
ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

Abgabedatum: 28th April 2022

Author:
Jürgen Mattheis

Gutachter:
Prof. Dr. Scholl

Betreuung:
M.Sc. Seufert

Eine Bachelorarbeit am Lehrstuhl für
Betriebssysteme

ERKLÄRUNG

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

Inhaltsverzeichnis

1	Implementierung	9
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	32
1.3.2.2.3	Codebeispiel	32
1.3.2.3	PicoC-Mon Pass	33
1.3.2.3.1	Aufgaben	33
1.3.2.3.2	Abstrakte Syntax	33
1.3.2.3.3	Codebeispiel	34
1.3.2.4	RETI-Blocks Pass	36
1.3.2.4.1	Aufgaben	36
1.3.2.4.2	Abstrakte Syntax	36
1.3.2.4.3	Codebeispiel	36
1.3.2.5	RETI-Patch Pass	39
1.3.2.5.1	Aufgaben	39
1.3.2.5.2	Abstrakte Syntax	39
1.3.2.5.3	Codebeispiel	39
1.3.2.6	RETI Pass	42
1.3.2.6.1	Aufgaben	42
1.3.2.6.2	Konkrete und Abstrakte Syntax	42
1.3.2.6.3	Codebeispiel	43

1.3.3	Umsetzung von Pointern	47
1.3.3.1	Referenzierung	47
1.3.3.2	Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen	49
1.3.4	Umsetzung von Arrays	50
1.3.4.1	Initialisierung von Arrays	50
1.3.4.2	Zugriff auf einen Arrayindex	55
1.3.4.3	Zuweisung an Arrayindex	60

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 Codebespiel	30
1.6	Abstract Syntax Tree für Codebespiel	31
1.7	PicoC Shrink Pass für Codebespiel	31
1.8	PicoC-Blocks Pass für Codebespiel	33
1.9	PicoC-Mon Pass für Codebespiel	36
1.10	RETI-Blocks Pass für Codebespiel	39
1.11	RETI-Patch Pass für Codebespiel	42
1.12	RETI Pass für Codebespiel	45
1.13	PicoC-Code für Pointer Referenzierung	47
1.14	Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung	47
1.15	Symboltabelle für Pointer Referenzierung	48
1.16	PicoC-Mon Pass für Pointer Referenzierung	48
1.17	RETI-Blocks Pass für Pointer Referenzierung	49
1.18	PicoC-Code für Pointer Dereferenzierung	49
1.19	Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung	50
1.20	PicoC-Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung	50
1.21	PicoC-Code für Array Initialisierung	51
1.22	Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung	51
1.23	Symboltabelle für Array Initialisierung	52
1.24	PicoC-Mon Pass für Array Initialisierung	53
1.25	RETI-Blocks Pass für Array Initialisierung	55
1.26	PicoC-Code für Zugriff auf einen Arrayindex	55
1.27	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf einen Arrayindex	56
1.28	PicoC-Mon Pass für Zugriff auf einen Arrayindex	58
1.29	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Arrayindex	59
1.30	PicoC-Code für Zuweisung an Arrayindex	60
1.31	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex	60
1.32	PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex	61
1.33	RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex	62

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	34

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}	32
1.3.2 Abstrakte Syntax für L_{PicoC_Mon}	34
1.3.3 Abstrakte Syntax für L_{RETI_Blocks}	36
1.3.4 Abstrakte Syntax für L_{RETI_Patch}	39
1.3.5 Konkrete Syntax für L_{RETI_Lex}	42
1.3.6 Konkrete Syntax für L_{RETI_Parse}	43
1.3.7 Abstrakte Syntax für L_{RETI}	43

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_op</i> <i>un_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_op</i> <i>rel_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**¹. 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 &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<b a<=b a>b a>=b</i>	Kleiner, Kleiner Gleich, Größer, Größer gleich	
6	<i>a==b a!=b</i>	Gleichheit und Ungleichheit	
7	<i>a&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&&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*

