
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	27
1.3.1	Übersicht	27
1.3.2	Passes	28
1.3.2.1	PicoC-Shrink Pass	28
1.3.2.1.1	Zweck	28
1.3.2.1.2	Codebeispiel	28
1.3.2.2	PicoC-Blocks Pass	30
1.3.2.2.1	Zweck	30
1.3.2.2.2	Abstrakte Syntax	30
1.3.2.2.3	Codebeispiel	30
1.3.2.3	PicoC-Mon Pass	31
1.3.2.3.1	Zweck	31
1.3.2.3.2	Abstrakte Syntax	31
1.3.2.3.3	Codebeispiel	32
1.3.2.4	RETI-Blocks Pass	33
1.3.2.4.1	Zweck	33
1.3.2.4.2	Abstrakte Syntax	33
1.3.2.4.3	Codebeispiel	33
1.3.2.5	RETI-Patch Pass	36
1.3.2.5.1	Zweck	36
1.3.2.5.2	Abstrakte Syntax	36
1.3.2.5.3	Codebeispiel	36
1.3.2.6	RETI Pass	38
1.3.2.6.1	Zweck	38
1.3.2.6.2	Konkrete und Abstrakte Syntax	38
1.3.2.6.3	Codebeispiel	39

1.3.3	Umsetzung von Funktionen	42
1.3.3.1	Mehrere Funktionen	42
1.3.3.1.1	Sprung zur Main Funktion	45
1.3.3.2	Funktionsdeklaration und -definition und Umsetzung von Scopes	48
1.3.3.3	Funktionsaufruf	49
1.3.3.3.1	Ohne Rückgabewert	49
1.3.3.3.2	Mit Rückgabewert	52
1.3.3.3.3	Umsetzung von Call by Sharing für Arrays	55
1.3.3.3.4	Umsetzung von Call by Value für Structs	58
1.4	Fehlermeldungen	60
1.4.1	Error Handler	60
1.4.2	Arten von Fehlermeldungen	60
1.4.2.1	Syntaxfehler	60
1.4.2.2	Laufzeitfehler	60

Abbildungsverzeichnis

1.1	Cross-Compiler Kompilervorgang ausgeschrieben	27
1.2	Cross-Compiler Kompilervorgang Kurzform	27
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	28
1.6	Abstract Syntax Tree für Codebespiel	29
1.7	PicoC Shrink Pass für Codebespiel	29
1.8	PicoC-Blocks Pass für Codebespiel	31
1.9	PicoC-Mon Pass für Codebespiel	33
1.10	RETI-Blocks Pass für Codebespiel	36
1.11	RETI-Patch Pass für Codebespiel	38
1.12	RETI Pass für Codebespiel	41
1.13	PicoC-Code für 3 Funktionen	42
1.14	Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen	43
1.15	PicoC-Blocks Pass für 3 Funktionen	44
1.16	PicoC-Mon Pass für 3 Funktionen	44
1.17	RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen	45
1.18	PicoC-Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	45
1.19	PicoC-Mon Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	46
1.20	RETI-Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	46
1.21	PicoC-Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	47
1.22	PicoC-Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	48
1.23	Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	49
1.24	PicoC-Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	49
1.25	PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	50
1.26	RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	51
1.27	RETI-Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	52
1.28	PicoC-Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	52
1.29	PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	53
1.30	RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	54
1.31	RETI-Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	55
1.32	PicoC-Code für Call by Sharing für Arrays	55
1.33	PicoC-Mon Pass für Call by Sharing für Arrays	56
1.34	Symboltabelle für Call by Sharing für Arrays	57
1.35	RETI-Block Pass für Call by Sharing für Arrays	58
1.36	PicoC-Code für Call by Value für Structs	58
1.37	PicoC-Mon Pass für Call by Value für Structs	59
1.38	RETI-Block Pass für Call by Value für Structs	60

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	32

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_{PiocC}	25
1.3.1 Abstrakte Syntax für L_{PicoC_Blocks}	30
1.3.2 Abstrakte Syntax für L_{PicoC_Mon}	31
1.3.3 Abstrakte Syntax für L_{RETI_Blocks}	33
1.3.4 Abstrakte Syntax für L_{RETI_Patch}	36
1.3.5 Konkrete Syntax für L_{RETI_Lex}	39
1.3.6 Konkrete Syntax für L_{RETI_Parse}	39
1.3.7 Abstrakte Syntax für L_{RETI}	39

1 Implementierung

1.1 Lexikalische Analyse

1.1.1 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse

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

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

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

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

1.1.2 Basic Lexer

1.2 Syntaktische Analyse

1.2.1 Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse

In 1.2.1

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

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

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

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

1.2.2 Umsetzung von Präzidenz

Die **PicoC** Programmiersprache hat dieselben **Präzidenzregeln** implementiert, wie die Programmiersprache **C**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	
12	<i>a=b</i>	Zuweisung	Rechts, dann links ←
13	<i>a,b</i>	Komma	Links, dann rechts →

Tabelle 1.1: Präzidenzregeln von PicoC

¹*C 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     ptr_decl
10    ptr_deg *
11    array_decl
12    array_dims
13    5
14    6
15    ptr_decl
16    ptr_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   ptr_deg
27   name main
28   fun_params
29   decl_exec_stmts
30   decl_part
31   decl_exp_stmt
32   alloc
33   ptr_decl
34   ptr_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</code> !a.
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 $x > 1$ 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 , wobei fun_name der Bezeichner der Funktion ist, für die ein neuer Stackframe erstellt werden soll und später dazu dient den Block dieser Funktion zu finden, weil dieser für den weiteren Kompilervorang wichtige Information in seinen versteckten Attribute angehängt hat und goto_after_call ein GoTo(Name('addr@next_instr')) ist, welches später durch die Adresse der Instruction, die direkt auf die Jump Instruction folgt, ersetzt wird.
RemoveStackframe()	Container für das Entfernen des aktuellen Stackframes .
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 Bezeichners 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 Kompilervorangs 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 **simpel** 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><ref_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}

