
ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

Abgabedatum: 28th 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	38
0.0.4.2	Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes	40
0.0.4.3	Schlusssteil für die verschiedenen Derived Datatypes	43

Abbildungsverzeichnis

1	Allgemeine 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	38
0.38	Abstract Syntax Tree für den Anfangsteil	39
0.39	PicoC-Mon Pass für den Anfangsteil	39
0.40	RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil	40
0.41	PicoC-Code für den Mittelteil	40
0.42	Abstract Syntax Tree für den Mittelteil	41
0.43	PicoC-Mon Pass für den Mittelteil	42
0.44	RETI-Blocks Pass für den Mittelteil	43
0.45	PicoC-Code für den Schlussteil	43
0.46	Abstract Syntax Tree für den Schlussteil	44
0.47	PicoC-Mon Pass für den Schlussteil	45

0.48 RETI-Blocks Pass für den Schlussteil	47
---	----

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]`) verhält¹. 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.

¹In 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 kann². 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**

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

Statischen Daten³.

Das **Größe** des Arrays datatype ar[dim₁]...[dim_k], 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**: $\text{size}(\text{datatype}(\text{ar})) = \left(\prod_{j=1}^n \text{dim}_j\right) \cdot \text{size}(\text{datatype})^a$.

^aDie **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

³Wenn 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** geschrieben⁴.

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')))`,

⁴Da 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     ]
13   ]

```

```

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^a berechnet werden^b.

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])`.

^aScholl, „Betriebssysteme“.

^b`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')))`⁵ die Zuweisung `=` des Ergebnisses des Ausdrucks auf der **rechten** Seite der Zuweisung zum **Arrayindex**, dessen **Adresse** im Schritt danach berechnet wurde dar.

⁵Ist 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(Writable(), 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(Writable(), 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**⁶ 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;}`^a 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**: $size(st) = \sum_{i=1}^n size(datatype_i)$.

^aHier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache *L_{PicoC}* nicht die fragwürdige Designentscheidung, auch die eckigen Klammern `[]` für die Definition eines Arrays **vor** die Variable zu schreiben von *L_C* 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')

```

⁶Wie 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 Kompilervorgangs im **PiocC-Mon Pass** dem **Container-Knoten** $\text{Ref}(\text{exp}, \text{datatype})$ angehängt.

Die Berechnung der **Adresse**, für eine Aneinanderreihung 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:

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

aus der Betriebssysteme Vorlesung^a berechnet werden.^{b,c}

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

Der Komposition $\text{Exp}(\text{Attr}(\text{Name}('st'), \text{Name}('y')))$ repräsentiert dabei einen Summanden $\sum_{k=1}^{j_i} \text{size}(\text{datatype}_{i,k})$ 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, die auf der obigen Formel 0.0.3 und der Formel 0.0.1 aufbaut.

^aScholl, „Betriebssysteme“.

^b $\text{ref}(\text{exp})$ steht dabei für das Schreiben der **Adresse** von exp auf den Stack, wobei exp z.B. st_var.attr sein könnte.

^cDie **äußere Schleife** iteriert nacheinander über die **Zugriffe auf Structattribute**. Die **innere Schleife** iteriert über alle **Attribute** des momentan betrachteten **Structtyps** st_i , die vor dem Attribut mit der Nummer j_i liegen.

```
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     ]
18  ]

```

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;

```

```

31     STOREIN SP IN1 1;
32     # Exp(Stack(Num('1')))
33     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')))

