
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

1	Implementierung	8
1.1	Architektur	8
1.2	Lexikalische Analyse	8
1.2.1	Verwendung von Lark	8
1.2.2	Basic Parser	8
1.3	Syntaktische Analyse	8
1.3.1	Verwendung von Lark	8
1.3.2	Umsetzung von Präzidenz	8
1.3.3	Derivation Tree Generierung	11
1.3.4	Early Parser	11
1.3.5	Derivation Tree Vereinfachung	11
1.3.6	Abstrakt Syntax Tree Generierung	11
1.4	Code Generierung	11
1.4.1	Passes	11
1.4.2	Umsetzung von Pointern	11
1.4.3	Umsetzung von Arrays	15
1.4.4	Umsetzung von Structs	23
1.4.5	Umsetzung des Zusammenspiels der Derived Datatypes	33
1.4.6	Umsetzung von Funktionen	39
1.4.7	Umsetzung kleinerer Details	47
1.5	Fehlermeldungen	47
1.5.1	Error Handler	47
1.5.2	Arten von Fehlermeldungen	47

Abbildungsverzeichnis

1.1	Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben	9
1.2	Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform	9
1.3	Architektur mit allen Passes ausgeschrieben	10

Codeverzeichnis

1.1	PicoC Code für Pointer Referenzierung	11
1.2	Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung	12
1.3	PicoC Mon Pass für Pointer Referenzierung	13
1.4	RETI Blocks Pass für Pointer Referenzierung	13
1.5	PicoC Code für Pointer Dereferenzierung	13
1.6	Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung	14
1.7	PicoC Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung	15
1.8	PicoC Code für Array Initialisierung	15
1.9	Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung	16
1.10	PicoC Mon Pass für Array Initialisierung	17
1.11	RETI Blocks Pass für Array Initialisierung	17
1.12	PicoC Code für Zugriff auf Arrayindex	17
1.13	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Arrayindex	18
1.14	PicoC Mon Pass für Zugriff auf Arrayindex	19
1.15	RETI Blocks Pass für Zugriff auf Arrayindex	20
1.16	PicoC Code für Zuweisung an Arrayindex	20
1.17	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex	21
1.18	PicoC Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex	22
1.19	RETI Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex	23
1.20	PicoC Code für Deklaration von Structs	23
1.21	Symboltabelle für Deklaration von Structs	24
1.22	PicoC Code für Initialisierung von Structs	25
1.23	Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs	26
1.24	PicoC Mon Pass für Initialisierung von Structs	26
1.25	RETI Blocks Pass für Initialisierung von Structs	27
1.26	PicoC Code für Zugriff auf Structattribut	27
1.27	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut	28
1.28	PicoC Mon Pass für Zugriff auf Structattribut	29
1.29	RETI Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut	30
1.30	PicoC Code für Zuweisung an Structattribut	30
1.31	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut	31
1.32	PicoC Mon Pass für Zuweisung an Structattribut	32
1.33	RETI Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut	33
1.34	PicoC Code für Definition von Variablen	33
1.35	Symboltabelle für Definition von Variablen	35
1.36	PicoC Code für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes	35
1.37	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes	36
1.38	PicoC Mon Pass für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes	37
1.39	RETI Blocks Pass für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes	38
1.40	PicoC Code für 3 Funktionen	39
1.41	Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen	39
1.42	PicoC Blocks Pass für 3 Funktionen	40
1.43	PicoC Mon Pass für 3 Funktionen	41
1.44	RETI Blocks Pass für 3 Funktionen	41
1.45	PicoC Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	42
1.46	PicoC Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	42
1.47	PicoC Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	43

1.48 PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	43
1.49 RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	44
1.50 RETI Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	44
1.51 PicoC Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	45
1.52 PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	45
1.53 RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	46
1.54 RETI Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	47

Tabellenverzeichnis

1.1 Präzidenzregeln von PicoC	10
---	----

Definitionen

1.1	Symboltabelle	11
-----	-------------------------	----

1 Implementierung

1.1 Architektur

1.2 Lexikalische Analyse

1.2.1 Verwendung von Lark

1.2.2 Basic Parser

1.3 Syntaktische Analyse

1.3.1 Verwendung von Lark

1.3.2 Umsetzung von Präzidenz

Die **PicoC Sprache** hat dieselben **Präzidenzregeln** implementiert, wie die **Sprache C**¹. Die **Präzidenzregeln** von **PicoC** sind in Tabelle 1.1 aufgelistet.

¹[C Operator Precedence - cppreference.com](http://c.operatorprecedence-cppreference.com).