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

Tabelle 1.2: PicoC-Knoten Teil 1

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

Tabelle 1.3: PicoC-Knoten Teil 2

PiocC-Knoten	Beschreibung
Struct(assigns, datatype)	Container für den Initializer eines Structs , z.B. {.<attr1>={1, 2}, .<attr2>={3, 4}}, dessen Eintrag assigns eine Liste von Assign(lhs, exp) ist mit einer Zuordnung eines Attributezeichners , zu einem weiteren Initializer für eine Array-Dimension oder zu einem Initializer für ein Struct oder zu einem Logischen Ausdruck . Des Weiteren besitzt er ein verstecktes Attribut datatype, welches für den PicoC-Mon Pass Informationen transportiert, die für Fehlermeldungen wichtig sind.
StructDecl(name, allocs)	Container für die Deklaration eines selbstdefinierten Structdatentyps , z.B. struct <var> {<datatype> <attr1>; <datatype> <attr2>;}, wobei name der Bezeichner des Structdatentyps ist und allocs eine Liste von Bezeichnern der Attribute des Structdatentyps mit dazugehörigem Datentyp , wofür sich der Container-Knoten Alloc(type_qual, datatype, name) sehr gut als Container eignet.
If(exp, stmts)	Container für ein If Statement if(<exp>) { <stmts> } inklusive Condition exp und einem Branch stmts, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
IfElse(exp, stmts1, stmts2)	Container für ein If-Else Statement if(<exp>) { <stmts2> } else { <stmts2> } inklusive Condition exp und 2 Branches stmts1 und stmts2, die zwei Alternativen darstellen in denen jeweils Listen von Statements oder GoTo(Name('block.xyz'))'s stehen können.
While(exp, stmts)	Container für ein While-Statement while(<exp>) { <stmts> } inklusive Condition exp und einem Branch stmts, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
DoWhile(exp, stmts)	Container für ein Do-While-Statement do { <stmts> } while(<exp>); inklusive Condition exp und einem Branch stmts, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
Call(name, exps)	Container für einen Funktionsaufruf : fun_name(exps), wobei name der Bezeichner der Funktion ist, die aufgerufen werden soll und exps eine Liste von Argumenten ist, die an die Funktion übergeben werden soll.
Return(exp)	Container für ein Return-Statement : return <exp>, wobei das Attribut exp einen Logischen Ausdruck darstellt, dessen Ergebnis vom Return-Statement zurückgegeben wird.
FunDecl(datatype, name, allocs)	Container für eine Funktionsdeklaration , z.B. <datatype> <fun_name>(<datatype> <param1>, <datatype> <param2>), wobei datatype der Rückgabewert der Funktion ist, name der Bezeichner der Funktion ist und allocs die Parameter der Funktion sind, wobei der Container-Knoten 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 Funktionsdefinition , z.B. <datatype> <fun_name>(<datatype> <param>) {<stmts>}, wobei datatype der Rückgabewert der Funktion ist, name der Bezeichner der Funktion ist, allocs die Parameter der Funktion sind, wobei der Container-Knoten Alloc(type_spec, datatype, name) als Container für die Parameter dient und stmts_blocks eine Liste von Statements bzw. Blöcken ist, welche diese Funktion beinhaltet.
NewStackframe(fun_name, goto_after_call)	Container für die Erstellung eines neuen Stackframes und Speicherung des Werts des BAF-Registers der aufgerufenen Funktion und der Rücksprungsadresse nacheinander an den Anfang des neuen Stackframes . Das Attribut fun_name steht dabei für den Bezeichner der Funktion, für die ein neuer Stackframe erstellt werden soll. Das Attribut fun_name dient später dazu den Block dieser Funktion zu finden, weil dieser für den weiteren Kompilierungsvorgang wichtige Information in seinen versteckten Attributen gespeichert hat. Des Weiteren ist das Attribut goto_after_call ein GoTo(Name('addr@next_instr')), welches später durch die Adresse des Befehls, der direkt auf die Jump Instruction folgt, ersetzt wird.
RemoveStackframe()	Container für das Entfernen des aktuellen Stackframes durch das Wiederherstellen des im noch aktuellen Stackframe gespeicherten Werts des BAF-Registers der aufgerufenen Funktion und das Setzen des SP-Registers auf den Wert des BAF-Registers vor der Wiederherstellung.
File(name, decls_defs_blocks)	Container für alle Funktionen oder Blöcke , welche eine Datei als Ursprung haben, wobei name der Dateiname der Datei ist, die erstellt wird und decls_defs_blocks eine Liste von Funktionen bzw. Blöcken ist.
Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size)	Container für Statements , der auch als Block bezeichnet wird, wobei das Attribut name der Bezeichner des Labels (Definition 1.1) des Blocks ist und stmts_instrs eine Liste von Statements oder Instructions . Zudem besitzt er noch 3 versteckte Attribute , wobei instrs_before die Zahl der Instructions vor diesem Block zählt, num_instrs die Zahl der Instructions ohne Kommentare in diesem Block zählt, param_size die voraussichtliche Anzahl an Speicherzellen aufaddiert, die für die Parameter der Funktion belegt werden müssen und local_vars_size die voraussichtliche Anzahl an Speicherzellen aufaddiert, die für die lokalen Variablen der Funktion belegt werden müssen.
GoTo(name)	Container für ein Goto zu einem anderen Block , wobei das Attribut name der Bezeichner des Labels des Blocks ist zu dem Gesprungen werden soll.
SingleLineComment(prefix, content)	Container für einen Kommentar , den der Compiler selber während des Kompilierungsvorgangs erstellt, der im RETI-Interpreter selbst später nicht sichtbar sein wird, aber in den Immediate-Dateien , welche die Abstract Syntax Trees nach den verschiedenen Passes enthalten.
RETIComment(value)	Container für einen Kommentar im Code der Form: // # comment, der im RETI-Interpreter später sichtbar sein wird und zur Orientierung genutzt werden kann, allerdings in einer tatsächlichen Implementierung einer RETI-CPU nicht umsetzbar ist und auch nicht sinnvoll wäre umzusetzen. Der Kommentar ist im Attribut value , welches jeder Knoten besitzt gespeichert.

Tabelle 1.5: PicoC-Knoten Teil 4

Definition 1.1: Label

Durch einen *Bezeichner eindeutig* zuordenbares *Sprungziel* im Programmcode.^a

^a`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.^a

^aG. 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 *einfach* ist und keine vermeidbaren Fallunterscheidungen gemacht werden müssen.

Token-Knoten entsprechen im Abstract Syntax Tree *Blättern*.^a

^aThiemann, „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.^a

Container-Knoten entsprechen im Abstract Syntax Tree *Inneren Knoten*.^b

^aWie 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.

^bThiemann, „Compilerbau“.