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

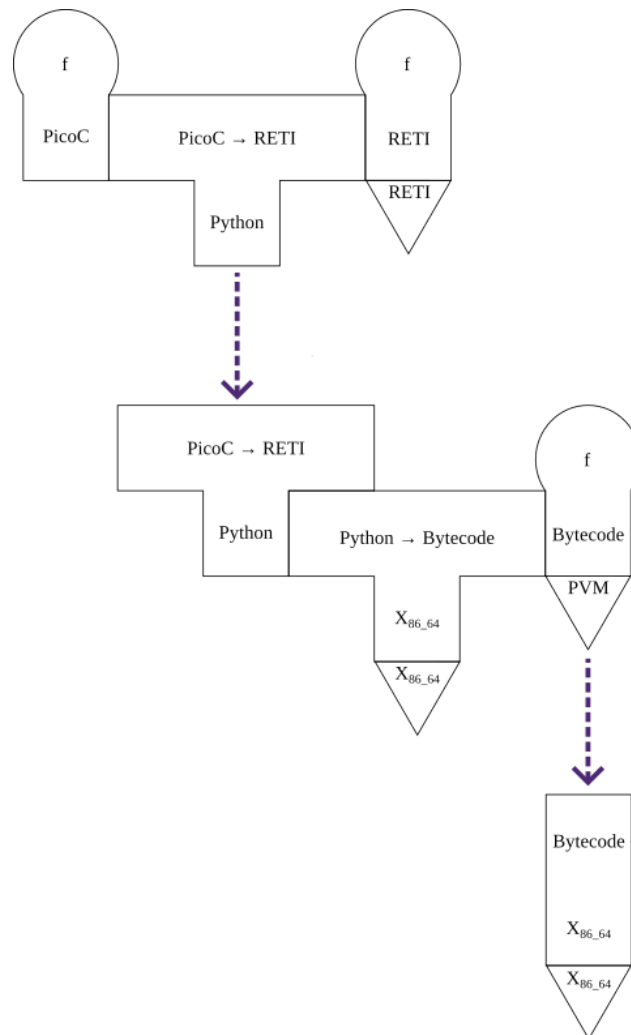


Abbildung 1.1: Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben

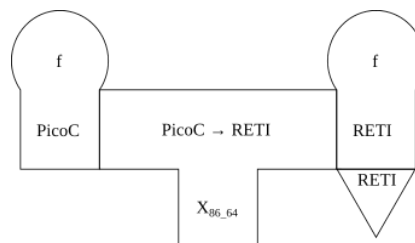


Abbildung 1.2: Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform

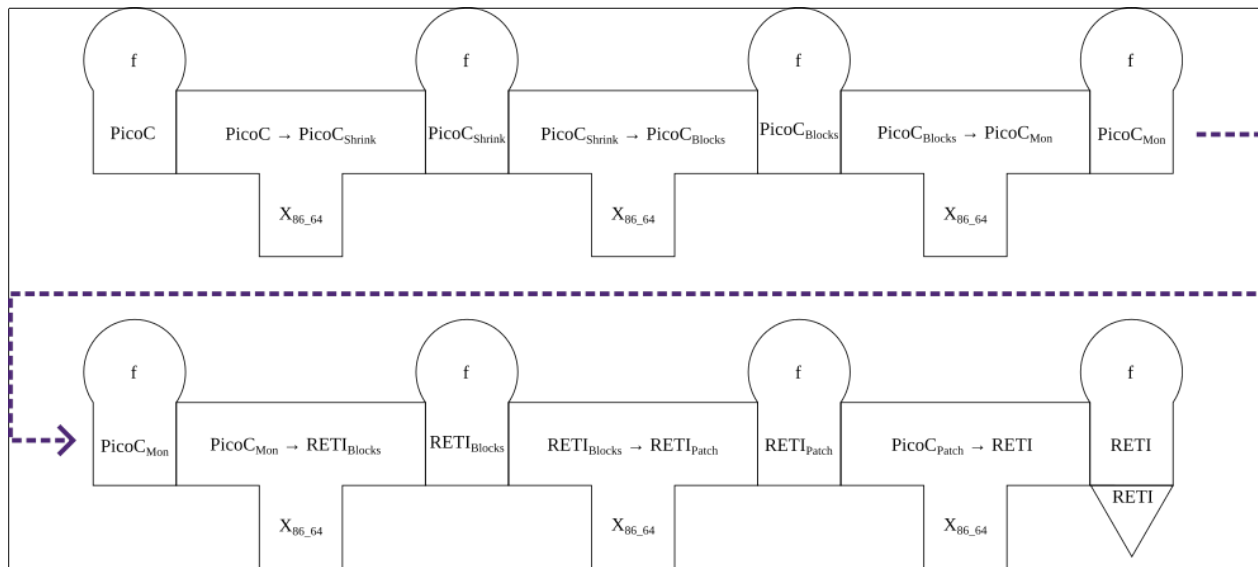


Abbildung 1.3: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben

1.3.2 Passes

1.3.2.1 PicoC-Shrink Pass

1.3.2.1.1 Zweck

1.3.2.1.2 Codebeispiel

```

1 // Author: Christoph Scholl, from the Operating Systems Lecture
2
3 void main() {
4     int n = 4;
5     int res = 1;
6     while (1) {
7         if (n == 1) {
8             return;
9         }
10        res = n * res;
11        n = n - 1;
12    }
13 }

```

Code 1.5: PicoC Code für Codebeispiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',

```

```

7   [],
8   [
9     Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('n')), Num('4'))
10    Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1')),
11    While
12      Num '1',
13      [
14        If
15          Atom
16            Name 'n',
17            Eq '==',
18            Num '1',
19            [
20              Return(Empty())
21            ]
22          Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
23          Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
24        ]
25      ]
26  ]

```

Code 1.6: Abstract Syntax Tree für Codebeispiel

```

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

```

Code 1.7: PicoC Shrink Pass für Codebeispiel

1.3.2.2 PicoC-Blocks Pass

1.3.2.2.1 Zweck

Der Zweck dieses Passes ist es, 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> (<i><datatype></i> , <i>Name</i> (<i>str</i>), <i>Alloc</i> (<i>Writeable</i> () , <i><datatype></i> , <i>Name</i> (<i>str</i>))* , <i><block></i> *)	<i>L_Fun</i>
<i>block</i>	<i>::= Block</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>), <i><stmt></i> *)	<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 *LPicoC_Blocks*

1.3.2.2.3 Codebeispiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.picoc_blocks',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Block
10          Name 'main.5',
11          [
12            Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('n')), Num('4'))
13            Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1'))
14            // While(Num('1'), [])
15            GoTo(Name('condition_check.4'))
16          ],
17        Block
18          Name 'condition_check.4',
19          [
20            IfElse
21              Num '1',
22              [
23                GoTo(Name('while_branch.3'))
24              ],
25              [
26                GoTo(Name('while_after.0'))
27              ]
28            ],
29          Block
30            Name 'while_branch.3',
31            [
32              // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), []),
33              IfElse
34                Atom
35                  Name 'n',

```

```

36         Eq '==',
37         Num '1',
38         [
39             GoTo(Name('if.2'))
40         ],
41         [
42             GoTo(Name('if_else_after.1'))
43         ]
44     ],
45     Block
46     Name 'if.2',
47     [
48         Return(Empty())
49     ],
50     Block
51     Name 'if_else_after.1',
52     [
53         Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
54         Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
55         GoTo(Name('condition_check.4'))
56     ],
57     Block
58     Name 'while_after.0',
59     []
60 ]
61 ]