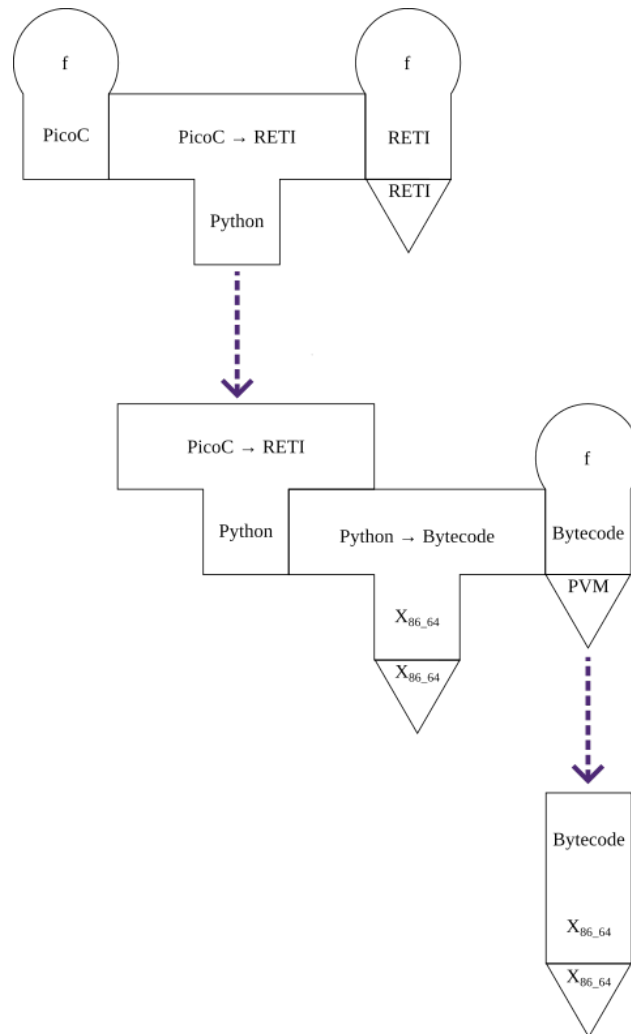


Abbildung 1.1: Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben

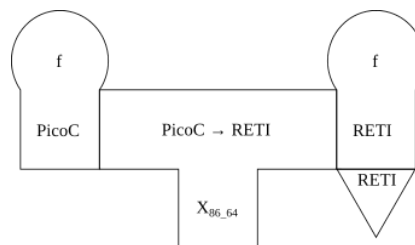


Abbildung 1.2: Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform

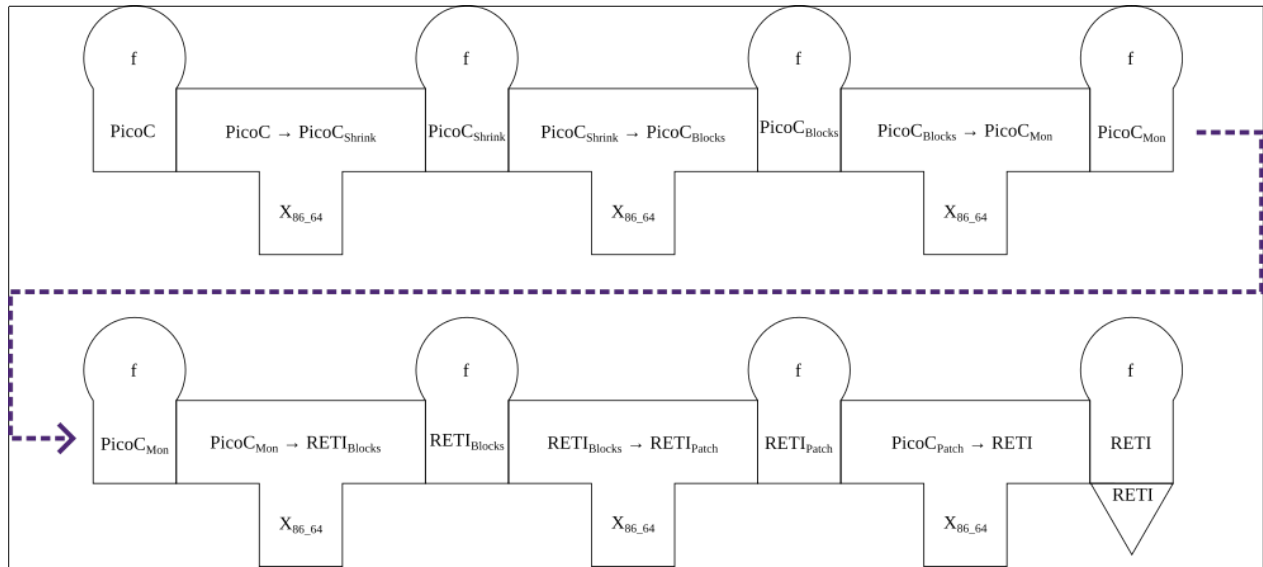


Abbildung 1.3: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben

Präzidenz	Operator	Beschreibung	Assoziativität
1	a() a[] a.b	Funktionsaufruf Indezzugriff Attributzugriff	Links, dann rechts →
2	-a !a ~a *a &a	Unäres Minus Logisches NOT und Bitweise NOT Dereferenz und Referenz, auch Adresse-von	Rechts, dann links ←
3	a*b a/b a%b	Multiplikation, Division und Modulo	Links, dann rechts →
4	a+b a-b	Addition und Subtraktion	
5	a<b a<=b a>b a>=b	Kleiner, Kleiner Gleich, Größer, Größer gleich	
6	a==b a!=b	Gleichheit und Ungleichheit	
7	a&b	Bitweise UND	
8	a^b	Bitweise XOR (exclusive or)	
9	a b	Bitweise ODER (inclusive or)	
10	a&& b	Logisches UND	
11	a b	Logisches ODER	
12	a=b	Zuweisung	Rechts, dann links ←
13	a, b	Komma	Links, dann rechts →