```

```

17      LOADIN SP ACC 1;
18      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

In den Unterkapiteln 0.0.1, 0.0.2 und 0.0.3 fällt auf, dass der **Zugriff** auf **Elemente** / **Attribute** der in diesen Kapiteln beschriebenen Datentypen (**Pointer**, **Array** und **Struct**) sehr ähnlich abläuft. Es lässt sich ein allgemeines Vorgehen, bestehend aus einem **Anfangsteil**, **Mittelteil** und **Schlusssteil** darin erkennen.

Dieses Vorgehen ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Dieses Vorgehen erlaubt es auch gemischte Ausdrücke zu schreiben, in denen die verschiedenen **Zugriffsarten** für **Elemente** / **Attribute** der Datentypen **Pointer**, **Array** und **Struct** gemischt sind (z.B. `(*st_var.ar)[0]`).

Dies ist möglich, indem im **Mittelteil**, je nachdem, ob das versteckte Attribut `datatype` des `Ref(exp, datatype)`-Container-Knotens ein `ArrayDecl(nums, datatype)`, ein `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructSpec(name)` beinhaltet und die dazu passende **Zugriffsoperation** `Subscr(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` vorliegt, einen anderen **RETI-Code** generiert wird. Dieser **RETI-Code** berechnet die **Startadresse** eines gewünschten **Pointerelements**, **Arrayelements** oder **Structattributs**.

Würde man bei einem `Subscr(Name('var'), exp2)` den Datentyp der Variable `Name('var')` von `ArrayDecl(nums, IntType())` zu `PointerDecl(num, IntType())` ändern, müsste nur der **Mittelteil** ausgetauscht werden. **Anfangsteil** und **Schlusssteil** bleiben unverändert.

Die **Zugriffsoperation** muss dabei zum **Datentyp** im versteckten Attribut `datatype` passen, ansonsten gibt es eine **DatatypeMismatch-Fehlermeldung**. Ein **Zugriff auf ein Arrayindex** `Subscr(exp1, exp2)` kann dabei mit den Datentypen **Array** `ArrayDecl(nums, datatype)` und **Pointer** `PntrDecl(num, datatype)` kombiniert

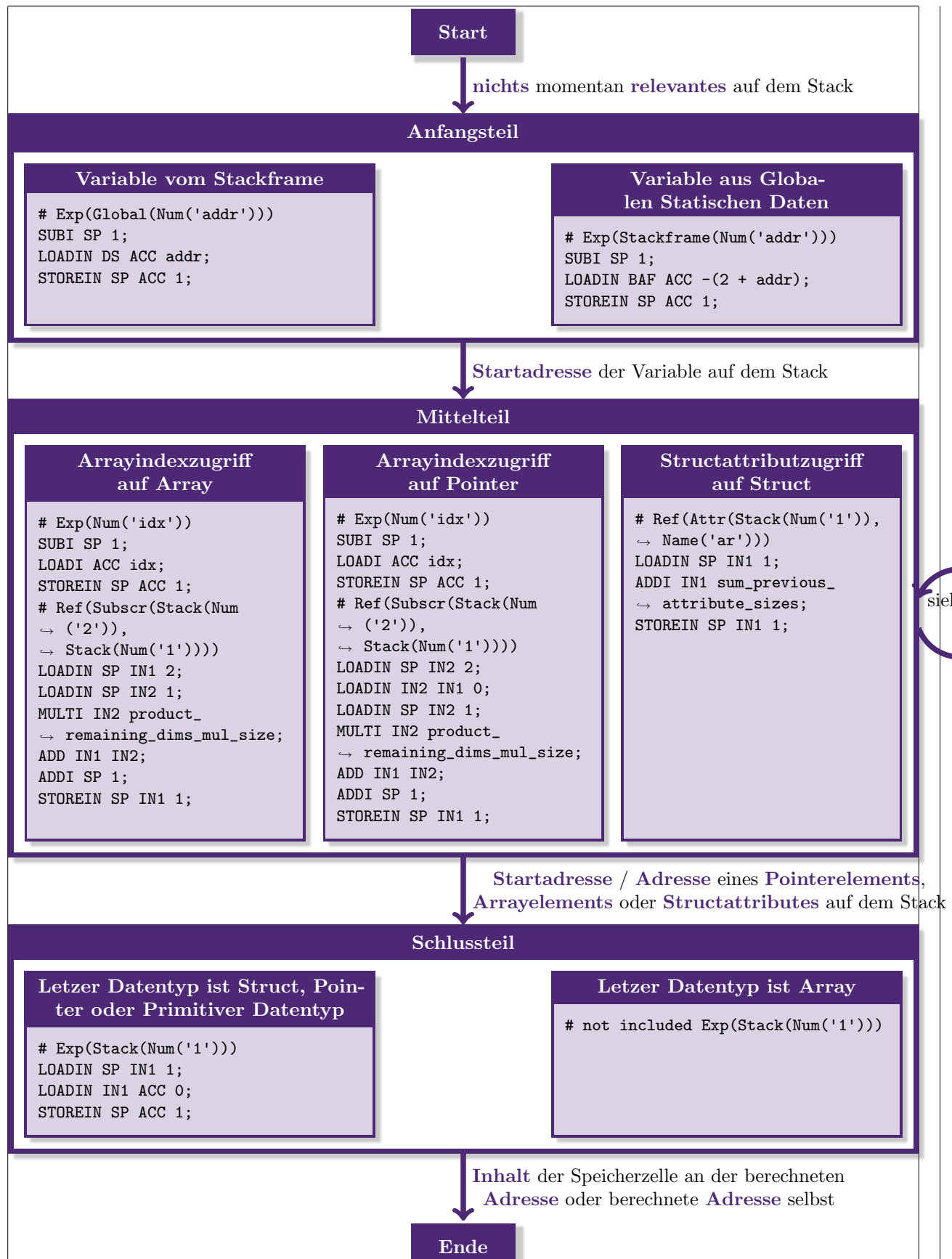


Abbildung 1: Allgemeine Veranschaulichung des Zugriffs auf Derived Datatypes

werden. Allerdings benötigen beide Kombinationen unterschiedlichen **RETI-Code**. Das liegt daran, dass bei einem **Pointer** `PntrDecl(num, datatype)` die **Adresse**, die auf dem **Stack** liegt auf eine Speicherzelle mit einer weiteren **Adresse** zeigt und das gewünschte Element erst zu finden ist, wenn man der letzteren **Adresse** folgt. Ein **Zugriff auf ein Structattribut** `Attr(exp, name)` kann nur mit dem Datentyp **Struct** `StructSpec(name)` kombiniert werden.

