

---

ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

# PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

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

*Author:*  
Jürgen Mattheis

*Gutachter:*  
Prof. Dr. Scholl

*Betreuung:*  
M.Sc. Seufert

---

Eine Bachelorarbeit am Lehrstuhl für  
Betriebssysteme

---

---

---

## **ERKLÄRUNG**

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

---

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Implementierung</b>	<b>9</b>
1.1	Lexikalische Analyse	9
1.1.1	Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse	9
1.1.2	Basic Lexer	10
1.2	Syntaktische Analyse	10
1.2.1	Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse	10
1.2.2	Umsetzung von Präzidenz	12
1.2.3	Derivation Tree Generierung	13
1.2.3.1	Early Parser	13
1.2.3.2	Codebeispiel	13
1.2.4	Derivation Tree Vereinfachung	14
1.2.4.1	Visitor	14
1.2.4.2	Codebeispiel	14
1.2.5	Abstrakt Syntax Tree Generierung	16
1.2.5.1	PicoC-Knoten	16
1.2.5.2	RETI-Knoten	21
1.2.5.3	Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung	22
1.2.5.4	Abstrakte Syntax	24
1.2.5.5	Transformer	26
1.2.5.6	Codebeispiel	26
1.3	Code Generierung	26
1.3.1	Übersicht	26
1.3.2	Passes	29
1.3.2.1	PicoC-Shrink Pass	29
1.3.2.1.1	Aufgabe	29
1.3.2.1.2	Codebeispiel	29
1.3.2.2	PicoC-Blocks Pass	31
1.3.2.2.1	Aufgaben	31
1.3.2.2.2	Abstrakte Syntax	31
1.3.2.2.3	Codebeispiel	31
1.3.2.3	PicoC-Mon Pass	32
1.3.2.3.1	Aufgaben	32
1.3.2.3.2	Abstrakte Syntax	32
1.3.2.3.3	Codebeispiel	33
1.3.2.4	RETI-Blocks Pass	34
1.3.2.4.1	Aufgaben	34
1.3.2.4.2	Abstrakte Syntax	34
1.3.2.4.3	Codebeispiel	35
1.3.2.5	RETI-Patch Pass	37
1.3.2.5.1	Aufgaben	37
1.3.2.5.2	Abstrakte Syntax	37
1.3.2.5.3	Codebeispiel	37
1.3.2.6	RETI Pass	40
1.3.2.6.1	Aufgaben	40
1.3.2.6.2	Konkrete und Abstrakte Syntax	40
1.3.2.6.3	Codebeispiel	41

1.3.3	Umsetzung von Pointern . . . . .	44
1.3.3.1	Referenzierung . . . . .	44
1.3.3.2	Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen . . . . .	46
1.3.4	Umsetzung von Arrays . . . . .	47
1.3.4.1	Initialisierung von Arrays . . . . .	47
1.3.4.2	Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	52
1.3.4.3	Zuweisung an Arrayindex . . . . .	57

---

---

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben . . . . .	27
1.2	Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform . . . . .	28
1.3	Architektur mit allen Passes ausgeschrieben . . . . .	28

---

---

# Codeverzeichnis

1.1	PicoC Code für Derivation Tree Generierung . . . . .	13
1.2	Derivation Tree nach Derivation Tree Generierung . . . . .	14
1.3	Derivation Tree nach Derivation Tree Vereinfachung . . . . .	15
1.4	Abstract Syntax Tree aus vereinfachtem Derivation Tree generiert . . . . .	26
1.5	PicoC Code für Codebeispiel . . . . .	30
1.6	Abstract Syntax Tree für Codebeispiel . . . . .	30
1.7	PicoC Shrink Pass für Codebeispiel . . . . .	31
1.8	PicoC-Blocks Pass für Codebeispiel . . . . .	32
1.9	PicoC-Mon Pass für Codebeispiel . . . . .	34
1.10	RETI-Blocks Pass für Codebeispiel . . . . .	37
1.11	RETI-Patch Pass für Codebeispiel . . . . .	40
1.12	RETI Pass für Codebeispiel . . . . .	43
1.13	PicoC-Code für Pointer Referenzierung . . . . .	44
1.14	Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung . . . . .	44
1.15	Symboltabelle für Pointer Referenzierung . . . . .	45
1.16	PicoC-Mon Pass für Pointer Referenzierung . . . . .	45
1.17	RETI-Blocks Pass für Pointer Referenzierung . . . . .	46
1.18	PicoC-Code für Pointer Dereferenzierung . . . . .	46
1.19	Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung . . . . .	47
1.20	PicoC-Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung . . . . .	47
1.21	PicoC-Code für Array Initialisierung . . . . .	48
1.22	Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung . . . . .	48
1.23	Symboltabelle für Array Initialisierung . . . . .	49
1.24	PicoC-Mon Pass für Array Initialisierung . . . . .	50
1.25	RETI-Blocks Pass für Array Initialisierung . . . . .	52
1.26	PicoC-Code für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	52
1.27	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	53
1.28	PicoC-Mon Pass für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	55
1.29	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Arrayindex . . . . .	56
1.30	PicoC-Code für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	57
1.31	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	57
1.32	PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	58
1.33	RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex . . . . .	59

---

---

# Tabellenverzeichnis

1.1	Präzidenzregeln von PicoC . . . . .	12
1.2	PicoC-Knoten Teil 1 . . . . .	16
1.3	PicoC-Knoten Teil 2 . . . . .	17
1.4	PicoC-Knoten Teil 3 . . . . .	18
1.5	PicoC-Knoten Teil 4 . . . . .	19
1.6	RETI-Knoten . . . . .	21
1.7	Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung . . . . .	23

---

---

# Definitionsverzeichnis

1.1	Label . . . . .	20
1.2	Location . . . . .	20
1.3	Token-Knoten . . . . .	20
1.4	Container-Knoten . . . . .	20
1.5	Symboltabelle . . . . .	33



---

---

# Grammatikverzeichnis

1.1.1 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 1 . . . . .	9
1.1.2 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 2 . . . . .	10
1.2.1 Konkrete Syntax Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 1 . . . . .	11
1.2.2 Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 2 . . . . .	12
1.2.3 Abstrakte Syntax für $L_{PioC}$ . . . . .	25
1.3.1 Abstrakte Syntax für $L_{PicoC\_Blocks}$ . . . . .	31
1.3.2 Abstrakte Syntax für $L_{PicoC\_Mon}$ . . . . .	33
1.3.3 Abstrakte Syntax für $L_{RETI\_Blocks}$ . . . . .	35
1.3.4 Abstrakte Syntax für $L_{RETI\_Patch}$ . . . . .	37
1.3.5 Konkrete Syntax für $L_{RETI\_Lex}$ . . . . .	40
1.3.6 Konkrete Syntax für $L_{RETI\_Parse}$ . . . . .	40
1.3.7 Abstrakte Syntax für $L_{RETI}$ . . . . .	41

# 1 Implementierung

## 1.1 Lexikalische Analyse

### 1.1.1 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse

<i>COMMENT</i>	::=	"//"/[ $\backslash$ n]*"/   "/*"/( $\cdot$   $\backslash$ n)*?/"*/"	<i>L_Comment</i>
<i>RETI.COMMENT.2</i>	::=	"//""?"#"/[ $\backslash$ n]*/	
<i>DIG.NO_0</i>	::=	"1"   "2"   "3"   "4"   "5"   "6"   "7"   "8"   "9"	<i>L_Arith</i>
<i>DIG.WITH_0</i>	::=	"0"   <i>DIG.NO_0</i>	
<i>NUM</i>	::=	"0"   <i>DIG.NO_0</i> <i>DIG.WITH_0</i> *	
<i>ASCII.CHAR</i>	::=	"_".." ~ "	
<i>CHAR</i>	::=	"'" <i>ASCII.CHAR</i> "'"	
<i>FILENAME</i>	::=	<i>ASCII.CHAR</i> + ".picoc"	
<i>LETTER</i>	::=	"a".."z"   "A".."Z"	
<i>NAME</i>	::=	( <i>LETTER</i>   "_") ( <i>LETTER</i> — <i>DIG.WITH_0</i> — "_")*	
<i>name</i>	::=	<i>NAME</i>   <i>INT.NAME</i>   <i>CHAR.NAME</i>   <i>VOID.NAME</i>	
<i>NOT</i>	::=	" ~ "	
<i>REF_AND</i>	::=	"&"	
<i>un_op</i>	::=	<i>SUB.MINUS</i>   <i>LOGIC.NOT</i>   <i>NOT</i>   <i>MUL.DEREF.PNTR</i>   <i>REF_AND</i>	
<i>MUL.DEREF.PNTR</i>	::=	"*"	
<i>DIV</i>	::=	"/"	
<i>MOD</i>	::=	"%"	
<i>prec1_op</i>	::=	<i>MUL.DEREF.PNTR</i>   <i>DIV</i>   <i>MOD</i>	
<i>ADD</i>	::=	"+"	
<i>SUB.MINUS</i>	::=	"_"	
<i>prec2_op</i>	::=	<i>ADD</i>   <i>SUB.MINUS</i>	
<i>LT</i>	::=	"<"	<i>L_Logic</i>
<i>LTE</i>	::=	"<="	
<i>GT</i>	::=	">"	
<i>GTE</i>	::=	">="	
<i>rel_op</i>	::=	<i>LT</i>   <i>LTE</i>   <i>GT</i>   <i>GTE</i>	
<i>EQ</i>	::=	"=="	
<i>NEQ</i>	::=	"!="	
<i>eq_op</i>	::=	<i>EQ</i>   <i>NEQ</i>	
<i>LOGIC.NOT</i>	::=	"!"	

**Grammar 1.1.1:** Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 1

<i>INT_DT.2</i>	::=	"int"	<i>L_Assign_Alloc</i>
<i>INT_NAME.3</i>	::=	"int" ( <i>LETTER</i>   <i>DIG_WITH_0</i>   "_")+	
<i>CHAR_DT.2</i>	::=	"char"	
<i>CHAR_NAME.3</i>	::=	"char" ( <i>LETTER</i>   <i>DIG_WITH_0</i>   "_")+	
<i>VOID_DT.2</i>	::=	"void"	
<i>VOID_NAME.3</i>	::=	"void" ( <i>LETTER</i>   <i>DIG_WITH_0</i>   "_")+	
<i>prim_dt</i>	::=	<i>INT_DT</i>   <i>CHAR_DT</i>   <i>VOID_DT</i>	

**Grammar 1.1.2:** Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 2

### 1.1.2 Basic Lexer

## 1.2 Syntaktische Analyse

### 1.2.1 Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse

In 1.2.1

<i>prim_exp</i>	::=	<i>name</i>   <i>NUM</i>   <i>CHAR</i>   "(" <i>logic_or</i> ")"	<i>L_Arith</i> +
<i>post_exp</i>	::=	<i>array_subscr</i>   <i>struct_attr</i>   <i>fun_call</i>	<i>L_Array</i> +
		<i>input_exp</i>   <i>print_exp</i>   <i>prim_exp</i>	<i>L_Pntr</i> +
<i>un_exp</i>	::=	<i>un_opun_exp</i>   <i>post_exp</i>	<i>L_Struct</i> + <i>L_Fun</i>
<i>input_exp</i>	::=	"input" "(" ")"	<i>L_Arith</i>
<i>print_exp</i>	::=	"print" "(" <i>logic_or</i> ")"	
<i>arith_prec1</i>	::=	<i>arith_prec1</i> <i>prec1_op</i> <i>un_exp</i>   <i>un_exp</i>	
<i>arith_prec2</i>	::=	<i>arith_prec2</i> <i>prec2_op</i> <i>arith_prec1</i>   <i>arith_prec1</i>	
<i>arith_and</i>	::=	<i>arith_and</i> "&" <i>arith_prec2</i>   <i>arith_prec2</i>	
<i>arith_oplus</i>	::=	<i>arith_oplus</i> "^" <i>arith_and</i>   <i>arith_and</i>	
<i>arith_or</i>	::=	<i>arith_or</i> " " <i>arith_oplus</i>   <i>arith_oplus</i>	
<i>rel_exp</i>	::=	<i>rel_exp</i> <i>rel_op</i> <i>arith_or</i>   <i>arith_or</i>	<i>L_Logic</i>
<i>eq_exp</i>	::=	<i>eq_exp</i> <i>eq_oprel_exp</i>   <i>rel_exp</i>	
<i>logic_and</i>	::=	<i>logic_and</i> "&&" <i>eq_exp</i>   <i>eq_exp</i>	
<i>logic_or</i>	::=	<i>logic_or</i> "  " <i>logic_and</i>   <i>logic_and</i>	
<i>type_spec</i>	::=	<i>prim_dt</i>   <i>struct_spec</i>	<i>L_Assign_Alloc</i>
<i>alloc</i>	::=	<i>type_spec</i> <i>pnter_decl</i>	
<i>assign_stmt</i>	::=	<i>un_exp</i> "=" <i>logic_or</i> ";"	
<i>initializer</i>	::=	<i>logic_or</i>   <i>array_init</i>   <i>struct_init</i>	
<i>init_stmt</i>	::=	<i>alloc</i> "=" <i>initializer</i> ";"	
<i>const_init_stmt</i>	::=	"const" <i>type_spec</i> <i>name</i> "=" <i>NUM</i> ";"	
<i>pnter_deg</i>	::=	"*" *	<i>L_Pntr</i>
<i>pnter_decl</i>	::=	<i>pnter_deg</i> <i>array_decl</i>   <i>array_decl</i>	
<i>array_dims</i>	::=	("[" <i>NUM</i> "]" ) *	<i>L_Array</i>
<i>array_decl</i>	::=	<i>name</i> <i>array_dims</i>   "(" <i>pnter_decl</i> ")" <i>array_dims</i>	
<i>array_init</i>	::=	"{" <i>initializer</i> ("," <i>initializer</i> ) * "}"	
<i>array_subscr</i>	::=	<i>post_exp</i> "[" <i>logic_or</i> "]"	
<i>struct_spec</i>	::=	"struct" <i>name</i>	<i>L_Struct</i>
<i>struct_params</i>	::=	( <i>alloc</i> ";" ) +	
<i>struct_decl</i>	::=	"struct" <i>name</i> "{" <i>struct_params</i> "}"	
<i>struct_init</i>	::=	"{" "." <i>name</i> "=" <i>initializer</i> ("," "." <i>name</i> "=" <i>initializer</i> ) * "}"	
<i>struct_attr</i>	::=	<i>post_exp</i> "." <i>name</i>	
<i>if_stmt</i>	::=	"if" "(" <i>logic_or</i> ")" <i>exec_part</i>	<i>L_If_Else</i>
<i>if_else_stmt</i>	::=	"if" "(" <i>logic_or</i> ")" <i>exec_part</i> "else" <i>exec_part</i>	
<i>while_stmt</i>	::=	"while" "(" <i>logic_or</i> ")" <i>exec_part</i>	<i>L_Loop</i>
<i>do_while_stmt</i>	::=	"do" <i>exec_part</i> "while" "(" <i>logic_or</i> ")" ";"	