Tabelle 1.1: Präzidenzregeln von PicoC

1.3.3 Derivation Tree Generierung

1.3.4 Early Parser

1.3.5 Derivation Tree Vereinfachung

1.3.6 Abstrakt Syntax Tree Generierung

1.3.6.1 ASTNode

1.3.6.2 PicoC Nodes

1.3.6.3 RETI Nodes

1.4 Code Generierung

1.4.1 Passes

1.4.1.1 PicoC-Shrink Pass

1.4.1.2 PicoC-Blocks Pass

1.4.1.3 PicoC-Mon Pass

Definition 1.1: Symboltabelle

1.4.1.4 RETI-Blocks Pass

1.4.1.5 RETI-Patch Pass

1.4.1.6 RETI Pass

1.4.2 Umsetzung von Pointern

1.4.2.1 Referenzierung

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

Code 1.1: PicoC Code für Pointer Referenzierung

```
1 File
2   Name './example_ptr_ref.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11            Writeable,
12            IntType 'int',
13            Name 'var',
14            Num '42',
15          Assign
16            Alloc
17              Writeable,
18              PtrDecl
19                Num '1',
20                IntType 'int',
21                Name 'ptr',
22              Ref
23                Name 'var'
24      ]
25 ]
```

Code 1.2: Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung

```
1 File
2   Name './example_ptr_ref.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '42',
9         Assign
10          GlobalWrite
11            Num '0',
12          Tmp
13            Num '1',
14          Ref
15            GlobalRead
16              Num '0',
17          Assign
18            GlobalWrite
19              Num '1',
20            Tmp
21              Num '1',
22          Return
23            Empty
24      ]
25 ]
```

Code 1.3: PicoC Mon Pass für Pointer Referenzierung

```
1 File
2   Name './example_pntr_ref.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 42,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      LOADIN SP ACC 1,
11      STOREIN DS ACC 0,
12      ADDI SP 1,
13      SUBI SP 1,
14      LOADI IN1 0,
15      ADD IN1 DS,
16      STOREIN SP IN1 1,
17      LOADIN SP ACC 1,
18      STOREIN DS ACC 1,
19      ADDI SP 1,
20      LOADIN BAF PC -1
21    ]
22  ]
```

Code 1.4: RETI Blocks Pass für Pointer Referenzierung

1.4.2.2 Pointer Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen

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

Code 1.5: PicoC Code für Pointer Dereferenzierung

```
1 File
2   Name './example_pntr_deref.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11            Writeable,
12            IntType 'int',
13            Name 'var',
14            Num '42',
15          Assign
16            Alloc
17              Writeable,
18              PntrDecl
19                Num '1',
20                IntType 'int',
21                Name 'pntr',
22              Ref
23                Name 'var',
24            Exp
25              Deref
26                Name 'pntr',
27                Num '0'
28          ]
29   ]
```

Code 1.6: Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung

```
1 File
2   Name './example_pntr_deref.picoc_shrink',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11            Writeable,
12            IntType 'int',
13            Name 'var',
14            Num '42',
15          Assign
16            Alloc
17              Writeable,
18              PntrDecl
19                Num '1',
20                IntType 'int',
21                Name 'pntr',
22              Ref
23                Name 'var',
24            Exp
25              Subscr
26                Name 'pntr',
27                Num '0'
28          ]
29   ]
```

Code 1.7: PicoC Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung

1.4.3 Umsetzung von Arrays

1.4.3.1 Initialisierung von Arrays

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

Code 1.8: PicoC Code für Array Initialisierung


```

1 File
2   Name './example_array_init.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11            Writeable,
12            ArrayDecl
13              [
14                Num '2',
15                Num '1'
16              ],
17              IntType 'int',
18              Name 'ar',
19              Array
20                [
21                  Array
22                    [
23                      Num '4'
24                    ],
25                    Array
26                      [
27                        Num '2'
28                      ]
29                ]
30          ]
31 ]

```

Code 1.9: Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung

```

1 File
2   Name './example_array_init.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '4',
9         Exp
10          Num '2',
11        Assign
12          GlobalWrite
13            Num '0',
14          Tmp
15            Num '2',
16        Return
17          Empty
18      ]
19 ]

```

Code 1.10: PicoC Mon Pass für Array Initialisierung

```
1 File
2   Name './example_array_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 4,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      SUBI SP 1,
11      LOADI ACC 2,
12      STOREIN SP ACC 1,
13      LOADIN SP ACC 1,
14      STOREIN DS ACC 1,
15      LOADIN SP ACC 2,
16      STOREIN DS ACC 0,
17      ADDI SP 2,
18      LOADIN BAF PC -1
19    ]
20  ]
```

Code 1.11: RETI Blocks Pass für Array Initialisierung

1.4.3.2 Zugriff auf Arrayindex

Der Zugriff auf einen bestimmten Index eines Arrays ist wie folgt umgesetzt:

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

Code 1.12: PicoC Code für Zugriff auf Arrayindex

```
1 File
2   Name './example_array_access.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11          Writeable,
12          ArrayDecl
13            [
14              Num '2'
15            ],
16          IntType 'int',
17          Name 'ar',
18          Array
19            [
20              Num '1',
21              Num '2'
22            ],
23          Exp
24            Subscr
25              Name 'ar',
26              Num '2'
27      ]
28   ]
```

