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

Betreung:
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

Abbildungsverzeichnis

Codeverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Definitionsverzeichnis

Grammatikverzeichnis

1 Implementierung

1.1 Lexikalische Analyse

1.1.1 Konkrette Syntax für die Lexikalische Analyse

COMMENT	::=	"//" /[^\n]*/ | "/*" /(. | \n)*?/ "*/"	*L_Comment*
RETI_COMMENT.2	::=	"//""␣"?"#"/[^\n]*/	
DIG_NO_0	::=	"1" | "2" | "3" | "4" | "5"	*L_Arith*
	|	"6" | "7" | "8" | "9"	
DIG_WITH_0	::=	"0" | *DIG_NO_0*	
NUM	::=	"0" | *DIG_NO_0* *DIG_WITH_0*∗	
ASCII_CHAR	::=	"␣".."∼"	
CHAR	::=	"'" *ASCII_CHAR* "'"	
FILENAME	::=	*ASCII_CHAR* + ".*picoc*"	
LETTER	::=	"*a*".."*z*" | "*A*".."*Z*"	
NAME	::=	(*LETTER* | "_") (LETTER | DIG_WITH_0 | "_")*	
name	::=	*NAME* | *INT_NAME* | *CHAR_NAME*	
	|	*VOID_NAME*	
LOGIC_NOT	::=	"!"	
NOT	::=	"∼"	
REF_AND	::=	"&"	
un_op	::=	*SUB_MINUS* | *LOGIC_NOT* | *NOT*	
	|	*MUL_DEREF_PNTR* | *REF_AND*	
MUL_DEREF_PNTR	::=	"∗"	
DIV	::=	"/"	
MOD	::=	"%"	
*prec*1*_op*	::=	*MUL_DEREF_PNTR* | *DIV* | *MOD*	
ADD	::=	"+"	
SUB_MINUS	::=	"−"	
*prec*2*_op*	::=	*ADD* | *SUB_MINUS*	
LT	::=	"<"	*L_Logic*
LTE	::=	"<="	
GT	::=	">"	
GTE	::=	">="	
rel_op	::=	*LT* | *LTE* | *GT* | *GTE*	
EQ	::=	"=="	
NEQ	::=	"!="	
eq_op	::=	*EQ* | *NEQ*	

Grammar 1.1.1: *Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 1*

$INT\_DT.2$	::=	"*int*"	*L_Assign_Alloc*
$INT\_NAME.3$	::=	"*int*" $(LETTER \mid DIG\_WITH\_0 \mid \text{"\_"})+$	
$CHAR\_DT.2$	::=	"*char*"	
$CHAR\_NAME.3$	::=	"*char*" $(LETTER \mid DIG\_WITH\_0 \mid \text{"\_"})+$	
$VOID\_DT.2$	::=	"*void*"	
$VOID\_NAME.3$	::=	"*void*" $(LETTER \mid DIG\_WITH\_0 \mid \text{"\_"})+$	
prim_dt	::=	$INT\_DT \mid CHAR\_DT \mid VOID\_DT$	

Grammar 1.1.2: *Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Lexikalische Analyse in EBNF, Teil 2*

1.1.2 Basic Lexer

1.2 Syntaktische Analyse

1.2.1 Umsetzung von Präzidenz und Assoziativität

Die Programmiersprache L_{PicoC} hat dieselben **Präzidenzregeln** implementiert, wie die Programmiersprache L_C[1]. Die **Präzidenzregeln** der Programmiersprache L_{PicoC} sind in Tabelle 1.1 aufgelistet.

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

Tabelle 1.1: *Präzidenzregeln von PicoC*

Würde man diese **Operatoren** ohne Beachtung von **Präzidenzreglen** (Definiton **??**) und **Assoziativität** (Definition **??**) in eine Grammatik verarbeiten wollen, so könnte eine Grammatik, wie Grammatik 1.2.1 dabei rauskommen.

[1] *C Operator Precedence - cppreference.com.*

prim_exp	::=	*name* | *NUM* | *CHAR* | "("*exp*")"	*L_Arith* +
un_op	::=	"−" | "∼" | "!" | "∗" | "&"	
un_exp	::=	*un_op exp*	
bin_op	::=	"∗" | "/" | "%" | "+" | "−" | "&" | "∧" | "|"	
		| "<" | "<=" | ">" | ">=" | "!=" | "==" | "&&" | "||"	
bin_exp	::=	*exp bin_op exp*	
exp	::=	*prim_exp* | *un_exp* | *bin_exp*	

Grammar 1.2.1: *Undurchdachte Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Syntaktische Analyse in EBNF*

Die Grammatik 1.2.1 ist allerdings **mehrdeutig**, d.h. verschiedene **Linksableitungen** in der Grammatik können zum selben **Wort** abgeleitet werden. Z.B. kann das Wort `3 * 1 && 4` sowohl über die **Linksableitung** 1.2.1 als auch über die **Linksableitung** 1.2.2 abgeleitet werden.

$$\begin{aligned} \texttt{exp} &\Rightarrow \texttt{bin\_exp} \Rightarrow \texttt{exp bin\_op exp} \Rightarrow \texttt{bin\_exp bin\_op exp} \\ &\Rightarrow \texttt{exp bin\_op exp bin\_op exp} \Rightarrow^* \texttt{3 * 1 \&\& 4} \end{aligned} \tag{1.2.1}$$

$$\begin{aligned} &\texttt{exp} \Rightarrow \texttt{bin\_exp} \Rightarrow \texttt{exp bin\_op exp} \Rightarrow \texttt{prim\_exp bin\_op exp} \Rightarrow \texttt{NUM bin\_op exp} \\ &\Rightarrow \texttt{3 bin\_op exp} \Rightarrow \texttt{3 * exp} \Rightarrow \texttt{3 * bin\_exp} \Rightarrow \texttt{3 * exp bin\_exp exp} \Rightarrow^* \texttt{3 * 1 \&\& 4} \end{aligned} \tag{1.2.2}$$

Beide **Wörter** sind **gleich**, allerdings sind die **Ableitungsbäume unterschiedlich**, wie in Abbildung 1.1 zu sehen ist.

Abbildung 1.1: *Ableitungsbäume zu den beiden Ableitungen*

Der **linke Baum** entspricht Ableitung 1.2.1 und der **rechte Baum** entspricht Ableitung 1.2.2. Würde man in den Ausdrücken, die von diesen Bäumen darsgestellt sind in **Klammern** setzen, um die **Präzidenz** sichtbar zu machen, so würde Ableitung 1.2.1 die Klammerung `(3 * 1) && 4` haben und die Ableitung 1.2.2 die Klammerung `3 * (1 && 4)` haben.

Aus diesem Grund ist es wichtig die **Präzidenzregeln** und die **Assoziativität** der Operatoren beim Erstellen der Grammatik miteinzubeziehen. Hierzu wird nun Tabelle 1.1 betrachtet. Für jede **Präzidenzstufe** in der Tabelle 1.1 wird eine eigene Regel erstellt werden, wie es in Grammatik 1.2.2 dargestellt ist. Zudem braucht es eine **Produktion** `prim_exp` für die höchste **Präzidenzstufe**, welche **Literale**, wie `'c'`, `5` oder `var` und geklammerte Ausdrücke wie `(3 && 14)` abdeckt.

prim_exp	::=	...	*L_Arith + L_Array*
post_exp	::=	...	*+ L_Pntr + L_Struct*
un_exp	::=	...	*+ L_Fun*
*arith_prec*1	::=	...	
*arith_prec*2	::=	...	
arith_and	::=	...	
arith_oplus	::=	...	
arith_or	::=	...	
rel_exp	::=	...	*L_Logic*
eq_exp	::=	...	
logic_and	::=	...	
logic_or	::=	...	
assign_stmt	::=	...	*L_Assign*

Grammar 1.2.2: *Durchdachte Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Syntaktische Analyse in EBNF*

Einigen **Bezeichnungen** der **Produktionen** sind in Tabelle 1.2 ihren jeweiligen **Operatoren** zugeordnet für welche sie zuständig sind.

