
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	10
1.1	Lexikalische Analyse	10
1.1.1	Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse	10
1.1.2	Basic Lexer	11
1.2	Syntaktische Analyse	11
1.2.1	Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse	11
1.2.2	Umsetzung von Präzidenz	13
1.2.3	Derivation Tree Generierung	14
1.2.3.1	Early Parser	14
1.2.3.2	Codebeispiel	14
1.2.4	Derivation Tree Vereinfachung	15
1.2.4.1	Visitor	15
1.2.4.2	Codebeispiel	15
1.2.5	Abstrakt Syntax Tree Generierung	17
1.2.5.1	PicoC-Knoten	17
1.2.5.2	RETI-Knoten	22
1.2.5.3	Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung	23
1.2.5.4	Abstrakte Syntax	25
1.2.5.5	Transformer	27
1.2.5.6	Codebeispiel	27
1.3	Code Generierung	28
1.3.1	Übersicht	28
1.3.2	Passes	29
1.3.2.1	PicoC-Shrink Pass	29
1.3.2.1.1	Codebeispiel	29
1.3.2.2	PicoC-Blocks Pass	30
1.3.2.2.1	Abstrakte Syntax	30
1.3.2.2.2	Codebeispiel	31
1.3.2.3	PicoC-Mon Pass	32
1.3.2.3.1	Abstrakte Syntax	32
1.3.2.3.2	Codebeispiel	32
1.3.2.4	RETI-Blocks Pass	34
1.3.2.4.1	Abstrakte Syntax	34
1.3.2.4.2	Codebeispiel	34
1.3.2.5	RETI-Patch Pass	37
1.3.2.5.1	Abstrakte Syntax	37
1.3.2.5.2	Codebeispiel	37
1.3.2.6	RETI Pass	39
1.3.2.6.1	Konkrete und Abstrakte Syntax	39
1.3.2.6.2	Codebeispiel	40
1.3.3	Umsetzung von Pointern	43
1.3.3.1	Referenzierung	43
1.3.3.2	Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen	45
1.3.4	Umsetzung von Arrays	46
1.3.4.1	Initialisierung von Arrays	46
1.3.4.2	Zugriff auf einen Arrayindex	51

1.3.4.3	Zuweisung an Arrayindex	55
1.3.5	Umsetzung von Structs	58
1.3.5.1	Deklaration und Definition von Structtypen	58
1.3.5.2	Initialisierung von Structs	60
1.3.5.3	Zugriff auf Structattribut	63
1.3.5.4	Zuweisung an Structattribut	65
1.3.6	Umsetzung der Derived Datatypes im Zusammenspiel	68
1.3.6.1	Anfangsteil für Globale Statische Daten und Stackframe	68
1.3.6.2	Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes	70
1.3.6.3	Schluss teil für die verschiedenen Derived Datatypes	73
1.3.7	Umsetzung von Funktionen	77
1.3.7.1	Funktionen auflösen zu RETI Code	77
1.3.7.1.1	Sprung zur Main Funktion	80
1.3.7.2	Funktionsdeklaration und -definition und Umsetzung von Scopes	82
1.3.7.3	Funktionsaufruf	83
1.3.7.3.1	Ohne Rückgabewert	83
1.3.7.3.2	Mit Rückgabewert	86
1.3.7.3.3	Umsetzung von Call by Sharing für Arrays	88
1.3.7.3.4	Umsetzung von Call by Value für Structs	91
1.3.8	Umsetzung kleinerer Details	93
1.4	Fehlermeldungen	93
1.4.1	Error Handler	93
1.4.2	Arten von Fehlermeldungen	93
1.4.2.1	Syntaxfehler	93
1.4.2.2	Laufzeitfehler	93

Abbildungsverzeichnis

1.1	Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben	28
1.2	Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform	28
1.3	Architektur mit allen Passes ausgeschrieben	29

Codeverzeichnis

1.1	PicoC Code für Derivation Tree Generierung	14
1.2	Derivation Tree nach Derivation Tree Generierung	15
1.3	Derivation Tree nach Derivation Tree Vereinfachung	16
1.4	Abstract Syntax Tree aus vereinfachtem Derivation Tree generiert	27
1.5	PicoC Code für Codebespiel	29
1.6	Abstract Syntax Tree für Codebespiel	30
1.7	PicoC Shrink Pass für Codebespiel	30
1.8	PicoC-Blocks Pass für Codebespiel	32
1.9	PicoC-Mon Pass für Codebespiel	34
1.10	RETI-Blocks Pass für Codebespiel	36
1.11	RETI-Patch Pass für Codebespiel	39
1.12	RETI Pass für Codebespiel	42
1.13	PicoC-Code für Pointer Referenzierung	43
1.14	Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung	43
1.15	Symboltabelle für Pointer Referenzierung	44
1.16	PicoC-Mon Pass für Pointer Referenzierung	44
1.17	RETI-Blocks Pass für Pointer Referenzierung	45
1.18	PicoC-Code für Pointer Dereferenzierung	45
1.19	Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung	46
1.20	PicoC-Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung	46
1.21	PicoC-Code für Array Initialisierung	47
1.22	Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung	47
1.23	Symboltabelle für Array Initialisierung	48
1.24	PicoC-Mon Pass für Array Initialisierung	49
1.25	RETI-Blocks Pass für Array Initialisierung	51
1.26	PicoC-Code für Zugriff auf einen Arrayindex	51
1.27	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf einen Arrayindex	52
1.28	PicoC-Mon Pass für Zugriff auf einen Arrayindex	53
1.29	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Arrayindex	55
1.30	PicoC-Code für Zuweisung an Arrayindex	55
1.31	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex	56
1.32	PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex	57
1.33	RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex	57
1.34	PicoC-Code für die Deklaration eines Structtyps	58
1.35	Abstract Syntax Tree für die Deklaration eines Structtyps	58
1.36	Symboltabelle für die Deklaration eines Structtyps	60
1.37	PicoC-Code für Initialisierung von Structs	60
1.38	Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs	61
1.39	Symboltabelle für Initialisierung von Structs	62
1.40	PicoC-Mon Pass für Initialisierung von Structs	63
1.41	RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Structs	63
1.42	PicoC-Code für Zugriff auf Structattribut	63
1.43	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut	64
1.44	PicoC-Mon Pass für Zugriff auf Structattribut	64
1.45	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut	65
1.46	PicoC-Code für Zuweisung an Structattribut	65
1.47	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut	66

1.48 PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Structattribut	66
1.49 RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut	67
1.50 PicoC-Code für den Anfangsteil	68
1.51 Abstract Syntax Tree für den Anfangsteil	69
1.52 PicoC-Mon Pass für den Anfangsteil	69
1.53 RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil	70
1.54 PicoC-Code für den Mittelteil	70
1.55 Abstract Syntax Tree für den Mittelteil	71
1.56 PicoC-Mon Pass für den Mittelteil	71
1.57 RETI-Blocks Pass für den Mittelteil	73
1.58 PicoC-Code für den Schlussteil	73
1.59 Abstract Syntax Tree für den Schlussteil	74
1.60 PicoC-Mon Pass für den Schlussteil	74
1.61 RETI-Blocks Pass für den Schlussteil	77
1.62 PicoC-Code für 3 Funktionen	77
1.63 Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen	78
1.64 RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen	78
1.65 PicoC-Mon Pass für 3 Funktionen	79
1.66 RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen	79
1.67 PicoC-Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	80
1.68 PicoC-Mon Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	80
1.69 RETI-Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	81
1.70 PicoC-Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	82
1.71 PicoC-Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	82
1.72 Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	83
1.73 PicoC-Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	83
1.74 PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	84
1.75 RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	85
1.76 RETI-Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	86
1.77 PicoC-Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	86
1.78 PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	86
1.79 RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	87
1.80 RETI-Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	88
1.81 PicoC-Code für Call by Sharing für Arrays	88
1.82 PicoC-Mon Pass für Call by Sharing für Arrays	89
1.83 Symboltabelle für Call by Sharing für Arrays	90
1.84 RETI-Block Pass für Call by Sharing für Arrays	91
1.85 PicoC-Code für Call by Value für Structs	91
1.86 PicoC-Mon Pass für Call by Value für Structs	92
1.87 RETI-Block Pass für Call by Value für Structs	93