```

Code 1.8: PicoC-Blocks Pass für Codebeispiel

1.3.2.3 PicoC-Mon Pass

1.3.2.3.1 Zweck

1.3.2.3.2 Abstrakte Syntax

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

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 'main.5',
6       [
7         // Assign(Name('n'), Num('4'))
8         Exp(Num('4'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('res'), Num('1'))
11        Exp(Num('1'))
12        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13        // While(Num('1'), [])
14        Exp(GoTo(Name('condition_check.4'))))
15      ],
16    Block
17      Name 'condition_check.4',
18      [
19        // IfElse(Num('1'), [], [])
20        Exp(Num('1')),
21        IfElse
22          Stack
23            Num '1',
24            [
25              GoTo(Name('while_branch.3'))
26            ],
27            [
28              GoTo(Name('while_after.0'))
29            ]
30        ],
31      Block
32        Name 'while_branch.3',
33        [
34          // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
35          // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
36          Exp(Global(Num('0')))
37          Exp(Num('1'))
38          Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1')))),
39          IfElse
40            Stack
41              Num '1',
42              [
43                GoTo(Name('if.2'))
44              ],
45              [
46                GoTo(Name('if_else_after.1'))
47              ]
48        ],
49      Block
50        Name 'if.2',

```

```

51     [
52         Return(Empty())
53     ],
54     Block
55     Name 'if_else_after.1',
56     [
57         // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
58         Exp(Global(Num('0')))
59         Exp(Global(Num('1')))
60         Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
61         Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
62         // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
63         Exp(Global(Num('0')))
64         Exp(Num('1'))
65         Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
66         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
67         Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
68     ],
69     Block
70     Name 'while_after.0',
71     [
72         Return(Empty())
73     ]
74 ]

```

Code 1.9: PicoC-Mon Pass für Codebeispiel

1.3.2.4 RETI-Blocks Pass

1.3.2.4.1 Zweck

1.3.2.4.2 Abstrakte Syntax

<i>program</i>	::=	<i>Program</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>), <i><block></i> *)	<i>L_Program</i>
<i>exp_stmts</i>	::=	<i>GoTo</i> (<i>str</i>)	<i>L_Blocks</i>
<i>instrs_before</i>	::=	<i>Num</i> (<i>str</i>)	
<i>num_instrs</i>	::=	<i>Num</i> (<i>str</i>)	
<i>block</i>	::=	<i>Block</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>), <i><instr></i> *, <i><instrs_before></i> , <i><num_instrs></i>)	
<i>instr</i>	::=	<i>GoTo</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>))	

Grammar 1.3.3: Abstrakte Syntax für *L_RETI_Blocks*

1.3.2.4.3 Codebeispiel

```

1 File
2   Name './example_faculty_it.reti_blocks',
3   [
4       Block
5       Name 'main.5',
6       [
7           # // Assign(Name('n'), Num('4'))
8           # Exp(Num('4'))

```

```

9      SUBI SP 1;
10     LOADI ACC 4;
11     STOREIN SP ACC 1;
12     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13     LOADIN SP ACC 1;
14     STOREIN DS ACC 0;
15     ADDI SP 1;
16     # // Assign(Name('res'), Num('1'))
17     # Exp(Num('1'))
18     SUBI SP 1;
19     LOADI ACC 1;
20     STOREIN SP ACC 1;
21     # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
22     LOADIN SP ACC 1;
23     STOREIN DS ACC 1;
24     ADDI SP 1;
25     # // While(Num('1'), [])
26     # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
27     Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
28 ],
29 Block
30   Name 'condition_check.4',
31   [
32     # // IfElse(Num('1'), [], [])
33     # Exp(Num('1'))
34     SUBI SP 1;
35     LOADI ACC 1;
36     STOREIN SP ACC 1;
37     # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
38     LOADIN SP ACC 1;
39     ADDI SP 1;
40     JUMP== GoTo(Name('while_after.0'));
41     Exp(GoTo(Name('while_branch.3')))
42   ],
43 Block
44   Name 'while_branch.3',
45   [
46     # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
47     # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
48     # Exp(Global(Num('0')))
49     SUBI SP 1;
50     LOADIN DS ACC 0;
51     STOREIN SP ACC 1;
52     # Exp(Num('1'))
53     SUBI SP 1;
54     LOADI ACC 1;
55     STOREIN SP ACC 1;
56     # Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1'))))
57     LOADIN SP ACC 2;
58     LOADIN SP IN2 1;
59     SUB ACC IN2;
60     JUMP== 3;
61     LOADI ACC 0;
62     JUMP 2;
63     LOADI ACC 1;
64     STOREIN SP ACC 2;
65     ADDI SP 1;

```

```

66     # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
67     LOADIN SP ACC 1;
68     ADDI SP 1;
69     JUMP== GoTo(Name('if_else_after.1'));
70     Exp(GoTo(Name('if.2')))
71 ],
72 Block
73   Name 'if.2',
74   [
75     # Return(Empty())
76     LOADIN BAF PC -1;
77   ],
78 Block
79   Name 'if_else_after.1',
80   [
81     # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
82     # Exp(Global(Num('0')))
83     SUBI SP 1;
84     LOADIN DS ACC 0;
85     STOREIN SP ACC 1;
86     # Exp(Global(Num('1')))
87     SUBI SP 1;
88     LOADIN DS ACC 1;
89     STOREIN SP ACC 1;
90     # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
91     LOADIN SP ACC 2;
92     LOADIN SP IN2 1;
93     MULT ACC IN2;
94     STOREIN SP ACC 2;
95     ADDI SP 1;
96     # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
97     LOADIN SP ACC 1;
98     STOREIN DS ACC 1;
99     ADDI SP 1;
100    # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
101    # Exp(Global(Num('0')))
102    SUBI SP 1;
103    LOADIN DS ACC 0;
104    STOREIN SP ACC 1;
105    # Exp(Num('1'))
106    SUBI SP 1;
107    LOADI ACC 1;
108    STOREIN SP ACC 1;
109    # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
110    LOADIN SP ACC 2;
111    LOADIN SP IN2 1;
112    SUB ACC IN2;
113    STOREIN SP ACC 2;
114    ADDI SP 1;
115    # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
116    LOADIN SP ACC 1;
117    STOREIN DS ACC 0;
118    ADDI SP 1;
119    # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
120    Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
121  ],
122 Block

```