1.2.5.2 RETI-Knoten

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

^a 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 Adresse der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Datensegment Register DS steht auf den Stack .
Ref(Stackframe(Num('addr')))	Speichert Adresse der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF steht auf den Stack .
Ref(Subscr(Stack(Num('addr1')), Stack(Num('addr2'))))	Berechnet die nächste Adresse aus der Adresse , die an Speicherzelle Stack(Num('addr1')) steht und dem Subscript Index , der an Speicherzelle Stack(Num('addr2')) steht und speichert diese auf den Stack . Die Berechnung ist abhängig davon ob der Datentyp ArrayDecl(datatype) oder PntrDecl(datatype) ist. Der Datentyp ist ein verstecktes Attribut von Ref(exp).
Ref(Attr(Stack(Num('addr1')), Name('attr')))	Berechnet die nächste Adresse aus der Adresse , die an Speicherzelle Stack(Num('addr1')) steht und dem Attributnamen Name('attr') und speichert diese auf den Stack . Zur Berechnung ist der Name des Struct in StructSpec(Name('st')) notwendig, dessen Attribut 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 Datensegment Register DS stehen, versetzt genauso auf den Stack .
Assign(Stack(Num('size')), Stackframe(Num('addr')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die ab Stackframe(Num('addr')) relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF stehen, versetzt genauso auf den Stack .
Exp(Global(Num('addr')))	Speichert Inhalt der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Datensegment Register DS steht auf den Stack .
Exp(Stackframe(Num('addr')))	Speichert Inhalt der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF steht auf den Stack .
Exp(Stack(Num('addr')))	Speichert Inhalt der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Stackpointer Register SP steht auf den Stack .
Assign(Stack(Num('addr1')), Stack(Num('addr2')))	Speichert Inhalt der Speicherzelle Stack(Num('addr2')), die Num('addr2') Speicherzellen relativ zum Stackpointer Register SP steht an der Adresse in der Speicherzelle, die Num('addr1') Speicherzellen relativ zum Stackpointer Register SP steht.
Assign(Global(Num('addr')), Stack(Num('size')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die auf dem Stack stehen, versetzt genauso auf die Speicherzellen ab Num('addr') relativ zum Datensegment Register DS .
Assign(Stackframe(Num('addr')), Stack(Num('size')))	Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die auf dem Stack stehen, versetzt genauso auf die Speicherzellen ab Num('addr') relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF .
Exp(Reg(reg))	Schreibt den aktuellen Wert des Registers reg auf den Stack .
Instr(Loadi(), [Reg(Acc()), GoTo(Name('addr@next_instr'))])	Lädt in das Register ACC die Adresse 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><exp></i> , <i><bin_op></i> , <i><exp></i>) <i>UnOp</i> (<i><un_op></i> , <i><exp></i>) <i>Call</i> (<i>Name('input')</i> , <i>None</i>)	
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>Alloc</i> (<i><type_qual></i> , <i><datatype></i> , <i>Name(str)</i>) <i>Call</i> (<i>Name('print')</i> , <i><exp></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><exp></i> , <i><rel></i> , <i><exp></i>) <i>ToBool</i> (<i><exp></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><type_qual></i> , <i><datatype></i> , <i>Name(str)</i>) <i><rel_loc></i>	
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>Alloc</i> (<i><type_qual></i> , <i><datatype></i> , <i>Name(str)</i>)	
<i>stmt</i>	::=	<i>Assign</i> (<i><lhs></i> , <i><exp></i>) <i>Exp</i> (<i><exp_stmts></i>)	
<i>datatype</i>	::=	<i>PntrDecl</i> (<i>Num(str)</i> , <i><datatype></i>)	<i>L_Pntr</i>
<i>deref_loc</i>	::=	<i>Ref</i> (<i><ref_loc></i>) <i><ref_loc></i>	
<i>ref_loc</i>	::=	<i>Name(str)</i> <i>Deref</i> (<i><deref_loc></i> , <i><exp></i>) <i>Subscr</i> (<i><deref_loc></i> , <i><exp></i>) <i>Attr</i> (<i><ref_loc></i> , <i>Name(str)</i>)	
<i>exp</i>	::=	<i>Deref</i> (<i><deref_loc></i> , <i><exp></i>) <i>Ref</i> (<i><ref_loc></i>)	
<i>datatype</i>	::=	<i>ArrayDecl</i> (<i>Num(str)</i> +, <i><datatype></i>)	<i>L_Array</i>
<i>exp</i>	::=	<i>Subscr</i> (<i><deref_loc></i> , <i><exp></i>) <i>Array</i> (<i><exp></i> +)	
<i>datatype</i>	::=	<i>StructSpec</i> (<i>Name(str)</i>)	<i>L_Struct</i>
<i>exp</i>	::=	<i>Attr</i> (<i><ref_loc></i> , <i>Name(str)</i>) <i>Struct</i> (<i>Assign</i> (<i>Name(str)</i> , <i><exp></i>) +)	
<i>decl_def</i>	::=	<i>StructDecl</i> (<i>Name(str)</i> , <i>Alloc</i> (<i>Writeable()</i> , <i><datatype></i> , <i>Name(str)</i>) +)	
<i>stmt</i>	::=	<i>If</i> (<i><exp></i> , <i><stmt></i> *) <i>IfElse</i> (<i><exp></i> , <i><stmt></i> *, <i><stmt></i> *)	<i>L_If_Else</i>
<i>stmt</i>	::=	<i>While</i> (<i><exp></i> , <i><stmt></i> *) <i>DoWhile</i> (<i><exp></i> , <i><stmt></i> *)	<i>L_Loop</i>
<i>exp</i>	::=	<i>Call</i> (<i>Name(str)</i> , <i><exp></i> *)	<i>L_Fun</i>
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>Call</i> (<i>Name(str)</i> , <i><exp></i> *)	
<i>stmt</i>	::=	<i>Return</i> (<i><exp></i>)	
<i>decl_def</i>	::=	<i>FunDecl</i> (<i><datatype></i> , <i>Name(str)</i> , <i>Alloc</i> (<i>Writeable()</i> , <i><datatype></i> , <i>Name(str)</i>)*) <i>FunDef</i> (<i><datatype></i> , <i>Name(str)</i> , <i>Alloc</i> (<i>Writeable()</i> , <i><datatype></i> , <i>Name(str)</i>)*, <i><stmt></i> *)	
<i>file</i>	::=	<i>File</i> (<i>Name(str)</i> , <i><decl_def></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__()`² 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_{86_64}**-Architektur laufen könnte zu **Bytecode** kompiliert werden. Dieser **Bytecode** wird dann von der **Python-Virtual-Machine** (PVM) interpretiert, welche wiederum auf einer **X_{86_64}**-Architektur laufen

²Spezielle 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.