Tabellenverzeichnis

1.1	Präzidenzregeln von PicoC	13
1.2	PicoC-Knoten Teil 1	17
1.3	PicoC-Knoten Teil 2	18
1.4	PicoC-Knoten Teil 3	19
1.5	PicoC-Knoten Teil 4	20
1.6	RETI-Knoten	22
1.7	Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung	24

Definitionsverzeichnis

1.1	Token-Knoten	21
1.2	Container-Knoten	21
1.3	Symboltabelle	32

Grammatikverzeichnis

1.1.1 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 1	10
1.1.2 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 2	11
1.2.1 Konkrete Syntax Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 1	12
1.2.2 Konkrete Syntax für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 2	13
1.2.3 Abstrakte Syntax für L_{PiocC}	26
1.3.1 Abstrakte Syntax für L_{PicoC_Blocks}	31
1.3.2 Abstrakte Syntax für L_{PicoC_Mon}	32
1.3.3 Abstrakte Syntax für L_{RETI_Blocks}	34
1.3.4 Abstrakte Syntax für L_{RETI_Patch}	37
1.3.5 Konkrete Syntax für L_{RETI_Lex}	39
1.3.6 Konkrete Syntax für L_{RETI_Parse}	40
1.3.7 Abstrakte Syntax für L_{RETI}	40

1 Implementierung

1.1 Lexikalische Analyse

1.1.1 Konkrete Syntax für die Lexikalische Analyse

<i>COMMENT</i>	::=	"//"/ "[\n]*"/ "/*"/ "(. \n)*?"/ "*/"	<i>L_Comment</i>
<i>RETI.COMMENT.2</i>	::=	"//"" "?"#"/ "[\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	Rechts, dann links ←
12	<i>a=b</i>	Zuweisung	
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 !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 $x > 1$ 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 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}</code> , <code>{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_goto)	Container für ein If Statement if(<exp>) { <stmts> } inklusive Condition exp und einem Branch stmts_goto, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
IfElse(exp, stmts_goto1, stmts_goto2)	Container für ein If-Else Statement if(<exp>) { <stmts2> } else { <stmts2> } inklusive Condition exp und 2 Branches stmts_goto1 und stmts_goto2, die zwei Alternativen darstellen in denen jeweils Listen von Statements oder GoTo(Name('block.xyz'))'s stehen können.
While(exp, stmts_goto)	Container für ein While-Statement while(<exp>) { <stmts> } inklusive Condition exp und einem Branch stmts_goto, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).
DoWhile(exp, stmts_goto)	Container für ein Do-While-Statement do { <stmts> } while(<exp>); inklusive Condition exp und einem Branch stmts_goto, 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 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

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 1.1) dem **Tokenwert** des Tokens, welches es ersetzt entspricht und bei **Container-Knoten** (Definition 1.2) unbesetzt ist. Das **Attribut position** wird später für Fehlermeldungen gebraucht.

Definition 1.1: 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 1.2: 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
8         Writeable,
9         PtrDecl
10        Num '1',
11        ArrayDecl
12        [
13          Num '5',
14          Num '6'
15        ],
16        PtrDecl
17        Num '1',
18        IntType 'int',
19        Name 'attr'
20      ],
21    FunDef
22      VoidType 'void',
23      Name 'main',
24      [],
25      [
26        Exp(Alloc(Writeable(), PtrDecl(Num('1')), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')],
27          ↪ PtrDecl(Num('1'), StructSpec(Name('st'))))), Name('var')))
28      ]
29    ]
```

Code 1.4: Abstract Syntax Tree aus vereinfachtem Derivation Tree generiert

1.3 Code Generierung

1.3.1 Übersicht

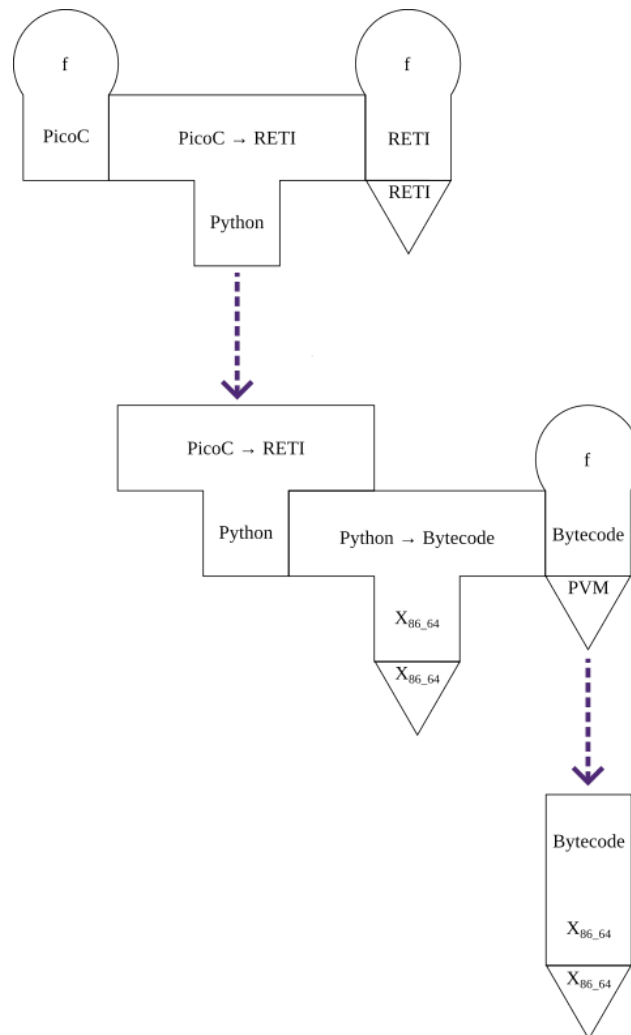


Abbildung 1.1: Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben

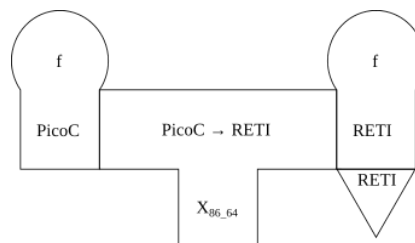


Abbildung 1.2: Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform

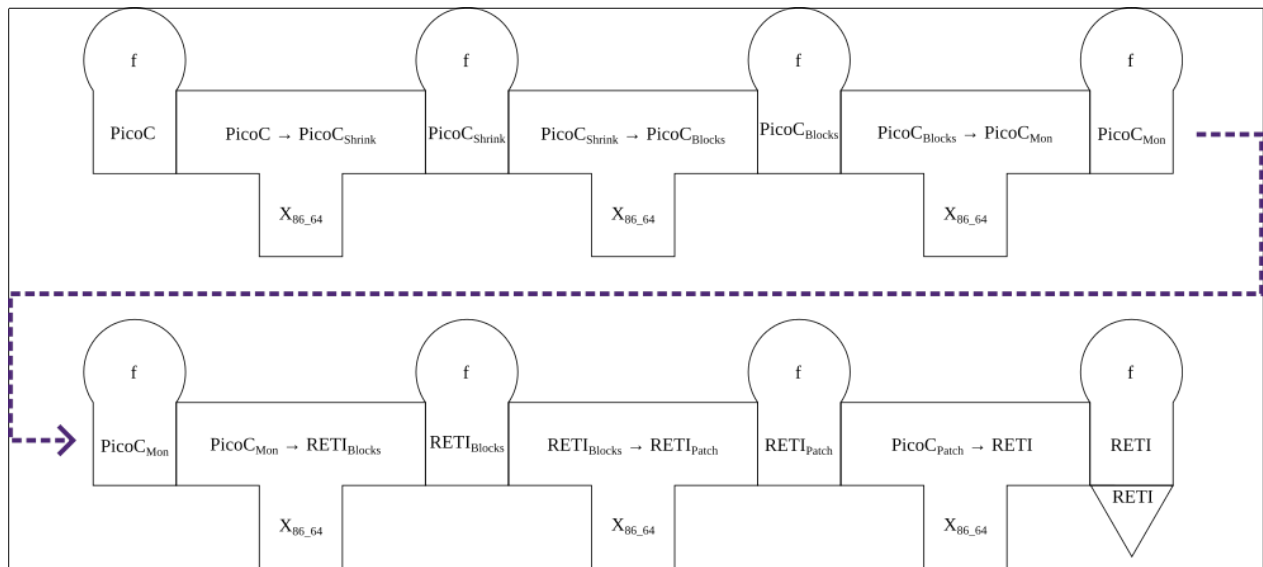


Abbildung 1.3: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben

1.3.2 Passes

1.3.2.1 PicoC-Shrink Pass

1.3.2.1.1 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 Abstrakte Syntax

<i>decl_def</i>	<i>::=</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>::=</i>	<i>Block</i> (<i>Name</i> (<i>str</i>), $\langle stmt \rangle$ *)	<i>L_Blocks</i>
<i>stmt</i>	<i>::=</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*

1.3.2.2.2 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 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>Writeable</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>Writeable</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 1.3: Symboltabelle

1.3.2.3.2 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 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}

1.3.2.4.2 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 Codebespiel

1.3.2.5 RETI-Patch Pass

1.3.2.5.1 Abstrakte Syntax

$$\text{stmt} ::= \text{Exit}(\text{Num}(\text{str}))$$

Grammar 1.3.4: Abstrakte Syntax für L_{RETI_Patch}

1.3.2.5.2 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         # // patched out 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        # // patched out 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     # // patched out 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         # // patched out 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 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}