**Grammar 1.2.1:** Konkrete Syntax Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 1

<i>decl_exp_stmt</i>	::=	<i>alloc</i> ";"	<i>L_Stmt</i>
<i>decl_direct_stmt</i>	::=	<i>assign_stmt</i>   <i>init_stmt</i>   <i>const_init_stmt</i>	
<i>decl_part</i>	::=	<i>decl_exp_stmt</i>   <i>decl_direct_stmt</i>   <i>RETI_COMMENT</i>	
<i>compound_stmt</i>	::=	"{" <i>exec_part</i> * "}"	
<i>exec_exp_stmt</i>	::=	<i>logic_or</i> ";"	
<i>exec_direct_stmt</i>	::=	<i>if_stmt</i>   <i>if_else_stmt</i>   <i>while_stmt</i>   <i>do_while_stmt</i>   <i>assign_stmt</i>   <i>fun_return_stmt</i>	
<i>exec_part</i>	::=	<i>compound_stmt</i>   <i>exec_exp_stmt</i>   <i>exec_direct_stmt</i>   <i>RETI_COMMENT</i>	
<i>decl_exec_stmts</i>	::=	<i>decl_part</i> * <i>exec_part</i> *	
<i>fun_args</i>	::=	[ <i>logic_or</i> ("," <i>logic_or</i> )*]	<i>L_Fun</i>
<i>fun_call</i>	::=	<i>name</i> (" <i>fun_args</i> ")	
<i>fun_return_stmt</i>	::=	"return" [ <i>logic_or</i> ];	
<i>fun_params</i>	::=	[ <i>alloc</i> ("," <i>alloc</i> )*]	
<i>fun_decl</i>	::=	<i>type_spec</i> <i>pntr_deg</i> <i>name</i> (" <i>fun_params</i> ")	
<i>fun_def</i>	::=	<i>type_spec</i> <i>pntr_deg</i> <i>name</i> (" <i>fun_params</i> ") " {" <i>decl_exec_stmts</i> } "	
<i>decl_def</i>	::=	( <i>struct_decl</i>   <i>fun_decl</i> );   <i>fun_def</i>	<i>L_File</i>
<i>decls_defs</i>	::=	<i>decl_def</i> *	
<i>file</i>	::=	<i>FILENAME</i> <i>decls_defs</i>	

**Grammar 1.2.2:** Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 2

## 1.2.2 Umsetzung von Präzidenz

Die **PicoC** Programmiersprache hat dieselben **Präzidenzregeln** implementiert, wie die Programmiersprache **C**<sup>1</sup>. Die **Präzidenzregeln** von **PicoC** sind in Tabelle 1.1 aufgelistet.

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

**Tabelle 1.1:** Präzidenzregeln von PicoC

<sup>1</sup>*C Operator Precedence - [cppreference.com](http://cppreference.com).*

### 1.2.3 Derivation Tree Generierung

#### 1.2.3.1 Early Parser

#### 1.2.3.2 Codebeispiel

```

1 struct st {int *(*attr)[5][6];};
2
3 void main() {
4     struct st *(*var)[3][2];
5 }

```

Code 1.1: PicoC Code für Derivation Tree Generierung

```

1 file
2   ./example_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.dt
3 decls_defs
4   decl_def
5     struct_decl
6       name st
7       struct_params
8       alloc
9       type_spec
10      prim_dt int
11      pntr_decl
12      pntr_deg *
13      array_decl
14      pntr_decl
15      pntr_deg *
16      array_decl
17      name attr
18      array_dims
19      array_dims
20      5
21      6
22  decl_def
23  fun_def
24    type_spec
25    prim_dt void
26    pntr_deg
27    name main
28    fun_params
29    decl_exec_stmts
30    decl_part
31    decl_exp_stmt
32    alloc
33    type_spec
34    struct_spec
35    name st
36    pntr_decl
37    pntr_deg *
38    array_decl
39    pntr_decl
40    pntr_deg *

```

```

41         array_decl
42         name var
43         array_dims
44     array_dims
45     3
46     2

```

Code 1.2: Derivation Tree nach Derivation Tree Generierung

## 1.2.4 Derivation Tree Vereinfachung

### 1.2.4.1 Visitor

### 1.2.4.2 Codebeispiel

Beispiel aus Subkapitel 1.2.3.2 wird fortgeführt.

```

1 file
2   ./example_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.dt_simple
3 decls_defs
4   decl_def
5     struct_decl
6     name st
7     struct_params
8     alloc
9     pntr_decl
10    pntr_deg *
11    array_decl
12    array_dims
13    5
14    6
15    pntr_decl
16    pntr_deg *
17    array_decl
18    array_dims
19    type_spec
20    prim_dt int
21  name attr
22 decl_def
23 fun_def
24   type_spec
25   prim_dt void
26   pntr_deg
27   name main
28   fun_params
29   decl_exec_stmts
30   decl_part
31   decl_exp_stmt
32   alloc
33   pntr_decl
34   pntr_deg *
35   array_decl
36   array_dims

```

```
37         3
38         2
39     pntr_decl
40     pntr_deg *
41     array_decl
42     array_dims
43     type_spec
44     struct_spec
45     name st
46 name var
```

**Code 1.3:** Derivation Tree nach Derivation Tree Vereinfachung



## 1.2.5 Abstrakt Syntax Tree Generierung

### 1.2.5.1 PicoC-Knoten

PiocC-Knoten	Beschreibung
Name(val)	Ein <b>Bezeichner</b> , z.B. <code>my_fun</code> , <code>my_var</code> usw., aber da es keine gute Kurzform für <code>Identifizier()</code> (englisches Wort für Bezeichner) gibt, wurde dieser Knoten <code>Name()</code> genannt.
Num(val)	Eine <b>Zahl</b> , z.B. 42, -3 usw.
Char(val)	Ein <b>Zeichen</b> der <b>ASCII-Zeichenkodierung</b> , z.B. <code>'c'</code> , <code>'*'</code> usw.
Minus(), Not(), DerefOp(), RefOp(), LogicNot()	Die <b>unären Operatoren</b> <code>un_op</code> : <code>-a</code> , <code>~a</code> , <code>*a</code> , <code>&amp;a</code> <code>!a</code> .
Add(), Sub(), Mul(), Div(), Mod(), Oplus(), And(), Or(), LogicAnd(), LogicOr()	Die <b>binären Operatoren</b> <code>bin_op</code> : <code>a + b</code> , <code>a - b</code> , <code>a * b</code> , <code>a / b</code> , <code>a % b</code> , <code>a ^ b</code> , <code>a &amp; b</code> , <code>a   b</code> , <code>a &amp;&amp; b</code> , <code>a    b</code> .
Eq(), NEq(), Lt(), LtE(), Gt(), GtE()	Die <b>Relationen</b> <code>rel</code> : <code>a == b</code> , <code>a != b</code> , <code>a &lt; b</code> , <code>a &lt;= b</code> , <code>a &gt; b</code> , <code>a &gt;= b</code> .
Const(), Writeable()	Die <b>Type Qualifier</b> <code>type_qual</code> : <code>const</code> , was für ein <b>nicht beschreibbare Konstante</b> steht und das <b>nicht</b> Angeben von <code>const</code> , was für einen <b>beschreibbare</b> Variable steht.
IntType(), CharType(), VoidType()	Die <b>Type Specifier</b> für <b>Primitiven Datentypen</b> , die in der Abstrakten Syntax, um eine intuitive Bezeichnung zu haben einfach nur unter <b>Datentypen</b> <code>datatype</code> eingeordnet werden: <code>int</code> , <code>char</code> , <code>void</code> .
Placeholder()	<b>Platzhalter</b> für einen Knoten, der diesen später <b>ersetzt</b> .
BinOp(exp, bin_op, exp)	Container für eine <b>binäre Operation</b> mit 2 Expressions: <code>&lt;exp1&gt; &lt;bin_op&gt; &lt;exp2&gt;</code>
UnOp(un_op, exp)	Container für eine <b>unäre Operation</b> mit einer Expression: <code>&lt;un_op&gt; &lt;exp&gt;</code> .
Exit(num)	Container für einen <b>Exit Code</b> , der vor der Beendigung in das ACC Register geschrieben wird und steht für die <b>Beendigung</b> des laufenden Programmes.
Atom(exp, rel, exp)	Container für eine <b>binäre Relation</b> mit 2 Expressions: <code>&lt;exp1&gt; &lt;rel&gt; &lt;exp2&gt;</code>
ToBool(exp)	Container für einen <b>Arithmetischen Ausdruck</b> , wie z.B. <code>1 + 3</code> oder einfach nur <code>3</code> , der nicht nur 1 oder 0 als Ergebnis haben kann und daher bei einem Ergebnis <code>x &gt; 1</code> auf 1 abgebildet wird.
Alloc(type_qual, datatype, name, local_var_or_param)	<b>Container</b> für eine <b>Allokation</b> <code>&lt;type_qual&gt; &lt;datatype&gt; &lt;name&gt;</code> mit den notwendigen Knoten <code>type_qual</code> , <code>datatype</code> und <code>name</code> , die alle für einen Eintrag in der <b>Symboltabelle</b> notwendigen Informationen enthalten. Zudem besitzt er ein verstecktes Attribut <code>local_var_or_param</code> , dass die Information trägt, ob es sich bei der <b>Variable</b> um eine <b>Lokale Variable</b> oder einen <b>Parameter</b> handelt.
Assign(lhs, exp)	Container für eine <b>Zuweisung</b> , wobei <code>lhs</code> ein <code>Subscr(exp1, exp2)</code> , <code>Deref(exp1, exp2)</code> , <code>Attr(exp, name)</code> oder <code>Name('var')</code> sein kann und <code>exp</code> ein beliebiger <b>Logischer Ausdruck</b> sein kann: <code>lhs = exp</code> .