Bezeichnung der Produktionsregel	Operatoren
`post_exp`	`a() a[] a.b`
`un_exp`	`-a !a ~a *a &a`
`arith_prec1`	`a*b a/b a%b`
`arith_prec2`	`a+b a-b`
`arith_and`	`a<b a<=b a>b a>=b`
`arith_oplus`	`a==b a!=b`
`arith_or`	`a&b`
`rel_exp`	`a^b`
`eq_exp`	`a|b`
`logic_and`	`a&&b`
`logic_or`	`a||b`
`assign`	`a=b`

Tabelle 1.2: *Zuordnung der Bezeichnungen von Produktionsregeln zu Operatoren*

Als nächstes müssen die einzelnen **Produktionen** entsprechend der **Ausdrücke** für die sie zuständig sind definiert werden. Jede der **Produktionen** soll nur Ausdrücke **erkennen** können, deren **Präzidenzstufe** die ist, für welche die jeweilige Produktion verantwortlich ist oder deren Präzidenzstufe **höher** ist. Z.B. soll `un_op` sowohl den Ausdruck `-(3 * 14)` als auch einfach nur `(3 * 14)`[2] erkennen können, aber nicht `3 * 14` ohne Klammern, da dieser Ausdruck eine **geringe Präzidenz** hat. Des Weiteren muss bei Produktionen für Ausdrücke mit **Operatoren** unterschieden werden, ob die Operatoren **linksassoziativ** oder **rechtsassoziativ**, **unär**, **binär** usw. sind.

Bei z.B. der Produktion `un_exp` in 1.2.3 für die **rechtsassoziativen unären Operatoren** `-a`, `!a` `~a`, `*a` und `&a` ist die **Alternative** `un_op un_exp` dafür zuständig, dass diese unären Operatoren **rechtsassoziativ** geschachtelt werden können (z.B. `!-~42`). Die Alternative `post_exp` ist dafür zuständig, dass die Produktion auch **terminieren** kann und es auch möglich ist auschließlich einen Ausdruck **höherer Präzidenz** (z.B. `42`) zu haben.

[2] **Geklammerte Ausdrücke** werden nämlich von `prim_exp` erkannt, welches eine höhere **Präzidenzstufe** hat.

$$un\_exp \quad ::= \quad un\_op\ un\_exp \quad | \quad post\_exp$$

Grammar 1.2.3: *Beispiel für eine unäre rechtsassoziative Produktion*

Bei z.B. der Produktion `post_exp` in 1.2.4 für die **linksassoziativen unären Operatoren** `a()`, `a[]` und `a.b` sind die Alternativen `post_exp"["logic_or"]"` und `post_exp"."name` dafür zuständig, dass diese unären Operatoren **linksassoziativ** geschachtelt werden können (z.B. `ar[3][1].car[4]`). Die Alternative `name"("fun_args")"` ist für einen **einzelnen Funktionsaufruf** zuständig. Die Alternative `prim_exp` ist dafür zuständig, dass die Produktion nicht nur bei `name"("fun_args")"` **terminieren** kann und es auch möglich ist ausschließlich einen Ausdruck der **höchsten Präzidenz** (z.B. `42`) zu haben.

$$post\_exp \quad ::= \quad post\_exp"["logic\_or"]" \quad | \quad post\_exp"."name \quad | \quad name"("fun\_args")" \quad | \quad prim\_exp$$

Grammar 1.2.4: *Beispiel für eine unäre linksassoziative Produktion*

Bei z.B. der Produktion `prec2_exp` in 1.2.5 für die **binären linksassoziativen Operatoren** `a+b` und `a-b` ist die **Alternative** `arith_prec2 prec2_op arith_prec1` dafür zuständig, dass **mehrere** Operationen der Präzidenzstufe 4 in Folge erkannt werden können[3] (z.B. `3 + 1 - 4`, wobei `-` und `+` beide Präzidenzstufe 4 haben). Das **Nicht-Terminalsymbol** `arith_prec1` auf der **rechten Seite** ermöglicht es, dass zwischen den Operationen der Präzidenzstufe 4 auch Operationen der Präzidenzstufe 3 auftauchen können (z.B. `3 + 1 / 4 - 1`, wobei `-` und `+` beide Präzidenzstufe 4 haben und `/` Präzidenzstufe 3). Mit der Alternative `arith_prec1` ist es möglich, dass ausschließlich ein Ausdruck **höherer Präzidenz** erkannt wird (z.B. `1 / 4`).

$$arith\_prec2 \quad ::= \quad arith\_prec2\ prec2\_op\ arith\_prec1 \quad | \quad arith\_prec1$$

Grammar 1.2.5: *Beispiel für eine linksassoziative Produktion*

Manche **Parser**[a] haben allerdings ein Problem mit **Linksrekursion** (Definition **??**), wie sie z.B. in der Produktion 1.2.5 vorliegt. Dieses Problem lässt sich allerdings einfach lösen, indem man die Produktion 1.2.5 zur Produktion 1.2.6 umschreibt.

$$arith\_prec2 \quad ::= \quad arith\_prec1\ (prec2\_op\ arith\_prec1)*$$

Grammar 1.2.6: *Beispiel für eine linksassoziative Produktion*

Die von Produktion 1.2.6 erkannten Ausdrücke sind dieselben, wie für die Produktion 1.2.5, allerdings ist die Produktion1.2.6 **flach** gehalten und ruft sich **nicht** selber auf, sondern nutzt den in der EBNF (Definition **??**) definierten `*`-Operator, um mehrere Operationen der Präzidenzstufe 4 in Folge erkennen zu können (z.B. `3 + 1 - 4`, wobei `-` und `+` beide Präzidenzstufe 4 haben).

Das **Nicht-Terminalsymbol** `arith_prec1` erlaubt es, dass **zwischen** der Folge von Operationen der Präzidenzstufe 4 auch Operationen der Präzidenzstufe 3 auftauchen können (z.B. `3 + 1 / 4 - 1`, wobei `-` und `+` beide Präzidenzstufe 4 haben und `/` Präzidenzstufe 3). Da der in der EBNF definierte `*`-Operator auch bedeutet, dass das Teilpattern auf das er sich bezieht **kein einziges mal** vorkommen kann, ist es mit dem **linken Nicht-Terminalsymbol** `arith_prec1` möglich, dass ausschließlich ein Ausdruck **höherer Präzidenz** erkannt wird (z.B. `1 / 4`).

[a] Darunter zählt der **Earley Parser**, der im **PicoC-Compiler** verwendet wird **nicht**.

[3] Bezogen auf Tabelle 1.1.