Code 1.13: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Arrayindex

```
1 File
2   Name './example_array_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '1',
9         Exp
10          Num '2',
11        Assign
12          GlobalWrite
13            Num '0',
14          Tmp
15            Num '2',
16        Ref
17          GlobalRead
18            Num '0',
19        Exp
20          Num '2',
21        Ref
22          Subscr
23            Tmp
24              Num '2',
25            Tmp
26              Num '1',
27        Exp
28          Subscr
29            Tmp
30              Num '1',
31            Num '0',
32        Return
33          Empty
34      ]
35  ]
```

Code 1.14: PicoC Mon Pass für Zugriff auf Arrayindex

```
1 File
2   Name './example_array_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 1,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        SUBI SP 1,
11        LOADI ACC 2,
12        STOREIN SP ACC 1,
13        LOADIN SP ACC 1,
14        STOREIN DS ACC 1,
15        LOADIN SP ACC 2,
16        STOREIN DS ACC 0,
17        ADDI SP 2,
18        SUBI SP 1,
19        LOADI IN1 0,
20        ADD IN1 DS,
21        STOREIN SP IN1 1,
22        SUBI SP 1,
23        LOADI ACC 2,
24        STOREIN SP ACC 1,
25        LOADIN SP IN1 2,
26        LOADIN SP IN2 1,
27        MULTI IN2 1,
28        ADD IN1 IN2,
29        ADDI SP 1,
30        STOREIN SP IN1 1,
31        LOADIN SP IN1 1,
32        LOADIN IN1 ACC 0,
33        STOREIN SP ACC 1,
34        LOADIN BAF PC -1
35      ]
36    ]
```

Code 1.15: RETI Blocks Pass für Zugriff auf Arrayindex

1.4.3.3 Zuweisung an Arrayindex

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

Code 1.16: PicoC Code für Zuweisung an Arrayindex

```
1 File
2   Name './example_array_assignment.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Exp
10          Alloc
11            Writeable,
12            ArrayDecl
13              [
14                Num '2'
15              ],
16            IntType 'int',
17            Name 'ar',
18          Assign
19            Subscr
20              Name 'ar',
21              Num '2',
22              Num '42'
23      ]
24  ]
```

Code 1.17: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex

```
1 File
2   Name './example_array_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '42',
9         Ref
10          GlobalRead
11            Num '0',
12        Exp
13          Num '2',
14        Ref
15          Subscr
16            Tmp
17              Num '2',
18            Tmp
19              Num '1',
20        Assign
21          Subscr
22            Tmp
23              Num '1',
24            Num '0',
25          Tmp
26            Num '2',
27        Return
28          Empty
29      ]
30  ]
```

Code 1.18: PicoC Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 42,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        SUBI SP 1,
11        LOADI IN1 0,
12        ADD IN1 DS,
13        STOREIN SP IN1 1,
14        SUBI SP 1,
15        LOADI ACC 2,
16        STOREIN SP ACC 1,
17        LOADIN SP IN1 2,
18        LOADIN SP IN2 1,
19        MULTI IN2 1,
20        ADD IN1 IN2,
21        ADDI SP 1,
22        STOREIN SP IN1 1,
23        LOADIN SP IN1 1,
24        LOADIN SP ACC 2,
25        ADDI SP 2,
26        STOREIN IN1 ACC 0,
27        LOADIN BAF PC -1
28      ]
29    ]

```

Code 1.19: RETI Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex

1.4.4 Umsetzung von Structs

1.4.4.1 Deklaration von Structs

```

1 struct st1 {int *ar[3];};
2
3 struct st2 {struct st1 st;};
4
5 void main() {
6 }

```

Code 1.20: PicoC Code für Deklaration von Structs

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol(
4       {
5         type qualifier:      Empty()
6         datatype:            ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))

```



```

7     name:                Name('ar@st1')
8     value or address:    Empty()
9     position:            Pos(Num('1'), Num('17'))
10    size:                Num('3')
11  },
12  Symbol(
13  {
14    type qualifier:      Empty()
15    datatype:            StructDecl(Name('st1'), [Alloc(Writable(),
16      ↪ ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))), Name('ar'))])
17    name:                Name('st1')
18    value or address:    [Name('ar@st1')]
19    position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
20    size:                Num('3')
21  },
22  Symbol(
23  {
24    type qualifier:      Empty()
25    datatype:            StructSpec(Name('st1'))
26    name:                Name('st@st2')
27    value or address:    Empty()
28    position:            Pos(Num('3'), Num('23'))
29    size:                Num('3')
30  },
31  Symbol(
32  {
33    type qualifier:      Empty()
34    datatype:            StructDecl(Name('st2'), [Alloc(Writable(),
35      ↪ StructSpec(Name('st1')), Name('st'))])
36    name:                Name('st2')
37    value or address:    [Name('st@st2')]
38    position:            Pos(Num('3'), Num('7'))
39    size:                Num('3')
40  },
41  Symbol(
42  {
43    type qualifier:      Empty()
44    datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
45    name:                Name('main')
46    value or address:    Empty()
47    position:            Pos(Num('5'), Num('5'))
48    size:                Empty()
49  }
50 ]