Tabelle 1.2: PicoC-Knoten Teil 1

PiocC-Knoten	Beschreibung
Exp(exp, datatype, error_data)	Container für einen <b>beliebigen Ausdruck</b> , dessen Ergebnis auf den <b>Stack</b> soll. Zudem besitzt er 2 versteckte Attribute, wobei <b>datatype</b> im <b>RETI Blocks Pass</b> wichtig ist und <b>error_data</b> für <b>Fehlermeldungen</b> wichtig ist.
Stack(num)	Container, der für das <b>temporäre</b> Ergebnis einer Berechnung, das <b>num</b> Speicherzellen relativ zum <b>Stackpointer Register SP</b> steht.
Stackframe(num)	Container, der für eine Variable steht, die <b>num</b> Speicherzellen relativ zum <b>Begin-Aktive-Funktion Register BAF</b> steht.
Global(num)	Container, der für eine Variable steht, die <b>num</b> Speicherzellen relativ zum <b>Datensegment Register DS</b> steht.
StackMalloc(num)	Container, der für das <b>Allokieren</b> von <b>num</b> Speicherzellen auf dem <b>Stack</b> steht.
PntrDecl(num, datatype)	Container, der für den <b>Pointerdatatype</b> steht: <code>&lt;prim_dt&gt; *&lt;var&gt;</code> , wobei das <b>Attribut</b> <b>num</b> die <b>Anzahl zusammengefasster Pointer</b> angibt und <b>datatype</b> der Datentyp ist, auf den der oder die <b>Pointer</b> zeigen.
Ref(exp, datatype, error_data)	Container, der für die Anwendung des <b>Referenz-Operators</b> <code>&amp;&lt;var&gt;</code> steht und die <b>Adresse</b> einer <b>Location</b> (Definition 1.2) auf den Stack schreiben soll, die über <b>exp</b> eingegrenzt wird. Zudem besitzt er 2 versteckte Attribute, wobei <b>datatype</b> im <b>RETI Blocks Pass</b> wichtig ist und <b>error_data</b> für <b>Fehlermeldungen</b> wichtig ist.
Deref(lhs, exp)	Container für den <b>Indezzugriff</b> auf einen <b>Array-</b> oder <b>Pointerdatatype</b> : <code>&lt;var&gt;[&lt;i&gt;]</code> , wobei <b>exp1</b> eine angehängte weitere <code>Subscr(exp1, exp2)</code> , <code>Deref(exp1, exp2)</code> , <code>Attr(exp, name)</code> oder ein <code>Name('var')</code> sein kann und <b>exp2</b> der Index ist auf den zugegriffen werden soll.
ArrayDecl(nums, datatype)	Container, der für den <b>Arraydatatype</b> steht: <code>&lt;prim_dt&gt; &lt;var&gt;[&lt;i&gt;]</code> , wobei das <b>Attribut</b> <b>nums</b> eine Liste von <code>Num('x')</code> ist, die die <b>Dimensionen</b> des Arrays angibt und <b>datatype</b> der Datentyp ist, der über das Anwenden von <code>Subscript()</code> auf das Array zugreifbar ist.
Array(exps, datatype)	Container für den <b>Initializer</b> eines <b>Arrays</b> , dessen Einträge <b>exps</b> weitere Initializer für eine <b>Array-Dimension</b> oder ein Initializer für ein <b>Struct</b> oder ein <b>Logischer Ausdruck</b> sein können, z.B. <code>{{1, 2}, {3, 4}}</code> . Des Weiteren besitzt er ein verstecktes Attribut <b>datatype</b> , welches für den <b>PicoC-Mon Pass</b> Informationen transportiert, die für <b>Fehlermeldungen</b> wichtig sind.
Subscr(exp1, exp2)	Container für den <b>Indezzugriff</b> auf einen <b>Array-</b> oder <b>Pointerdatatype</b> : <code>&lt;var&gt;[&lt;i&gt;]</code> , wobei <b>exp1</b> eine angehängte weitere <code>Subscr(exp1, exp2)</code> , <code>Deref(exp1, exp2)</code> oder <code>Attr(exp, name)</code> Operation sein kann oder ein <code>Name('var')</code> sein kann und <b>exp2</b> der Index ist auf den zugegriffen werden soll.
StructSpec(name)	Container für einen selbst definierten <b>Structdatatype</b> : <code>struct &lt;name&gt;</code> , wobei das <b>Attribut</b> <b>name</b> festlegt, welchen <b>selbst definierte</b> Structdatatype dieser Container-Knoten repräsentiert.
Attr(exp, name)	Container für den <b>Attributzugriff</b> auf einen <b>Structdatatype</b> : <code>&lt;var&gt;.&lt;attr&gt;</code> , wobei <b>exp1</b> eine angehängte weitere <code>Subscr(exp1, exp2)</code> , <code>Deref(exp1, exp2)</code> oder <code>Attr(exp, name)</code> Operation sein kann oder ein <code>Name('var')</code> sein kann und <b>name</b> das Attribut ist, auf das zugegriffen werden soll.

Tabelle 1.3: PicoC-Knoten Teil 2

PiocC-Knoten	Beschreibung
Struct(assigns, datatype)	Container für den <b>Initializer</b> eines <b>Structs</b> , z.B. {.<attr1>={1, 2}, .<attr2>={3, 4}}, dessen Eintrag assigns eine Liste von Assign(lhs, exp) ist mit einer Zuordnung eines <b>Attributezeichners</b> , zu einem weiteren Initializer für eine <b>Array-Dimension</b> oder zu einem Initializer für ein <b>Struct</b> oder zu einem <b>Logischen Ausdruck</b> . Des Weiteren besitzt er ein verstecktes Attribut datatype, welches für den <b>PicoC-Mon Pass</b> Informationen transportiert, die für <b>Fehlermeldungen</b> wichtig sind.
StructDecl(name, allocs)	Container für die Deklaration eines <b>selbstdefinierten Structdatentyps</b> , z.B. struct <var> {<datatype> <attr1>; <datatype> <attr2>;}, wobei name der <b>Bezeichner</b> des Structdatentyps ist und allocs eine Liste von Bezeichnern der <b>Attribute</b> des Structdatentyps mit dazugehörigem <b>Datentyp</b> , wofür sich der <b>Container-Knoten</b> Alloc(type_qual, datatype, name) sehr gut als <b>Container</b> eignet.
If(exp, stmts)	Container für ein <b>If Statement</b> if(<exp>) { <stmts> } inklusive <b>Condition</b> exp und einem <b>Branch</b> stmts, indem eine <b>Liste von Statements</b> stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
IfElse(exp, stmts1, stmts2)	Container für ein <b>If-Else Statement</b> if(<exp>) { <stmts2> } else { <stmts2> } inklusive <b>Condition</b> exp und 2 <b>Branches</b> stmts1 und stmts2, die zwei Alternativen darstellen in denen jeweils <b>Listen von Statements</b> oder GoTo(Name('block.xyz'))'s stehen können.
While(exp, stmts)	Container für ein <b>While-Statement</b> while(<exp>) { <stmts> } inklusive <b>Condition</b> exp und einem <b>Branch</b> stmts, indem eine <b>Liste von Statements</b> stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
DoWhile(exp, stmts)	Container für ein <b>Do-While-Statement</b> do { <stmts> } while(<exp>); inklusive <b>Condition</b> exp und einem <b>Branch</b> stmts, indem eine <b>Liste von Statements</b> stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
Call(name, exps)	Container für einen <b>Funktionsaufruf</b> : fun_name(exps), wobei name der <b>Bezeichner</b> der Funktion ist, die aufgerufen werden soll und exps eine <b>Liste von Argumenten</b> ist, die an die Funktion übergeben werden soll.
Return(exp)	Container für ein <b>Return-Statement</b> : return <exp>, wobei das <b>Attribut</b> exp einen <b>Logischen Ausdruck</b> darstellt, dessen Ergebnis vom <b>Return-Statement</b> zurückgegeben wird.
FunDecl(datatype, name, allocs)	Container für eine <b>Funktionsdeklaration</b> , z.B. <datatype> <fun_name>(<datatype> <param1>, <datatype> <param2>), wobei datatype der <b>Rückgabewert</b> der Funktion ist, name der <b>Bezeichner</b> der Funktion ist und allocs die <b>Parameter</b> der Funktion sind, wobei der <b>Container-Knoten</b> Alloc(type_spec, datatype, name) als Container für die Parameter dient.

Tabelle 1.4: PicoC-Knoten Teil 3

PiocC-Knoten	Beschreibung
FunDef(datatype, name, allocs, stmts.blocks)	Container für eine <b>Funktionsdefinition</b> , z.B. <datatype> <fun.name>(<datatype> <param>) {<stmts>}, wobei datatype der <b>Rückgabewert</b> der Funktion ist, name der <b>Bezeichner</b> der Funktion ist, allocs die <b>Parameter</b> der Funktion sind, wobei der <b>Container-Knoten</b> Alloc(type_spec, datatype, name) als Container für die Parameter dient und stmts.blocks eine Liste von <b>Statements</b> bzw. <b>Blöcken</b> ist, welche diese Funktion beinhaltet.
NewStackframe(fun_name, goto_after_call)	Container für die <b>Erstellung</b> eines neuen <b>Stackframes</b> und Speicherung des Werts des BAF-Registers der <b>aufgerufenen Funktion</b> und der <b>Rücksprungsadresse</b> nacheinander an den <b>Anfang</b> des neuen <b>Stackframes</b> . Das Attribut fun_name steht dabei für den Bezeichner der Funktion, für die ein neuer <b>Stackframe</b> erstellt werden soll. Das Attribut fun_name dient später dazu den <b>Block</b> dieser Funktion zu finden, weil dieser für den weiteren Kompilierungsvorgang wichtige Information in seinen <b>versteckten Attributen</b> gespeichert hat. Des Weiteren ist das Attribut goto_after_call ein GoTo(Name('addr@next_instr')), welches später durch die <b>Adresse</b> des Befehls, der direkt auf die <b>Jump Instruction</b> folgt, ersetzt wird.
RemoveStackframe()	Container für das <b>Entfernen</b> des aktuellen <b>Stackframes</b> durch das <b>Wiederherstellen</b> des im noch <b>aktuellen Stackframe</b> gespeicherten Werts des BAF-Registers der <b>aufgerufenen Funktion</b> und das Setzen des SP-Registers auf den Wert des BAF-Registers <b>vor</b> der Wiederherstellung.
File(name, decls_defs.blocks)	Container für alle <b>Funktionen</b> oder <b>Blöcke</b> , welche eine Datei als Ursprung haben, wobei name der <b>Dateiname</b> der Datei ist, die erstellt wird und decls_defs.blocks eine Liste von <b>Funktionen</b> bzw. <b>Blöcken</b> ist.
Block(name, stmts_instrs, instrs.before, num_instrs, param_size, local_vars.size)	Container für <b>Statements</b> , der auch als <b>Block</b> bezeichnet wird, wobei das Attribut name der Bezeichner des <b>Labels</b> (Definition 1.1) des Blocks ist und stmts_instrs eine <b>Liste von Statements</b> oder <b>Instructions</b> . Zudem besitzt er noch 3 <b>versteckte Attribute</b> , wobei instrs.before die Zahl der <b>Instructions</b> vor diesem <b>Block</b> zählt, num_instrs die Zahl der Instructions ohne Kommentare in diesem Block zählt, param_size die voraussichtliche Anzahl an Speicherzellen aufaddiert, die für die <b>Parameter</b> der Funktion belegt werden müssen und local_vars.size die voraussichtliche Anzahl an Speicherzellen aufaddiert, die für die <b>lokalen Variablen</b> der Funktion belegt werden müssen.
GoTo(name)	Container für ein <b>Goto</b> zu einem anderen <b>Block</b> , wobei das Attribut name der Bezeichner des <b>Labels</b> des Blocks ist zu dem Gesprungen werden soll.
SingleLineComment(prefix, content)	Container für einen <b>Kommentar</b> , den der Compiler selber während des <b>Kompilierungsvorgangs</b> erstellt, der im <b>RETI-Interpreter</b> selbst später <b>nicht</b> sichtbar sein wird, aber in den <b>Immediate-Dateien</b> , welche die <b>Abstract Syntax Trees</b> nach den verschiedenen <b>Passes</b> enthalten.
RETIComment(value)	Container für einen <b>Kommentar</b> im Code der Form: // # comment, der im <b>RETI-Interpreter</b> später sichtbar sein wird und zur Orientierung genutzt werden kann, allerdings in einer tatsächlichen Implementierung einer <b>RETI-CPU nicht umsetzbar</b> ist und auch nicht sinnvoll wäre umzusetzen. Der <b>Kommentar</b> ist im Attribut <b>value</b> , welches jeder Knoten besitzt gespeichert.

Tabelle 1.5: PicoC-Knoten Teil 4

**Definition 1.1: Label**

Durch einen *Bezeichner eindeutig* zuordenbares *Sprungziel* im Programmcode.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>`tab:picoc`knoten`teil`4.`

**Definition 1.2: Location**

Kollektiver Begriff für *Variablen*, *Attribute* bzw. *Elemente* von Variablen bestimmter Datentypen, *Speicherbereiche auf dem Stack*, die *temporäre Zwischenergebnisse* speichern und *Register*.

Im Grunde genommen alles, was mit einem *Programm zu tun* hat und irgendwo *gespeichert* ist.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>G. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Die ausgegrauten Attribute der PicoC-Nodes sind versteckte Attribute, die **nicht** direkt bei der Erstellung der **PicoC-Nodes** mit einem Wert **initialisiert** werden, sondern im **Verlauf der Kompilierung** beim Durchlaufen der verschiedenen Passes etwas zugewiesen bekommen, dass im weiteren Kompilierungsvorgang **Informationen** transportiert, die später im Kompilierungsvorgang nicht mehr so leicht zugänglich wären.

Jeder **Knoten** hat darüberhinaus auch noch 2 **Attribute** **value** und **position**, wobei **value** bei einem **Token-Knoten** (Definition 1.3) dem **Tokenwert** des Tokens, welches es ersetzt entspricht und bei **Container-Knoten** (Definition 1.4) unbesetzt ist. Das **Attribut** **position** wird später für Fehlermeldungen gebraucht.

**Definition 1.3: Token-Knoten**

Ersetzt ein *Token* bei der Generierung des *Abstract Syntax Tree*, damit der Zugriff auf Knoten des Abstract Syntax Tree möglichst *simpel* ist und keine vermeidbaren Fallunterscheidungen gemacht werden müssen.