Um Verwirrung vorzubeugen, wird hier vorausschauend nochmal darauf hingewiesen, dass eine **Dereferenzierung** in der Form `Deref(exp1, exp2)` nicht mehr existiert, denn wie in Unterkapitel 0.0.1 bereits erklärt wurde, wurde der **Container-Knoten** `Deref(exp1, exp2)` im **PicoC-Shrink Pass** durch `Subscr(exp1, exp2)` ersetzt. Das hatte den Zweck, **doppelten Code** zu vermeiden, da die **Dereferenzierung** und der **Zugriff auf ein Arrayelement** jeweils gegenseitig austauschbar sind. Der **Zugriff auf einen Arrayindex** steht also gleichermaßen auch für eine **Dereferenzierung**.

Das versteckte Attribut `datatype` beinhaltet den **Unterdatentyp**, in welchem der Zugriff auf ein **Pointerelement**, **Arrayelement** oder **Structattribut** erfolgt. Der **Unterdatentyp** ist dabei ein **Teilbaum** des Baumes, der vom gesamten **Datentyp** der **Variable** gebildet wird. Wobei man sich allerdings nur für den obersten **Container-Knoten** oder **Token-Knoten** in diesem **Unterdatentyp** interessiert und die möglicherweise unter diesem momentan betrachteten **Knoten** liegenden **Container-Knoten** und **Token-Knoten** in einem anderen `Ref(exp, versteckte Attribut)`-Container-Knoten dem versteckten Attribut zugeordnet sind. Das versteckte Attribut `datatype` enthält also die Information auf welchen **Unterdatentyp** im dem momentanen **Kontext** gerade zugegriffen wird.

Der **Anfangsteil**, der durch die Komposition `Ref(Name('var'))` repräsentiert wird, ist dafür zuständig die **Startadresse** der Variablen `Name('var')` auf den **Stack** zu schreiben und je nachdem, ob diese Variable in den **Globalen Statischen Daten** oder auf dem **Stackframe** liegt einen anderen **RETI-Code** zu generieren.

Der **Schlusssteil** wird durch die Komposition `Exp(Stack(Num('1')), datatype)` dargestellt. Je nachdem, ob verstecktes Attribut `datatype` ein `CharType()`, `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructType(name)` ist, wird ein entsprechender **RETI-Code** generiert, der die **Adresse**, die auf dem **Stack** liegt dazu nutzt, um den **Inhalt** der Speicherzelle an dieser **Adresse** auf den **Stack** zu schreiben. Dabei wird die Speicherzelle der **Adresse** mit dem **Inhalt** auf den sie selbst zeigt überschreiben. Bei einem `ArrayDecl(nums, datatype)` hingegen wird kein weiterer **RETI-Code** generiert, die **Adresse**, die auf dem **Stack** liegt, stellt bereits das gewünschte Ergebnis dar.