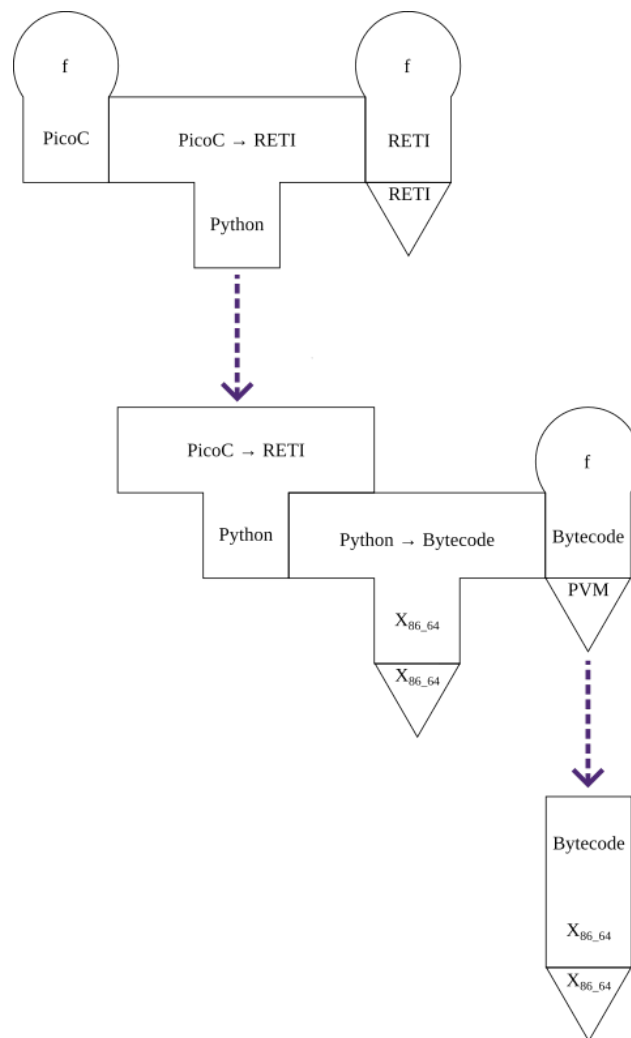


Abbildung 1.1: *Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben*

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.

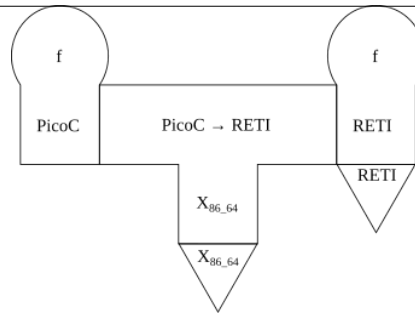


Abbildung 1.2: Cross-Compiler Kompilervorgang Kurzform

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.

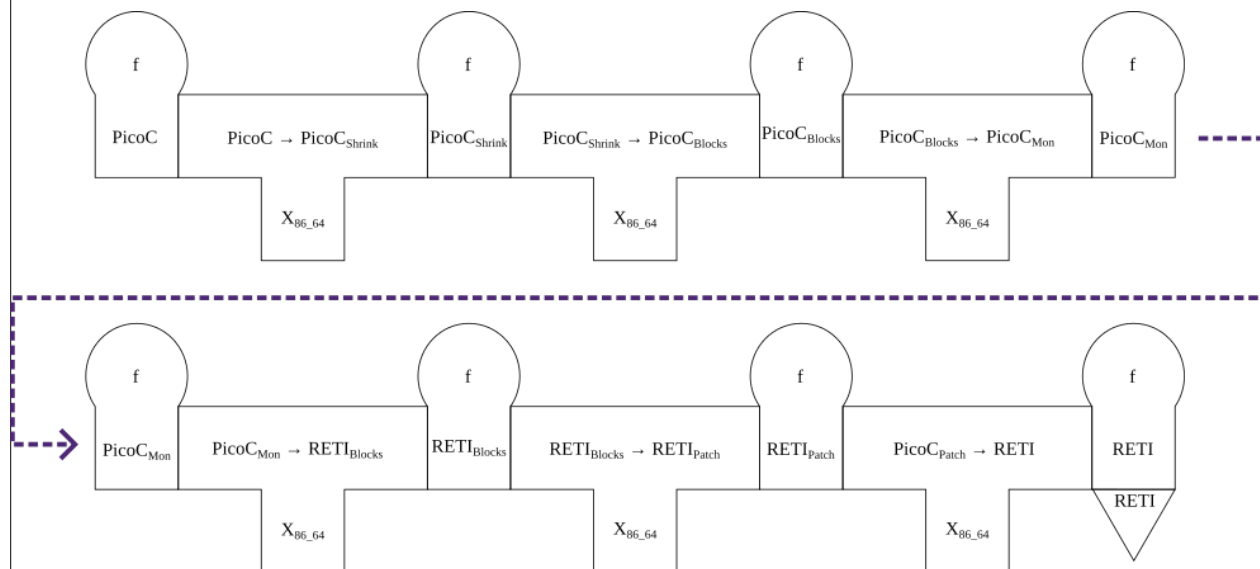


Abbildung 1.3: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben

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 wird³. Die **Codebeispiele** wurden alle mit dem **PicoC-Compiler** kompiliert und

³Also 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**⁴ finden und mithilfe der im Ordner `/code_examples` beiliegenden **Makefile** und dem Befehl `> make compile-all` genauso **kompilieren**, wie sie hier dargestellt sind⁵.