```

123     Name 'while_after.0',
124     [
125         # Return(Empty())
126         LOADIN BAF PC -1;
127     ]
128 ]

```

Code 1.10: RETI-Blocks Pass für Codebeispiel

1.3.2.5 RETI-Patch Pass

1.3.2.5.1 Zweck

1.3.2.5.2 Abstrakte Syntax

$$\underline{stmt ::= Exit(Num(str))}$$
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.6',
6         [
7             # // Exp(GoTo(Name('main.5')))
8             # // not included Exp(GoTo(Name('main.5')))
9         ],
10      Block
11        Name 'main.5',
12        [
13            # // Assign(Name('n'), Num('4'))
14            # Exp(Num('4'))
15            SUBI SP 1;
16            LOADI ACC 4;
17            STOREIN SP ACC 1;
18            # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
19            LOADIN SP ACC 1;
20            STOREIN DS ACC 0;
21            ADDI SP 1;
22            # // Assign(Name('res'), Num('1'))
23            # Exp(Num('1'))
24            SUBI SP 1;
25            LOADI ACC 1;
26            STOREIN SP ACC 1;
27            # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
28            LOADIN SP ACC 1;
29            STOREIN DS ACC 1;
30            ADDI SP 1;
31            # // While(Num('1'), [])
32            # Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))

```

```

33     # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.4')))
34 ],
35 Block
36     Name 'condition_check.4',
37     [
38         # // IfElse(Num('1'), [], [])
39         # Exp(Num('1'))
40         SUBI SP 1;
41         LOADI ACC 1;
42         STOREIN SP ACC 1;
43         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
44         LOADIN SP ACC 1;
45         ADDI SP 1;
46         JUMP== GoTo(Name('while_after.0'));
47         # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.3')))
48     ],
49 Block
50     Name 'while_branch.3',
51     [
52         # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
53         # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
54         # Exp(Global(Num('0')))
55         SUBI SP 1;
56         LOADIN DS ACC 0;
57         STOREIN SP ACC 1;
58         # Exp(Num('1'))
59         SUBI SP 1;
60         LOADI ACC 1;
61         STOREIN SP ACC 1;
62         # Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1'))))
63         LOADIN SP ACC 2;
64         LOADIN SP IN2 1;
65         SUB ACC IN2;
66         JUMP== 3;
67         LOADI ACC 0;
68         JUMP 2;
69         LOADI ACC 1;
70         STOREIN SP ACC 2;
71         ADDI SP 1;
72         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
73         LOADIN SP ACC 1;
74         ADDI SP 1;
75         JUMP== GoTo(Name('if_else_after.1'));
76         # // not included Exp(GoTo(Name('if.2')))
77     ],
78 Block
79     Name 'if.2',
80     [
81         # Return(Empty())
82         LOADIN BAF PC -1;
83     ],
84 Block
85     Name 'if_else_after.1',
86     [
87         # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
88         # Exp(Global(Num('0')))
89         SUBI SP 1;

```

```

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

```

Code 1.11: RETI-Patch Pass für Codebeispiel

1.3.2.6 RETI Pass

1.3.2.6.1 Zweck

1.3.2.6.2 Konkrete und Abstrakte Syntax

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

Grammar 1.3.5: Konkrete Syntax für *L_{RETI_Lex}*

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

Grammar 1.3.6: Konkrete Syntax für *L_{RETI_Parse}*

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

Grammar 1.3.7: Abstrakte Syntax für *L_{RETI}***1.3.2.6.3 Codebeispiel**


```
1 # // Exp(GoTo(Name('main.5'))))
2 # // not included Exp(GoTo(Name('main.5'))))
3 # // Assign(Name('n'), Num('4'))
4 # Exp(Num('4'))
5 SUBI SP 1;
6 LOADI ACC 4;
7 STOREIN SP ACC 1;
8 # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1'))))
9 LOADIN SP ACC 1;
10 STOREIN DS ACC 0;
11 ADDI SP 1;
12 # // Assign(Name('res'), Num('1'))
13 # Exp(Num('1'))
14 SUBI SP 1;
15 LOADI ACC 1;
16 STOREIN SP ACC 1;
17 # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1'))))
18 LOADIN SP ACC 1;
19 STOREIN DS ACC 1;
20 ADDI SP 1;
21 # // While(Num('1'), [])
22 # Exp(GoTo(Name('condition_check.4'))))
23 # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.4'))))
24 # // IfElse(Num('1'), [], [])
25 # Exp(Num('1'))
26 SUBI SP 1;
27 LOADI ACC 1;
28 STOREIN SP ACC 1;
29 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
30 LOADIN SP ACC 1;
31 ADDI SP 1;
32 JUMP== 49;
33 # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.3'))))
34 # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
35 # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
36 # Exp(Global(Num('0'))))
37 SUBI SP 1;
38 LOADIN DS ACC 0;
39 STOREIN SP ACC 1;
40 # Exp(Num('1'))
41 SUBI SP 1;
42 LOADI ACC 1;
43 STOREIN SP ACC 1;
44 # Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1'))))
45 LOADIN SP ACC 2;
46 LOADIN SP IN2 1;
47 SUB ACC IN2;
48 JUMP== 3;
49 LOADI ACC 0;
50 JUMP 2;
51 LOADI ACC 1;
52 STOREIN SP ACC 2;
53 ADDI SP 1;
54 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
55 LOADIN SP ACC 1;
56 ADDI SP 1;
57 JUMP== 2;
```

```
58 # // not included Exp(GoTo(Name('if.2'))))
59 # Return(Empty())
60 LOADIN BAF PC -1;
61 # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
62 # Exp(Global(Num('0'))))
63 SUBI SP 1;
64 LOADIN DS ACC 0;
65 STOREIN SP ACC 1;
66 # Exp(Global(Num('1'))))
67 SUBI SP 1;
68 LOADIN DS ACC 1;
69 STOREIN SP ACC 1;
70 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
71 LOADIN SP ACC 2;
72 LOADIN SP IN2 1;
73 MULT ACC IN2;
74 STOREIN SP ACC 2;
75 ADDI SP 1;
76 # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1'))))
77 LOADIN SP ACC 1;
78 STOREIN DS ACC 1;
79 ADDI SP 1;
80 # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1'))))
81 # Exp(Global(Num('0'))))
82 SUBI SP 1;
83 LOADIN DS ACC 0;
84 STOREIN SP ACC 1;
85 # Exp(Num('1'))
86 SUBI SP 1;
87 LOADI ACC 1;
88 STOREIN SP ACC 1;
89 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
90 LOADIN SP ACC 2;
91 LOADIN SP IN2 1;
92 SUB ACC IN2;
93 STOREIN SP ACC 2;
94 ADDI SP 1;
95 # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1'))))
96 LOADIN SP ACC 1;
97 STOREIN DS ACC 0;
98 ADDI SP 1;
99 # Exp(GoTo(Name('condition_check.4'))))
100 JUMP -53;
101 # Return(Empty())
102 LOADIN BAF PC -1;
```

Code 1.12: RETI Pass für Codebeispiel

1.3.3 Umsetzung von Funktionen

1.3.3.1 Mehrere Funktionen

Die Umsetzung **mehrerer Funktionen** wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 1.13 erklärt. Dieses Beispiel soll nur zeigen, wie Funktionen in verschiedenen, für die Kompilierung von Funktionen relevanten **Passes** kompiliert werden. Das Beispiel ist so gewählt, dass es möglichst **isoliert** von weiterem möglicherweise störendem Code ist.

```

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