```

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 # // patched out 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 # // patched out 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 # // patched out 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 Codebespiel

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**-Feld der **Symboltabelle** eingetragen ist, ist dabei immer: `size(pntr) = 1`.

```
1 SymbolTable
2   [
3       Symbol
4       {
5           type qualifier:      Empty()
6           datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
7           name:                Name('main')
8           value or address:     Empty()
9           position:             Pos(Num('1'), Num('5'))
10          size:                 Empty()
```

```

11     },
12     Symbol
13     {
14         type qualifier:      Writeable()
15         datatype:           IntType('int')
16         name:               Name('var@main')
17         value or address:   Num('0')
18         position:           Pos(Num('2'), Num('6'))
19         size:               Num('1')
20     },
21     Symbol
22     {
23         type qualifier:      Writeable()
24         datatype:           PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))
25         name:               Name('ptr@main')
26         value or address:   Num('1')
27         position:           Pos(Num('3'), Num('7'))
28         size:               Num('1')
29     }
30 ]

```

Code 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 1.3.6.2 kümmern.

```

1 File
2   Name './example_ptr_ref.picoc_mon',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       // Assign(Name('var'), Num('42'))
8       Exp(Num('42'))
9       Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10      // Assign(Name('ptr'), Ref(Name('var')))
11      Ref(Global(Num('0')))
12      Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13      Return(Empty())
14    ]
15  ]

```

Code 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 Knoten `Deref(Name('var'))` repräsentiert im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.19 eine **Dereferenzierung** `*var`.

```

1 File
2   Name './example_pntr_deref.ast',
3   [
4     FunDef

```

```

5      VoidType 'void',
6      Name 'main',
7      [],
8      [
9          Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10         Assign(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('ptr')),
11             ↪ Ref(Name('var')))
12         Exp(Deref(Name('ptr'), Num('0')))
13     ]

```

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]`) verhält². 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.

²In 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 kann³. 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**

³Das widerspricht der üblichen Auswertungsreihenfolge beim **Zuweisungsoperator** `=`, der **rechtsassoziativ** ist. Der **Zuweisungsoperator** `=` tritt allerdings erst später in Aktion.

Statischen Daten⁴.

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

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

```

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

```

Code 1.23: Symboltabelle für Array Initialisierung

⁴Wenn man beim **GCC** *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project* einen Stackframe mittels des **GDB** *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project* beobachtet, sieht man, dass dieser es genauso macht.

Im **PiocC-Mon Pass** in Code 1.24 werden zuerst die **Ausdrücke** im **Array-Initializer** `Array([Array([BinOp(Num('3')), Add('+'), Num('1'))]), Array([Num('4')])])` nach dem **Depth-First-Search** Schema, von **links-nach-rechts** ausgewertet und auf den **Stack** geschrieben⁵.

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 **PicoC-Knoten** bzw. **Kompositionen** für die Ausdrücke `Exp(exp)` und `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

⁵Da 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;

```

```

54     STOREIN SP ACC 1;
55     # Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
56     LOADIN SP ACC 1;
57     STOREIN BAF ACC -2;
58     LOADIN SP ACC 2;
59     STOREIN BAF ACC -3;
60     LOADIN SP ACC 3;
61     STOREIN BAF ACC -4;
62     LOADIN SP ACC 4;
63     STOREIN BAF ACC -5;
64     ADDI SP 4;
65     # Return(Empty())
66     LOADIN BAF PC -1;
67 ]
68 ]

```

Code 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

```

```

13     VoidType 'void',
14     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 1.3.6.1** die **Adresse** der Variable `Name('ar')` auf den **Stack** geschrieben. Bei den **Globalen Statischen Daten** der `main`-Funktion wird das durch die Komposition `Ref(Global(Num('0')))` dargestellt und beim **Stackframe** der Funktion `fun` wird das durch die Komposition `Ref(Stackframe(Num('2')))` dargestellt.

In nächsten Schritt, dem **Mittelteil 1.3.6.2** wird die Adresse des **Index**, des Arrays auf das Zugriffen werden soll berechnet. Da der **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.

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 1.3.6.2 allgemein erklärt ist.

Im letzten Schritt, dem **Schluss teil 1.3.6.3** wird der **Inhalt** des **Index**, dessen **Adresse** in den vorherigen Schritten berechnet wurde, nun auf den **Stack** geschrieben, wobei dieser die **Adresse** auf dem Stack ersetzt, die es zum Finden des **Index** brauchte. Dies wird durch den Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` dargestellt. Je nachdem, welchen **Datentyp** die Variable `ar` hat und auf welchen **Subdatentyp**, welcher ein verstecktes Attribut des `Exp(Stack(Num('1')))` Knoten ist folglich im **Kontext** zuletzt zugriffen wird, abhängig davon wird der **Schluss teil** `Exp(Stack(Num('1')))` auf eine andere Weise verarbeitet (siehe Subkapitel 1.3.6.3).

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.

```

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')))`⁶ die Zuweisung = des Ergebnisses des Ausdrucks auf der **rechten** Seite der Zuweisung zum **Arrayindex**, dessen **Adresse** im Schritt danach berechnet wurde dar.

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 Kompositionen `Ref(Global(Num('0')))` und `Ref(Stackframe(Num('2')))` repräsentiert dabei den Summanden `ref(ar)` in der Formel.

Die Komposition `Exp(Num('2'))` repräsentiert dabei einen **Subindex** (z.B. `i` in `a[i][j][k]`) beim **Zugriff auf ein Arrayelement**, der als Faktor `idxi` in der Formel auftaucht.

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

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

^aScholl, „Betriebssysteme“.