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 Aspekte⁶ 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 **Container-Knoten** `Deref(exp, i)` im jeweiligen **Abstract Syntax Tree** in **Container-Knoten** `Subscr(exp, i)` um, sodass sich dadurch viele vermeidbare **Fallunterscheidungen** und **doppelter Code** bei der Implementierung sparen lassen, denn man kann die **Dereferenzierung** `*(var + i)` einfach von den Routinen für einen **Zugriff auf einen Arrayindex** `var[i]` übernehmen lassen.

1.3.2.1.2 Codebeispiel

In den nächsten Unterkapiteln wird das Beispiel in Code 1.5 zur **Anschauung** der verschiedenen **Passes** verwendet. Im Code 1.5 ist in der Funktion `faculty` ein **iterativer** Algorithmus implementiert, der die **Fakultät** eines übergebenen **Arguments** berechnet. Der Algorithmus basiert auf einem **Beispielprogramm** aus der Vorlesung Scholl, „Betriebssysteme“, der in der Vorlesung allerdings **rekursiv** implementiert war.

Dieser **rekursive** Algorithmus ist allerdings **kein** gutes **Anschauungsbeispiel**, dass viele der Aufgaben der verschiedenen **Passes** bei der Kompilierung veranschaulicht hätte. Viele Aufgaben der **Passes**, wie z.B. bei der Kompilierung von **if**-, **if-else**-, **while**- und **do-while**-Statements wären im Beispiel aus der Vorlesung

⁴https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit/tree/master/code_examples

⁵Es 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.

⁶In kurz: **Pointer**, **Arrays**, **Structs** und **Funktionen**.

nicht enthalten gewesen. Daher wurde das Beispiel aus der Vorlesung zu einem **iterativen** Algorithmus umgeschrieben, um **if**- und **while**-Statemens zu enthalten.

```

1 // based on a example program from Christoph Scholl's Operating Systems lecture
2
3 int faculty(int n){
4     int res = 1;
5     while (1) {
6         if (n == 1) {
7             return res;
8         }
9         res = n * res;
10        n = n - 1;
11    }
12 }
13
14 void main() {
15     print(faculty(4));
16 }

```

Code 1.5: *PicoC Code für Codebeispiel*

In Code 1.6 sieht man den **Abstract Syntax Tree**, der in der **Syntaktischen Analyse** generiert wurde.

```

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

```

```

29     Name 'main',
30     [],
31     [
32         Exp(Call(Name('print'), [Call(Name('faculty'), [Num('4')]))]))
33     ]
34 ]

```

Code 1.6: *Abstract Syntax Tree für Codebespiel*

In Code 1.7 sieht man den **Abstract Syntax Tree**, des **PicoC-Shrink-Passes**.

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.picoc_shrink',
3   [
4       FunDef
5         IntType 'int',
6         Name 'faculty',
7         [
8             Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('n'))
9         ],
10        [
11            Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1')),
12            While
13              Num '1',
14              [
15                  If
16                    Atom
17                      Name 'n',
18                      Eq '==',
19                      Num '1',
20                      [
21                          Return(Name('res'))
22                      ]
23                  Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
24                  Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
25              ]
26        ],
27        FunDef
28          VoidType 'void',
29          Name 'main',
30          [],
31          [
32              Exp(Call(Name('print'), [Call(Name('faculty'), [Num('4')]))]))
33          ]
34    ]

```

Code 1.7: *PicoC Shrink Pass für Codebespiel*

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>FunDef</i> ($\langle datatype \rangle$, <i>Name</i> (<i>str</i>), <i>Alloc</i> (<i>Writeable</i> (), $\langle datatype \rangle$, <i>Name</i> (<i>str</i>))* , $\langle block \rangle$ *)	<i>L_Fun</i>
<i>block</i>	$::=$	<i>Block</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>), $\langle stmt \rangle$ *)	<i>L_Blocks</i>
<i>stmt</i>	$::=$	<i>GoTo</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>)) <i>NewStackframe</i> (<i>Name</i> (), <i>GoTo</i> (<i>str</i>)) <i>RemoveStackframe</i> () <i>SetScope</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>)) <i>SingleLineComment</i> (<i>str</i> , <i>str</i>)	

Grammar 1.3.1: Abstrakte Syntax für *L_PicoC_Blocks*

1.3.2.2.3 Codebeispiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.picoc_blocks',
3   [
4     FunDef
5       IntType 'int',
6       Name 'faculty',
7       [
8         Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('n'))
9       ],
10      [
11        Block
12          Name 'faculty.6',
13          [
14            Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1'))
15            // While(Num('1'), [])
16            GoTo(Name('condition_check.5'))
17          ],
18        Block
19          Name 'condition_check.5',
20          [
21            IfElse
22              Num '1',
23              [
24                GoTo(Name('while_branch.4'))
25              ],
26              [
27                GoTo(Name('while_after.1'))
28              ]
29            ],
30        Block
31          Name 'while_branch.4',
32          [
33            // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), []),
34            IfElse
35              Atom
36                Name 'n',
37                Eq '==',