```

Code 1.13: PicoC-Code für 3 Funktionen

Im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.14 wird eine **Funktion**, wie z.B. `void fun(int param){ return param; }` mit der Komposition `FunDef(IntType(), Name('fun'), [Alloc(Writeable(), IntType()), Name('fun')])`, `[Return(Exp(Name('param')))]` dargestellt. Die einzelnen **Attribute** dieses Container-Knoten sind in Tabelle 1.5 erklärt.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Return
10          Empty
11      ],
12     FunDef
13       VoidType 'void',
14       Name 'fun1',
15       [],
16       [],
17     FunDef
18       IntType 'int',
19       Name 'fun2',
20       [],
21       [
22         Return
23           Num '1'
24       ]
25   ]

```

Code 1.14: Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen

Im **PicoC-Blocks Pass** in Code 1.15 werden die **Statements** der Funktion in **Blöcke** `Block(name, stmts_instrs)` aufgeteilt. Dabei bekommt ein Block `Block(name, stmts_instrs)`, der die Statements der Funktion vom **Anfang** bis zum **Ende** oder bis zum Auftauchen eines `If(exp, stmts)`, `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`, `While(exp, stmts)` oder `DoWhile(exp, stmts)`² beinhaltet den **Bezeichner** bzw. den `Name(str)`-Token-Knoten der Funktion an sein **Label** bzw. an sein `name`-Attribut zugewiesen. Dem **Bezeichner** wird vor der Zuweisung allerdings noch eine **Nummer** angehängt `<name>.<number>`³.

Es werden parallel dazu neue Zuordnungen im **Dictionary** `fun_name_to_block_name` hinzugefügt. Das **Dictionary** ordnet einem **Funktionsnamen** den **Blocknamen** des Blockes, der das erste **Statement** der Funktion enthält und dessen **Bezeichner** `<name>.<number>` bis auf die angehängte **Nummer** identisch zu dem der Funktion ist zu⁴. Diese Zuordnung ist nötig, da **Blöcke** noch eine **Nummer** an ihren Bezeichner `<name>.<number>` angehängt haben.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs.picoc_blocks',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Block
10          Name 'main.2',
11          [
12            Return
13              Empty
14          ]
15      ],
16     FunDef
17       VoidType 'void',
18       Name 'fun1',
19       [],
20       [
21         Block
22          Name 'fun1.1',
23          []
24      ],
25     FunDef
26       IntType 'int',
27       Name 'fun2',
28       [],
29       [
30         Block
31          Name 'fun2.0',
32          [
33            Return
34              Num '1'
35          ]
36      ]
37   ]

```

²Eine Erklärung dazu ist in Unterkapitel 1.3.2.2.1 zu finden.

³Der **Grund** dafür kann im Unterkapitel 1.3.2.2.1 nachgelesen werden.

⁴Das ist der **Block**, über den im **obigen letzten Paragraph** gesprochen wurde.

```

36     ]
37 ]

```

Code 1.15: PicoC-Blocks Pass für 3 Funktionen

Im **PicoC-Mon Pass** in Code 1.16 werden die `FunDef(datatype, name, allocs, stmts)`-Container-Knoten komplett aufgelöst, sodass sich im `File(name, decls.defs.blocks)`-Container-Knoten nur noch Blöcke befinden.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.2',
6       [
7         Return
8         Empty
9       ],
10    Block
11      Name 'fun1.1',
12      [
13        Return
14        Empty
15      ],
16    Block
17      Name 'fun2.0',
18      [
19        // Return(Num('1')),
20        Exp
21          Num '1',
22        Return
23          Stack
24          Num '1'
25      ]
26 ]

```

Code 1.16: PicoC-Mon Pass für 3 Funktionen

Nach dem **RETI Pass** in Code 1.17 gibt es nur noch **RETI-Instructions**. Glücklicherweise enthalten die **Kommentare** die **Labelbezeichner** `<name>.<nummer>` der Blöcke, die in diesem Beispiel immer zugleich bis auf die Nummer, dem **Namen** der jeweiligen **Funktion** entsprechen, deren kompilierte Instructions als nächstes folgen. Ohne diese Kommentare könnte man die **Funktionen** nicht mehr direkt ausmachen.

Da es in der `main`-Funktion keinen **Funktionsaufruf** gab, wird der Code, der nach der **Instruction** in der **markierten Zeile** kommt nicht mehr betreten. Funktionen sind im **RETI-Code** nur dadurch existent, dass im RETI-Code **Sprünge** (z.B. `JUMP<rel> <im>`) zu den jeweils richtigen Positionen gemacht werden, nämlich dorthin, wo die **RETI-Instructions**, die aus den **Statemens** einer **Funktion** kompiliert wurden anfangen.

```

1 # // Block(Name('start.3'), [])
2 # // Exp(GoTo(Name('main.2'))))
3 # // not included Exp(GoTo(Name('main.2'))))
4 # // Block(Name('main.2'), [])
5 # Return(Empty())
6 LOADIN BAF PC -1;
7 # // Block(Name('fun1.1'), [])
8 # Return(Empty())
9 LOADIN BAF PC -1;
10 # // Block(Name('fun2.0'), [])
11 # // Return(Num('1'))
12 # Exp(Num('1'))
13 SUBI SP 1;
14 LOADI ACC 1;
15 STOREIN SP ACC 1;
16 # Return(Stack(Num('1'))))
17 LOADIN SP ACC 1;
18 ADDI SP 1;
19 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 1.17: RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen

1.3.3.1.1 Sprung zur Main Funktion

Im vorherigen Beispiel in Code 1.13 war die `main`-Funktion die **erste** Funktion, die im Code vorkam. Dadurch konnte die `main`-Funktion direkt betreten werden, da die **Ausführung** des Programmes immer ganz vorne im **RETI-Code** beginnt. Man musste sich daher keine Gedanken darum machen, wie man die **Ausführung**, die von der `main`-Funktion ausgeht überhaupt startet.