Alle **Operatoren** der Sprache L_{PicoC} sind also entweder **binär** und **linksassoziativ** (z.B. `a*b`, `a-b`, `a>=b` oder `a&&b`), **unär** und **rechtsassoziativ** (z.B. `&a` oder `!a`) oder **unär** und **linksassoziativ** (z.B. `a[]` oder `a()`). Somit ergibt sich die Grammatik 1.2.7.

prec1_op	::=	" * " | " / " | "%"	*L_Misc*
prec2_op	::=	" + " | " − "	
rel_op	::=	" < " | " <= " | " > " | " >= "	
eq_op	::=	" == " | "!= "	
fun_args	::=	[*logic_or*(" , " *logic_or*)*]	
prim_exp	::=	*name* | *NUM* | *CHAR* | "("*logic_or*")"	*L_Arith*
post_exp	::=	*post_exp*"["*logic_or*"]" | *post_exp*"."*name* | *name*"("*fun_args*")"	*+ L_Array*
	|	*prim_exp*	*+ L_Pntr*
un_exp	::=	*un_op un_exp* | *post_exp*	*+ L_Struct*
arith_prec1	::=	*arith_prec1 prec1_op un_exp* | *un_exp*	*+ L_Fun*
arith_prec2	::=	*arith_prec2 prec2_op arith_prec1* | *arith_prec1*	
arith_and	::=	*arith_and* "&" *arith_prec2* | *arith_prec2*	
arith_oplus	::=	*arith_oplus* "∧" *arith_and* | *arith_and*	
arith_or	::=	*arith_or* "|" *arith_oplus* | *arith_oplus*	
rel_exp	::=	*rel_exp rel_op arith_or* | *arith_or*	*L_Logic*
eq_exp	::=	*eq_exp eq_op rel_exp* | *rel_exp*	
logic_and	::=	*logic_and* "&&" *eq_exp* | *eq_exp*	
logic_or	::=	*logic_or* "||" *logic_and* | *logic_and*	
assign_stmt	::=	*un_exp* "=" *logic_or*";"	*L_Assign*

Grammar 1.2.7: *Durchdachte Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Syntaktische Analyse in EBNF*

1.2.2 Konkrette Syntax für die Syntaktische Analyse

Die gesamte Grammatik 1.2.8, welche die **Konkrette Syntax** der Sprache L_{PicoC} beschreibt ergibt sich wenn man die Grammatik 1.2.7 um die **restliche Syntax** der Sprache L_{PicoC} erweitert, die sich nach einem **ähnlichen Prinzip** wie in Unterkapitel 1.2.7 erläutert ergibt.

Später in der Entwicklung des **PicoC-Compilers** wurde die **Konkrette Syntax** an die **aktuellste konstenlos auffindbare Version** der echten Grammatik *ANSI C grammar (Yacc)* der Sprache L_C angepasst[4], damit es sicherer gewährleistet werden kann, dass der **PicoC-Compiler** sich genauso verhält, wie geläufige Compiler der Programmiersprache L_C, wobei z.B. die Compiler **GCC**[5] und **Clang**[6] zu nennen wären.

[4] An der für die Programmiersprache L_{PicoC} relevanten **Syntax** hat sich allerdings über die Jahre nichts verändert, wie die Grammatiken für die **Syntaktische Analyse** *ANSI C grammar (Yacc)* und **Lexikalische Analyse** *ANSI C grammar (Lex)* aus dem Jahre 1985 zeigen.
[5] *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project*.
[6] *clang: C++ Compiler*.

prim_exp	::=	*name* | *NUM* | *CHAR* | "("*logic_or*")"	*L_Arith + L_Array*
post_exp	::=	*array_subscr* | *struct_attr* | *fun_call*	*+ L_Pntr + L_Struct*
		| *input_exp* | *print_exp* | *prim_exp*	*+ L_Fun*
un_exp	::=	*un_op un_exp* | *post_exp*	
input_exp	::=	"*input*""("")"	
print_exp	::=	"*print*""("*logic_or*")"	
*arith_prec*1	::=	*arith_prec*1 *prec*1*_op un_exp* | *un_exp*	
*arith_prec*2	::=	*arith_prec*2 *prec*2*_op arith_prec*1 | *arith_prec*1	
arith_and	::=	*arith_and* "&" *arith_prec*2 | *arith_prec*2	
arith_oplus	::=	*arith_oplus* "∧" *arith_and* | *arith_and*	
arith_or	::=	*arith_or* "|" *arith_oplus* | *arith_oplus*	
rel_exp	::=	*rel_exp rel_op arith_or* | *arith_or*	*L_Logic*
eq_exp	::=	*eq_exp eq_op rel_exp* | *rel_exp*	
logic_and	::=	*logic_and* "&&" *eq_exp* | *eq_exp*	
logic_or	::=	*logic_or* "||" *logic_and* | *logic_and*	
type_spec	::=	*prim_dt* | *struct_spec*	*L_Assign_Alloc*
alloc	::=	*type_spec pntr_decl*	
assign_stmt	::=	*un_exp* "=" *logic_or*";"	
initializer	::=	*logic_or* | *array_init* | *struct_init*	
init_stmt	::=	*alloc* "=" *initializer*";"	
const_init_stmt	::=	"*const*" *type_spec name* "=" *NUM*";"	
pntr_deg	::=	"*"*	*L_Pntr*
pntr_decl	::=	*pntr_deg array_decl* | *array_decl*	
array_dims	::=	("["*NUM*"]")*	*L_Array*
array_decl	::=	*name array_dims* | "("*pntr_decl*")"*array_dims*	
array_init	::=	"{"*initializer*("," *initializer*) * "}"	
array_subscr	::=	*post_exp*"["*logic_or*"]"	
struct_spec	::=	"*struct*" *name*	*L_Struct*
struct_params	::=	(*alloc*";")+	
struct_decl	::=	"*struct*" *name* "{"*struct_params*"}"	
struct_init	::=	"{""."*name*"="*initializer*	
		("," "."name"="initializer)*"}"	
struct_attr	::=	*post_exp*"."*name*	
if_stmt	::=	"*if*""("*logic_or*")" *exec_part*	*L_If_Else*
if_else_stmt	::=	"*if*""("*logic_or*")" *exec_part* "*else*" *exec_part*	
while_stmt	::=	"*while*""("*logic_or*")" *exec_part*	*L_Loop*
do_while_stmt	::=	"*do*" *exec_part* "*while*""("*logic_or*")"";"	

Grammar 1.2.8: *Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 1*

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

Grammar 1.2.9: *Konkrette Syntax der Sprache L_{PicoC} für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 2*

1.2.3 Derivation Tree Generierung

Die in Unterkapitel 1.2.2 definierte **Konkrette Syntax**, die von der Grammatik 1.2.8 beschrieben wird lässt sich mithilfe des **Earley Parsers** (Definition 1.1) von Lark dazu verwenden Code, der in der Sprache L_{PicoC} geschrieben ist zu parsen um einen **Derivation Tree** zu generieren.

Definition 1.1: Earley Parser

1.2.3.1 Codebeispiel

In den folgenden Unterkapiteln wird das Beispiel in Code 1.1 dazu verwendet die Konstruktion eines **Abstract Syntax Trees** in seinen einzelnen **Zwischenschritten** zu erläutern.