```

```

38         Num '1',
39         [
40             GoTo(Name('if.3'))
41         ],
42         [
43             GoTo(Name('if_else_after.2'))
44         ]
45     ],
46     Block
47     Name 'if.3',
48     [
49         Return(Name('res'))
50     ],
51     Block
52     Name 'if_else_after.2',
53     [
54         Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
55         Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
56         GoTo(Name('condition_check.5'))
57     ],
58     Block
59     Name 'while_after.1',
60     []
61 ],
62 FunDef
63 VoidType 'void',
64 Name 'main',
65 [],
66 [
67     Block
68     Name 'main.0',
69     [
70         Exp(Call(Name('print'), [Call(Name('faculty'), [Num('4')])]))
71     ]
72 ]
73 ]

```

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_{PicoC_Mon}***Definition 1.5:** Symboltabelle**1.3.2.3.3 Codebeispiel**

```

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

```

```

28 Block
29   Name 'while_branch.4',
30   [
31     // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
32     // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
33     Exp(Stackframe(Num('0')))
34     Exp(Num('1'))
35     Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1')))),
36     IfElse
37       Stack
38       Num '1',
39       [
40         GoTo(Name('if.3'))
41       ],
42       [
43         GoTo(Name('if_else_after.2'))
44       ]
45   ],
46 Block
47   Name 'if.3',
48   [
49     // Return(Name('res'))
50     Exp(Stackframe(Num('1')))
51     Return(Stack(Num('1')))
52   ],
53 Block
54   Name 'if_else_after.2',
55   [
56     // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
57     Exp(Stackframe(Num('0')))
58     Exp(Stackframe(Num('1')))
59     Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
60     Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
61     // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
62     Exp(Stackframe(Num('0')))
63     Exp(Num('1'))
64     Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
65     Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
66     Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
67   ],
68 Block
69   Name 'while_after.1',
70   [
71     Return(Empty())
72   ],
73 Block
74   Name 'main.0',
75   [
76     StackMalloc(Num('2'))
77     Exp(Num('4'))
78     NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
79     Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
80     RemoveStackframe()
81     Exp(ACC)
82     Exp(Call(Name('print'), [Stack(Num('1'))]))
83     Return(Empty())
84   ]

```

85]

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 'faculty.6',
6       [
7         # // Assign(Name('res'), Num('1'))
8         # Exp(Num('1'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 1;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN BAF ACC -3;
15        ADDI SP 1;
16        # // While(Num('1'), [])
17        # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
18        Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
19      ],
20    Block
21      Name 'condition_check.5',
22      [
23        # // IfElse(Num('1'), [], [])
24        # Exp(Num('1'))
25        SUBI SP 1;
26        LOADI ACC 1;
27        STOREIN SP ACC 1;
28        # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
29        LOADIN SP ACC 1;
30        ADDI SP 1;
31        JUMP== GoTo(Name('while_after.1'));

```

```

32     Exp(GoTo(Name('while_branch.4'))))
33 ],
34 Block
35     Name 'while_branch.4',
36     [
37         # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
38         # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
39         # Exp(Stackframe(Num('0'))))
40         SUBI SP 1;
41         LOADIN BAF ACC -2;
42         STOREIN SP ACC 1;
43         # Exp(Num('1'))
44         SUBI SP 1;
45         LOADI ACC 1;
46         STOREIN SP ACC 1;
47         LOADIN SP ACC 2;
48         LOADIN SP IN2 1;
49         SUB ACC IN2;
50         JUMP== 3;
51         LOADI ACC 0;
52         JUMP 2;
53         LOADI ACC 1;
54         STOREIN SP ACC 2;
55         ADDI SP 1;
56         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
57         LOADIN SP ACC 1;
58         ADDI SP 1;
59         JUMP== GoTo(Name('if_else_after.2'));
60         Exp(GoTo(Name('if.3'))))
61     ],
62 Block
63     Name 'if.3',
64     [
65         # // Return(Name('res'))
66         # Exp(Stackframe(Num('1'))))
67         SUBI SP 1;
68         LOADIN BAF ACC -3;
69         STOREIN SP ACC 1;
70         # Return(Stack(Num('1'))))
71         LOADIN SP ACC 1;
72         ADDI SP 1;
73         LOADIN BAF PC -1;
74     ],
75 Block
76     Name 'if_else_after.2',
77     [
78         # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
79         # Exp(Stackframe(Num('0'))))
80         SUBI SP 1;
81         LOADIN BAF ACC -2;
82         STOREIN SP ACC 1;
83         # Exp(Stackframe(Num('1'))))
84         SUBI SP 1;
85         LOADIN BAF ACC -3;
86         STOREIN SP ACC 1;
87         # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
88         LOADIN SP ACC 2;

```