Arrays haben in der Sprache L_C und somit auch in L_{PicoC} die Eigenheit, dass wenn auf ein gesamtes **Array** zugegriffen wird⁸, die **Adresse** des ersten Elements ausgegeben wird und nicht der **Inhalt** der Speicherzelle des ersten Elements. Bei allen anderen in der Sprache L_{PicoC} implementierten Datentypen wird immer der **Inhalt** der Speicherzelle ausgegeben, die an der **Adresse** zu finden ist, die auf dem **Stack** liegt.

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.

Implementieren lässt sich dieses Vorgehen, indem beim Antreffen eines `Subscr(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` Ausdrucks ein `Exp(Stack(Num('1')))` an die Spitze einer **Liste der generierten Ausdrücke** gesetzt wird und der Ausdruck selbst als `exp`-Attribut des `Ref(exp)`-Knotens gesetzt wird und hinter dem `Exp(Stack(Num('1')))`-Container-Knoten in der Liste eingefügt wird.

Es wird solange dem jeweiligen `exp1` des `Subscr(exp1, exp2)`-Knoten, dem `exp` des `Attr(exp, name)`

⁸Und nicht auf ein **Element** des Arrays.

⁸**Startadresse** / **Adresse** eines **Pointerelements**, **Arrayelements** oder **Structattributes** auf dem **Stack**.

Knoten oder dem `exp` des `Ref(exp)`-Knotens gefolgt und der jeweilige **Container-Knoten** selbst in ein `Ref(exp)` eingesetzt und hinten in die Liste der generierten Ausdrücke eingefügt, bis man bei einem `Name(name)` ankommt. Der `Name(name)`-Knoten wird zu einem `Ref(Global(num))` oder `Ref(Stackframe(num))` umgewandelt und ebenfalls ganz hinten in die **Liste der generierten Ausdrücke** eingefügt.

Beim Antreffen eines `Ref(exp)` wird direkt so vorgegangen, wie

Parallel wird eine Liste der `Ref(exp)`-Knoten geführt, deren versteckte Attribut `datatype` und `error_data` die entsprechenden Informationen zugewiesen bekommen müssen. Sobald man beim `Name(name)`-Knoten angekommen ist und mithilfe dieses in der **Symboltabelle** den **Datentyp** der Variable nachsehen kann, wird der **Datentyp** der Variable nun ebenfalls, wie die Ausdrücke `Subscr(exp1, exp2)` und `Attr(exp, name)` schrittweise durchiteriert und dem jeweils nächsten `datatype`-Attribut gefolgt werden. Das **Iterieren** über den **Datentyp** wird solange durchgeführt, bis alle `Ref(exp)`-Knoten ihren im jeweiligen **Kontext** vorliegenden **Datenentyp** in ihrem `datatype`-Attribut zugewiesen bekommen haben. Alles andere führt zu einer **Fehlermeldung**, für die das versteckte Attribut `error_data` genutzt wird.^a

^aMan könnte diese Implementierung gut mit dem **Auseinanderrollen** und **Wieder-Einrollen** eines **Schnecken-Gebäcks** vergleichen.

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('ptr2')))
19     Exp(Name('ptr2'))
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('ptr1')))
30     Exp(Name('ptr1'))
31 ]
32 ]