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

Code 1.1: *PicoC Code für Derivation Tree Generierung*

Der **Derivation Tree**, der mithilfe des **Earley Parsers** aus dem Beispiel in Code 1.1 generiert wurde, ist in Code 1.2 zu sehen. Im Code 1.1 wurden einige Zeilen **markiert**, die später in Unterkapitel 1.2.4 zum Vergleich wichtig sind.

```
file
  ./verbose_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.dt
  decls_defs
    decl_def
      struct_decl
        name        st
        struct_params
          alloc
            type_spec
              prim_dt        int
            pntr_decl
              pntr_deg        *
              array_decl
                pntr_decl
                  pntr_deg        *
                  array_decl
                    name        attr
                    array_dims
                array_dims
                  4
                  5
    decl_def
      fun_def
        type_spec
          prim_dt        void
        pntr_deg
        name        main
        fun_params
        decl_exec_stmts
          decl_part
            decl_exp_stmt
              alloc
                type_spec
                  struct_spec
                    name        st
                pntr_decl
                  pntr_deg        *
                  array_decl
                    pntr_decl
                      pntr_deg        *
                      array_decl
                        name        var
                        array_dims
                          3
                          2
                    array_dims
```

Code 1.2: *Derivation Tree nach Derivation Tree Generierung*

1.2.3.2 Ausgabe des Derivation Tree

Die Ausgabe des **Derivation Tree** wird komplett vom **Lark Parsing Toolkit** übernommen. Die **Inneren Knoten** sind **Nicht-Terminalsymbole**, welche in der Grammatik den **linken Seite** einer **Produktion** entsprechen.

1.2.4 Derivation Tree Vereinfachung

Der **Derivation Tree** in Code 1.2, dessen Generierung in Unterkapitel 1.2.3.1 besprochen wurde ist noch untauglich, damit aus ihm mittels eines **Tramsformers** ein **Abstract Syntax Tree** generiert werden kann. Das Problem ist, dass um den den **Datentyp** einer Variable in der Programmiersprache L_C und somit auch die Programmiersprache L_{PicoC} korrekt bestimmen zu können, wie z.B. ein **„Array der Mächtigkeit 3 von Pointern auf Arrays der Mächtigkeit 2 von Integern“** `int (*ar[3])[2]` die **Spiralregel**[7] in der Implementeirung des **PicoC-Compilers** umgesetzt werden muss und das ist nicht alleinig möglich, indem man die entsprechenden **Produktionen** in der Grammatik 1.2.8 der **Konkretten Syntax** auf eine spezielle Weise passend spezifiziert.

Was man erhalten will, ist ein **entarteter Baum** von **PicoC-Knoten**, an dem man den **Datentyp** direkt ablesen kann, indem man sich einfach über den **entarteten Baum** bewegt, wie z.B. `PntrDecl(Num('1'),ArrayDecl([Num('3'),Num('2')],PntrDecl(Num('1'),StructSpec(Name('st')))))` für den Ausdruck `struct st *(*var[3][2])`.

Es sind hierbei mehrere Probleme zu lösen. Hat man den Ausdruck `struct st *(*var[3][2])` wird dieser zu einem **Derivation Tree**, wie er in Abbildung 1.2 zu sehen ist.

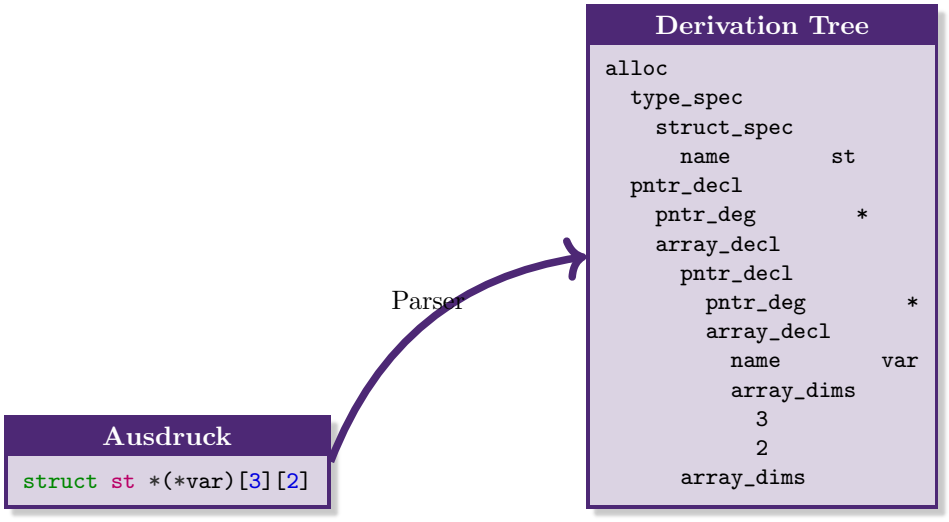

Abbildung 1.2: *Derivation Tree nach Parsen eines Ausdrucks*

Dieser **Derivation Tree** für den Ausdruck `struct st *(*var[3][2])` hat allerdings einen Aufbau welcher durch die **Syntax** der **Pointerdeklaratoren** `pntr_decl(num, datatype)` und **Arraydeklaratoren** `array_decl(datatype, nums)` bestimmt ist, die **spiralähnlich** ist. Man würde allerdings gerne einen **entarteten Baum** erhalten, bei dem der Datentyp immer im **zweiten Attribut** weitergeht, anstatt abwechselnd im **zweiten** und **ersten**, wie beim **Pointerdeklarator** `pntr_decl(num, datatype)` und **Arraydeklarator** `array_decl(datatype, nums)`. Daher muss beim **ArrayDeclarator** `array_decl(datatype, nums)` immer das **erste Attribut** `datatype` mit dem **zweiten Attribut** `nums` getauscht werden.

Des Weiteren befindet sich in der **Mitte** dieser **Spirale**, die der **Derivation Tree** bildet der **Name der Variable** `name(var)` und nicht der **innerste Datentyp** `struct st`, da der **Derivation Tree** einfach nur die **kompilerinterne Darstellung**, die durch das Parsen eines **Programms** in **Konkretter Syntax** (z.B. `struct st *(*var[3][2])`) **generiert** wird darstellt. Der **Name der Variable** `name(var)` sollte daher mit dem **innersten Datentyp** `struct st` ausgetauscht werden.

[7] *Clockwise/Spiral Rule*.

In Abbildung 1.3 ist daher zu sehen, wie der **Derivation Tree** aus Abbildung 1.2 mithilfe eines **Visitors** (Definition **??**) **vereinfacht** wird, sodass er die gerade erläuterten Ansprüche erfüllt.