*Token-Knoten* entsprechen im Abstract Syntax Tree *Blättern*.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Thiemann, „Compilerbau“.

**Definition 1.4: Container-Knoten**

Dient als *Container* für andere *Container-Knoten* und *Token-Knoten*. Die *Container-Knoten* werden *optimalerweise* immer so gewählt, dass sie *mehrere Produktionen der Konkreten Syntax* abdecken, die einen *gleichen Aufbau* haben und sich auch unter einem *Überbegriff* zusammenfassen lassen.<sup>a</sup>

*Container-Knoten* entsprechen im Abstract Syntax Tree *Inneren Knoten*.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Wie z.B. die verschiedenen **Arithmetischen Ausdrücke**, wie z.B. `1 % 3` und **Logischen Ausdrücke**, wie z.B. `1 && 2 < 3`, die einen gleichen Aufbau haben mit immer einer **Operation** in der Mitte haben und 2 **Operanden** auf beiden Seiten und sich unter dem Überbegriff **Binäre Operationen** zusammenfassen lassen.

<sup>b</sup>Thiemann, „Compilerbau“.

## 1.2.5.2 RETI-Knoten

RETI-Knoten	Beschreibung
Program(name, instrs)	Container für alle <b>Instructions</b> : <name> <instrs>, wobei <b>name</b> der <b>Dateiname</b> der Datei ist, die erstellt wird und <b>instrs</b> eine <b>Liste von Instructions</b> ist.
Instr(op, args)	Container für eine <b>Instruction</b> : <op> <args>, wobei <b>op</b> eine <b>Operation</b> ist und <b>args</b> eine <b>Liste von Argumenten</b> für dieser Operation.
Jump(rel, im_goto)	Container für eine <b>Jump-Instruction</b> : JUMP<rel> <im>, wobei <b>rel</b> eine <b>Relation</b> ist und <b>im_goto</b> ein <b>Immediate Value</b> <b>Im(val)</b> für die <b>Anzahl an Speicherzellen</b> , um die relativ zur <b>Jump-Instruction</b> gesprungen werden soll oder ein <b>GoTo(Name('block.xyz'))</b> , das später im <b>RETI-Patch Pass</b> durch einen passenden <b>Immediate Value</b> ersetzt wird.
Int(num)	Container für einen <b>Interruptaufruf</b> : INT <im>, wobei <b>num</b> die <b>Interruptvektornummer</b> (IVN) für die passende Speicherzelle in der <b>Interruptvektortabelle</b> ist, in der die Adresse der <b>Interrupt-Service-Routine</b> (ISR) steht.
Call(name, reg)	Container für einen <b>Prozeduraufruf</b> : CALL <name> <reg>, wobei <b>name</b> der <b>Bezeichner</b> der Prozedur, die aufgerufen werden soll ist und <b>reg</b> ein <b>Register</b> ist, das als <b>Argument</b> an die Prozedur dient. Diese <b>Operation</b> ist in der Betriebssysteme Vorlesung <sup>a</sup> nicht deklariert, sondern wurde dazuerfunden, um unkompliziert ein CALL PRINT ACC oder CALL INPUT ACC im RETI-Interpreter simulieren zu können.
Name(val)	Bezeichner für eine <b>Prozedur</b> , z.B. PRINT oder INPUT oder den <b>Programmnamen</b> , z.B. PROGRAMNAME. Dieses <b>Argument</b> ist in der Betriebssysteme Vorlesung <sup>a</sup> nicht deklariert, sondern wurde dazuerfunden, um Bezeichner, wie PRINT, INPUT oder PROGRAMNAME schreiben zu können.
Reg(reg)	Container für ein <b>Register</b> .
Im(val)	Ein <b>Immediate Value</b> , z.B. 42, -3 usw.
Add(), Sub(), Mult(), Div(), Mod(), Oplus(), Or(), And()	<b>Compute-Memory</b> oder <b>Compute-Register</b> Operationen: ADD, SUB, MULT, DIV, OPLUS, OR, AND.
Addi(), Subi(), Multi(), Divi(), Modi(), Oplusi(), Ori(), Andi()	<b>Compute-Immediate</b> Operationen: ADDI, SUBI, MULTI, DIVI, MODI, OPLUSI, ORI, ANDI.
Load(), Loadin(), Loadi()	<b>Load</b> Operationen: LOAD, LOADIN, LOADI.
Store(), Storein(), Move()	<b>Store</b> Operationen: STORE, STOREIN, MOVE.
Lt(), LtE(), Gt(), GtE(), Eq(), NEq(), Always(), NOP()	<b>Relationen</b> : <, <=, >, >=, ==, !=, _NOP.
Rti()	<b>Return-From-Interrupt</b> Operation: RTI.
Pc(), In1(), In2(), Acc(), Sp(), Baf(), Cs(), Ds()	<b>Register</b> : PC, IN1, IN2, ACC, SP, BAF, CS, DS.

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

Tabelle 1.6: RETI-Knoten

**1.2.5.3 Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung**

Hier sind jegliche **Kompositionen** von **PicoC-Knoten** und **RETI-Knoten** aufgelistet, die eine **besondere Bedeutung** haben und nicht bereits in der **Abstrakten Syntax 1.2.1** enthalten sind.



Komposition	Beschreibung
Ref(Global(Num('addr')))	Speichert <b>Adresse</b> der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Datensegment Register</b> DS steht auf den <b>Stack</b> .
Ref(Stackframe(Num('addr')))	Speichert <b>Adresse</b> der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Begin-Aktive-Funktion Register</b> BAF steht auf den <b>Stack</b> .
Ref(Subscr(Stack(Num('addr1')), Stack(Num('addr2'))))	Berechnet die nächste <b>Adresse</b> aus der <b>Adresse</b> , die an Speicherzelle Stack(Num('addr1')) steht und dem <b>Subscript Index</b> , der an Speicherzelle Stack(Num('addr2')) steht und speichert diese auf den <b>Stack</b> . Die Berechnung ist abhängig davon ob der <b>Datentyp</b> ArrayDecl(datatype) oder PntrDecl(datatype) ist. Der <b>Datentyp</b> ist ein verstecktes Attribut von Ref(exp).
Ref(Attr(Stack(Num('addr1')), Name('attr')))	Berechnet die nächste <b>Adresse</b> aus der <b>Adresse</b> , die an Speicherzelle Stack(Num('addr1')) steht und dem <b>Attributnamen</b> Name('attr') und speichert diese auf den <b>Stack</b> . Zur Berechnung ist der Name des <b>Struct</b> in StructSpec(Name('st')) notwendig, dessen <b>Attribut</b> Name('attr') ist. StructSpec(Name('st')) ist ein verstecktes Attribut von Ref(exp).
Assign(Stack(Num('size')), Global(Num('addr')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die ab Global(Num('addr')) relativ zum <b>Datensegment Register</b> DS stehen, versetzt genauso auf den <b>Stack</b> .
Assign(Stack(Num('size')), Stackframe(Num('addr')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die ab Stackframe(Num('addr')) relativ zum <b>Begin-Aktive-Funktion Register</b> BAF stehen, versetzt genauso auf den <b>Stack</b> .
Exp(Global(Num('addr')))	Speichert <b>Inhalt</b> der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Datensegment Register</b> DS steht auf den <b>Stack</b> .
Exp(Stackframe(Num('addr')))	Speichert <b>Inhalt</b> der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Begin-Aktive-Funktion Register</b> BAF steht auf den <b>Stack</b> .
Exp(Stack(Num('addr')))	Speichert <b>Inhalt</b> der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Stackpointer Register</b> SP steht auf den <b>Stack</b> .
Assign(Stack(Num('addr1')), Stack(Num('addr2')))	Speichert <b>Inhalt</b> der Speicherzelle Stack(Num('addr2')), die Num('addr2') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Stackpointer Register</b> SP steht an der <b>Adresse</b> in der Speicherzelle, die Num('addr1') Speicherzellen <b>relativ</b> zum <b>Stackpointer Register</b> SP steht.
Assign(Global(Num('addr')), Stack(Num('size')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die auf dem <b>Stack</b> stehen, versetzt genauso auf die Speicherzellen ab Num('addr') <b>relativ</b> zum <b>Datensegment Register</b> DS.
Assign(Stackframe(Num('addr')), Stack(Num('size')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die auf dem <b>Stack</b> stehen, versetzt genauso auf die Speicherzellen ab Num('addr') <b>relativ</b> zum <b>Begin-Aktive-Funktion Register</b> BAF.
Exp(Reg(reg))	Schreibt den aktuellen Wert des <b>Registers</b> reg auf den <b>Stack</b> .
Instr(Loadi(), [Reg(Acc()), GoTo(Name('addr@next_instr'))])	Lädt in das Register ACC die <b>Adresse</b> der Instruction, die in diesem Kontext direkt nach dem Sprung zum Block einer anderen Funktion steht.

Tabelle 1.7: Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung



Um die obige Tabelle 1.7 nicht mit unnötig viel repetitiven Inhalt zu füllen, wurden die zahlreichen Kompositionen **ausgelassen**, bei denen einfach nur **exp** durch  $\text{Stack}(\text{Num}('x')), x \in \mathbb{N}$  ersetzt wurde.

Zudem sind auch jegliche Kombinationen ausgelassen, bei denen einfach nur eine **Expression** an ein  $\text{Exp}(\text{exp})$  bzw.  $\text{Ref}(\text{exp})$  drangehängt wurde.

#### 1.2.5.4 Abstrakte Syntax

<i>un_op</i>	::=	<i>Minus()</i>   <i>Not()</i>	<i>L_Arith</i>
<i>bin_op</i>	::=	<i>Add()</i>   <i>Sub()</i>   <i>Mul()</i>   <i>Div()</i>   <i>Mod()</i>   <i>Oplus()</i>   <i>And()</i>   <i>Or()</i>	
<i>exp</i>	::=	<i>Name(str)</i>   <i>Num(str)</i>   <i>Char(str)</i>   <i>BinOp</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> , <i>&lt;bin_op&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>UnOp</i> ( <i>&lt;un_op&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>Call</i> ( <i>Name('input')</i> , <i>None</i> )	
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>Alloc</i> ( <i>&lt;type_qual&gt;</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )   <i>Call</i> ( <i>Name('print')</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )	
<i>un_op</i>	::=	<i>LogicNot()</i>	<i>L_Logic</i>
<i>rel</i>	::=	<i>Eq()</i>   <i>NEq()</i>   <i>Lt()</i>   <i>LtE()</i>   <i>Gt()</i>   <i>GtE()</i>	
<i>bin_op</i>	::=	<i>LogicAnd()</i>   <i>LogicOr()</i>	
<i>exp</i>	::=	<i>Atom</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> , <i>&lt;rel&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>ToBool</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> )	
<i>type_qual</i>	::=	<i>Const()</i>   <i>Writeable()</i>	<i>L_Assign_Alloc</i>
<i>datatype</i>	::=	<i>IntType()</i>   <i>CharType()</i>   <i>VoidType()</i>	
<i>lhs</i>	::=	<i>Alloc</i> ( <i>&lt;type_qual&gt;</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )   <i>&lt;ref_loc&gt;</i>	
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>Alloc</i> ( <i>&lt;type_qual&gt;</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )	
<i>stmt</i>	::=	<i>Assign</i> ( <i>&lt;lhs&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>Exp</i> ( <i>&lt;exp_stmts&gt;</i> )	
<i>datatype</i>	::=	<i>PntrDecl</i> ( <i>Num(str)</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> )	<i>L_Pntr</i>
<i>deref_loc</i>	::=	<i>Ref</i> ( <i>&lt;ref_loc&gt;</i> )   <i>&lt;ref_loc&gt;</i>	
<i>ref_loc</i>	::=	<i>Name(str)</i>   <i>Deref</i> ( <i>&lt;deref_loc&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>Subscr</i> ( <i>&lt;deref_loc&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>Attr</i> ( <i>&lt;ref_loc&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )	
<i>exp</i>	::=	<i>Deref</i> ( <i>&lt;deref_loc&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>Ref</i> ( <i>&lt;ref_loc&gt;</i> )	
<i>datatype</i>	::=	<i>ArrayDecl</i> ( <i>Num(str)</i> +, <i>&lt;datatype&gt;</i> )	<i>L_Array</i>
<i>exp</i>	::=	<i>Subscr</i> ( <i>&lt;deref_loc&gt;</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> )   <i>Array</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> +)	
<i>datatype</i>	::=	<i>StructSpec</i> ( <i>Name(str)</i> )	<i>L_Struct</i>
<i>exp</i>	::=	<i>Attr</i> ( <i>&lt;ref_loc&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )   <i>Struct</i> ( <i>Assign</i> ( <i>Name(str)</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> ) +)	
<i>decl_def</i>	::=	<i>StructDecl</i> ( <i>Name(str)</i> , <i>Alloc</i> ( <i>Writeable()</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> ) +)	
<i>stmt</i>	::=	<i>If</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> , <i>&lt;stmt&gt;</i> *)   <i>IfElse</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> , <i>&lt;stmt&gt;</i> *, <i>&lt;stmt&gt;</i> *)	<i>L_If_Else</i>
<i>stmt</i>	::=	<i>While</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> , <i>&lt;stmt&gt;</i> *)   <i>DoWhile</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> , <i>&lt;stmt&gt;</i> *)	<i>L_Loop</i>
<i>exp</i>	::=	<i>Call</i> ( <i>Name(str)</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> *)	<i>L_Fun</i>
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>Call</i> ( <i>Name(str)</i> , <i>&lt;exp&gt;</i> *)	
<i>stmt</i>	::=	<i>Return</i> ( <i>&lt;exp&gt;</i> )	
<i>decl_def</i>	::=	<i>FunDecl</i> ( <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> , <i>Alloc</i> ( <i>Writeable()</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )*)   <i>FunDef</i> ( <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> , <i>Alloc</i> ( <i>Writeable()</i> , <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> )*, <i>&lt;stmt&gt;</i> *)	
<i>file</i>	::=	<i>File</i> ( <i>Name(str)</i> , <i>&lt;decl_def&gt;</i> *)	<i>L_File</i>