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

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))

```

⁶Ist in Tabelle 1.7 genauer beschrieben ist

```

8      // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
9      Exp(Num('42'))
10     Ref(Global(Num('0')))
11     Exp(Num('2'))
12     Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
13     Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
14     Return(Empty())
15 ]
16 ]

```

Code 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         # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))
8         # // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))
9         # Exp(Num('42'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 42;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Ref(Global(Num('0')))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI IN1 0;
16        ADD IN1 DS;
17        STOREIN SP IN1 1;
18        # Exp(Num('2'))
19        SUBI SP 1;
20        LOADI ACC 2;
21        STOREIN SP ACC 1;
22        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
23        LOADIN SP IN1 2;
24        LOADIN SP IN2 1;
25        MULTI IN2 1;
26        ADD IN1 IN2;
27        ADDI SP 1;
28        STOREIN SP IN1 1;
29        # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
30        LOADIN SP IN1 1;
31        LOADIN SP ACC 2;
32        ADDI SP 2;
33        STOREIN IN1 ACC 0;
34        # Return(Empty())
35        LOADIN BAF PC -1;
36      ]
37    ]

```

Code 1.33: RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex

1.3.5 Umsetzung von Structs

1.3.5.1 Deklaration und Definition von Structtypen

Die **Deklaration** eines neuen **Structtyps** (z.B. `struct st {int len; int ar[2];};`) und die **Definition** einer Variable mit diesem **Structtyp** (z.B. `struct st st_var;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 1.34 erläutert.

```
1 struct st {int len; int ar[2];};
2
3 void main() {
4     struct st st_var;
5 }
```

Code 1.34: PicoC-Code für die Deklaration eines Structtyps

Bevor irgendwas definiert werden kann, muss erstmal ein **Structtyp** deklariert werden. Im **Abstract Syntax Tree** in Code 1.36 wird die **Deklaration eines Structtyps** `struct st {int len; int ar[2];};` durch die Komposition `StructDecl(Name('st'), [Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('len')) Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))])` dargestellt.

Die **Definition** einer Variable mit diesem **Structtyp** `struct st st_var;` wird durch die Komposition `Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var'))` dargestellt.

```
1 File
2   Name './example_struct_decl_def.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('len'))
8         Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Exp(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var'))))
16      ]
17  ]
```

Code 1.35: Abstract Syntax Tree für die Deklaration eines Structtyps

Für den **Structtyp** selbst wird in der **Symboltabelle**, die in Code 1.36 dargestellt ist ein Eintrag mit dem **Schlüssel** `st` erstellt. Die Felder dieses Eintrags `type_qualifier`, `datatype`, `name`, `position` und `size` sind wie üblich belegt, allerdings sind in dem `value_address`-Feld die Attribute des **Structtyps** `[Name('len@st'),`

Name('ar@st')] aufgelistet, sodass man über den **Structtyp** `st` die **Attribute** des Structtyps in der **Symboltabelle** nachschlagen kann. Die Schlüssel der **Attribute** haben einen **Suffix** `@st` angehängt, der eine Art **Scope** innerhalb des **Structtyps** für seine Attribut darstellt. Es gilt folglich, dass **innerhalb** eines **Structtyps** zwei Attribute nicht gleich benannt werden können, aber dafür zwei **unterschiedliche Structtypen** ihre Attribute gleich benennen können.

Jedes der **Attribute** [Name('len@st'), Name('ar@st')] erhält auch einen eigenen Eintrag in der **Symboltabelle**, wobei die Felder `type_qualifier`, `datatype`, `name`, `value_address`, `position` und `size` wie üblich belegt werden. Die Felder `type_qualifier`, `datatype` und `name` werden z.B. bei Name('ar@st') mithilfe der Attribute von `Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))]` belegt.

Für die **Definition** einer Variable `st.var@main` mit diesem **Structtyp** `st` wird ein Eintrag in der **Symboltabelle** angelegt. Das `datatype`-Feld enthält dabei den Namen des **Structtyps** als Komposition `StructSpec(Name('st'))`, wodurch jederzeit alle wichtigen Informationen zu diesem **Structtyp** und seinen **Attributen** in der **Symboltabelle** nachgeschlagen werden können.

Die **Größe** einer Variable `st.var`, die mit dem **Structtyp** `struct st {datatype1 attr1; ... datatypen attrn};a definiert ist (struct st st.var;), berechnet sich dabei aus der Summe der Größen der einzelnen Datentypen datatype1 ... datatypen der Attribute attr1, ... attrn des Structtyps: $\text{size}(\text{st}) = \sum_{i=1}^n \text{size}(\text{datatype}_i)$.`

^aHier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache *L_{PicoC}* nicht die fragwürdige Designentscheidung, die eckigen Klammern `[]` auch für die Definition eines Arrays zu **vor** die Variable zu schreiben von *L_C* übernommen und der komplette **Datentyp** würde immer **hinter** der Variable stehen: `datatype var`.

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type_qualifier:      Empty()
6       datatype:            IntType('int')
7       name:                Name('len@st')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('15'))
10      size:                 Num('1')
11    },
12    Symbol
13    {
14      type_qualifier:      Empty()
15      datatype:            ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))
16      name:                Name('ar@st')
17      value or address:    Empty()
18      position:            Pos(Num('1'), Num('24'))
19      size:                 Num('2')
20    },
21    Symbol
22    {
23      type_qualifier:      Empty()
24      datatype:            StructDecl(Name('st'), [Alloc(Writeable(), IntType('int'),
25      ↪ Name('len'))Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')),
26      ↪ Name('ar'))])
27      name:                Name('st')
28      value or address:    [Name('len@st'), Name('ar@st')]
29      position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
30      size:                 Num('3')

```

```

29     },
30     Symbol
31     {
32         type qualifier:      Empty()
33         datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
34         name:                 Name('main')
35         value or address:     Empty()
36         position:             Pos(Num('3'), Num('5'))
37         size:                 Empty()
38     },
39     Symbol
40     {
41         type qualifier:      Writeable()
42         datatype:            StructSpec(Name('st'))
43         name:                 Name('st_var@main')
44         value or address:     Num('0')
45         position:             Pos(Num('4'), Num('12'))
46         size:                 Num('3')
47     }
48 ]

```

Code 1.36: Symboltabelle für die Deklaration eines Structtyps

1.3.5.2 Initialisierung von Structs

```

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

```

Code 1.37: PicoC-Code für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.ast',
3   [
4     StructDecl
5     Name 'st1',
6     [
7       Alloc
8       Writeable,
9       ArrayDecl
10      [
11        Num '1'
12      ],
13      PtrDecl
14      Num '1',
15      IntType 'int',
16      Name 'pntr'

```

```

17 ],
18 StructDecl
19   Name 'st2',
20   [
21     Alloc
22     Writeable,
23     StructSpec
24     Name 'st1',
25     Name 'st'
26   ],
27 FunDef
28   VoidType 'void',
29   Name 'main',
30   [],
31   [
32     Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
33     Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')),
34     ↪ Struct([Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('pntr'),
35     ↪ Array([Array([Ref(Name('var'))]))]))]))))
36   ]
37 ]

```

Code 1.38: Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            ArrayDecl([Num('1')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))
7       name:                Name('pntr@st1')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('17'))
10      size:                 Num('1')
11    },
12    Symbol
13    {
14      type qualifier:      Empty()
15      datatype:            StructDecl(Name('st1'), [Alloc(Writeable(),
16      ↪ ArrayDecl([Num('1')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))), Name('pntr')))]
17      name:                Name('st1')
18      value or address:    [Name('pntr@st1')]
19      position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
20      size:                 Num('1')
21    },
22    Symbol
23    {
24      type qualifier:      Empty()
25      datatype:            StructSpec(Name('st1'))
26      name:                Name('st@st2')
27      value or address:    Empty()
28      position:            Pos(Num('3'), Num('23'))
29      size:                 Num('1')
30    },
31  ],

```

```

30 Symbol
31 {
32     type qualifier:      Empty()
33     datatype:            StructDecl(Name('st2'), [Alloc(Writeable(),
34     ↪ StructSpec(Name('st1')), Name('st'))])
35     name:                Name('st2')
36     value or address:    [Name('st@st2')]
37     position:            Pos(Num('3'), Num('7'))
38     size:                Num('1')
39 },
40 Symbol
41 {
42     type qualifier:      Empty()
43     datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
44     name:                Name('main')
45     value or address:    Empty()
46     position:            Pos(Num('5'), Num('5'))
47     size:                Empty()
48 },
49 Symbol
50 {
51     type qualifier:      Writeable()
52     datatype:            IntType('int')
53     name:                Name('var@main')
54     value or address:    Num('0')
55     position:            Pos(Num('6'), Num('6'))
56     size:                Num('1')
57 },
58 Symbol
59 {
60     type qualifier:      Writeable()
61     datatype:            StructSpec(Name('st1'))
62     name:                Name('st@main')
63     value or address:    Num('1')
64     position:            Pos(Num('7'), Num('13'))
65     size:                Num('1')
66 }
67 ]

```

Code 1.39: Symboltabelle für Initialisierung von Structs