```

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(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
8         ↪ Name('st_ar')))
9         # // Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
10        ↪ PntrDecl(Num('1'), IntType('int')))), Name('pntr2')))
11        # // Exp(Name('pntr2'))
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(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
23        ↪ Name('st_ar')))
24        # // Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
25        ↪ IntType('int'))), Name('pntr1')))
26        # // Exp(Name('pntr1'))
27        # Exp(Stackframe(Num('9')))
28        SUBI SP 1;
29        LOADIN BAF ACC -11;
30        STOREIN SP ACC 1;
31        # Return(Empty())
32        LOADIN BAF PC -1;
33      ]
34    ]
35  ]

```

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(Writable(), PtrDecl(Num('1')), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int'))),
8       ↪ Name('ar'))
9   ],
10  FunDef
11    VoidType 'void',
12    Name 'main',
13    [],
14    [
15      Assign(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('var')),
16        ↪ Array([Num('42')]))
17      Assign(Alloc(Writable(), 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^a berechnet werden^b.

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.

^aScholl, „Betriebssysteme“.

^b $ref(exp)$ 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.0',
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(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr'))
8       ],
9     FunDef
10      VoidType 'void',
11      Name 'main',
12      [],
13      [
14        Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], Num('2')), IntType('int')), Name('ar1')))
15        Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))), Name('ar2')))
16        Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
17        Assign(Alloc(Writeable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr1')),
18              ↪ Ref(Name('var')))
19        Assign(Alloc(Writeable(), 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')))
23        Exp(Deref(Name('pntr2'), Num('0')))
24      ]
25    ]
26  ]

```

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(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], Num('2')), IntType('int')),
8         ↪ Name('ar1')))
9         // Exp(Alloc(Writeable(), 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')))

```

```

25     Exp(Num('0'))
26     Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
27     Exp(Stack(Num('1')))
28     // Exp(Subscr(Name('pntr2'), Num('0')))
29     Ref(Global(Num('6')))
30     Exp(Num('0'))
31     Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
32     Exp(Stack(Num('1')))
33     Return(Empty())
34 ]
35 ]

```

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.O',
6       [
7         # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1'), Num('2')], IntType('int')),
8         ↪ Name('ar1')))
9         # // Exp(Alloc(Writeable(), 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')))

```

```

39      # Ref(Global(Num('0')))
40      SUBI SP 1;
41      LOADI IN1 0;
42      ADD IN1 DS;
43      STOREIN SP IN1 1;
44      # Exp(Num('0'))
45      SUBI SP 1;
46      LOADI ACC 0;
47      STOREIN SP ACC 1;
48      # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
49      LOADIN SP IN1 2;
50      LOADIN SP IN2 1;
51      MULTI IN2 2;
52      ADD IN1 IN2;
53      ADDI SP 1;
54      STOREIN SP IN1 1;
55      # // not included Exp(Stack(Num('1')))
56      # // Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))
57      # Ref(Global(Num('2')))
58      SUBI SP 1;
59      LOADI IN1 2;
60      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      # Exp(Stack(Num('1')))

```

```
96      LOADIN SP IN1 1;  
97      LOADIN IN1 ACC 0;  
98      STOREIN SP ACC 1;  
99      # Return(Empty())  
100     LOADIN BAF PC -1;  
101   ]  
102 ]
```

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 (besucht am 09.07.2022).