```

89     LOADIN SP IN2 1;
90     MULT ACC IN2;
91     STOREIN SP ACC 2;
92     ADDI SP 1;
93     # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
94     LOADIN SP ACC 1;
95     STOREIN BAF ACC -3;
96     ADDI SP 1;
97     # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
98     # Exp(Stackframe(Num('0')))
99     SUBI SP 1;
100    LOADIN BAF ACC -2;
101    STOREIN SP ACC 1;
102    # Exp(Num('1'))
103    SUBI SP 1;
104    LOADI ACC 1;
105    STOREIN SP ACC 1;
106    # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
107    LOADIN SP ACC 2;
108    LOADIN SP IN2 1;
109    SUB ACC IN2;
110    STOREIN SP ACC 2;
111    ADDI SP 1;
112    # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
113    LOADIN SP ACC 1;
114    STOREIN BAF ACC -2;
115    ADDI SP 1;
116    # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
117    Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
118 ],
119 Block
120   Name 'while_after.1',
121   [
122     # Return(Empty())
123     LOADIN BAF PC -1;
124   ],
125 Block
126   Name 'main.0',
127   [
128     # StackMalloc(Num('2'))
129     SUBI SP 2;
130     # Exp(Num('4'))
131     SUBI SP 1;
132     LOADI ACC 4;
133     STOREIN SP ACC 1;
134     # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
135     MOVE BAF ACC;
136     ADDI SP 3;
137     MOVE SP BAF;
138     SUBI SP 4;
139     STOREIN BAF ACC 0;
140     LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
141     ADD ACC CS;
142     STOREIN BAF ACC -1;
143     # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
144     Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
145     # RemoveStackframe()

```

```

146     MOVE BAF IN1;
147     LOADIN IN1 BAF 0;
148     MOVE IN1 SP;
149     # Exp(ACC)
150     SUBI SP 1;
151     STOREIN SP ACC 1;
152     LOADIN SP ACC 1;
153     ADDI SP 1;
154     CALL PRINT ACC;
155     # Return(Empty())
156     LOADIN BAF PC -1;
157 ]
158 ]

```

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

$$stmt ::= Exit(Num(str))$$

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.7',
6       [
7         # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
8         Exp(GoTo(Name('main.0')))
9       ],
10    Block
11      Name 'faculty.6',
12      [
13        # // Assign(Name('res'), Num('1'))
14        # Exp(Num('1'))
15        SUBI SP 1;
16        LOADI ACC 1;
17        STOREIN SP ACC 1;
18        # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
19        LOADIN SP ACC 1;
20        STOREIN BAF ACC -3;
21        ADDI SP 1;
22        # // While(Num('1'), [])
23        # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
24        # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
25      ],

```



```

26 Block
27   Name 'condition_check.5',
28   [
29     # // IfElse(Num('1'), [], [])
30     # Exp(Num('1'))
31     SUBI SP 1;
32     LOADI ACC 1;
33     STOREIN SP ACC 1;
34     # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
35     LOADIN SP ACC 1;
36     ADDI SP 1;
37     JUMP== GoTo(Name('while_after.1'));
38     # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.4'))))
39   ],
40 Block
41   Name 'while_branch.4',
42   [
43     # // If(Atom(Name('n'), Eq('='), Num('1')), [])
44     # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('='), Num('1')), [], [])
45     # Exp(Stackframe(Num('0'))))
46     SUBI SP 1;
47     LOADIN BAF ACC -2;
48     STOREIN SP ACC 1;
49     # Exp(Num('1'))
50     SUBI SP 1;
51     LOADI ACC 1;
52     STOREIN SP ACC 1;
53     LOADIN SP ACC 2;
54     LOADIN SP IN2 1;
55     SUB ACC IN2;
56     JUMP== 3;
57     LOADI ACC 0;
58     JUMP 2;
59     LOADI ACC 1;
60     STOREIN SP ACC 2;
61     ADDI SP 1;
62     # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
63     LOADIN SP ACC 1;
64     ADDI SP 1;
65     JUMP== GoTo(Name('if_else_after.2'));
66     # // not included Exp(GoTo(Name('if.3'))))
67   ],
68 Block
69   Name 'if.3',
70   [
71     # // Return(Name('res'))
72     # Exp(Stackframe(Num('1'))))
73     SUBI SP 1;
74     LOADIN BAF ACC -3;
75     STOREIN SP ACC 1;
76     # Return(Stack(Num('1'))))
77     LOADIN SP ACC 1;
78     ADDI SP 1;
79     LOADIN BAF PC -1;
80   ],
81 Block
82   Name 'if_else_after.2',

```

```

83     [
84         # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
85         # Exp(Stackframe(Num('0')))
86         SUBI SP 1;
87         LOADIN BAF ACC -2;
88         STOREIN SP ACC 1;
89         # Exp(Stackframe(Num('1')))
90         SUBI SP 1;
91         LOADIN BAF ACC -3;
92         STOREIN SP ACC 1;
93         # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
94         LOADIN SP ACC 2;
95         LOADIN SP IN2 1;
96         MULT ACC IN2;
97         STOREIN SP ACC 2;
98         ADDI SP 1;
99         # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
100        LOADIN SP ACC 1;
101        STOREIN BAF ACC -3;
102        ADDI SP 1;
103        # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
104        # Exp(Stackframe(Num('0')))
105        SUBI SP 1;
106        LOADIN BAF ACC -2;
107        STOREIN SP ACC 1;
108        # Exp(Num('1'))
109        SUBI SP 1;
110        LOADI ACC 1;
111        STOREIN SP ACC 1;
112        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
113        LOADIN SP ACC 2;
114        LOADIN SP IN2 1;
115        SUB ACC IN2;
116        STOREIN SP ACC 2;
117        ADDI SP 1;
118        # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
119        LOADIN SP ACC 1;
120        STOREIN BAF ACC -2;
121        ADDI SP 1;
122        # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
123        Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
124    ],
125    Block
126        Name 'while_after.1',
127        [
128            # Return(Empty())
129            LOADIN BAF PC -1;
130        ],
131    Block
132        Name 'main.0',
133        [
134            # StackMalloc(Num('2'))
135            SUBI SP 2;
136            # Exp(Num('4'))
137            SUBI SP 1;
138            LOADI ACC 4;
139            STOREIN SP ACC 1;