**Grammar 1.2.3:** Abstrakte Syntax für *L\_Piocc*

Das Ausgeben eines **Abstract Syntax Trees** wird in Python über die **Magische Methode** `__repr__()`<sup>2</sup> umgesetzt. Sobald ein **PicoC-Knoten** oder **RETI-Knoten** ausgegeben werden soll, gibt seine Magische Methode `__repr__()` eine Textrepräsentation seiner selbst und all seiner Knoten mit an den richtigen Stellen passenden gesetzten **runden öffnenden** ( und **schließenden** ) **Klammern**, sowie **Kommas** , und **Semikolons** ; zur Darstellung der **Hierarchie** und zur **Abtrennung** zurück. Dabei wird nach **Depth-First-Search** Schema der gesamte **Abstract Sybtax Tree** durchlaufen und die Magische `__repr__()`-Methode der verschiedenen Knoten aufgerufen, die immer jeweils die `__repr__()`-Methode ihrer Kinder aufrufen und die zurückgegebene Textrepräsentation passend **zusammenfügen** und selbst **zurückgeben**.

#### 1.2.5.5 Transformer

#### 1.2.5.6 Codebeispiel

Beispiel welches in Subkapitel 1.2.3.2 angefangen wurde, wird hier fortgeführt.

```

1 File
2   Name './example_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('5'), Num('6')]),
8           ↪ PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))), Name('attr'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')]),
16          ↪ PtrDecl(Num('1'), StructSpec(Name('st'))))), Name('var'))
17      ]
18  ]

```

**Code 1.4:** Abstract Syntax Tree aus vereinfachtem Derivation Tree generiert

## 1.3 Code Generierung

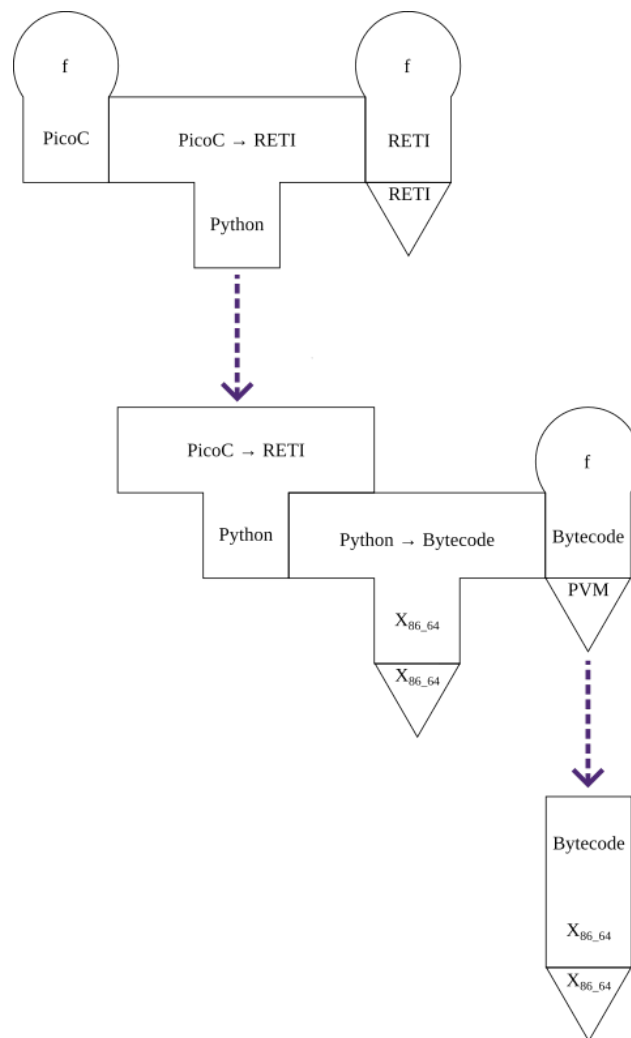
### 1.3.1 Übersicht

Nach der Generierung eines **Abstract Syntax Tree** als Ergebnis der **Lexikalischen** und **Syntaktischen Analyse** in Unterkapitel 1.2, wird in diesem Kapitel aus den verschiedenen **Kompositionen** von **Container-Knoten** und **Token-Knoten** im Abstract Syntax Tree das gewünschte Endprodukt des **PicoC-Compilers**, der **RETI-Code** generiert.

Beim **PicoC-Compiler** handelt es sich um einen **Cross-Compiler** (Definiton ??). Damit **RETI-Code** erzeugt werden kann, der auf der **RETI-Architektur** läuft, muss erst, wie im **T-Diagramm** (siehe Unterkapitel ??) in Abbildung 1.1 zu sehen ist, der **Python-Code** des **PicoC-Compilers** mittels eines Compilers, der z.B. auf einer **X<sub>86\_64</sub>**-Architektur laufen könnte zu **Bytecode** kompiliert werden. Dieser **Bytecode** wird dann von der **Python-Virtual-Machine** (PVM) interpretiert, welche wiederum auf einer **X<sub>86\_64</sub>**-Architektur laufen

<sup>2</sup>Spezielle Methode, die immer aufgerufen wird, wenn das **Object**, dass in Besitz dieser Methode ist als **String** mittels `print()` oder zur **Repräsentation** ausgegeben werden soll.

könnte. Und selbst dieses **T-Diagramm** könnte noch ausführlicher ausgedrückt werden, indem nachgeforscht wird, in welcher Sprache eigentlich die **Python-Virtual-Machine** geschrieben war, bevor sie zu  $X_{86\_64}$  kompiliert wurde usw.



**Abbildung 1.1:** Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben

Dieses längliche **T-Diagramm** in Abbildung 1.1 lässt sich zusammenfassen, sodass man das **T-Diagramm** in Abbildung 1.2 erhält, in welcher direkt angegeben ist, dass der **PicoC-Compiler** in  $X_{86\_64}$ -Maschinentensprache geschrieben ist.

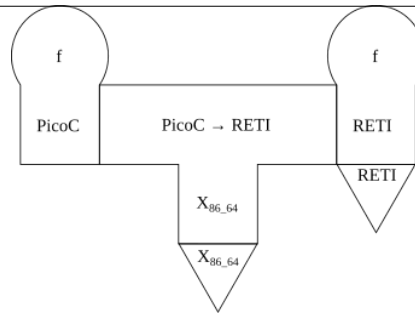


Abbildung 1.2: Cross-Compiler Kompilervorgang Kurzform

Nachdem der Kompilierprozess des **PicoC-Compiler** im **vertikalen** nun genauer angesehen wurde, wird der Kompilierprozess im Folgenden im **horizontalen**, auf der Ebene der verschiedenen **Passes** genauer betrachtet. Die Abbildung 1.3 gibt einen guten Überblick über alle **Passes** und wie diese in der **Pipe-Architektur** (Definition ??) des **PicoC-Compilers** aufeinanderfolgen. In der **Pipe-Architektur** nutzt der jeweils nächste **Pass** den generierten **Abstract Syntax Tree** des vorherigen Passes oder der Syntaktischen Analyse, um einen eigenen **Abstract Syntax Tree** in seiner eigenen **Sprache** zu generieren.

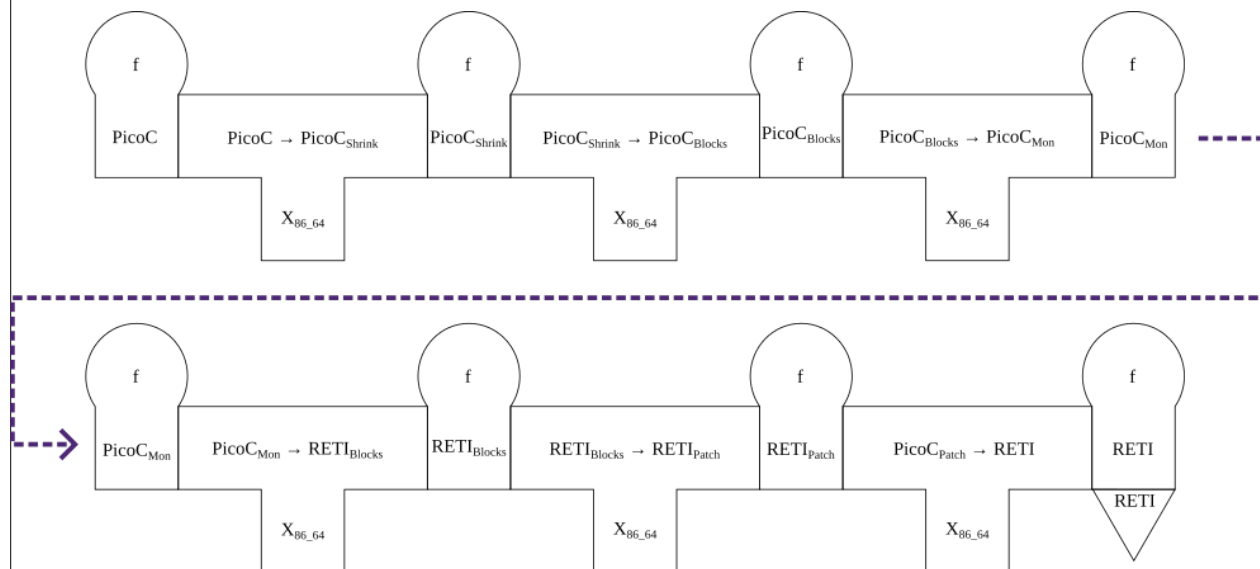


Abbildung 1.3: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben

Im Unterkapitel 1.3.2 werden die unterschiedlichen **Passes** des PicoC-Compilers erklärt. In den darauffolgenden Unterkapiteln 1.3.3, 1.3.4, ?? und ?? zu **Pointern**, **Arrays**, **Structs** und **Funktionen** werden einzelne **Aspekte**, die Thema dieser **Bachelorarbeit** sind **genauer betrachtet** und erklärt, die im Unterkapitel 1.3.2 nicht ausreichend vertieft wurden. Viele der verwendeten **Ansätze** zur Lösung dieser Probleme basieren auf der Vorlesung Scholl, „Betriebssysteme“ und wurden in dieser Bachelorarbeit weiter ausgearbeitet, wo es nötig war, sodass diese mit dem **PicoC-Compiler** auch in der **Praxis** implementiert werden konnten.

Um die verschiedenen Aspekte besser erklären zu können, werden **Codebeispiele** verwendet, in welchen ein kleines repräsentatives **PicoC-Programm** für einen spezifischen Aspekt in wichtigen **Zwischenstadien der Kompilierung** gezeigt wird<sup>3</sup>. Die **Codebeispiele** wurden alle mit dem **PicoC-Compiler** kompiliert und

<sup>3</sup>Also die verschiedenen in den **Passes** generierten **Abstract Syntax Trees**, sofern der **Pass** für den gezeigten Aspekt relevant ist.

danach **nicht** mehr **verändert**, also genauso, wie der **PicoC-Compiler** sie kompiliert aus den Dateien in dieses Dokument eingelesen. Alle hier zur Repräsentation verwendeten **PicoC-Programme** lassen sich unter dem **Link**<sup>4</sup> finden und mithilfe der im Ordner `/code_examples` beiliegenden **Makefile** und dem Befehl `> make compile-all` genauso **kompilieren**, wie sie hier dargestellt sind<sup>5</sup>.

### 1.3.2 Passes

Im Folgenden werden die verschiedenen **Passes** des **PicoC-Compilers** für die Generierung von **RETI-Code** besprochen. Viele dieser **Passes** haben **Aufgaben**, die eher unter die Themenbereiche des **Bachelorprojekts** fallen. Allerdings ist das Verständnis der **Passes** auch für das Verständnis der verschiedenen Aspekte<sup>6</sup> der **Bachelorarbeit** wichtig.

Die von den **Passes** generierten **Abstract Syntax Trees** werden dabei mit jedem **Pass** der **Syntax** des **RETI-Code's** immer ähnlicher werden. Jeder Pass sollte dabei möglichst **eine** Aufgabe übernehmen, da der Sinn von **Passes** ist, die Kompilierung in mehrere kleinschrittige Aufgaben runterzuberechnen. Wie es auch schon der Zweck des **Derivation Tree** in der Syntaktischen Analyse war, eine Zwischenstufe zum **Abstract Syntax Tree** darzustellen, aus der sich unkompliziert und einfach mit **Transformern** und **Visitors** ein **Abstract Syntax Tree** generieren lies.