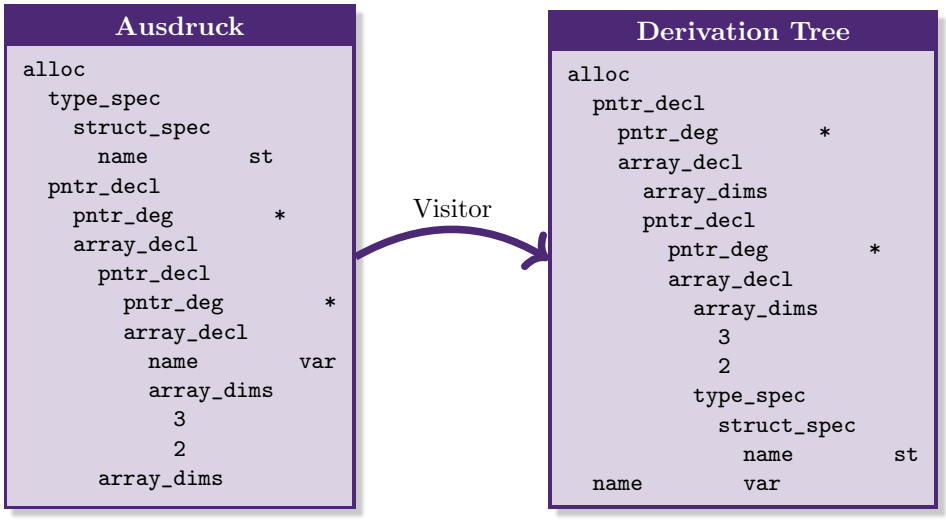

Abbildung 1.3: *Derivation Tree nach Vereinfachung*

1.2.4.1 Codebeispiel

In Code 1.3 ist der **Derivation Tree** aus Code 1.2 nach der **Vereinfachung** mithilfe eines **Visitors** zu sehen.

```
1  file
2    ./verbose_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.dt_simple
3    decls_defs
4      decl_def
5        struct_decl
6          name        st
7          struct_params
8            alloc
9              pntr_decl
10               pntr_deg        *
11               array_decl
12                 array_dims
13                   4
14                   5
15                 pntr_decl
16                   pntr_deg        *
17                   array_decl
18                     array_dims
19                     type_spec
20                       prim_dt        int
21             name        attr
22     decl_def
23       fun_def
24         type_spec
25           prim_dt        void
26         pntr_deg
```

```
27        name        main
28        fun_params
29        decl_exec_stmts
30          decl_part
31            decl_exp_stmt
32              alloc
33                pntr_decl
34                  pntr_deg        *
35                  array_decl
36                    array_dims
37                    pntr_decl
38                      pntr_deg        *
39                      array_decl
40                        array_dims
41                          3
42                          2
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

Nachdem der **Derviation Tree** in Unterkapitel 1.2.4 vereinfacht wurde, ist der **vereinfachte Derivation Tree** in Code 1.3 nun dazu geeignet, um mit einem **Transformer** (Definition **??**) einen **Abstract Syntax Tree** aus ihm zu generieren. Würde man den **vereinfachten Derivation Tree** des Ausdrucks `struct st *(*var[3][2])` auf passende Weise in einen **Abstract Syntax Tree** umwandeln, so würde dabei ein **Abstract Syntax Tree** wie in Abbildung 1.4 rauskommen.

Den Teilbaum, der den Datentyp darstellt würde man von von **oben-nach-unten**[8] als **„Pointer auf einen Pointer auf ein Array der Mächtigkeit 2, 3 von Structs des Typs `st`“** lesen, also genau anders herum, als man den Ausdruck `struct st *(*var[3][2])` mit der **Spiralregel** lesen würde. Bei der **Spiralregel** fängt man beim Ausdruck `struct st *(*var[3][2])` bei der Variable `var` an und arbeitet sich dann auf **„Spiralbahnen“**, von **innen-nach-außen** durch den Ausdruck, um herauszufinden, dass dieser Datentyp ein **„Array der Mächtigkeit 3, 2 von Pointern auf einen Pointer auf einen Struct vom Typ `st`“** ist.

[8] In der Informatik wachsen Bäume von **oben-nach-unten**, von der **Wurzel** zur den **Blättern**, bzw. in diesem Beispiel von **links-nach-rechts**.

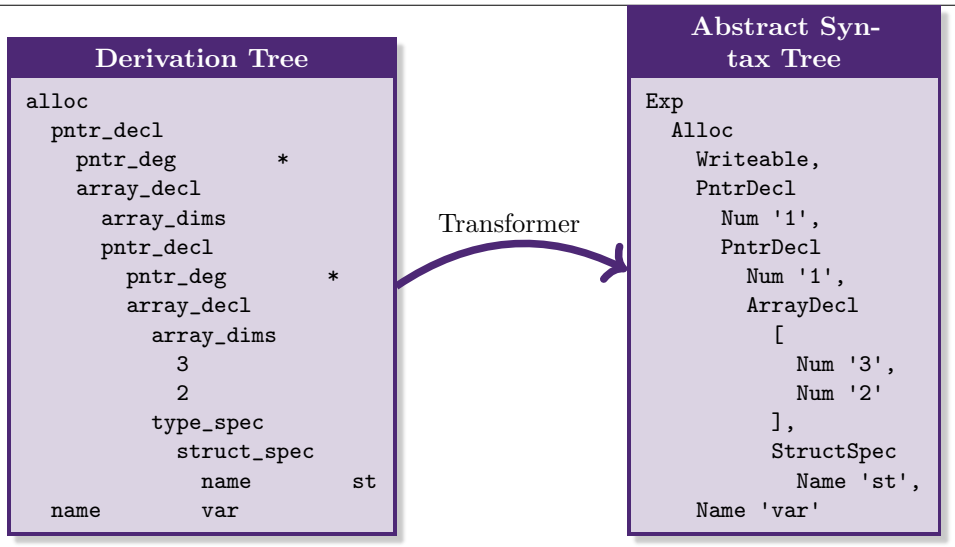

Abbildung 1.4: *Abstract Syntax Tree Generierung ohne Umdrehen*

Dieser **Abstract Syntax Tree** ist für die Weiterverarbeitung ungeeignet, denn für die **Adressberechnung** für eine Aneinandereihung von Zugriffen auf **Pointerelemente**, **Arrayelemente** oder **Structattribute**, welche in Unterkapitel **??** genauer erläutert wird, will man den Datentyp in **umgekehrter Reihenfolge**. Aus diesem Grund muss der **Transformer** bei der Konstruktion des **Abstract Syntax Tree** zusätzlich dafür sorgen, dass jeder **Teilbaum**, der für einen **Datentyp** steht **umgedreht** wird. Auf diese Weise kommt ein **Abstract Syntax Tree** mit **richtig rum gedrehtem Datentyp**, wie in Abbildung 1.5 zustande, der für die Weiterverarbeitung geeignet ist.

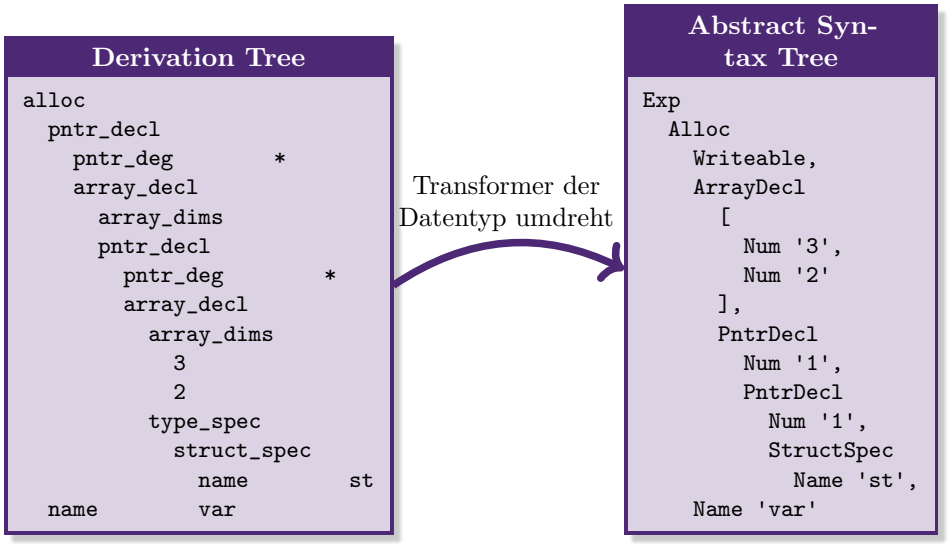

Abbildung 1.5: *Abstract Syntax Tree Generierung mit Umdrehen*

Die Weiterverarbeitung des **Abstract Syntax Trees** geschieht mithilfe von **Passes**, welche im Unterkapitel 1.3 genauer beschrieben werden. Da die Knoten des **Abstract Syntax Tree** anders als beim **Derivation Tree** nicht die gleichen Bezeichnungen haben wie **Produktionen** der Grammatik der **Konkretten Syntax**

ist es in den folgenden Unterkapiteln 1.2.5.1, 1.2.5.2 und 1.2.5.3 notwendig die **Bedeutung** der einzelnen **PicoC-Knoten**, **RETI-Knoten** und bestimmter **Kompositionen** dieser Knoten zu **dokumentieren**, die alle in den unterschiedlichen von den **Passes** umgeformten **Abstract Syntax Trees** vorkommen.

Des Weiteren gibt die **Abstrakte Syntax** die durch die Grammatik 1.2.1 in Unterkapitel 1.2.5.4 beschrieben wird aufschluss darüber welche **Kompositionen von PicoC-Knoten**, neben den bereits in Tabelle 1.2.10 definierten Kompositionen mit Bedeutung insgesamt überhaupt **möglich** sind.

1.2.5.1 PicoC-Knoten

Bei den **PicoC-Knoten** handelt es sich um Knoten, die irgendeinen **Ausdruck** aus der Sprache L_{PicoC} darstellen. Für die **PicoC-Knoten** wurden möglichst **kurze** und **leicht** verständliche Bezeichner gewählt, da auf diese Weise bei der Implementierung der einzelnen Passes möglichst **viel Code in eine Zeile** passt und dieser Code auch durch leicht verständliche Bezeichner von Knoten **intuitiv verständlich** sein sollte[9]. Alle **PicoC-Knoten**, die in den von den verschiedenen Passes generierten **Abstract Syntax Trees** vorkommen sind in Tabelle 1.3 mit einem **Bschreibungstext** dokumentiert.

[9] Z.B. steht der **PicoC-Knoten** `Name(str)` für einen **Bezeichner**. Anstatt diesen Knoten in englisch `Identifier(str)` zu nennen, wurde dieser als `Name(str)` gewählt, da `Name(str)` **kürzer** ist und **inuitiver verständlich**.

PiocC-Knoten	Beschreibung
`Name(val)`	Ein **Bezeichner**, z.B. `my_fun`, `my_var` usw. , aber da es keine gute Kurzform für `Identifier()` (englisches Wort für Bezeichner) gibt, wurde dieser Knoten `Name()` genannt.
`Num(val)`	Eine **Zahl**, z.B. `42`, `-3` usw.
`Char(val)`	Ein **Zeichen** der **ASCII-Zeichenkodierung**, z.B. `'c'`, `'*'` usw.
`Minus()`, `Not()`, `DerefOp()`, `RefOp()`, `LogicNot()`	Die **unären Operatoren** `un_op`: `-a`, `~a`, `*a`, `&a` `!a`.
`Add()`, `Sub()`, `Mul()`, `Div()`, `Mod()`, `Oplus()`, `And()`, `Or()`, `LogicAnd()`, `LogicOr()`	Die **binären Operatoren** `bin_op`: `a + b`, `a - b`, `a * b`, `a / b`, `a % b`, `a` $\wedge$ `b`, `a & b`, `a` $\mid$ `b`, `a && b`, `a` $\mid\mid$ `b`.
`Eq()`, `NEq()`, `Lt()`, `LtE()`, `Gt()`, `GtE()`	Die **Relationen** `rel`: `a == b`, `a != b`, `a < b`, `a <= b`, `a > b`, `a >= b`.
`Const()`, `Writeable()`	Die **Type Qualifier** `type_qual`: `const`, was für ein **nicht beschreibbare Konstante** steht und das **nicht** Angeben von `const`, 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** `datatype` eingeordnet werden: `int`, `char`, `void`.
`Placeholder()`	**Platzhalter** für einen Knoten, der diesen später **ersetzt**.
`BinOp(exp, bin_op, exp)`	Container für eine **binäre Operation** mit 2 Expressions: `<exp1> <bin_op> <exp2>`