```

1 File
2 Name './example_struct_init.picoc_mon',
3 [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7         // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('pntr'),
11        ↪ Array([Array([Ref(Name('var'))]))]))]))
12        Ref(Global(Num('0')))
13        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))

```

```

13     Return(Empty())
14 ]
15 ]

```

Code 1.40: PicoC-Mon Pass für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('pntr'),
17        ↪   Array([Array([Ref(Name('var'))]))]))]))))
18        # Ref(Global(Num('0')))
19        SUBI SP 1;
20        LOADI IN1 0;
21        ADD IN1 DS;
22        STOREIN SP IN1 1;
23        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
24        LOADIN SP ACC 1;
25        STOREIN DS ACC 1;
26        ADDI SP 1;
27        # Return(Empty())
28        LOADIN BAF PC -1;
29      ]
30    ]

```

Code 1.41: RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Structs

1.3.5.3 Zugriff auf Structattribut

```

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

```

Code 1.42: PicoC-Code für Zugriff auf Structattribut


```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'x',
11          Alloc
12            Writeable,
13            IntType 'int',
14            Name 'y'
15        ],
16      FunDef
17        VoidType 'void',
18        Name 'main',
19        [],
20        [
21          Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
22            ↪ Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
23          Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
24        ]
25      ]
26    ]

```

Code 1.43: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8         ↪ Num('2'))]))
9         Exp(Num('4'))
10        Exp(Num('2'))
11        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
12        // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
13        Ref(Global(Num('0')))
14        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
15        Exp(Stack(Num('1')))
16        Return(Empty())
17      ]
18    ]

```

Code 1.44: PicoC-Mon Pass für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.reti_blocks',

```

```

3  [
4    Block
5      Name 'main.0',
6      [
7        # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8          ↪ Num('2'))]))
9        # Exp(Num('4'))
10       SUBI SP 1;
11       LOADI ACC 4;
12       STOREIN SP ACC 1;
13       # Exp(Num('2'))
14       SUBI SP 1;
15       LOADI ACC 2;
16       STOREIN SP ACC 1;
17       # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
18       LOADIN SP ACC 1;
19       STOREIN DS ACC 1;
20       LOADIN SP ACC 2;
21       STOREIN DS ACC 0;
22       ADDI SP 2;
23       # // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
24       # Ref(Global(Num('0')))
25       SUBI SP 1;
26       LOADI IN1 0;
27       ADD IN1 DS;
28       STOREIN SP IN1 1;
29       # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
30       LOADIN SP IN1 1;
31       ADDI IN1 1;
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  ]

```

Code 1.45: RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut

1.3.5.4 Zuweisung an Structattribut

```

1  struct pos {int x; int y;};
2
3  void main() {
4    struct pos st = {.x=4, .y=2};
5    st.y = 42;
6  }

```

Code 1.46: PicoC-Code für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'x',
11         Alloc
12           Writeable,
13           IntType 'int',
14           Name 'y'
15       ],
16     FunDef
17       VoidType 'void',
18       Name 'main',
19       [],
20       [
21         Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('pos'))), Name('st')),
22         ↪ Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
23         Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
24       ]
25   ]

```

Code 1.47: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8         ↪ Num('2'))]))
9         Exp(Num('4'))
10        Exp(Num('2'))
11        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
12        // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
13        Exp(Num('42'))
14        Ref(Global(Num('0')))
15        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
16        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
17        Return(Empty())
18      ]
19    ]

```

Code 1.48: PicoC-Mon Pass für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8           ↪ Num('2'))]))
9         # Exp(Num('4'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 4;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Exp(Num('2'))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI ACC 2;
16        STOREIN SP ACC 1;
17        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
18        LOADIN SP ACC 1;
19        STOREIN DS ACC 1;
20        LOADIN SP ACC 2;
21        STOREIN DS ACC 0;
22        ADDI SP 2;
23        # // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
24        # Exp(Num('42'))
25        SUBI SP 1;
26        LOADI ACC 42;
27        STOREIN SP ACC 1;
28        # Ref(Global(Num('0')))
29        SUBI SP 1;
30        LOADI IN1 0;
31        ADD IN1 DS;
32        STOREIN SP IN1 1;
33        # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
34        LOADIN SP IN1 1;
35        ADDI IN1 1;
36        STOREIN SP IN1 1;
37        # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
38        LOADIN SP IN1 1;
39        LOADIN SP ACC 2;
40        ADDI SP 2;
41        STOREIN IN1 ACC 0;
42        # Return(Empty())
43        LOADIN BAF PC -1;
44      ]
45    ]

```

Code 1.49: RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut

1.3.6 Umsetzung der Derived Datatypes im Zusammenspiel

1.3.6.1 Anfangsteil für Globale Statische Daten und Stackframe

```

1 struct ar_with_len {int len; int ar[2]};
2
3 void main() {
4     struct ar_with_len st_ar[3];
5     int (*pntr2)[3];
6     pntr2;
7 }
8
9 void fun() {
10    struct ar_with_len st_ar[3];
11    int (*pntr1)[3];
12    pntr1;
13 }

```

Code 1.50: PicoC-Code für den Anfangsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'ar_with_len',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'len',
11        Alloc
12          Writeable,
13          ArrayDecl
14            [
15              Num '2'
16            ],
17          IntType 'int',
18          Name 'ar'
19        ],
20      FunDef
21        VoidType 'void',
22        Name 'main',
23        [],
24        [
25          Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
26            ↳ Name('st_ar')))
27          Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PntrDecl(Num('1')),
28            ↳ IntType('int')))), Name('pntr2')))
29          Exp(Name('pntr2'))
30        ],
31      FunDef
32        VoidType 'void',
33        Name 'fun',
34        [],

```

```

33  [
34    Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
        ↪ Name('st_ar')))
35    Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
        ↪ Name('ptr1')))
36    Exp(Name('ptr1'))
37  ]
38 ]

```

Code 1.51: Abstract Syntax Tree für den Anfangsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
            ↪ Name('st_ar')))
8         // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'),
            ↪ IntType('int')))), Name('ptr2')))
9         // Exp(Name('ptr2'))
10        Exp(Global(Num('9')))
11        Return(Empty())
12      ],
13    Block
14      Name 'fun.0',
15      [
16        // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
            ↪ Name('st_ar')))
17        // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
            ↪ Name('ptr1')))
18        // Exp(Name('ptr1'))
19        Exp(Stackframe(Num('9')))
20        Return(Empty())
21      ]
22  ]

```

Code 1.52: PicoC-Mon Pass für den Anfangsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
            ↪ Name('st_ar')))
8         # // Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
            ↪ PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))), Name('ptr2')))
9         # // Exp(Name('ptr2'))

```

```

10      # Exp(Global(Num('9')))
11      SUBI SP 1;
12      LOADIN DS ACC 9;
13      STOREIN SP ACC 1;
14      # Return(Empty())
15      LOADIN BAF PC -1;
16  ],
17  Block
18      Name 'fun.0',
19      [
20          # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
21          ↪ Name('st_ar')))
21          # // Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')],
22          ↪ IntType('int'))), Name('pntr1')))
22          # // Exp(Name('pntr1'))
23          # Exp(Stackframe(Num('9')))
24          SUBI SP 1;
25          LOADIN BAF ACC -11;
26          STOREIN SP ACC 1;
27          # Return(Empty())
28          LOADIN BAF PC -1;
29      ]
30  ]

```

Code 1.53: RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil

1.3.6.2 Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes

```

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

```

Code 1.54: PicoC-Code für den Mittelteil

```

1 File
2     Name './example_derived_dts_main_part.ast',
3     [
4         StructDecl
5             Name 'st1',
6             [
7                 Alloc
8                     Writeable,
9                     PntrDecl
10                         Num '1',
11                         ArrayDecl
12                             [
13                                 Num '1'
14                             ],