Auf jedes Detail der einzelnen **Passes** wird in diesem Unterkapitel allerdings nicht eingegangen, da diese einerseits in den Unterkapiteln 1.3.3, 1.3.4, ?? und ?? zu **Pointern**, **Arrays**, **Structs** und **Funktionen** im Detail erklärt sind und andererseits viele Aufgaben dieser **Passes** eher dem **Bachelorprojekt** zuzurechnen sind.

#### 1.3.2.1 PicoC-Shrink Pass

##### 1.3.2.1.1 Aufgabe

Der Aufgabe des **PicoC-Shrink Pass** ist in Unterkapitel 1.3.3.2 ausführlich an einem Beispiel erklärt. Kurzgefasst hat der **PicoC-Shrink Pass** die Aufgabe, die Eigenheit auszunutzen, dass der **Dereferenzierungsoperator** `*pntr` und die damit einhergehende **Pointer Arithmetik** `*(pntr + i)` sich in der Untermenge der Sprache  $L_C$ , welche die Sprache  $L_{PicoC}$  darstellt genau gleich verhält, wie der **Operator** für den **Zugriff** auf den **Index** eines **Arrays** `ar[i]`. Daher wandelt der **PicoC-Shrink Pass** alle Verwendungen des **Dereferenzierungsoperators** `*(pntr + i)` in Verwendungen des **Operators** zum **Zugriff** auf einen **Arrayindex** `ar[i]` um, sodass sich viele

##### 1.3.2.1.2 Codebeispiel

```
1 // based on a example program from Christoph Scholl's Operating Systems lecture
2
3 void main() {
4     int n = 4;
5     int res = 1;
6     while (1) {
7         if (n == 1) {
8             return;
9         }
10        res = n * res;
```

<sup>4</sup>[https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit/tree/master/code\\_examples](https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit/tree/master/code_examples)

<sup>5</sup>Es wurden zu diesem Zweck spezielle neue **Command-line Optionen** erstellt, die bestimmte Kommentare **herausfiltern** und manche Container-Knoten **einzeilig** machen, damit die generierten **Abstract Syntax Trees** in den verschiedenen Zwischenstufen der Kompilierung **nicht** zu langgestreckt und **überfüllt** mit Kommentaren sind.

<sup>6</sup>In kurz: **Pointer**, **Arrays**, **Structs** und **Funktionen**.

```

11     n = n - 1;
12 }
13 }

```

**Code 1.5:** PicoC Code für Codebespiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('n')), Num('4'))
10        Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1')),
11        While
12          Num '1',
13          [
14            If
15              Atom
16                Name 'n',
17                Eq '==',
18                Num '1',
19                [
20                  Return(Empty())
21                ]
22            Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
23            Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
24          ]
25        ]
26  ]

```

**Code 1.6:** Abstract Syntax Tree für Codebespiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.picoc_shrink',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('n')), Num('4'))
10        Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1')),
11        While
12          Num '1',
13          [
14            If
15              Atom
16                Name 'n',

```

```

17         Eq '==',
18         Num '1',
19     [
20         Return(Empty())
21     ]
22     Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
23     Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
24 ]
25 ]
26 ]

```

**Code 1.7:** PicoC Shrink Pass für Codebeispiel

### 1.3.2.2 PicoC-Blocks Pass

#### 1.3.2.2.1 Aufgaben

Der Zweck dieses **Passes** ist die die Container-Knoten `If(exp, stmts)`, `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`, `While(exp, stmts)` und `DoWhile(exp, stmts)` mithilfe von Blöcken, `GoTo(label)`-Statements und nur noch IF-Else-Container-Knoten für die **Condition** umzusetzen.

#### 1.3.2.2.2 Abstrakte Syntax

<i>decl_def</i>	<i>::=</i>	<i>FunDef</i> ( <i>&lt;datatype&gt;</i> , <i>Name(str)</i> , <i>Alloc(Writable(), &lt;datatype&gt;, Name(str))*</i> , <i>&lt;block&gt;*</i> )	<i>L_Fun</i>
<i>block</i>	<i>::=</i>	<i>Block</i> ( <i>Name(str)</i> , <i>&lt;stmt&gt;*</i> )	<i>L_Blocks</i>
<i>stmt</i>	<i>::=</i>	<i>GoTo</i> ( <i>Name(str)</i> )   <i>NewStackframe</i> ( <i>Name()</i> , <i>GoTo(str)</i> )   <i>RemoveStackframe()</i>   <i>SetScope</i> ( <i>Name(str)</i> )   <i>SingleLineComment</i> ( <i>str, str</i> )	

**Grammar 1.3.1:** Abstrakte Syntax für *L<sub>PicoC\_Blocks</sub>*

#### 1.3.2.2.3 Codebeispiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.picoc_blocks',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Block
10          Name 'main.5',
11          [
12            Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('n')), Num('4'))
13            Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1'))
14            // While(Num('1'), [])
15            GoTo(Name('condition_check.4'))
16          ],
17          Block
18            Name 'condition_check.4',

```



```

19     [
20         IfElse
21             Num '1',
22             [
23                 GoTo(Name('while_branch.3'))
24             ],
25             [
26                 GoTo(Name('while_after.0'))
27             ]
28     ],
29     Block
30     Name 'while_branch.3',
31     [
32         // If (Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), []),
33         IfElse
34             Atom
35             Name 'n',
36             Eq '==',
37             Num '1',
38             [
39                 GoTo(Name('if.2'))
40             ],
41             [
42                 GoTo(Name('if_else_after.1'))
43             ]
44     ],
45     Block
46     Name 'if.2',
47     [
48         Return(Empty())
49     ],
50     Block
51     Name 'if_else_after.1',
52     [
53         Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
54         Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
55         GoTo(Name('condition_check.4'))
56     ],
57     Block
58     Name 'while_after.0',
59     []
60 ]
61 ]

```

Code 1.8: PicoC-Blocks Pass für Codebespiel

### 1.3.2.3 PicoC-Mon Pass

#### 1.3.2.3.1 Aufgaben

#### 1.3.2.3.2 Abstrakte Syntax

<i>ref_loc</i>	$::=$	<i>Stack</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ))   <i>Global</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ))	<i>L_Assign_Alloc</i>
		<i>Stackframe</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ))	
<i>error_data</i>	$::=$	$\langle exp \rangle$   <i>Pos</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ), <i>Num</i> ( <i>str</i> ))	
<i>exp</i>	$::=$	<i>Stack</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ))   <i>Ref</i> ( $\langle ref\_loc \rangle$ , $\langle datatype \rangle$ , $\langle error\_data \rangle$ )	
<i>stmt</i>	$::=$	<i>Exp</i> ( $\langle exp \rangle$ )	
		<i>Assign</i> ( <i>Alloc</i> ( <i>Writable</i> ()), <i>StructSpec</i> ( <i>Name</i> ( <i>str</i> )), <i>Name</i> ( <i>str</i> )), <i>Struct</i> ( <i>Assign</i> ( <i>Name</i> ( <i>str</i> ), $\langle exp \rangle$ ) +, $\langle datatype \rangle$ ))	
		<i>Assign</i> ( <i>Alloc</i> ( <i>Writable</i> ()), <i>ArrayDecl</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ) +, $\langle datatype \rangle$ ), <i>Name</i> ( <i>str</i> )), <i>Array</i> ( $\langle exp \rangle$ +, $\langle datatype \rangle$ ))	
<i>symbol_table</i>	$::=$	<i>SymbolTable</i> ( $\langle symbol \rangle$ )	<i>L_Symbol_Table</i>
<i>symbol</i>	$::=$	<i>Symbol</i> ( $\langle type\_qual \rangle$ , $\langle datatype \rangle$ , $\langle name \rangle$ , $\langle val \rangle$ , $\langle pos \rangle$ , $\langle size \rangle$ )	
<i>type_qual</i>	$::=$	<i>Empty</i> ()	
<i>datatype</i>	$::=$	<i>BuiltIn</i> ()   <i>SelfDefined</i> ()	
<i>name</i>	$::=$	<i>Name</i> ( <i>str</i> )	
<i>val</i>	$::=$	<i>Num</i> ( <i>str</i> )   <i>Empty</i> ()	
<i>pos</i>	$::=$	<i>Pos</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ), <i>Num</i> ( <i>str</i> ))   <i>Empty</i> ()	
<i>size</i>	$::=$	<i>Num</i> ( <i>str</i> )   <i>Empty</i> ()	

**Grammar 1.3.2:** Abstrakte Syntax für *L<sub>PicoC\_Mon</sub>***Definition 1.5:** Symboltabelle**1.3.2.3.3 Codebeispiel**

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.5',
6       [
7         // Assign(Name('n'), Num('4'))
8         Exp(Num('4'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('res'), Num('1'))
11        Exp(Num('1'))
12        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13        // While(Num('1'), [])
14        Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
15      ],
16    Block
17      Name 'condition_check.4',
18      [
19        // IfElse(Num('1'), [], [])
20        Exp(Num('1')),
21        IfElse
22          Stack
23            Num '1',
24            [
25              GoTo(Name('while_branch.3'))
26            ],
27        [

```

```

28         GoTo(Name('while_after.0'))
29     ]
30 ],
31 Block
32     Name 'while_branch.3',
33     [
34         // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
35         // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
36         Exp(Global(Num('0')))
37         Exp(Num('1'))
38         Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1')))),
39         IfElse
40             Stack
41                 Num '1',
42                 [
43                     GoTo(Name('if.2'))
44                 ],
45                 [
46                     GoTo(Name('if_else_after.1'))
47                 ]
48     ],
49 Block
50     Name 'if.2',
51     [
52         Return(Empty())
53     ],
54 Block
55     Name 'if_else_after.1',
56     [
57         // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
58         Exp(Global(Num('0')))
59         Exp(Global(Num('1')))
60         Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
61         Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
62         // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
63         Exp(Global(Num('0')))
64         Exp(Num('1'))
65         Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
66         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
67         Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
68     ],
69 Block
70     Name 'while_after.0',
71     [
72         Return(Empty())
73     ]
74 ]

```

Code 1.9: PicoC-Mon Pass für Codebeispiel

#### 1.3.2.4 RETI-Blocks Pass

##### 1.3.2.4.1 Aufgaben

##### 1.3.2.4.2 Abstrakte Syntax

<i>program</i>	$::=$	$Program(Name(str), \langle block \rangle^*)$	$L\_Program$
<i>exp_stmts</i>	$::=$	$GoTo(str)$	$L\_Blocks$
<i>instrs_before</i>	$::=$	$Num(str)$	
<i>num_instrs</i>	$::=$	$Num(str)$	
<i>block</i>	$::=$	$Block(Name(str), \langle instr \rangle^*, \langle instrs\_before \rangle, \langle num\_instrs \rangle)$	
<i>instr</i>	$::=$	$GoTo(Name(str))$	

**Grammar 1.3.3:** Abstrakte Syntax für  $L_{RETI\_Blocks}$ **1.3.2.4.3 Codebeispiel**

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.5',
6       [
7         # // Assign(Name('n'), Num('4'))
8         # Exp(Num('4'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 4;
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('res'), Num('1'))
17        # Exp(Num('1'))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI ACC 1;
20        STOREIN SP ACC 1;
21        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
22        LOADIN SP ACC 1;
23        STOREIN DS ACC 1;
24        ADDI SP 1;
25        # // While(Num('1'), [])
26        # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
27        Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
28      ],
29    Block
30      Name 'condition_check.4',
31      [
32        # // IfElse(Num('1'), [], [])
33        # Exp(Num('1'))
34        SUBI SP 1;
35        LOADI ACC 1;
36        STOREIN SP ACC 1;
37        # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
38        LOADIN SP ACC 1;
39        ADDI SP 1;
40        JUMP== GoTo(Name('while_after.0'));
41        Exp(GoTo(Name('while_branch.3')))
42      ],
43    Block

```

```

44     Name 'while_branch.3',
45     [
46         # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
47         # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
48         # Exp(Global(Num('0')))
49         SUBI SP 1;
50         LOADIN DS ACC 0;
51         STOREIN SP ACC 1;
52         # Exp(Num('1'))
53         SUBI SP 1;
54         LOADI ACC 1;
55         STOREIN SP ACC 1;
56         LOADIN SP ACC 2;
57         LOADIN SP IN2 1;
58         SUB ACC IN2;
59         JUMP== 3;
60         LOADI ACC 0;
61         JUMP 2;
62         LOADI ACC 1;
63         STOREIN SP ACC 2;
64         ADDI SP 1;
65         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
66         LOADIN SP ACC 1;
67         ADDI SP 1;
68         JUMP== GoTo(Name('if_else_after.1'));
69         Exp(GoTo(Name('if.2')))
70     ],
71     Block
72     Name 'if.2',
73     [
74         # Return(Empty())
75         LOADIN BAF PC -1;
76     ],
77     Block
78     Name 'if_else_after.1',
79     [
80         # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
81         # Exp(Global(Num('0')))
82         SUBI SP 1;
83         LOADIN DS ACC 0;
84         STOREIN SP ACC 1;
85         # Exp(Global(Num('1')))
86         SUBI SP 1;
87         LOADIN DS ACC 1;
88         STOREIN SP ACC 1;
89         # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
90         LOADIN SP ACC 2;
91         LOADIN SP IN2 1;
92         MULT ACC IN2;
93         STOREIN SP ACC 2;
94         ADDI SP 1;
95         # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
96         LOADIN SP ACC 1;
97         STOREIN DS ACC 1;
98         ADDI SP 1;
99         # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
100        # Exp(Global(Num('0')))

```