`UnOp(un_op, exp)`	Container für eine **unäre Operation** mit einer Expression: `<un_op> <exp>`.
`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: `<exp1> <rel> <exp2>`
`ToBool(exp)`	Container für einen **Arithmetischen Ausdruck**, wie z.B. `1 + 3` oder einfach nur `3`, 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** `<type_qual> <datatype> <name>` mit den notwendigen Knoten `type_qual`, `datatype` und `name`, die alle für einen Eintrag in der **Symboltabelle** notwendigen Informationen enthalten. Zudem besitzt er ein versteckt es Attribut `local_var_or_param`, 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 `lhs` ein `Subscr(exp1, exp2)`, `Deref(exp1, exp2)`, `Attr(exp, name)` oder `Name('var')` sein kann und `exp` ein beliebiger **Logischer Ausdruck** sein kann: `lhs = exp`.

Tabelle 1.3: *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 **Pointerdatentyp** steht: `<prim_dt> *<var>`, 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** `&<var>` steht und die **Adresse** einer **Location** (Definition **??**) 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 **Indexzugriff** auf einen **Array-** oder **Pointerdatentyp**: `<var>[<i>]`, wobei `exp1` eine angehängte weitere `Subscr(exp1, exp2)`, `Deref(exp1, exp2)`, `Attr(exp, name)` oder ein `Name('var')` sein kann und `exp2` der Index ist auf den zugegriffen werden soll.
`ArrayDecl(nums, datatype)`	Container, der für den **Arraydatentyp** steht: `<prim_dt> <var>[<i>]`, wobei das **Attribut** `nums` eine Liste von `Num('x')` ist, die die **Dimensionen** des Arrays angibt und `datatype` der Datentyp ist, der über das Anwenden von `Subscript()` 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. `{{1, 2}, {3, 4}}`. Des Weiteren besitzt er ein verstecktes Attribut `datatype`, welches für den **PicoC-ANF Pass** Informationen transportiert, die für **Fehlermeldungen** wichtig sind.
`Subscr(exp1, exp2)`	Container für den **Indexzugriff** auf einen **Array-** oder **Pointerdatentyp**: `<var>[<i>]`, wobei `exp1` eine angehängte weitere `Subscr(exp1, exp2)`, `Deref(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` Operation sein kann oder ein `Name('var')` sein kann und `exp2` der Index ist auf den zugegriffen werden soll.
`StructSpec(name)`	Container für einen selbst definierten **Structdatentyp**: `struct <name>`, wobei das **Attribut** `name` festlegt, welchen **selbst definierte** Structdatentyp dieser Container-Knoten repräsentiert.
`Attr(exp, name)`	Container für den **Attributzugriff** auf einen **Structdatentyp**: `<var>.<attr>`, wobei `exp1` eine angehängte weitere `Subscr(exp1, exp2)`, `Deref(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` Operation sein kann oder ein `Name('var')` sein kann und `name` das Attribut ist, auf das zugegriffen werden soll.

Tabelle 1.4: *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-ANF Pass** Informationen transportiert, die für **Fehlermeldungen** wichtig sind.
`StructDecl(name, allocs)`	Container für die Deklaration eines **selbstdefinierten Structdatentyps**, z.B. `struct <var> {<datatype> <attr1>; <datatype> <attr2>;};`, wobei `name` der **Bezeichner** des Structdatentyps ist und `allocs` eine Liste von Bezeichnern der **Attribute** des Structdatentyps mit dazugehörigem **Datentyp**, wofür sich der **Container-Knoten** `Alloc(type_qual, datatype, name)` sehr gut als **Container** eignet.
`If(exp, stmts)`	Container für ein **If Statement** `if(<exp>) { <stmts> }` inklusive **Condition** `exp` und einem **Branch** `stmts`, indem eine **Liste von Statements** stehen kann oder ein einzelnes `GoTo(Name('block.xyz'))`.
`IfElse(exp, stmts1, stmts2)`	Container für ein **If-Else Statement** `if(<exp>) { <stmts2> } else { <stmts2> }` inklusive **Codition** `exp` und 2 **Branches** `stmts1` und `stmts2`, die zwei Alternativen Darstellen in denen jeweils **Listen von Statements** oder `GoTo(Name('block.xyz'))`'s stehen können.
`While(exp, stmts)`	Container für ein **While-Statement** `while(<exp>) { <stmts> }` inklusive **Condition** `exp` und einem **Branch** `stmts`, indem eine **Liste von Statements** stehen kann oder ein einzelnes `GoTo(Name('block.xyz'))`.
`DoWhile(exp, stmts)`	Container für ein **Do-While-Statement** `do { <stmts> } while(<exp>);` inklusive **Condition** `exp` und einem **Branch** `stmts`, indem eine **Liste von Statements** stehen kann oder ein einzelnes `GoTo(Name('block.xyz'))`.
`Call(name, exps)`	Container für einen **Funktionsaufruf**: `fun_name(exps)`, wobei `name` der **Bezeichner** der Funktion ist, die aufgerufen werden soll und `exps` eine **Liste von Argumenten** ist, die an die Funktion übergeben werden soll.
`Return(exp)`	Container für ein `Return-Statement`: `return <exp>`, wobei das **Attribut** `exp` einen **Logischen Ausdruck** darstellt, dessen Ergebnis vom **Return-Statement** zurückgegeben wird.
`FunDecl(datatype, name, allocs)`	Container für eine **Funktionsdeklaration**, z.B. `<datatype> <fun_name>(<datatype> <param1>, <datatype> <param2>)`, wobei `datatype` der **Rückgabewert** der Funktion ist, `name` der **Bezeichner** der Funktion ist und `allocs` die **Parameter** der Funktion sind, wobei der **Container-Knoten** `Alloc(type_spec, datatype, name)` als Cotainer für die Parameter dient.

Tabelle 1.5: *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 Cotainer für die Parameter dient und `stmts_blocks` eine Liste von **Statemetns** bzw. **Blöcken** ist, welche diese Funktion beinhaltet.
`NewStackframe(fun_name, goto_after_call)`	Container für die **Erstellung** eines neuen **Stackframes** und Speicherung des Werts des `BAF`-Registers der **aufrufenden Funktion** und der **Rücksprungadresse** nacheinander an den **Anfang** des neuen **Stackframes**. Das Attribut `fun_name` stehte dabei für den Bezeichner der Funktion, für die ein neuer **Stackframe** erstellt werden soll. Das Attribut `fun_name` dient später dazu den **Block** dieser Funktion zu finden, weil dieser für den weiteren Kompiliervorang wichtige Information in seinen versteckte Attributen gespeichert hat. Des Weiteren ist das Attribut `goto_after_call` ein `GoTo(Name('addr@next_instr'))`, welches später durch die **Adresse** des Befehls, der direkt auf die **Jump Instruction** folgt, ersetzt wird.
`RemoveStackframe()`	Container für das **Entfernen** des aktuellen **Stackframes** durch das **Wiederherstellen** des im noch **aktuellen Stackframe** gespeicherten Werts des `BAF`-Registes der **aufrufenden Funktion** und das Setzen des `SP`-Registers auf den Wert des `BAF`-Registesr **vor** der Wiederherstellung.
`File(name, decls_defs_blocks)`	Container für alle **Funkionen** oder **Blöcke**, welche eine Datei als Ursprung haben, wobei `name` der **Dateiname** der Datei ist, die erstellt wird und `decls_defs_blocks` eine Liste von **Funktionen** bzw. **Blöcken** ist.
`Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size)`	Container für **Statements**, der auch als **Block** bezeichnet wird, wobei das Attribut `name` der Bezeichners des **Labels** (Definition 1.2) 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 **Kompiliervorangs** 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-Intepreter** 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 1.6: *PicoC-Knoten Teil 4*

Definition 1.2: Label

*Durch einen **Bezeichner eindeutig** zuordenbares **Sprungziel** im Programmcode.*[a]

[a] Thiemann, „Compilerbau“.

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 Kompiliervorgang **Informationen** transportiert, die später im Kompiliervorgang nicht mehr so leicht zugänglich wären.

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

Definition 1.3: Token-Knoten

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

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

[a] Thiemann, „Compilerbau“.

Definition 1.4: Container-Knoten

*Dient als **Container** für andere **Container-Knoten** und **Token-Knoten**. Die **Container-Knoten** werden optimalerweise immer so gewählt, dass sie **mehrere Produktionen** der **Konkretten 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]

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

1.2.5.2 RETI-Knoten

Bei den **RETI-Knoten** handelt es sich um Knoten, die irgendeinen **Ausdruck** aus der Sprache L_{RETI} darstellen. Für die **RETI-Knoten** wurden aus bereits in Unterkapitel 1.2.5.1 erläutertem Grund, genauso wie für die **RETI-Knoten** möglichst **kurze** und **leicht** verständliche Bezeichner gewählt. Alle **RETI-Knoten**, die in den von den verschiedenen Passes generierten **Abstract Syntax Trees** vorkommen sind in Tabelle 1.2.5.1 mit einem **Beschreibungstext** dokumentiert.

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 **Interrruptvektornummer** (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 **Programnamen**, 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()`	**R**eturn-**F**rom-**I**nterrupt Operation: `RTI`.
`Pc(), In1(), In2(), Acc(), Sp(), Baf(), Cs(), Ds()`	**Register**: `PC, IN1, IN2, ACC, SP, BAF, CS, DS`.

[a] Scholl, „Betriebssysteme“

Tabelle 1.7: *RETI-Knoten*

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

In Tabelle 1.8 sind jegliche **Kompositionen** von **PicoC-Knoten** und **RETI-Knoten** aufgelistet, die eine **besondere Bedeutung** haben und nicht bereits in der **Abstrakten Syntax** 1.2.8 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 versteckte 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 1.8: *Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung*

Um die obige Tabelle 1.8 nicht mit unnötig viel repetetiven Inhalt zu füllen, wurden die zahlreichen Kompostionen **ausgelassen**, bei denen einfach nur `exp` durch $\texttt{Stack}(\texttt{Num}('\texttt{x}')), \texttt{x} \in \mathbb{N}$ ersetzt wurde.

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

1.2.5.4 Abstrakte Syntax

Die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{PicoC} wird durch die Grammatik 1.2.10 beschrieben. Es ist die Aufgabe des **Parsers**, die Aufgabe möglicher **Visitors** und die Aufgabe des **Transformers** am Ende der **Syntaktischen Analyse** aus einem **Programm** in **Konkretter Syntax** einen **Abstract Syntax Tree** in **Abstrakter Syntax** zu generieren.

$stmt$	$::=$	$SingleLineComment(str, str) \mid RETIComment()$	*L_Comment*
un_op	$::=$	$Minus() \mid Not()$	*L_Arith*
bin_op	$::=$	$Add() \mid Sub() \mid Mul() \mid Div() \mid Mod()$	
	$\mid$	$Oplus() \mid And() \mid Or()$	
exp	$::=$	$Name(str) \mid Num(str) \mid Char(str)$	
	$\mid$	$BinOp(\langle exp\rangle, \langle bin\_op\rangle, \langle exp\rangle)$	
	$\mid$	$UnOp(\langle un\_op\rangle, \langle exp\rangle) \mid Call(Name('input'), Empty())$	
	$\mid$	$Call(Name('print'), \langle exp\rangle)$	
$stmt$	$::=$	$Exp(\langle exp\rangle)$	
un_op	$::=$	$LogicNot()$	*L_Logic*
rel	$::=$	$Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt() \mid GtE()$	
bin_op	$::=$	$LogicAnd() \mid LogicOr()$	
exp	$::=$	$Atom(\langle exp\rangle, \langle rel\rangle, \langle exp\rangle) \mid ToBool(\langle exp\rangle)$	
$type\_qual$	$::=$	$Const() \mid Writeable()$	*L_Assign_Alloc*
$datatype$	$::=$	$IntType() \mid CharType() \mid VoidType()$	
exp	$::=$	$Alloc(\langle type\_qual\rangle, \langle datatype\rangle, Name(str))$	
$stmt$	$::=$	$Assign(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle)$	
$datatype$	$::=$	$PntrDecl(Num(str), \langle datatype\rangle)$	*L_Pntr*
exp	$::=$	$Deref(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle) \mid Ref(\langle exp\rangle)$	
$datatype$	$::=$	$ArrayDecl(Num(str)+, \langle datatype\rangle)$	*L_Array*
exp	$::=$	$Subscr(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle) \mid Array(\langle exp\rangle+)$	
$datatype$	$::=$	$StructSpec(Name(str))$	*L_Struct*
exp	$::=$	$Attr(\langle exp\rangle, Name(str))$	
	$\mid$	$Struct(Assign(Name(str), \langle exp\rangle)+)$	
$decl\_def$	$::=$	$StructDecl(Name(str),$	
		$\quad Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))+)$	
$stmt$	$::=$	$If(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	*L_If_Else*
	$\mid$	$IfElse(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*, \langle stmt\rangle*)$	
$stmt$	$::=$	$While(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	*L_Loop*
	$\mid$	$DoWhile(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	
exp	$::=$	$Call(Name(str), \langle exp\rangle*)$	*L_Fun*
$stmt$	$::=$	$Return(\langle exp\rangle)$	
$decl\_def$	$::=$	$FunDecl(\langle datatype\rangle, Name(str),$	
		$\quad Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))*)$	
	$\mid$	$FunDef(\langle datatype\rangle, Name(str),$	
		$\quad Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))*, \langle stmt\rangle*)$	
$file$	$::=$	$File(Name(str), \langle decl\_def\rangle*)$	*L_File*

Grammar 1.2.10: *Abstrakte Syntax der Sprache* L_{PiocC}

Man spricht hier von der **„Abstrakten Syntax der Sprache** L_{PicoC}**“** und meint hier mit der Sprache L_{PicoC} **nicht** die Sprache, welche durch die **Abstrakte Syntax** beschrieben wird. Es ist damit **immer** die Sprache gemeint, die **kompiliert** werden soll und zu deren Zweck die **Abstrakt Syntax** überhaupt definiert wird. Für die tatsächliche Sprache, die durch die **Abstrakt Syntax** beschrieben wird, interessiert man sich nie wirklich explizit. Diese **Redeart** wurde aus der **Quelle** G. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)* übernommen.

1.2.5.5 Codebeispiel

In Code 1.4 ist der **Abstract Syntax Tree** zu sehen, der aus dem **vereinfachten Derivation Tree** aus Code 1.3 mithilfe eines **Transformers** generiert wurde.