```

```

15         IntType 'int',
16         Name 'ar'
17     ],
18     FunDef
19         VoidType 'void',
20         Name 'main',
21         [],
22         [
23             Assign(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('var')),
24                 ↪ Array([Num('42')]))
25             Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st_first')),
26                 ↪ Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
27             Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('st_first'), Name('ar')), Num('0')), Num('0')))
28         ]
29 ]

```

Code 1.55: Abstract Syntax Tree für den Mittelteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('st_first'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
11        Ref(Global(Num('0')))
12        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13        // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('st_first'), Name('ar')), Num('0')), Num('0')))
14        Ref(Global(Num('1')))
15        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
16        Exp(Num('0'))
17        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
18        Exp(Num('0'))
19        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
20        Exp(Stack(Num('1')))
21        Return(Empty())
22      ]
23    ]

```

Code 1.56: PicoC-Mon Pass für den Mittelteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))

```



```
8      # Exp(Num('42'))
9      SUBI SP 1;
10     LOADI ACC 42;
11     STOREIN SP ACC 1;
12     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13     LOADIN SP ACC 1;
14     STOREIN DS ACC 0;
15     ADDI SP 1;
16     # // Assign(Name('st_first'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
17     # Ref(Global(Num('0')))
18     SUBI SP 1;
19     LOADI IN1 0;
20     ADD IN1 DS;
21     STOREIN SP IN1 1;
22     # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
23     LOADIN SP ACC 1;
24     STOREIN DS ACC 1;
25     ADDI SP 1;
26     # // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('st_first'), Name('ar')), Num('0')), Num('0')))
27     # Ref(Global(Num('1')))
28     SUBI SP 1;
29     LOADI IN1 1;
30     ADD IN1 DS;
31     STOREIN SP IN1 1;
32     # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
33     LOADIN SP IN1 1;
34     ADDI IN1 0;
35     STOREIN SP IN1 1;
36     # Exp(Num('0'))
37     SUBI SP 1;
38     LOADI ACC 0;
39     STOREIN SP ACC 1;
40     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
41     LOADIN SP IN2 2;
42     LOADIN IN2 IN1 0;
43     LOADIN SP IN2 1;
44     MULTI IN2 1;
45     ADD IN1 IN2;
46     ADDI SP 1;
47     STOREIN SP IN1 1;
48     # Exp(Num('0'))
49     SUBI SP 1;
50     LOADI ACC 0;
51     STOREIN SP ACC 1;
52     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
53     LOADIN SP IN1 2;
54     LOADIN SP IN2 1;
55     MULTI IN2 1;
56     ADD IN1 IN2;
57     ADDI SP 1;
58     STOREIN SP IN1 1;
59     # Exp(Stack(Num('1')))
60     LOADIN SP IN1 1;
61     LOADIN IN1 ACC 0;
62     STOREIN SP ACC 1;
63     # Return(Empty())
64     LOADIN BAF PC -1;
```

```

65     ]
66 ]

```

Code 1.57: RETI-Blocks Pass für den Mittelteil

1.3.6.3 Schlussteil für die verschiedenen Derived Datatypes

```

1 struct st {int attr[2];};
2
3 void main() {
4     int ar1[1][2] = {{42, 314}};
5     struct st ar2[1] = {.attr={42, 314}};
6     int var = 42;
7     int *pntr1 = &var;
8     int **pntr2 = &pntr1;
9
10    ar1[0];
11    ar2[0];
12    *pntr2;
13 }

```

Code 1.58: PicoC-Code für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.ast',
3   [
4       StructDecl
5         Name 'st',
6         [
7             Alloc
8             Writeable,
9             ArrayDecl
10              [
11                  Num '2'
12              ],
13              IntType 'int',
14              Name 'attr'
15          ],
16      FunDef
17        VoidType 'void',
18        Name 'main',
19        [],
20        [
21            Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1'), Num('2')], IntType('int')),
22              ↪ Name('ar1')), Array([Array([Num('42'), Num('314')])]))
23            Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))),
24              ↪ Name('ar2')), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Num('42'), Num('314')])]))))
25            Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
26            Assign(Alloc(Writeable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr1')),
27              ↪ Ref(Name('var')))
28            Assign(Alloc(Writeable(), PtrDecl(Num('2'), IntType('int')), Name('pntr2')),
29              ↪ Ref(Name('pntr1')))

```

```

26     Exp(Subscr(Name('ar1'), Num('0')))
27     Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))
28     Exp(Deref(Name('pntr2'), Num('0')))
29 ]
30 ]

```

Code 1.59: Abstract Syntax Tree für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('ar1'), Array([Array([Num('42'), Num('314')]))))
8         Exp(Num('42'))
9         Exp(Num('314'))
10        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
11        // Assign(Name('ar2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Num('42'),
12        ↪ Num('314')]))]))
13        Exp(Num('42'))
14        Exp(Num('314'))
15        Assign(Global(Num('2')), Stack(Num('2')))
16        // Assign(Name('var'), Num('42'))
17        Exp(Num('42'))
18        Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
19        // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
20        Ref(Global(Num('4')))
21        Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
22        // Assign(Name('pntr2'), Ref(Name('pntr1')))
23        Ref(Global(Num('5')))
24        Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
25        // Exp(Subscr(Name('ar1'), Num('0')))
26        Ref(Global(Num('0')))
27        Exp(Num('0'))
28        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
29        Exp(Stack(Num('1')))
30        // Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))
31        Ref(Global(Num('2')))
32        Exp(Num('0'))
33        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
34        Exp(Stack(Num('1')))
35        // Exp(Subscr(Name('pntr2'), Num('0')))
36        Ref(Global(Num('6')))
37        Exp(Num('0'))
38        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
39        Exp(Stack(Num('1')))
40        Return(Empty())
41 ]

```

Code 1.60: PicoC-Mon Pass für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('ar1'), Array([Array([Num('42'), Num('314')]))))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Exp(Num('314'))
13        SUBI SP 1;
14        LOADI ACC 314;
15        STOREIN SP ACC 1;
16        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
17        LOADIN SP ACC 1;
18        STOREIN DS ACC 1;
19        LOADIN SP ACC 2;
20        STOREIN DS ACC 0;
21        ADDI SP 2;
22        # // Assign(Name('ar2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Num('42'),
23        ↪ Num('314')]))]))
24        # Exp(Num('42'))
25        SUBI SP 1;
26        LOADI ACC 42;
27        STOREIN SP ACC 1;
28        # Exp(Num('314'))
29        SUBI SP 1;
30        LOADI ACC 314;
31        STOREIN SP ACC 1;
32        # Assign(Global(Num('2')), Stack(Num('2')))
33        LOADIN SP ACC 1;
34        STOREIN DS ACC 3;
35        LOADIN SP ACC 2;
36        STOREIN DS ACC 2;
37        ADDI SP 2;
38        # // Assign(Name('var'), Num('42'))
39        # Exp(Num('42'))
40        SUBI SP 1;
41        LOADI ACC 42;
42        STOREIN SP ACC 1;
43        # Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
44        LOADIN SP ACC 1;
45        STOREIN DS ACC 4;
46        ADDI SP 1;
47        # // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
48        # Ref(Global(Num('4')))
49        SUBI SP 1;
50        LOADI IN1 4;
51        ADD IN1 DS;
52        STOREIN SP IN1 1;
53        # Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
54        LOADIN SP ACC 1;
55        STOREIN DS ACC 5;
56        ADDI SP 1;
57        # // Assign(Name('pntr2'), Ref(Name('pntr1')))

```