```

```

140      # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
141      MOVE BAF ACC;
142      ADDI SP 3;
143      MOVE SP BAF;
144      SUBI SP 4;
145      STOREIN BAF ACC 0;
146      LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
147      ADD ACC CS;
148      STOREIN BAF ACC -1;
149      # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
150      Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
151      # RemoveStackframe()
152      MOVE BAF IN1;
153      LOADIN IN1 BAF 0;
154      MOVE IN1 SP;
155      # Exp(ACC)
156      SUBI SP 1;
157      STOREIN SP ACC 1;
158      LOADIN SP ACC 1;
159      ADDI SP 1;
160      CALL PRINT ACC;
161      # Return(Empty())
162      LOADIN BAF PC -1;
163  ]
164 ]

```

Code 1.11: RETI-Patch Pass für Codebespiel

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 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}


```

16 # Exp(Num('1'))
17 SUBI SP 1;
18 LOADI ACC 1;
19 STOREIN SP ACC 1;
20 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
21 LOADIN SP ACC 1;
22 ADDI SP 1;
23 JUMP== 54;
24 # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.4')))
25 # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
26 # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
27 # Exp(Stackframe(Num('0')))
28 SUBI SP 1;
29 LOADIN BAF ACC -2;
30 STOREIN SP ACC 1;
31 # Exp(Num('1'))
32 SUBI SP 1;
33 LOADI ACC 1;
34 STOREIN SP ACC 1;
35 LOADIN SP ACC 2;
36 LOADIN SP IN2 1;
37 SUB ACC IN2;
38 JUMP== 3;
39 LOADI ACC 0;
40 JUMP 2;
41 LOADI ACC 1;
42 STOREIN SP ACC 2;
43 ADDI SP 1;
44 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
45 LOADIN SP ACC 1;
46 ADDI SP 1;
47 JUMP== 7;
48 # // not included Exp(GoTo(Name('if.3')))
49 # // Return(Name('res'))
50 # Exp(Stackframe(Num('1')))
51 SUBI SP 1;
52 LOADIN BAF ACC -3;
53 STOREIN SP ACC 1;
54 # Return(Stack(Num('1')))
55 LOADIN SP ACC 1;
56 ADDI SP 1;
57 LOADIN BAF PC -1;
58 # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
59 # Exp(Stackframe(Num('0')))
60 SUBI SP 1;
61 LOADIN BAF ACC -2;
62 STOREIN SP ACC 1;
63 # Exp(Stackframe(Num('1')))
64 SUBI SP 1;
65 LOADIN BAF ACC -3;
66 STOREIN SP ACC 1;
67 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
68 LOADIN SP ACC 2;
69 LOADIN SP IN2 1;
70 MULT ACC IN2;
71 STOREIN SP ACC 2;
72 ADDI SP 1;

```

```
73 # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1'))))
74 LOADIN SP ACC 1;
75 STOREIN BAF ACC -3;
76 ADDI SP 1;
77 # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1'))))
78 # Exp(Stackframe(Num('0'))))
79 SUBI SP 1;
80 LOADIN BAF ACC -2;
81 STOREIN SP ACC 1;
82 # Exp(Num('1'))
83 SUBI SP 1;
84 LOADI ACC 1;
85 STOREIN SP ACC 1;
86 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
87 LOADIN SP ACC 2;
88 LOADIN SP IN2 1;
89 SUB ACC IN2;
90 STOREIN SP ACC 2;
91 ADDI SP 1;
92 # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1'))))
93 LOADIN SP ACC 1;
94 STOREIN BAF ACC -2;
95 ADDI SP 1;
96 # Exp(GoTo(Name('condition_check.5'))))
97 JUMP -58;
98 # Return(Empty())
99 LOADIN BAF PC -1;
100 # StackMalloc(Num('2'))
101 SUBI SP 2;
102 # Exp(Num('4'))
103 SUBI SP 1;
104 LOADI ACC 4;
105 STOREIN SP ACC 1;
106 # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr'))))
107 MOVE BAF ACC;
108 ADDI SP 3;
109 MOVE SP BAF;
110 SUBI SP 4;
111 STOREIN BAF ACC 0;
112 LOADI ACC 80;
113 ADD ACC CS;
114 STOREIN BAF ACC -1;
115 # Exp(GoTo(Name('faculty.6'))))
116 JUMP -78;
117 # RemoveStackframe()
118 MOVE BAF IN1;
119 LOADIN IN1 BAF 0;
120 MOVE IN1 SP;
121 # Exp(ACC)
122 SUBI SP 1;
123 STOREIN SP ACC 1;
124 LOADIN SP ACC 1;
125 ADDI SP 1;
126 CALL PRINT ACC;
127 # Return(Empty())
128 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]`) verhält⁷. 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.

⁷In 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 kann⁸. 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**⁹.

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

⁹Wenn 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**: $\text{size}(\text{datatype}(\text{ar})) = \left(\prod_{j=1}^n \text{dim}_j\right) \cdot \text{size}(\text{datatype})^a$.

^aDie **Funktion** `type` ordnet einer **Variable** ihren **Datentyp** zu. Das ist notwendig, weil die **Funktion** `size` nur bei einem **Datentyp** als **Funktionsargument** die **Größe** dieses **Datentyps** als **Zielwert** liefert

```

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

```

Code 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** geschrieben¹⁰.

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.

¹⁰Da 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 Kompiliervorgangs im **PiocC-Mon Pass** dem **Container-Knoten** `Ref(exp, datatype)` angehängt.

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

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])`.

^aScholl, „Betriebssysteme“.

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

```

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

```

```

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

```

Code 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')))`¹¹ 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
```

¹¹Ist 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 (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 (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).