```

Code 1.21: Symboltabelle für Deklaration von Structs

1.4.4.2 Initialisierung von Structs

```

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

```

Code 1.22: PicoC Code für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.ast',
3   [
4       StructDecl
5         Name 'st1',
6         [
7             Alloc
8             Writeable,
9             ArrayDecl
10              [
11                  Num '1'
12              ],
13             PtrDecl
14               Num '1',
15               IntType 'int',
16               Name 'pntr'
17         ],
18       StructDecl
19         Name 'st2',
20         [
21             Alloc
22             Writeable,
23             StructSpec
24               Name 'st1',
25               Name 'st'
26         ],
27       FunDef
28         VoidType 'void',
29         Name 'main',
30         [],
31         [
32             Assign
33             Alloc
34             Writeable,
35             IntType 'int',
36             Name 'var',
37             Num '42',
38             Assign
39             Alloc
40             Writeable,
41             StructSpec
42               Name 'st1',

```

```

43     Name 'st',
44     Struct
45     [
46         Assign
47         Name 'st',
48         Struct
49         [
50             Assign
51             Name 'pntr',
52             Array
53             [
54                 Array
55                 [
56                     Ref
57                     Name 'var'
58                 ]
59             ]
60         ]
61     ]
62 ]
63 ]

```

Code 1.23: Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.picoc_mon',
3   [
4       Block
5       Name 'main.0',
6       [
7           Exp
8           Num '42',
9           Assign
10          GlobalWrite
11          Num '0',
12          Tmp
13          Num '1',
14          Ref
15          GlobalRead
16          Num '0',
17          Assign
18          GlobalWrite
19          Num '1',
20          Tmp
21          Num '1',
22          Return
23          Empty
24      ]
25  ]

```

Code 1.24: PicoC Mon Pass für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 42,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        LOADIN SP ACC 1,
11        STOREIN DS ACC 0,
12        ADDI SP 1,
13        SUBI SP 1,
14        LOADI IN1 0,
15        ADD IN1 DS,
16        STOREIN SP IN1 1,
17        LOADIN SP ACC 1,
18        STOREIN DS ACC 1,
19        ADDI SP 1,
20        LOADIN BAF PC -1
21      ]
22    ]

```

Code 1.25: RETI Blocks Pass für Initialisierung von Structs

1.4.4.3 Zugriff auf Structattribut

```

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

```

Code 1.26: PicoC Code für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'x',
11         Alloc
12           Writeable,
13           IntType 'int',
14           Name 'y'
15       ],
16     FunDef

```

```
17     VoidType 'void',
18     Name 'main',
19     [],
20     [
21         Assign
22         Alloc
23         Writeable,
24         StructSpec
25         Name 'pos',
26         Name 'st',
27         Struct
28         [
29             Assign
30             Name 'x',
31             Num '4',
32             Assign
33             Name 'y',
34             Num '2'
35         ],
36         Exp
37         Attr
38         Name 'st',
39         Name 'y'
40     ]
41 ]
```

Code 1.27: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut

```
1 File
2   Name './example_struct_attr_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '4',
9         Exp
10          Num '2',
11        Assign
12          GlobalWrite
13            Num '0',
14          Tmp
15            Num '2',
16        Ref
17          GlobalRead
18            Num '0',
19        Ref
20          Attr
21            Tmp
22              Num '1',
23              Name 'y',
24          Exp
25            Subscr
26              Tmp
27                Num '1',
28                Num '0',
29          Return
30            Empty
31        ]
32    ]
```

Code 1.28: PicoC Mon Pass für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 4,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        SUBI SP 1,
11        LOADI ACC 2,
12        STOREIN SP ACC 1,
13        LOADIN SP ACC 1,
14        STOREIN DS ACC 1,
15        LOADIN SP ACC 2,
16        STOREIN DS ACC 0,
17        ADDI SP 2,
18        SUBI SP 1,
19        LOADI IN1 0,
20        ADD IN1 DS,
21        STOREIN SP IN1 1,
22        LOADIN SP IN1 1,
23        ADDI IN1 1,
24        STOREIN SP IN1 1,
25        LOADIN SP IN1 1,
26        LOADIN IN1 ACC 0,
27        STOREIN SP ACC 1,
28        LOADIN BAF PC -1
29      ]
30    ]

```

Code 1.29: RETI Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut

1.4.4.4 Zuweisung an Structattribut

```

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 1.30: PicoC Code für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc
8         Writeable,

```

```
9      IntType 'int',
10     Name 'x',
11     Alloc
12     Writeable,
13     IntType 'int',
14     Name 'y'
15 ],
16 FunDef
17 VoidType 'void',
18 Name 'main',
19 [],
20 [
21   Assign
22   Alloc
23   Writeable,
24   StructSpec
25   Name 'pos',
26   Name 'st',
27   Struct
28   [
29     Assign
30     Name 'x',
31     Num '4',
32     Assign
33     Name 'y',
34     Num '2'
35   ],
36   Assign
37   Attr
38   Name 'st',
39   Name 'y',
40   Num '42'
41 ]
42 ]
```

Code 1.31: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut


```
1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '4',
9         Exp
10          Num '2',
11        Assign
12          GlobalWrite
13            Num '0',
14          Tmp
15            Num '2',
16        Exp
17          Num '42',
18        Ref
19          GlobalRead
20            Num '0',
21        Ref
22          Attr
23            Tmp
24              Num '1',
25            Name 'y',
26        Assign
27          Subscr
28            Tmp
29              Num '1',
30            Num '0',
31          Tmp
32            Num '2',
33        Return
34          Empty
35      ]
36  ]
```

Code 1.32: PicoC Mon Pass für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 4,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        SUBI SP 1,
11        LOADI ACC 2,
12        STOREIN SP ACC 1,
13        LOADIN SP ACC 1,
14        STOREIN DS ACC 1,
15        LOADIN SP ACC 2,
16        STOREIN DS ACC 0,
17        ADDI SP 2,
18        SUBI SP 1,
19        LOADI ACC 42,
20        STOREIN SP ACC 1,
21        SUBI SP 1,
22        LOADI IN1 0,
23        ADD IN1 DS,
24        STOREIN SP IN1 1,
25        LOADIN SP IN1 1,
26        ADDI IN1 1,
27        STOREIN SP IN1 1,
28        LOADIN SP IN1 1,
29        LOADIN SP ACC 2,
30        ADDI SP 2,
31        STOREIN IN1 ACC 0,
32        LOADIN BAF PC -1
33      ]
34    ]

```

Code 1.33: RETI Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut

1.4.5 Umsetzung des Zusammenspiels der Derived Datatypes

1.4.5.1 Definition von Variablen mit den Derived Datatypes

```

1 struct ar_with_len {int ar[2]; int len;};
2
3 void main() {
4   struct ar_with_len st_ar[3];
5   int (*pntr1)[3];
6   int *(*pntr2)[3];
7 }

```

Code 1.34: PicoC Code für Definition von Variablen

```

1 SymbolTable
2 [
3   Symbol(
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))
7       name:                Name('ar@ar_with_len')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('24'))
10      size:                 Num('2')
11    },
12    Symbol(
13      {
14        type qualifier:      Empty()
15        datatype:            IntType('int')
16        name:                Name('len@ar_with_len')
17        value or address:    Empty()
18        position:            Pos(Num('1'), Num('35'))
19        size:                 Num('1')
20      },
21      Symbol(
22        {
23          type qualifier:      Empty()
24          datatype:            StructDecl(Name('ar_with_len'), [Alloc(Writeable(),
25            ↪ ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')), Alloc(Writeable(),
26            ↪ IntType('int')), Name('len'))])
27          name:                Name('ar_with_len')
28          value or address:    [Name('ar@ar_with_len'), Name('len@ar_with_len')]
29          position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
30          size:                 Num('3')
31        },
32        Symbol(
33          {
34            type qualifier:      Empty()
35            datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
36            name:                Name('main')
37            value or address:    Empty()
38            position:            Pos(Num('3'), Num('5'))
39            size:                 Empty()
40          },
41          Symbol(
42            {
43              type qualifier:      Writeable()
44              datatype:            ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len')))
45              name:                Name('st_ar@main')
46              value or address:    Num('0')
47              position:            Pos(Num('4'), Num('21'))
48              size:                 Num('9')
49            },
50            Symbol(
51              {
52                type qualifier:      Writeable()
53                datatype:            PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
54                name:                Name('pntr1@main')
55                value or address:    Num('9')
56                position:            Pos(Num('5'), Num('8'))
57                size:                 Num('1')

```

```

56     },
57     Symbol(
58     {
59         type qualifier:      Writeable()
60         datatype:           PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'),
61         ↪ IntType('int'))))
62         name:               Name('ptr2@main')
63         value or address:   Num('10')
64         position:          Pos(Num('6'), Num('9'))
65         size:               Num('1')
66     }
67 ]

```

Code 1.35: Symboltabelle für Definition von Variablen

1.4.5.2 Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes

```

1 struct st1 {int (*ar)[1]};
2
3 void main() {
4     int var[1] = {42};
5     struct st1 st_first = {.ar=&var};
6     (*st_first.ar)[0];
7 }

```

Code 1.36: PicoC Code für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_combined.ast',
3   [
4       StructDecl
5         Name 'st1',
6         [
7             Alloc
8             Writeable,
9             PtrDecl
10              Num '1',
11              ArrayDecl
12                [
13                  Num '1'
14                ],
15              IntType 'int',
16              Name 'ar'
17          ],
18       FunDef
19         VoidType 'void',
20         Name 'main',
21         [],
22         [
23             Assign
24             Alloc
25             Writeable,
26             ArrayDecl

```

```
27     [
28         Num '1'
29     ],
30     IntType 'int',
31     Name 'var',
32     Array
33     [
34         Num '42'
35     ],
36     Assign
37     Alloc
38     Writeable,
39     StructSpec
40     Name 'st1',
41     Name 'st_first',
42     Struct
43     [
44         Assign
45         Name 'ar',
46         Ref
47         Name 'var'
48     ],
49     Exp
50     Subscr
51     Deref
52     Attr
53     Name 'st_first',
54     Name 'ar',
55     Num '0',
56     Num '0'
57 ]
58 ]
```

Code 1.37: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_combined.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '42',
9         Assign
10          GlobalWrite
11            Num '0',
12          Tmp
13            Num '1',
14        Ref
15          GlobalRead
16            Num '0',
17        Assign
18          GlobalWrite
19            Num '1',
20          Tmp
21            Num '1',
22        Ref
23          GlobalRead
24            Num '1',
25        Ref
26          Attr
27            Tmp
28              Num '1',
29              Name 'ar',
30        Exp
31          Num '0',
32        Ref
33          Subscr
34            Tmp
35              Num '2',
36            Tmp
37              Num '1',
38        Exp
39          Num '0',
40        Ref
41          Subscr
42            Tmp
43              Num '2',
44            Tmp
45              Num '1',
46        Exp
47          Subscr
48            Tmp
49              Num '1',
50            Num '0',
51        Return
52          Empty
53      ]
54  ]
```