Im Beispiel in Code 1.18 ist die `main`-Funktion allerdings **nicht** die **erste** Funktion. Daher muss dafür gesorgt werden, dass die `main`-Funktion die erste Funktion ist, die ausgeführt wird.

```

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

```

Code 1.18: PicoC-Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs_main.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'fun1.2',

```

```

6      [
7      Return
8      Empty
9      ],
10     Block
11     Name 'fun2.1',
12     [
13     // Return(Num('1')),
14     Exp
15     Num '1',
16     Return
17     Stack
18     Num '1'
19     ],
20     Block
21     Name 'main.O',
22     [
23     Return
24     Empty
25     ]
26 ]

```

Code 1.19: PicoC-Mon Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```

1 File
2 Name './verbose_3_funs_main.reti_blocks',
3 [
4     Block
5     Name 'fun1.2',
6     [
7     # Return(Empty()),
8     LOADIN BAF PC -1
9     ],
10    Block
11    Name 'fun2.1',
12    [
13    # // Return(Num('1')),
14    # Exp(Num('1')),
15    SUBI SP 1,
16    LOADI ACC 1,
17    STOREIN SP ACC 1,
18    # Return(Stack(Num('1'))),
19    LOADIN SP ACC 1,
20    ADDI SP 1,
21    LOADIN BAF PC -1
22    ],
23    Block
24    Name 'main.O',
25    [
26    # Return(Empty()),
27    LOADIN BAF PC -1
28    ]
29 ]

```

Code 1.20: RETI-Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

Eine simple Möglichkeit ist es, die `main`-Funktion einfach nach **vorne** zu schieben, damit diese als **erstes** ausgeführt wird. Im `File(name, decls_defs)`-Container-Knoten muss dazu im `decls_defs`-Attribut, welches eine **Liste von Funktionen** ist, die `main`-Funktion an Index 0 geschoben werden.

Eine andere Möglichkeit und die Möglichkeit für die sich in der **Implementierung** des **PicoC-Compilers** entschieden wurde, ist es, wenn die `main`-Funktion nicht die erste auftauchende Funktion ist, einen `start.0`-Block als ersten Block einzufügen, der ein `GoTo()`

In der Implementierung des **PicoC-Compilers** wurde sich für diese Möglichkeit entschieden, da

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs_main.reti_patch',
3   [
4     Block
5       Name 'start.3',
6       [
7         # // Exp(GoTo(Name('main.0'))),
8         Exp
9           GoTo
10            Name 'main.0'
11       ],
12     Block
13       Name 'fun1.2',
14       [
15         # Return(Empty()),
16         LOADIN BAF PC -1
17       ],
18     Block
19       Name 'fun2.1',
20       [
21         # // Return(Num('1')),
22         # Exp(Num('1')),
23         SUBI SP 1,
24         LOADI ACC 1,
25         STOREIN SP ACC 1,
26         # Return(Stack(Num('1'))),
27         LOADIN SP ACC 1,
28         ADDI SP 1,
29         LOADIN BAF PC -1
30       ],
31     Block
32       Name 'main.0',
33       [
34         # Return(Empty()),
35         LOADIN BAF PC -1
36       ]
37   ]

```

Code 1.21: PicoC-Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

1.3.3.2 Funktionsdeklaration und -definition und Umsetzung von Scopes

```

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

```

Code 1.22: PicoC-Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss

Bei mehreren Funktionen werden die **Scopes** der unterschiedlichen **Funktionen** mittels eines **Suffix** "<fun_name>@" umgesetzt, der an den **Variablen**namen <var> drangehängt wird: <var>@<fun_name>. Dieser **Suffix** wird geändert sobald beim **Top-Down**⁵ Durchiterieren über den **Abstract Syntax Tree** des aktuellen **Passes** nach dem **Depth-First-Search** Schema über den

```

1 SymbolTable
2 [
3     Symbol
4     {
5         type qualifier:      Empty()
6         datatype:            FunDecl(IntType('int'), Name('fun2'), [Alloc(Writeable(),
7                               ↪ IntType('int'), Name('var'))])
8         name:                Name('fun2')
9         value or address:    Empty()
10        position:            Pos(Num('1'), Num('4'))
11        size:                Empty()
12    },
13    Symbol
14    {
15        type qualifier:      Empty()
16        datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('fun1'), [])
17        name:                Name('fun1')
18        value or address:    Empty()
19        position:            Pos(Num('3'), Num('5'))
20        size:                Empty()
21    },
22    Symbol
23    {
24        type qualifier:      Empty()
25        datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
26        name:                Name('main')
27        value or address:    Empty()
28        position:            Pos(Num('6'), Num('5'))
29        size:                Empty()
30    }
31 ]

```

⁵D.h. von der Wurzel zu den Blättern eines Baumes

```

29     },
30     Symbol
31     {
32         type qualifier:      Writeable()
33         datatype:            IntType('int')
34         name:                 Name('var@main')
35         value or address:     Num('0')
36         position:             Pos(Num('7'), Num('6'))
37         size:                 Num('1')
38     },
39     Symbol
40     {
41         type qualifier:      Writeable()
42         datatype:            IntType('int')
43         name:                 Name('var@fun2')
44         value or address:     Num('0')
45         position:             Pos(Num('11'), Num('13'))
46         size:                 Num('1')
47     }
48 ]

```

Code 1.23: Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss

1.3.3.3 Funktionsaufruf

1.3.3.3.1 Ohne Rückgabewert

```

1 struct st {int attr1; int attr2[2];};
2
3 void stack_fun(struct st param[2][3]);
4
5 void main() {
6     struct st local_var[2][3];
7     stack_fun(local_var);
8     return;
9 }
10
11 void stack_fun(struct st param[2][3]) {
12     int local_var;
13 }

```

Code 1.24: PicoC-Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2   Name './verbose_fun_call_no_return_value.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
7         ↪ Name('local_var'))),

```

```

8      // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')])),
9      // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]),
10     StackMalloc
11         Num '2',
12     Ref
13         Global
14             Num '0',
15     NewStackframe
16         Name 'stack_fun',
17         GoTo
18             Name 'addr@next_instr',
19     Exp
20         GoTo
21             Name 'stack_fun.0',
22     RemoveStackframe,
23     Return
24         Empty
25 ],
26 Block
27     Name 'stack_fun.0',
28     [
29         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
30         ↪ Name('param'))),
31         // Exp(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('local_var'))),
32     Return
33         Empty
34 ]

```

Code 1.25: PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2     Name './verbose_fun_call_no_return_value.reti_blocks',
3     [
4         Block
5             Name 'main.1',
6             [
7                 # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
8                 ↪ Name('local_var'))),
9                 # // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')])),
10                # // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]),
11                # StackMalloc(Num('2')),
12                SUBI SP 2,
13                # Ref(Global(Num('0'))),
14                SUBI SP 1,
15                LOADI IN1 0,
16                ADD IN1 DS,
17                STOREIN SP IN1 1,
18                # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))),
19                MOVE BAF ACC,
20                ADDI SP 3,
21                MOVE SP BAF,
22                SUBI SP 4,
23                STOREIN BAF ACC 0,

```