```

101     SUBI SP 1;
102     LOADIN DS ACC 0;
103     STOREIN SP ACC 1;
104     # Exp(Num('1'))
105     SUBI SP 1;
106     LOADI ACC 1;
107     STOREIN SP ACC 1;
108     # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
109     LOADIN SP ACC 2;
110     LOADIN SP IN2 1;
111     SUB ACC IN2;
112     STOREIN SP ACC 2;
113     ADDI SP 1;
114     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
115     LOADIN SP ACC 1;
116     STOREIN DS ACC 0;
117     ADDI SP 1;
118     # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
119     Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
120 ],
121 Block
122   Name 'while_after.0',
123   [
124     # Return(Empty())
125     LOADIN BAF PC -1;
126   ]
127 ]

```

Code 1.10: RETI-Blocks Pass für Codebeispiel

### 1.3.2.5 RETI-Patch Pass

#### 1.3.2.5.1 Aufgaben

#### 1.3.2.5.2 Abstrakte Syntax

$$\text{stmt} ::= \text{Exit}(\text{Num}(\text{str}))$$
Grammar 1.3.4: Abstrakte Syntax für  $L_{RETI\_Patch}$ 

#### 1.3.2.5.3 Codebeispiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.reti_patch',
3   [
4     Block
5       Name 'start.6',
6       [
7         # // Exp(GoTo(Name('main.5')))
8         # // not included Exp(GoTo(Name('main.5')))
9       ],
10    Block
11      Name 'main.5',

```

```

12     [
13         # // Assign(Name('n'), Num('4'))
14         # Exp(Num('4'))
15         SUBI SP 1;
16         LOADI ACC 4;
17         STOREIN SP ACC 1;
18         # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
19         LOADIN SP ACC 1;
20         STOREIN DS ACC 0;
21         ADDI SP 1;
22         # // Assign(Name('res'), Num('1'))
23         # Exp(Num('1'))
24         SUBI SP 1;
25         LOADI ACC 1;
26         STOREIN SP ACC 1;
27         # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
28         LOADIN SP ACC 1;
29         STOREIN DS ACC 1;
30         ADDI SP 1;
31         # // While(Num('1'), [])
32         # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
33         # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
34     ],
35     Block
36     Name 'condition_check.4',
37     [
38         # // IfElse(Num('1'), [], [])
39         # Exp(Num('1'))
40         SUBI SP 1;
41         LOADI ACC 1;
42         STOREIN SP ACC 1;
43         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
44         LOADIN SP ACC 1;
45         ADDI SP 1;
46         JUMP== GoTo(Name('while_after.0'));
47         # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.3')))
48     ],
49     Block
50     Name 'while_branch.3',
51     [
52         # // If(Atom(Name('n'), Eq('='), Num('1')), [])
53         # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('='), Num('1')), [], [])
54         # Exp(Global(Num('0')))
55         SUBI SP 1;
56         LOADIN DS ACC 0;
57         STOREIN SP ACC 1;
58         # Exp(Num('1'))
59         SUBI SP 1;
60         LOADI ACC 1;
61         STOREIN SP ACC 1;
62         LOADIN SP ACC 2;
63         LOADIN SP IN2 1;
64         SUB ACC IN2;
65         JUMP== 3;
66         LOADI ACC 0;
67         JUMP 2;
68         LOADI ACC 1;

```

```

69     STOREIN SP ACC 2;
70     ADDI SP 1;
71     # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
72     LOADIN SP ACC 1;
73     ADDI SP 1;
74     JUMP== GoTo(Name('if_else_after.1'));
75     # // not included Exp(GoTo(Name('if.2')))
76 ],
77 Block
78     Name 'if.2',
79     [
80         # Return(Empty())
81         LOADIN BAF PC -1;
82     ],
83 Block
84     Name 'if_else_after.1',
85     [
86         # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
87         # Exp(Global(Num('0')))
88         SUBI SP 1;
89         LOADIN DS ACC 0;
90         STOREIN SP ACC 1;
91         # Exp(Global(Num('1')))
92         SUBI SP 1;
93         LOADIN DS ACC 1;
94         STOREIN SP ACC 1;
95         # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
96         LOADIN SP ACC 2;
97         LOADIN SP IN2 1;
98         MULT ACC IN2;
99         STOREIN SP ACC 2;
100        ADDI SP 1;
101        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
102        LOADIN SP ACC 1;
103        STOREIN DS ACC 1;
104        ADDI SP 1;
105        # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
106        # Exp(Global(Num('0')))
107        SUBI SP 1;
108        LOADIN DS ACC 0;
109        STOREIN SP ACC 1;
110        # Exp(Num('1'))
111        SUBI SP 1;
112        LOADI ACC 1;
113        STOREIN SP ACC 1;
114        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
115        LOADIN SP ACC 2;
116        LOADIN SP IN2 1;
117        SUB ACC IN2;
118        STOREIN SP ACC 2;
119        ADDI SP 1;
120        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
121        LOADIN SP ACC 1;
122        STOREIN DS ACC 0;
123        ADDI SP 1;
124        # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
125        Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))

```



```

126 ],
127 Block
128   Name 'while_after.0',
129   [
130     # Return(Empty())
131     LOADIN BAF PC -1;
132   ]
133 ]

```

Code 1.11: RETI-Patch Pass für Codebeispiel

### 1.3.2.6 RETI Pass

#### 1.3.2.6.1 Aufgaben

##### 1.3.2.6.2 Konkrete und Abstrakte Syntax

<i>dig_no_0</i>	::=	"1"   "2"   "3"   "4"   "5"   "6"	<i>L_Program</i>
		"7"   "8"   "9"	
<i>dig_with_0</i>	::=	"0"   <i>dig_no_0</i>	
<i>num</i>	::=	"0"   <i>dig_no_0</i> <i>dig_with_0</i> *   "-" <i>dig_with_0</i> *	
<i>letter</i>	::=	"a" ... "Z"	
<i>name</i>	::=	<i>letter</i> ( <i>letter</i>   <i>dig_with_0</i>   _)*	
<i>reg</i>	::=	"ACC"   "IN1"   "IN2"   "PC"   "SP"	
		"BAF"   "CS"   "DS"	
<i>arg</i>	::=	<i>reg</i>   <i>num</i>	
<i>rel</i>	::=	"=="   "!="   "<"   "<="   ">"	
		">="   "_NOP"	

Grammar 1.3.5: Konkrete Syntax für  $L_{RETI\_Lex}$ 

<i>instr</i>	::=	"ADD" <i>reg</i> <i>arg</i>   "ADDI" <i>reg</i> <i>num</i>   "SUB" <i>reg</i> <i>arg</i>	<i>L_Program</i>
		"SUBI" <i>reg</i> <i>num</i>   "MULT" <i>reg</i> <i>arg</i>   "MULTI" <i>reg</i> <i>num</i>	
		"DIV" <i>reg</i> <i>arg</i>   "DIVI" <i>reg</i> <i>num</i>   "MOD" <i>reg</i> <i>arg</i>	
		"MODI" <i>reg</i> <i>num</i>   "OPLUS" <i>reg</i> <i>arg</i>   "OPLUSI" <i>reg</i> <i>num</i>	
		"OR" <i>reg</i> <i>arg</i>   "ORI" <i>reg</i> <i>num</i>	
		"AND" <i>reg</i> <i>arg</i>   "ANDI" <i>reg</i> <i>num</i>	
		"LOAD" <i>reg</i> <i>num</i>   "LOADIN" <i>arg</i> <i>arg</i> <i>num</i>	
		"LOADI" <i>reg</i> <i>num</i>	
		"STORE" <i>reg</i> <i>num</i>   "STOREIN" <i>arg</i> <i>argnum</i>	
		"MOVE" <i>reg</i> <i>reg</i>	
		"JUMP" <i>rel</i> <i>num</i>   <i>INT</i> <i>num</i>   <i>RTI</i>	
		"CALL" "INPUT" <i>reg</i>   "CALL" "PRINT" <i>reg</i>	
<i>program</i>	::=	<i>name</i> ( <i>instr</i> ";" )*	

Grammar 1.3.6: Konkrete Syntax für  $L_{RETI\_Parse}$

<i>reg</i>	$::=$ <i>ACC()</i>   <i>IN1()</i>   <i>IN2()</i>   <i>PC()</i>   <i>SP()</i>   <i>BAF()</i>   <i>CS()</i>   <i>DS()</i>	<i>L_Program</i>
<i>arg</i>	$::=$ <i>Reg</i> ( <i>&lt;reg&gt;</i> )   <i>Num</i> ( <i>str</i> )	
<i>rel</i>	$::=$ <i>Eq()</i>   <i>NEq()</i>   <i>Lt()</i>   <i>LtE()</i>   <i>Gt()</i>   <i>GtE()</i>   <i>Always()</i>   <i>NOp()</i>	
<i>op</i>	$::=$ <i>Add()</i>   <i>Addi()</i>   <i>Sub()</i>   <i>Subi()</i>   <i>Mult()</i>   <i>Multi()</i>   <i>Div()</i>   <i>Divi()</i>   <i>Mod()</i>   <i>Modi()</i>   <i>Oplus()</i>   <i>Oplusi()</i>   <i>Or()</i>   <i>Ori()</i>   <i>And()</i>   <i>Andi()</i>   <i>Load()</i>   <i>Loadin()</i>   <i>Loadi()</i>   <i>Store()</i>   <i>Storein()</i>   <i>Move()</i>	
<i>instr</i>	$::=$ <i>Instr</i> ( <i>&lt;op&gt;</i> , <i>&lt;arg&gt;</i> +)   <i>Jump</i> ( <i>&lt;rel&gt;</i> , <i>Num</i> ( <i>str</i> ))   <i>Int</i> ( <i>Num</i> ( <i>str</i> ))   <i>RTI()</i>   <i>Call</i> ( <i>Name</i> ('print'), <i>&lt;reg&gt;</i> )   <i>Call</i> ( <i>Name</i> ('input'), <i>&lt;reg&gt;</i> )   <i>SingleLineComment</i> ( <i>str</i> , <i>str</i> )	
<i>program</i>	$::=$ <i>Program</i> ( <i>Name</i> ( <i>str</i> ), <i>&lt;instr&gt;</i> *)	

**Grammar 1.3.7:** Abstrakte Syntax für *L<sub>RETI</sub>*

### 1.3.2.6.3 Codebeispiel

```

1 # // Exp(GoTo(Name('main.5'))))
2 # // not included Exp(GoTo(Name('main.5'))))
3 # // Assign(Name('n'), Num('4'))
4 # Exp(Num('4'))
5 SUBI SP 1;
6 LOADI ACC 4;
7 STOREIN SP ACC 1;
8 # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1'))))
9 LOADIN SP ACC 1;
10 STOREIN DS ACC 0;
11 ADDI SP 1;
12 # // Assign(Name('res'), Num('1'))
13 # Exp(Num('1'))
14 SUBI SP 1;
15 LOADI ACC 1;
16 STOREIN SP ACC 1;
17 # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1'))))
18 LOADIN SP ACC 1;
19 STOREIN DS ACC 1;
20 ADDI SP 1;
21 # // While(Num('1'), [])
22 # Exp(GoTo(Name('condition_check.4'))))
23 # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.4'))))
24 # // IfElse(Num('1'), [], [])
25 # Exp(Num('1'))
26 SUBI SP 1;
27 LOADI ACC 1;
28 STOREIN SP ACC 1;
29 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
30 LOADIN SP ACC 1;
31 ADDI SP 1;
32 JUMP== 49;
33 # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.3'))))
34 # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])