Code 1.38: PicoC Mon Pass für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_combined.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 42,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      LOADIN SP ACC 1,
11      STOREIN DS ACC 0,
12      ADDI SP 1,
13      SUBI SP 1,
14      LOADI IN1 0,
15      ADD IN1 DS,
16      STOREIN SP IN1 1,
17      LOADIN SP ACC 1,
18      STOREIN DS ACC 1,
19      ADDI SP 1,
20      SUBI SP 1,
21      LOADI IN1 1,
22      ADD IN1 DS,
23      STOREIN SP IN1 1,
24      LOADIN SP IN1 1,
25      ADDI IN1 0,
26      STOREIN SP IN1 1,
27      SUBI SP 1,
28      LOADI ACC 0,
29      STOREIN SP ACC 1,
30      LOADIN SP IN2 2,
31      LOADIN IN2 IN1 0,
32      LOADIN SP IN2 1,
33      MULTI IN2 1,
34      ADD IN1 IN2,
35      ADDI SP 1,
36      STOREIN SP IN1 1,
37      SUBI SP 1,
38      LOADI ACC 0,
39      STOREIN SP ACC 1,
40      LOADIN SP IN1 2,
41      LOADIN SP IN2 1,
42      MULTI IN2 1,
43      ADD IN1 IN2,
44      ADDI SP 1,
45      STOREIN SP IN1 1,
46      LOADIN SP IN1 1,
47      LOADIN IN1 ACC 0,
48      STOREIN SP ACC 1,
49      LOADIN BAF PC -1
50    ]
51  ]

```

Code 1.39: RETI Blocks Pass für Zugriff auf Variablen mit Derived Datatypes

1.4.6 Umsetzung von Funktionen

1.4.6.1 Funktionen auflösen zu RETI Code

```
1 void main() {  
2     return;  
3 }  
4  
5 void fun1() {  
6 }  
7  
8 int fun2() {  
9     return 1;  
10 }
```

Code 1.40: PicoC Code für 3 Funktionen

```
1 File  
2   Name './example_3_funs.ast',  
3   [  
4     FunDef  
5       VoidType 'void',  
6       Name 'main',  
7       [],  
8       [  
9         Return  
10        Empty  
11      ],  
12     FunDef  
13       VoidType 'void',  
14       Name 'fun1',  
15       [],  
16       [],  
17     FunDef  
18       IntType 'int',  
19       Name 'fun2',  
20       [],  
21       [  
22         Return  
23         Num '1'  
24       ]  
25   ]
```

Code 1.41: Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen


```
1 File
2   Name './example_3_funs.picoc_blocks',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Block
10          Name 'main.2',
11          [
12            Return
13            Empty
14          ]
15        ],
16      FunDef
17        VoidType 'void',
18        Name 'fun1',
19        [],
20        [
21          Block
22            Name 'fun1.1',
23            []
24          ],
25      FunDef
26        IntType 'int',
27        Name 'fun2',
28        [],
29        [
30          Block
31            Name 'fun2.0',
32            [
33              Return
34              Num '1'
35            ]
36        ]
37    ]
```

Code 1.42: PicoC Blocks Pass für 3 Funktionen

```
1 File
2   Name './example_3_funs.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.2',
6       [
7         Return
8         Empty
9       ],
10    Block
11      Name 'fun1.1',
12      [
13        Return
14        Empty
15      ],
16    Block
17      Name 'fun2.0',
18      [
19        Exp
20        Num '1',
21        Return
22        Tmp
23        Num '1'
24      ]
25  ]
```

Code 1.43: PicoC Mon Pass für 3 Funktionen

```
1 File
2   Name './example_3_funs.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.2',
6       [
7         LOADIN BAF PC -1
8       ],
9     Block
10      Name 'fun1.1',
11      [
12        LOADIN BAF PC -1
13      ],
14    Block
15      Name 'fun2.0',
16      [
17        SUBI SP 1,
18        LOADI ACC 1,
19        STOREIN SP ACC 1,
20        LOADIN SP ACC 1,
21        ADDI SP 1,
22        LOADIN BAF PC -1
23      ]
24  ]
```

Code 1.44: RETI Blocks Pass für 3 Funktionen

1.4.6.1.1 Sprung zur Main Funktion

```
1 void fun1() {  
2 }  
3  
4 int fun2() {  
5     return 1;  
6 }  
7  
8 void main() {  
9     return;  
10 }
```

Code 1.45: PicoC Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

1.4.6.2 Funktionsdeklaration

```
1 int fun2(int var);  
2  
3 void fun1() {  
4 }  
5  
6 void main() {  
7     fun1();  
8     fun2(42);  
9     return;  
10 }  
11  
12 int fun2(int var) {  
13     return var;  
14 }
```

Code 1.46: PicoC Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss

1.4.6.3 Funktionsdefinition

1.4.6.3.1 Allocation von Variablen

1.4.6.4 Funktionsaufruf

1.4.6.4.1 Ohne Rückgabewert