```
57      # Ref(Global(Num('5')))
58      SUBI SP 1;
59      LOADI IN1 5;
60      ADD IN1 DS;
61      STOREIN SP IN1 1;
62      # Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
63      LOADIN SP ACC 1;
64      STOREIN DS ACC 6;
65      ADDI SP 1;
66      # // Exp(Subscr(Name('ar1'), Num('0')))
67      # Ref(Global(Num('0')))
68      SUBI SP 1;
69      LOADI IN1 0;
70      ADD IN1 DS;
71      STOREIN SP IN1 1;
72      # Exp(Num('0'))
73      SUBI SP 1;
74      LOADI ACC 0;
75      STOREIN SP ACC 1;
76      # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
77      LOADIN SP IN1 2;
78      LOADIN SP IN2 1;
79      MULTI IN2 2;
80      ADD IN1 IN2;
81      ADDI SP 1;
82      STOREIN SP IN1 1;
83      # Exp(Stack(Num('1')))
84      # // Exp(Subscr(Name('ar2'), Num('0')))
85      # Ref(Global(Num('2')))
86      SUBI SP 1;
87      LOADI IN1 2;
88      ADD IN1 DS;
89      STOREIN SP IN1 1;
90      # Exp(Num('0'))
91      SUBI SP 1;
92      LOADI ACC 0;
93      STOREIN SP ACC 1;
94      # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
95      LOADIN SP IN1 2;
96      LOADIN SP IN2 1;
97      MULTI IN2 2;
98      ADD IN1 IN2;
99      ADDI SP 1;
100     STOREIN SP IN1 1;
101     # Exp(Stack(Num('1')))
102     LOADIN SP IN1 1;
103     LOADIN IN1 ACC 0;
104     STOREIN SP ACC 1;
105     # // Exp(Subscr(Name('pntr2'), Num('0')))
106     # Ref(Global(Num('6')))
107     SUBI SP 1;
108     LOADI IN1 6;
109     ADD IN1 DS;
110     STOREIN SP IN1 1;
111     # Exp(Num('0'))
112     SUBI SP 1;
113     LOADI ACC 0;
```

```

114     STOREIN SP ACC 1;
115     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
116     LOADIN SP IN2 2;
117     LOADIN IN2 IN1 0;
118     LOADIN SP IN2 1;
119     MULTI IN2 1;
120     ADD IN1 IN2;
121     ADDI SP 1;
122     STOREIN SP IN1 1;
123     # Exp(Stack(Num('1')))
124     # Return(Empty())
125     LOADIN BAF PC -1;
126 ]
127 ]

```

Code 1.61: RETI-Blocks Pass für den Schlussteil

1.3.7 Umsetzung von Funktionen

1.3.7.1 Funktionen auflösen zu RETI Code

```

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

```

Code 1.62: PicoC-Code für 3 Funktionen

```

1 File
2   Name './example_3_funs.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Return(Empty())
10      ],
11     FunDef
12       VoidType 'void',
13       Name 'fun1',
14       [],
15       [],
16     FunDef
17       IntType 'int',

```

```

18     Name 'fun2',
19     [],
20     [
21         Return(Num('1'))
22     ]
23 ]

```

Code 1.63: Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen

```

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

```

Code 1.64: RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen

```

1 File
2   Name './example_3_funs.picoc_mon',
3   [
4     Block

```

```

5     Name 'main.2',
6     [
7         Return(Empty())
8     ],
9     Block
10    Name 'fun1.1',
11    [
12        Return(Empty())
13    ],
14    Block
15    Name 'fun2.0',
16    [
17        // Return(Num('1'))
18        Exp(Num('1'))
19        Return(Stack(Num('1')))
20    ]
21 ]

```

Code 1.65: PicoC-Mon Pass für 3 Funktionen

```

1 File
2 Name './example_3_funs.reti_blocks',
3 [
4     Block
5     Name 'main.2',
6     [
7         # Return(Empty())
8         LOADIN BAF PC -1;
9     ],
10    Block
11    Name 'fun1.1',
12    [
13        # Return(Empty())
14        LOADIN BAF PC -1;
15    ],
16    Block
17    Name 'fun2.0',
18    [
19        # // Return(Num('1'))
20        # Exp(Num('1'))
21        SUBI SP 1;
22        LOADI ACC 1;
23        STOREIN SP ACC 1;
24        # Return(Stack(Num('1')))
25        LOADIN SP ACC 1;
26        ADDI SP 1;
27        LOADIN BAF PC -1;
28    ]
29 ]

```

Code 1.66: RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen

1.3.7.1.1 Sprung zur Main Funktion

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

Code 1.67: PicoC-Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```
1 File  
2   Name './example_3_funs_main.picoc_mon',  
3   [  
4       Block  
5         Name 'fun1.2',  
6         [  
7             Return(Empty())  
8         ],  
9       Block  
10        Name 'fun2.1',  
11        [  
12            // Return(Num('1'))  
13            Exp(Num('1'))  
14            Return(Stack(Num('1')))  
15        ],  
16      Block  
17        Name 'main.0',  
18        [  
19            Return(Empty())  
20        ]  
21    ]
```

Code 1.68: PicoC-Mon Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```
1 File  
2   Name './example_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.0',
25     [
26         # Return(Empty())
27         LOADIN BAF PC -1;
28     ]
29 ]

```

Code 1.69: RETI-Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```

1 File
2   Name './example_3_funs_main.reti_patch',
3   [
4       Block
5       Name 'start.3',
6       [
7           # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
8           Exp(GoTo(Name('main.0')))
9       ],
10      Block
11      Name 'fun1.2',
12      [
13          # Return(Empty())
14          LOADIN BAF PC -1;
15      ],
16      Block
17      Name 'fun2.1',
18      [
19          # // Return(Num('1'))
20          # Exp(Num('1'))
21          SUBI SP 1;
22          LOADI ACC 1;
23          STOREIN SP ACC 1;
24          # Return(Stack(Num('1')))
25          LOADIN SP ACC 1;
26          ADDI SP 1;
27          LOADIN BAF PC -1;
28      ],
29      Block
30      Name 'main.0',
31      [
32          # Return(Empty())
33          LOADIN BAF PC -1;

```

```

34     ]
35 ]

```

Code 1.70: PicoC-Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

1.3.7.2 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 1.71: 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** <var> drangehängt wird: <var>@<fun_name>. Dieser **Suffix** wird geändert sobald beim **Top-Down**⁷ 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

```

⁷D.h. von der Wurzel zu den Blättern eines Baumes

```

22     {
23         type qualifier:      Empty()
24         datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
25         name:                Name('main')
26         value or address:    Empty()
27         position:            Pos(Num('6'), Num('5'))
28         size:                Empty()
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 1.72: Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss

1.3.7.3 Funktionsaufruf

1.3.7.3.1 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 1.73: PicoC-Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_fun_call_no_return_value.picoc_mon',
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        StackMalloc(Num('2'))
11        Ref(Global(Num('0')))
12        NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
13        Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))
14        RemoveStackframe()
15        Return(Empty())
16      ],
17    Block
18      Name 'stack_fun.0',
19      [
20        // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
21        ↪   Name('param')))
22        // Exp(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('local_var')))
23        Return(Empty())
24      ]
25    ]

```

Code 1.74: PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_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        # StackMalloc(Num('2'))
11        SUBI SP 2;
12        # Ref(Global(Num('0')))
13        SUBI SP 1;
14        LOADI IN1 0;
15        ADD IN1 DS;
16        STOREIN SP IN1 1;
17        # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
18        MOVE BAF ACC;
19        ADDI SP 3;
20        MOVE SP BAF;
21        SUBI SP 4;
22        STOREIN BAF ACC 0;
23        LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
24        ADD ACC CS;
25        STOREIN BAF ACC -1;
26        # Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))

```

```

26     Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))
27     # RemoveStackframe()
28     MOVE BAF IN1;
29     LOADIN IN1 BAF 0;
30     MOVE IN1 SP;
31     # Return(Empty())
32     LOADIN BAF PC -1;
33 ],
34 Block
35     Name 'stack_fun.0',
36     [
37         # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
38         ↪ Name('param')))
39         # // Exp(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('local_var')))
40         # Return(Empty())
41         LOADIN BAF PC -1;
42     ]

