
39     ADDI SP 1;
40     # // Exp(Subscr(Name('ar1'), Num('0')))
41     # Ref(Global(Num('0')))
42     SUBI SP 1;
43     LOADI IN1 0;
44     ADD IN1 DS;
45     STOREIN SP IN1 1;
46     # Exp(Num('0'))
47     SUBI SP 1;
48     LOADI ACC 0;
49     STOREIN SP ACC 1;
50     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
51     LOADIN SP IN1 2;
52     LOADIN SP IN2 1;
53     MULTI IN2 2;
54     ADD IN1 IN2;
55     ADDI SP 1;
56     STOREIN SP IN1 1;
57     # // not included Exp(Stack(Num('1')))
58     # // Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))
59     # Ref(Global(Num('2')))
60     SUBI SP 1;
61     LOADI IN1 2;
62     ADD IN1 DS;

```

```
61     STOREIN SP IN1 1;
62     # Exp(Num('0'))
63     SUBI SP 1;
64     LOADI ACC 0;
65     STOREIN SP ACC 1;
66     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
67     LOADIN SP IN1 2;
68     LOADIN SP IN2 1;
69     MULTI IN2 2;
70     ADD IN1 IN2;
71     ADDI SP 1;
72     STOREIN SP IN1 1;
73     # Exp(Stack(Num('1'))))
74     LOADIN SP IN1 1;
75     LOADIN IN1 ACC 0;
76     STOREIN SP ACC 1;
77     # // Exp(Subscr(Name('pntr2'), Num('0'))))
78     # Ref(Global(Num('6'))))
79     SUBI SP 1;
80     LOADI IN1 6;
81     ADD IN1 DS;
82     STOREIN SP IN1 1;
83     # Exp(Num('0'))
84     SUBI SP 1;
85     LOADI ACC 0;
86     STOREIN SP ACC 1;
87     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
88     LOADIN SP IN2 2;
89     LOADIN IN2 IN1 0;
90     LOADIN SP IN2 1;
91     MULTI IN2 1;
92     ADD IN1 IN2;
93     ADDI SP 1;
94     STOREIN SP IN1 1;
95     # // not included Exp(Stack(Num('1'))))
96     # Return(Empty())
97     LOADIN BAF PC -1;
98 ]
99 ]
```

Code 0.48: RETI-Blocks Pass für den Schlussteil

---

---

# Literatur

## Online

- *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project*. URL: <https://gcc.gnu.org/> (besucht am 13.07.2022).

## Vorlesungen

- Scholl, Christoph. „Betriebssysteme“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2020. URL: [https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach\\_main.php?id=157](https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach_main.php?id=157) (besucht am 09.07.2022).