```
1 void stack_fun();  
2  
3 void main() {  
4     stack_fun();  
5     return;  
6 }  
7  
8 void stack_fun() {  
9 }
```

Code 1.47: PicoC Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```
1 File
2   Name './example_function_call_no_return_value.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         StackMalloc
8         Num '2',
9         NewStackframe
10        Name 'stack_fun',
11        GoTo
12        Name 'addr@next_instr',
13      Exp
14      GoTo
15      Name 'stack_fun.0',
16      RemoveStackframe,
17      Return
18      Empty
19    ],
20    Block
21      Name 'stack_fun.0',
22      [
23        Return
24        Empty
25      ]
26  ]
```

Code 1.48: PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_function_call_no_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         SUBI SP 2,
8         MOVE BAF ACC,
9         ADDI SP 2,
10        MOVE SP BAF,
11        SUBI SP 2,
12        STOREIN BAF ACC 0,
13        LOADI ACC GoTo
14          Name 'addr@next_instr',
15        ADD ACC CS,
16        STOREIN BAF ACC -1,
17        Exp
18          GoTo
19          Name 'stack_fun.0',
20        MOVE BAF IN1,
21        LOADIN IN1 BAF 0,
22        MOVE IN1 SP,
23        LOADIN BAF PC -1
24      ],
25    Block
26      Name 'stack_fun.0',
27      [
28        LOADIN BAF PC -1
29      ]
30  ]

```

Code 1.49: RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 SUBI SP 2;
2 MOVE BAF ACC;
3 ADDI SP 2;
4 MOVE SP BAF;
5 SUBI SP 2;
6 STOREIN BAF ACC 0;
7 LOADI ACC 10;
8 ADD ACC CS;
9 STOREIN BAF ACC -1;
10 JUMP 5;
11 MOVE BAF IN1;
12 LOADIN IN1 BAF 0;
13 MOVE IN1 SP;
14 LOADIN BAF PC -1;
15 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 1.50: RETI Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

1.4.6.4.2 Mit Rückgabewert

```
1 void stack_fun() {  
2     return 42;  
3 }  
4  
5 void main() {  
6     int var = stack_fun();  
7 }
```

Code 1.51: PicoC Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```
1 File  
2   Name './example_function_call_with_return_value.picoc_mon',  
3   [  
4     Block  
5       Name 'stack_fun.1',  
6       [  
7         Exp  
8           Num '42',  
9         Return  
10          Tmp  
11            Num '1'  
12       ],  
13     Block  
14       Name 'main.0',  
15       [  
16         StackMalloc  
17           Num '2',  
18         NewStackframe  
19           Name 'stack_fun',  
20           GoTo  
21             Name 'addr@next_instr',  
22         Exp  
23           GoTo  
24             Name 'stack_fun.1',  
25         RemoveStackframe,  
26         Assign  
27           GlobalWrite  
28             Num '0',  
29           Tmp  
30             Num '1',  
31         Return  
32           Empty  
33       ]  
34   ]
```

Code 1.52: PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```
1 File
2   Name './example_function_call_with_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 42,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        LOADIN SP ACC 1,
11        ADDI SP 1,
12        LOADIN BAF PC -1
13      ],
14    Block
15      Name 'main.0',
16      [
17        SUBI SP 2,
18        MOVE BAF ACC,
19        ADDI SP 2,
20        MOVE SP BAF,
21        SUBI SP 2,
22        STOREIN BAF ACC 0,
23        LOADI ACC GoTo
24          Name 'addr@next_instr',
25        ADD ACC CS,
26        STOREIN BAF ACC -1,
27        Exp
28          GoTo
29          Name 'stack_fun.1',
30        MOVE BAF IN1,
31        LOADIN IN1 BAF 0,
32        MOVE IN1 SP,
33        LOADIN SP ACC 1,
34        STOREIN DS ACC 0,
35        ADDI SP 1,
36        LOADIN BAF PC -1
37      ]
38    ]
```

Code 1.53: RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```
1 JUMP 7;  
2 SUBI SP 1;  
3 LOADI ACC 42;  
4 STOREIN SP ACC 1;  
5 LOADIN SP ACC 1;  
6 ADDI SP 1;  
7 LOADIN BAF PC -1;  
8 SUBI SP 2;  
9 MOVE BAF ACC;  
10 ADDI SP 2;  
11 MOVE SP BAF;  
12 SUBI SP 2;  
13 STOREIN BAF ACC 0;  
14 LOADI ACC 17;  
15 ADD ACC CS;  
16 STOREIN BAF ACC -1;  
17 JUMP -15;  
18 MOVE BAF IN1;  
19 LOADIN IN1 BAF 0;  
20 MOVE IN1 SP;  
21 LOADIN SP ACC 1;  
22 STOREIN DS ACC 0;  
23 ADDI SP 1;  
24 LOADIN BAF PC -1;
```

Code 1.54: RETI Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

1.4.6.4.3 Umsetzung von Call by Sharing für Arrays

1.4.6.4.4 Umsetzung von Call by Value für Structs

1.4.7 Umsetzung kleinerer Details

1.5 Fehlermeldungen

1.5.1 Error Handler

1.5.2 Arten von Fehlermeldungen

1.5.2.1 Syntaxfehler

1.5.2.2 Laufzeitfehler

Literatur

Online

- *C Operator Precedence* - *cppreference.com*. URL: https://en.cppreference.com/w/c/language/operator_precedence (besucht am 27.04.2022).