```

Code 1.75: RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 # // Exp(GoTo(Name('main.1')))
2 # // patched out Exp(GoTo(Name('main.1')))
3 # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], StructSpec(Name('st'))),
4 ↪ Name('local_var')))
5 # // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]))
6 # StackMalloc(Num('2'))
7 SUBI SP 2;
8 # Ref(Global(Num('0')))
9 SUBI SP 1;
10 LOADI IN1 0;
11 ADD IN1 DS;
12 STOREIN SP IN1 1;
13 # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
14 MOVE BAF ACC;
15 ADDI SP 3;
16 MOVE SP BAF;
17 SUBI SP 4;
18 STOREIN BAF ACC 0;
19 LOADI ACC 14;
20 ADD ACC CS;
21 STOREIN BAF ACC -1;
22 # Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))
23 JUMP 5;
24 # RemoveStackframe()
25 MOVE BAF IN1;
26 LOADIN IN1 BAF 0;
27 MOVE IN1 SP;
28 # Return(Empty())
29 LOADIN BAF PC -1;
30 # // Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('st'))), Name('param')))
31 # // Exp(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('local_var')))
32 # Return(Empty())
33 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 1.76: RETI-Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

1.3.7.3.2 Mit Rückgabewert

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

Code 1.77: PicoC-Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```
1 File
2   Name './example_fun_call_with_return_value.picoc_mon',
3   [
4       Block
5         Name 'stack_fun.1',
6         [
7             // Return(Num('42'))
8             Exp(Num('42'))
9             Return(Stack(Num('1')))
10        ],
11        Block
12          Name 'main.0',
13          [
14              // Assign(Name('var'), Call(Name('stack_fun'), []))
15              StackMalloc(Num('2'))
16              NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
17              Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
18              RemoveStackframe()
19              Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
20              Return(Empty())
21          ]
22    ]
```

Code 1.78: PicoC-Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```
1 File
2   Name './example_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(Name('var'), Call(Name('stack_fun'), []))
21     # StackMalloc(Num('2'))
22     SUBI SP 2;
23     # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
24     MOVE BAF ACC;
25     ADDI SP 2;
26     MOVE SP BAF;
27     SUBI SP 2;
28     STOREIN BAF ACC 0;
29     LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
30     ADD ACC CS;
31     STOREIN BAF ACC -1;
32     # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
33     Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
34     # RemoveStackframe()
35     MOVE BAF IN1;
36     LOADIN IN1 BAF 0;
37     MOVE IN1 SP;
38     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
39     LOADIN SP ACC 1;
40     STOREIN DS ACC 0;
41     ADDI SP 1;
42     # Return(Empty())
43     LOADIN BAF PC -1;
44   ]
45 ]

```

Code 1.79: RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
2 JUMP 7;
3 # // Return(Num('42'))
4 # Exp(Num('42'))
5 SUBI SP 1;
6 LOADI ACC 42;
7 STOREIN SP ACC 1;
8 # Return(Stack(Num('1')))
9 LOADIN SP ACC 1;
10 ADDI SP 1;
11 LOADIN BAF PC -1;
12 # // Assign(Name('var'), Call(Name('stack_fun'), []))
13 # StackMalloc(Num('2'))
14 SUBI SP 2;
15 # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))

```



```

16 MOVE BAF ACC;
17 ADDI SP 2;
18 MOVE SP BAF;
19 SUBI SP 2;
20 STOREIN BAF ACC 0;
21 LOADI ACC 17;
22 ADD ACC CS;
23 STOREIN BAF ACC -1;
24 # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
25 JUMP -15;
26 # RemoveStackframe()
27 MOVE BAF IN1;
28 LOADIN IN1 BAF 0;
29 MOVE IN1 SP;
30 # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
31 LOADIN SP ACC 1;
32 STOREIN DS ACC 0;
33 ADDI SP 1;
34 # Return(Empty())
35 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 1.80: RETI-Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

1.3.7.3.3 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 1.81: PicoC-Code für Call by Sharing für Arrays

```

1 File
2   Name './example_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(Empty())
11      ],
12    Block
13      Name 'main.0',
14      [

```

```

14 // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int')),
    ↪ Name('local_var1'))
15 // Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int')),
    ↪ Name('local_var2'))
16 // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var1'), Name('local_var2')]))
17 StackMalloc(Num('2'))
18 Ref(Global(Num('0')))
19 Ref(Global(Num('6')))
20 NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))
21 Exp(GoTo(Name('stack_fun.1'))))
22 RemoveStackframe()
23 Return(Empty())
24 ]
25 ]

```

Code 1.82: 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'),
    ↪ [Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
    ↪ Name('param1'), Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')),
    ↪ Name('param2'))])
7     name:                Name('stack_fun')
8     value or address:    Empty()
9     position:            Pos(Num('1'), Num('5'))
10    size:                 Empty()
11  },
12  Symbol
13  {
14    type qualifier:      Writable()
15    datatype:            PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
16    name:                Name('param1@stack_fun')
17    value or address:    Num('0')
18    position:            Pos(Num('1'), Num('21'))
19    size:                Num('1')
20  },
21  Symbol
22  {
23    type qualifier:      Writable()
24    datatype:            PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
25    name:                Name('param2@stack_fun')
26    value or address:    Num('1')
27    position:            Pos(Num('1'), Num('37'))
28    size:                Num('1')
29  },
30  Symbol
31  {
32    type qualifier:      Empty()
33    datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
34    name:                Name('main')

```

```

35     value or address:    Empty()
36     position:           Pos(Num('4'), Num('5'))
37     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 1.83: Symboltabelle für Call by Sharing für Arrays

```

1 File
2   Name './example_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        # StackMalloc(Num('2'))
22        SUBI SP 2;
23        # Ref(Global(Num('0')))
24        SUBI SP 1;
25        LOADI IN1 0;
26        ADD IN1 DS;
27        STOREIN SP IN1 1;
28        # Ref(Global(Num('6')))

```

```

26     SUBI SP 1;
27     LOADI IN1 6;
28     ADD IN1 DS;
29     STOREIN SP IN1 1;
30     # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
31     MOVE BAF ACC;
32     ADDI SP 4;
33     MOVE SP BAF;
34     SUBI SP 4;
35     STOREIN BAF ACC 0;
36     LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
37     ADD ACC CS;
38     STOREIN BAF ACC -1;
39     # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
40     Exp(GoTo(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 1.84: RETI-Block Pass für Call by Sharing für Arrays

1.3.7.3.4 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 1.85: PicoC-Code für Call by Value für Structs

```

1 File
2   Name './example_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(Empty())
9       ],
10    Block
11      Name 'main.0',

```

```

12     [
13         // Exp(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st')), Name('local_var')))
14         // Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]))
15         StackMalloc(Num('2'))
16         Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))
17         NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
18         Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
19         RemoveStackframe()
20         Return(Empty())
21     ]
22 ]

```

Code 1.86: PicoC-Mon Pass für Call by Value für Structs

```

1 File
2   Name './example_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              # StackMalloc(Num('2'))
17              SUBI SP 2;
18              # Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))
19              SUBI SP 3;
20              LOADIN DS ACC 0;
21              STOREIN SP ACC 1;
22              LOADIN DS ACC 1;
23              STOREIN SP ACC 2;
24              LOADIN DS ACC 2;
25              STOREIN SP ACC 3;
26              # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
27              MOVE BAF ACC;
28              ADDI SP 5;
29              MOVE SP BAF;
30              SUBI SP 5;
31              STOREIN BAF ACC 0;
32              LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
33              ADD ACC CS;
34              STOREIN BAF ACC -1;
35              # Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
36              Exp(GoTo(Name('stack_fun.1')))
37              # RemoveStackframe()
38              MOVE BAF IN1;
39              LOADIN IN1 BAF 0;
40              MOVE IN1 SP;

```

```
41     # Return(Empty())
42     LOADIN BAF PC -1;
43 ]
44 ]
```

Code 1.87: RETI-Block Pass für Call by Value für Structs

1.3.8 Umsetzung kleinerer Details

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).
- *GCC, the GNU Compiler Collection* - *GNU Project*. URL: <https://gcc.gnu.org/> (besucht am 13.07.2022).

Vorlesungen

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