```

23     LOADI ACC GoTo
24         Name 'addr@next_instr',
25     ADD ACC CS,
26     STOREIN BAF ACC -1,
27     # Exp(GoTo(Name('stack_fun.0'))),
28     Exp
29     GoTo
30     Name 'stack_fun.0',
31     # RemoveStackframe(),
32     MOVE BAF IN1,
33     LOADIN IN1 BAF 0,
34     MOVE IN1 SP,
35     # Return(Empty()),
36     LOADIN BAF PC -1
37 ],
38 Block
39     Name 'stack_fun.0',
40     [
41     # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
42     ↪ Name('param'))),
43     # // Exp(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('local_var'))),
44     # Return(Empty()),
45     LOADIN BAF PC -1
46 ]

```

Code 1.26: RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 # // Block(Name('start.2'), [])
2 # // Exp(GoTo(Name('main.1'))))
3 # // not included Exp(GoTo(Name('main.1'))))
4 # // Block(Name('main.1'), [])
5 # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
6 ↪ Name('local_var'))))
6 # // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]))
7 # // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')])
8 # StackMalloc(Num('2'))
9 SUBI SP 2;
10 # Ref(Global(Num('0'))))
11 SUBI SP 1;
12 LOADI IN1 0;
13 ADD IN1 DS;
14 STOREIN SP IN1 1;
15 # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))))
16 MOVE BAF ACC;
17 ADDI SP 3;
18 MOVE SP BAF;
19 SUBI SP 4;
20 STOREIN BAF ACC 0;
21 # LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
22 LOADI ACC 14;
23 ADD ACC CS;
24 STOREIN BAF ACC -1;
25 # Exp(GoTo(Name('stack_fun.0'))))

```

```

26 JUMP 5;
27 # RemoveStackframe()
28 MOVE BAF IN1;
29 LOADIN IN1 BAF 0;
30 MOVE IN1 SP;
31 # Return(Empty())
32 LOADIN BAF PC -1;
33 # // Block(Name('stack_fun.0'), [])
34 # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('st'))), Name('param')))
35 # // Exp(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('local_var')))
36 # Return(Empty())
37 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 1.27: RETI-Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

1.3.3.3.2 Mit Rückgabewert

```

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

```

Code 1.28: PicoC-Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 File
2   Name './verbose_fun_call_with_return_value.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         // Return(Num('42')),
8         Exp
9           Num '42',
10        Return
11          Stack
12            Num '1'
13      ],
14    Block
15      Name 'main.0',
16      [
17        // Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Call(Name('stack_fun'),
18        ↪ [])),
19        // Assign(Name('var'), Call(Name('stack_fun'), [])),
20        // // Call(Name('stack_fun'), []),
21        StackMalloc
22          Num '2',
23        NewStackframe
24          Name 'stack_fun',

```

```

24      GoTo
25      Name 'addr@next_instr',
26    Exp
27      GoTo
28      Name 'stack_fun.1',
29    RemoveStackframe,
30    Assign
31      Global
32      Num '0',
33      Stack
34      Num '1',
35    Return
36      Empty
37  ]
38 ]

```

Code 1.29: PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 File
2   Name './verbose_fun_call_with_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         # // Return(Num('42')),
8         # Exp(Num('42')),
9         SUBI SP 1,
10        LOADI ACC 42,
11        STOREIN SP ACC 1,
12        # Return(Stack(Num('1'))),
13        LOADIN SP ACC 1,
14        ADDI SP 1,
15        LOADIN BAF PC -1
16      ],
17    Block
18      Name 'main.0',
19      [
20        # // Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Call(Name('stack_fun'),
21        ↪ [])),
22        # // Assign(Name('var'), Call(Name('stack_fun'), [])),
23        # // // Call(Name('stack_fun'), []),
24        # StackMalloc(Num('2')),
25        SUBI SP 2,
26        # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))),
27        MOVE BAF ACC,
28        ADDI SP 2,
29        MOVE SP BAF,
30        SUBI SP 2,
31        STOREIN BAF ACC 0,
32        LOADI ACC GoTo
33          Name 'addr@next_instr',
34        ADD ACC CS,
35        STOREIN BAF ACC -1,
36        # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1'))),

```

```

36     Exp
37     GoTo
38     Name 'stack_fun.1',
39     # RemoveStackframe(),
40     MOVE BAF IN1,
41     LOADIN IN1 BAF 0,
42     MOVE IN1 SP,
43     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1'))),
44     LOADIN SP ACC 1,
45     STOREIN DS ACC 0,
46     ADDI SP 1,
47     # Return(Empty()),
48     LOADIN BAF PC -1
49 ]
50 ]

```

Code 1.30: RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 # // Block(Name('start.2'), [])
2 # // Exp(GoTo(Name('main.0'))))
3 JUMP 7;
4 # // Block(Name('stack_fun.1'), [])
5 # // Return(Num('42'))
6 # Exp(Num('42'))
7 SUBI SP 1;
8 LOADI ACC 42;
9 STOREIN SP ACC 1;
10 # Return(Stack(Num('1'))))
11 LOADIN SP ACC 1;
12 ADDI SP 1;
13 LOADIN BAF PC -1;
14 # // Block(Name('main.0'), [])
15 # // Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Call(Name('stack_fun'), []))
16 # // Assign(Name('var'), Call(Name('stack_fun'), []))
17 # // // Call(Name('stack_fun'), [])
18 # StackMalloc(Num('2'))
19 SUBI SP 2;
20 # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))))
21 MOVE BAF ACC;
22 ADDI SP 2;
23 MOVE SP BAF;
24 SUBI SP 2;
25 STOREIN BAF ACC 0;
26 # LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
27 LOADI ACC 17;
28 ADD ACC CS;
29 STOREIN BAF ACC -1;
30 # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1'))))
31 JUMP -15;
32 # RemoveStackframe()
33 MOVE BAF IN1;
34 LOADIN IN1 BAF 0;
35 MOVE IN1 SP;
36 # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1'))))

```

```

37 LOADIN SP ACC 1;
38 STOREIN DS ACC 0;
39 ADDI SP 1;
40 # Return(Empty())
41 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 1.31: RETI-Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

1.3.3.3 Umsetzung von Call by Sharing für Arrays

```

1 void stack_fun(int (*param1)[3], int param2[2][3]) {
2 }
3
4 void main() {
5     int local_var1[2][3];
6     int local_var2[2][3];
7     stack_fun(local_var1, local_var2);
8 }

```

Code 1.32: PicoC-Code für Call by Sharing für Arrays

```

1 File
2   Name './verbose_fun_call_by_sharing_array.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
8         ↪ Name('param1'))),
9         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')), Name('param2'))),
10        Return
11        Empty
12      ],
13    Block
14      Name 'main.0',
15      [
16        // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int')),
17        ↪ Name('local_var1'))),
18        // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int')),
19        ↪ Name('local_var2'))),
20        // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var1'), Name('local_var2')])),
21        // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var1'), Name('local_var2')]),
22        StackMalloc
23        Num '2',
24      Ref
25      Global
26      Num '0',
27      Ref
28      Global
29      Num '6',
30      NewStackframe

```