```

```
35 # // IfElse(Atom(Name('n')), Eq('=='), Num('1')), [], [])
36 # Exp(Global(Num('0'))))
37 SUBI SP 1;
38 LOADIN DS ACC 0;
39 STOREIN SP ACC 1;
40 # Exp(Num('1'))
41 SUBI SP 1;
42 LOADI ACC 1;
43 STOREIN SP ACC 1;
44 LOADIN SP ACC 2;
45 LOADIN SP IN2 1;
46 SUB ACC IN2;
47 JUMP== 3;
48 LOADI ACC 0;
49 JUMP 2;
50 LOADI ACC 1;
51 STOREIN SP ACC 2;
52 ADDI SP 1;
53 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
54 LOADIN SP ACC 1;
55 ADDI SP 1;
56 JUMP== 2;
57 # // not included Exp(GoTo(Name('if.2'))))
58 # Return(Empty())
59 LOADIN BAF PC -1;
60 # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res'))))
61 # Exp(Global(Num('0'))))
62 SUBI SP 1;
63 LOADIN DS ACC 0;
64 STOREIN SP ACC 1;
65 # Exp(Global(Num('1'))))
66 SUBI SP 1;
67 LOADIN DS ACC 1;
68 STOREIN SP ACC 1;
69 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
70 LOADIN SP ACC 2;
71 LOADIN SP IN2 1;
72 MULT ACC IN2;
73 STOREIN SP ACC 2;
74 ADDI SP 1;
75 # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1'))))
76 LOADIN SP ACC 1;
77 STOREIN DS ACC 1;
78 ADDI SP 1;
79 # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1'))))
80 # Exp(Global(Num('0'))))
81 SUBI SP 1;
82 LOADIN DS ACC 0;
83 STOREIN SP ACC 1;
84 # Exp(Num('1'))
85 SUBI SP 1;
86 LOADI ACC 1;
87 STOREIN SP ACC 1;
88 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
89 LOADIN SP ACC 2;
90 LOADIN SP IN2 1;
91 SUB ACC IN2;
```

```
92 STOREIN SP ACC 2;  
93 ADDI SP 1;  
94 # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))  
95 LOADIN SP ACC 1;  
96 STOREIN DS ACC 0;  
97 ADDI SP 1;  
98 # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))  
99 JUMP -53;  
100 # Return(Empty())  
101 LOADIN BAF PC -1;
```

**Code 1.12:** RETI Pass für Codebeispiel

### 1.3.3 Umsetzung von Pointern

#### 1.3.3.1 Referenzierung

Die **Referenzierung** (z.B. `&var`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 1.13 erklärt.

```

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

**Code 1.13:** PicoC-Code für Pointer Referenzierung

Der Knoten `Ref(Name('var'))` repräsentiert im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.14 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 1.14:** 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 1.15.

Die **Größe** eines Pointers (z.B. eines Pointers auf ein Array von `int`: `pntr = int *pntr[3]`), die ihm `size`-Attribut 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 1.15: Symboltabelle für Pointer Referenzierung

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 1.16 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 ?? 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 1.16: PicoC-Mon Pass für Pointer Referenzierung

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 1.17 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.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('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 1.17: RETI-Blocks Pass für Pointer Referenzierung

### 1.3.3.2 Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen

Die **Dereferenzierung** (z.B. `*var`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 1.18 erklärt.

```

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

```

Code 1.18: PicoC-Code für Pointer Dereferenzierung

Der Container-Knoten `Deref(Name('var'), Num('0'))` repräsentiert im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.19 eine **Dereferenzierung** `*var`. Es gibt hierbei **zwei** Fälle. Bei der Anwendung von **Pointer Arithmetik**, wie z.B. `*(var + 2 - 1)` übersetzt sich diese zu `Deref(Name('var'), BinOp(Num('2'), Sub(), BinOp(Num('1'))))`. Bei einer normalen **Dereferenzierung**, wie z.B. `*var`, übersetzt sich diese zu `Deref(Name('var'), Num('0'))`.

```

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       Exp(Deref(Name('ptr'), Num('0'))))
13     ]
14   ]

```

Code 1.19: Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung

Im **PicoC-Shrink Pass** in Code 1.20 wird ein Trick angewandt, bei dem jeder Knoten `Deref(Name('ptr'), Num('0'))` einfach durch den Knoten `Subscr(Name('ptr'), Num('0'))` ersetzt wird. Der Trick besteht darin, dass der **Dereferenzoperator** (z.B. `*(var + 1)`) sich identisch zum **Operator für den Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `var[1]`) verhält<sup>7</sup>. Damit spart man sich viele vermeidbare **Fallunterscheidungen** und **doppelten Code** und kann die **Dereferenzierung** (z.B. `*(var + 1)`) einfach von den Routinen für einen **Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `var[1]`) übernehmen lassen.

```

1 File
2   Name './example_ptr_deref.picoc_shrink',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10        Assign(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('ptr')),
11          ↪ Ref(Name('var')))
12        Exp(Subscr(Name('ptr'), Num('0'))))
13      ]
14    ]

```

Code 1.20: PicoC-Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung

## 1.3.4 Umsetzung von Arrays

### 1.3.4.1 Initialisierung von Arrays

Die **Initialisierung** eines **Arrays** (z.B. `int ar[2][1] = {{3+1}, {4}}`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 1.21 erklärt.

<sup>7</sup>In der Sprache  $L_C$  gibt es einen Unterschied bei der Initialisierung bei z.B. `int *var = "string"` und z.B. `int var[1] = "string"`, der allerdings nichts mit den beiden Operatoren zu tun hat, sondern mit der **Initialisierung**, bei der die Sprache  $L_C$  verwirrenderweise die eckigen Klammern `[]` genauso, wie beim **Operator für den Zugriff auf einen Arrayindex**, vor den Bezeichner schreibt (z.B. `var[1]`), obwohl es ein **Derived Datatype** ist.



```

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

```

Code 1.21: PicoC-Code für Array Initialisierung

Die **Initialisierung** eines **Arrays** `int ar[2][1]={3+1},{4}}` wird im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.22 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 1.22: Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung

Bei der **Initialisierung** eines **Arrays** wird zuerst `Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')))` ausgewertet, da eine Variable zuerst definiert sein muss, bevor man sie verwenden kann<sup>8</sup>. Das **Definieren** der Variable `ar` erfolgt mittels der **Symboltabelle**, die in Code 1.23 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 1.3.4.2 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 Statischen Daten**<sup>9</sup>.

<sup>8</sup>Das widerspricht der üblichen Auswertungsreihenfolge beim **Zuweisungsoperator** `=`, der **rechtsassoziativ** ist. Der **Zuweisungsoperator** `=` tritt allerdings erst später in Aktion.

<sup>9</sup>Wenn man beim **GCC GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project** einen Stackframe mittels des **GDB GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project** beobachtet, sieht man, dass dieser es genauso macht.

Das **Größe** des Arrays datatype `ar[dim1]...[dimk]`, die ihm `size`-Attribut des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist, berechnet sich dabei aus der **Mächtigkeit** der einzelnen **Dimensionen** des Arrays multipliziert mit der **Größe** des **grundlegenden Datentyps** der einzelnen **Arrayelemente**:  $\text{size}(\text{datatype}(\text{ar})) = \left(\prod_{j=1}^n \text{dim}_j\right) \cdot \text{size}(\text{datatype})^a$ .

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

```

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

```

**Code 1.23:** Symboltabelle für Array Initialisierung

Im **PiocC-Mon Pass** in Code 1.24 werden zuerst die **Logischen Ausdrücke** in den Blättern des Teilbaums, der beim **Array-Initializers Container-Knoten** `Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]), Array([Num('4')])])` anfängt nach dem **Depth-First-Search** Schema, von **links-nach-rechts** ausgewertet

und auf den **Stack** geschrieben<sup>10</sup>.

Im finalen Schritt muss zwischen **Globalen Statischen Daten** bei der `main`-Funktion und **Stackframe** bei der Funktion `fun` unterschieden werden. Die auf den Stack ausgewerteten Expressions werden mittels der Komposition `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))`, die in Tabelle 1.7 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 1.24:** PicoC-Mon Pass für Array Initialisierung

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 1.25 werden die **Kompositionen** `Exp(exp)` und `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

<sup>10</sup>Da der **Zuweisungsoperator** = **rechtsassoziativ** ist und auch rein **logisch**, weil man nichts zuweisen kann, was man noch nicht berechnet hat.

```

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'))
54        SUBI SP 1;
55        LOADI ACC 6;
56        STOREIN SP ACC 1;
57        # 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 1.25: RETI-Blocks Pass für Array Initialisierung

### 1.3.4.2 Zugriff auf einen Arrayindex

Der **Zugriff auf einen Arrayindex** (z.B. `ar[0]`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 1.26 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 1.26: PicoC-Code für Zugriff auf einen Arrayindex

Der **Zugriff auf einen Arrayindex** `ar[0]` wird im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.27 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         Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0'))))
12       ],
13     FunDef
14       VoidType 'void',
15       Name 'fun',

```

```

15     [],
16     [
17         Assign(Alloc(Writable(), 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 1.27:** Abstract Syntax Tree für Zugriff auf einen Arrayindex

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 1.28 wird vom **Container-Knoten** `Subscr(Name('ar'), Num('0'))` zuerst im **Anfangsteil** ?? 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** ?? 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 1.7 dokumentiert.

Zur **Adressberechnung** ist es notwendig auf die **Dimensionen** (z.B. `[Num('3')]`) des Arrays, auf dessen **Arrayelement** zugriffen wird, zugreifen zu können. Daher ist der **Arraydatatype** (z.B. `ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))`) dem **Container-Knoten** `Ref(exp, datatype)` als verstecktes Attribut `datatype` angehängt. Das versteckte Attribut wird während des Kompilervorgangs 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 ?? allgemein erklärt ist.

Im letzten Schritt, dem **Schlusssteil** ?? 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 **Unterdatatype** folglich im **Kontext** zuletzt zugriffen wird, abhängig davon wird der **Schlusssteil** `Exp(Stack(Num('1')))` auf eine andere Weise verarbeitet (siehe Subkapitel ??). Der **Unterdatatype** 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 1.3.1:

$$\text{ref}(\text{ar}[\text{idx}_1] \dots [\text{idx}_n]) = \text{ref}(\text{ar}) + \left( \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=i+1}^n \text{dim}_j \right) \cdot \text{idx}_i \right) \cdot \text{size}(\text{datatype}) \quad (1.3.1)$$

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

Die Komposition `Ref(Global(num))` bzw. `Ref(Stackframe(num))` repräsentiert dabei den Summanden `ref(ar)` in der Formel.

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

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

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

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

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

```

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

```

```

31     Exp(Stack(Num('1')))
32     Return(Empty())
33 ]
34 ]

```

**Code 1.28:** PicoC-Mon Pass für Zugriff auf einen Arrayindex

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 1.29 werden die **Kompositionen** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` und `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 1.29: RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Arrayindex

### 1.3.4.3 Zuweisung an Arrayindex

Die **Zuweisung** eines Wertes an einen **Arrayindex** (z.B. `ar[2] = 42;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 1.30 erläutert.

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

Code 1.30: PicoC-Code für Zuweisung an Arrayindex

Im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.31 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 1.31: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 1.32 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 1.3.4.2. Es wird die **Adresse** des **Index**, dem das Ergebnis der Ausdrucks auf der rechten Seite des **Zuweisungsoperators** = zugewiesen wird berechnet, wie in Subkapitel 1.3.4.2.

Zum Schluss stellt die **Komposition** `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))`<sup>11</sup> die Zuweisung `=` des Ergebnisses des Ausdrucks auf der **rechten** Seite der Zuweisung zum **Arrayindex**, dessen **Adresse** im Schritt danach berechnet wurde dar.

```
1 File
2   Name './example_array_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
```

<sup>11</sup>Ist in Tabelle 1.7 genauer beschrieben ist

```

5     Name 'main.0',
6     [
7         // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
8         Exp(Num('42'))
9         Ref(Global(Num('0')))
10        Exp(Num('2'))
11        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
12        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
13        Return(Empty())
14    ]
15 ]

```

### Code 1.32: PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 1.33 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           # // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
8           # Exp(Num('42'))
9           SUBI SP 1;
10          LOADI ACC 42;
11          STOREIN SP ACC 1;
12          # Ref(Global(Num('0')))
13          SUBI SP 1;
14          LOADI IN1 0;
15          ADD IN1 DS;
16          STOREIN SP IN1 1;
17          # Exp(Num('2'))
18          SUBI SP 1;
19          LOADI ACC 2;
20          STOREIN SP ACC 1;
21          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
22          LOADIN SP IN1 2;
23          LOADIN SP IN2 1;
24          MULTI IN2 1;
25          ADD IN1 IN2;
26          ADDI SP 1;
27          STOREIN SP IN1 1;
28          # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
29          LOADIN SP IN1 1;
30          LOADIN SP ACC 2;
31          ADDI SP 2;
32          STOREIN IN1 ACC 0;
33          # Return(Empty())
34          LOADIN BAF PC -1;
35      ]
36 ]

```

**Code 1.33:** RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex

---

---

# Literatur

## Online

- *C Operator Precedence* - *cppreference.com*. URL: [https://en.cppreference.com/w/c/language/operator\\_precedence](https://en.cppreference.com/w/c/language/operator_precedence) (besucht am 27.04.2022).
- *GCC, the GNU Compiler Collection* - *GNU Project*. URL: <https://gcc.gnu.org/> (besucht am 13.07.2022).

## Bücher

- G. Siek, Jeremy. *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*. 28. Jan. 2022. URL: <https://iucompilercourse.github.io/IU-Fall-2021/> (besucht am 28.01.2022).

## Vorlesungen

- Scholl, Christoph. „Betriebssysteme“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2020. URL: [https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach\\_main.php?id=157](https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach_main.php?id=157) (besucht am 09.07.2022).
- Thiemann, Peter. „Compilerbau“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2021. URL: <http://proglang.informatik.uni-freiburg.de/teaching/compilerbau/2021ws/> (besucht am 09.07.2022).