```

28     Name 'stack_fun',
29     GoTo
30     Name 'addr@next_instr',
31   Exp
32     GoTo
33     Name 'stack_fun.1',
34   RemoveStackframe,
35   Return
36     Empty
37 ]
38 ]

```

Code 1.33: PicoC-Mon Pass für Call by Sharing für Arrays

```

1 SymbolTable
2 [
3   Symbol
4   {
5     type qualifier:      Empty()
6     datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('stack_fun'),
7     ↪ [Alloc(Writable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
8     ↪ Name('param1')), Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')),
9     ↪ Name('param2'))])
10    name:                Name('stack_fun')
11    value or address:     Empty()
12    position:            Pos(Num('1'), Num('5'))
13    size:                Empty()
14  },
15  Symbol
16  {
17    type qualifier:      Writable()
18    datatype:            PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
19    name:                Name('param1@stack_fun')
20    value or address:     Num('0')
21    position:            Pos(Num('1'), Num('21'))
22    size:                Num('1')
23  },
24  Symbol
25  {
26    type qualifier:      Writable()
27    datatype:            PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
28    name:                Name('param2@stack_fun')
29    value or address:     Num('1')
30    position:            Pos(Num('1'), Num('37'))
31    size:                Num('1')
32  },
33  Symbol
34  {
35    type qualifier:      Empty()
36    datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
37    name:                Name('main')
38    value or address:     Empty()
39    position:            Pos(Num('4'), Num('5'))
40    size:                Empty()

```

```

38     },
39     Symbol
40     {
41         type qualifier:      Writeable()
42         datatype:           ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))
43         name:               Name('local_var1@main')
44         value or address:   Num('0')
45         position:           Pos(Num('5'), Num('6'))
46         size:               Num('6')
47     },
48     Symbol
49     {
50         type qualifier:      Writeable()
51         datatype:           ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))
52         name:               Name('local_var2@main')
53         value or address:   Num('6')
54         position:           Pos(Num('6'), Num('6'))
55         size:               Num('6')
56     }
57 ]

```

Code 1.34: Symboltabelle für Call by Sharing für Arrays

```

1 File
2   Name './verbose_fun_call_by_sharing_array.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         # // Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
8           ↪ IntType('int'))), Name('param1'))),
9         # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')), Name('param2'))),
10        # Return(Empty()),
11        LOADIN BAF PC -1
12      ],
13    Block
14      Name 'main.0',
15      [
16        # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int')),
17          ↪ Name('local_var1'))),
18        # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int')),
19          ↪ Name('local_var2'))),
20        # // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var1'), Name('local_var2')])),
21        # // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var1'), Name('local_var2')]),
22        # StackMalloc(Num('2')),
23        SUBI SP 2,
24        # Ref(Global(Num('0'))),
25        SUBI SP 1,
26        LOADI IN1 0,
27        ADD IN1 DS,
28        STOREIN SP IN1 1,
29        # Ref(Global(Num('6'))),
30        SUBI SP 1,
31        LOADI IN1 6,

```

```

29     ADD IN1 DS,
30     STOREIN SP IN1 1,
31     # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))),
32     MOVE BAF ACC,
33     ADDI SP 4,
34     MOVE SP BAF,
35     SUBI SP 4,
36     STOREIN BAF ACC 0,
37     LOADI ACC GoTo
38         Name 'addr@next_instr',
39     ADD ACC CS,
40     STOREIN BAF ACC -1,
41     # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1'))),
42     Exp
43         GoTo
44         Name 'stack_fun.1',
45     # RemoveStackframe(),
46     MOVE BAF IN1,
47     LOADIN IN1 BAF 0,
48     MOVE IN1 SP,
49     # Return(Empty()),
50     LOADIN BAF PC -1
51 ]
52 ]

```

Code 1.35: RETI-Block Pass für Call by Sharing für Arrays

1.3.3.3.4 Umsetzung von Call by Value für Structs

```

1 struct st {int attr1; int attr2[2];};
2
3 void stack_fun(struct st param) {
4 }
5
6 void main() {
7     struct st local_var;
8     stack_fun(local_var);
9 }

```

Code 1.36: PicoC-Code für Call by Value für Structs

```

1 File
2     Name './verbose_fun_call_by_value_struct.picoc_mon',
3     [
4         Block
5             Name 'stack_fun.1',
6             [
7                 // Exp(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st')), Name('param'))),
8                 Return
9                     Empty
10            ],

```

```

11  Block
12      Name 'main.0',
13      [
14          // Exp(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st')), Name('local_var'))),
15          // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')])),
16          // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]),
17          StackMalloc
18              Num '2',
19          Assign
20              Stack
21                  Num '3',
22              Global
23                  Num '0',
24          NewStackframe
25              Name 'stack_fun',
26              GoTo
27                  Name 'addr@next_instr',
28          Exp
29              GoTo
30                  Name 'stack_fun.1',
31          RemoveStackframe,
32          Return
33              Empty
34      ]
35  ]

```

Code 1.37: PicoC-Mon Pass für Call by Value für Structs

```

1  File
2  Name './verbose_fun_call_by_value_struct.reti_blocks',
3  [
4      Block
5          Name 'stack_fun.1',
6          [
7              # // Exp(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st')), Name('param'))),
8              # Return(Empty()),
9              LOADIN BAF PC -1
10         ],
11     Block
12         Name 'main.0',
13         [
14             # // Exp(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st')), Name('local_var'))),
15             # // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')])),
16             # // // Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]),
17             # StackMalloc(Num('2')),
18             SUBI SP 2,
19             # Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0'))),
20             SUBI SP 3,
21             LOADIN DS ACC 0,
22             STOREIN SP ACC 1,
23             LOADIN DS ACC 1,
24             STOREIN SP ACC 2,
25             LOADIN DS ACC 2,
26             STOREIN SP ACC 3,

```

```
27      # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))),
28      MOVE BAF ACC,
29      ADDI SP 5,
30      MOVE SP BAF,
31      SUBI SP 5,
32      STOREIN BAF ACC 0,
33      LOADI ACC GoTo
34          Name 'addr@next_instr',
35      ADD ACC CS,
36      STOREIN BAF ACC -1,
37      # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1'))),
38      Exp
39          GoTo
40          Name 'stack_fun.1',
41      # RemoveStackframe(),
42      MOVE BAF IN1,
43      LOADIN IN1 BAF 0,
44      MOVE IN1 SP,
45      # Return(Empty()),
46      LOADIN BAF PC -1
47  ]
48  ]
```

Code 1.38: RETI-Block Pass für Call by Value für Structs

1.4 Fehlermeldungen

1.4.1 Error Handler

1.4.2 Arten von Fehlermeldungen

1.4.2.1 Syntaxfehler

1.4.2.2 Laufzeitfehler

Literatur

Online

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

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).