```
File
  Name './verbose_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.ast',
  [
    StructDecl
      Name 'st',
      [
        Alloc
          Writeable,
          PntrDecl
            Num '1',
            ArrayDecl
              [
                Num '4',
                Num '5'
              ],
              PntrDecl
                Num '1',
                IntType 'int',
          Name 'attr'
      ],
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Exp
          Alloc
            Writeable,
            ArrayDecl
              [
                Num '3',
                Num '2'
              ],
              PntrDecl
                Num '1',
                PntrDecl
                  Num '1',
                  StructSpec
                    Name 'st',
            Name 'var'
      ]
  ]
```

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

1.2.5.6 Ausgabe des Abstract Syntax Tree

Ein **Knoten** eines **Abstract Syntax Tree** kann entweder in der **Konkretter Syntax** der Sprache, für dessen Kompilierung er generiert wurde oder in der **Abstrakter Syntax**, die beschreibt, wie der Abstract Syntax Tree selbst aufgebaut sein darf ausgegeben werden.

Das Ausgeben eines **Abstract Syntax Trees** wird im **PicoC-Compiler** über die **Magische Methode** `__repr__()`[10] der Programmiersprache **Python** umgesetzt. Sobald ein **PicoC-Knoten** oder **RETI-Knoten** ausgegeben werden soll, gibt seine Magische Methode `__repr__()` eine nach der **Abstrakten** oder **Konkretten Syntax** aufgebaute **Textrepräsentation** seiner selbst und all seiner Knoten mit an den richtigen Stellen passend gesetzten **runden öffnenden** `(` und **schließenden** `)` **Klammern**, sowie **Kommas** `','`, **Semikolons** `;` usw. zur Darstellung der **Hierarchie** und zur **Abtrennung** zurück. Dabei wird nach dem **Depth-First-Search** Schema der gesamte **Abstract Sybtax Tree** durchlaufen und die Magische `__repr__()`-Methode der verschiedenen Knoten aufgerufen, die immer jeweils die `__repr__()`-Methode ihrer Kinder aufrufen und die zurückgegebene **Textrepräsentation** passend **zusammenfügen** und selbst **zurückgeben**.

Im **PicoC-Compiler** wurden **Abstrakte** und **Konkrette Syntax** miteinander gemischt. Für **PicoC-Knoten** wurde die **Abstrakte Syntax** verwendet, da Passes schließlich auf **Abstract Syntax Trees** operieren. Bei **RETI-Knoten** wurde die **Konkrette Syntax** verwendet, da **Maschienenbefehle** in **Konkretter Syntax** schließlich das **Endprodukt** des Kompiliervorgangs sein sollen. Da die **Abstrakte Syntax** von **RETI-Knoten** so simpel ist, macht es kaum einen Unterschied in der Erkennbarkeit, bis auf fehlende gescheifte Klammern `()` usw., ob man die **RETI-Knoten** in **Abstrakter** oder **Konkretter** Syntax schreibt. Daher kann man auch einfach gleich die **RETI-Knoten** in **Konkretter Syntax** ausgeben und muss nicht beim letzten **Pass** daran denken, am Ende die **Konkrette**, statt der **Abstrakten Syntax** für die **RETI-Knoten** auszugeben.

1.3 Code Generierung

1.3.1 Übersicht

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

Man steht nun dem Problem gegenüber einen **Abstract Syntax Tree** der Sprache L_{PicoC}, der durch die **Abstrakte Syntax** in Grammatik 1.2.10 spezifiziert ist in einen entsprechenden **Abstract Syntax Tree** der Sprache L_{RETI} umzuformen. Das ganze lässt sich, wie in Unterkapitel 1.3 bereits beschrieben vereinfachen, indem man dieses Problem in mehrere **Passes** (Definition **??**) herunterbricht.

Beim **PicoC-Compiler** handelt es sich um einen **Cross-Compiler** (Definiton **??**). Damit **RETI-Code** erzeugt werden kann, der auf der **RETI-Architektur** läuft, muss erst, wie im **T-Diagram** (siehe Unterkapitel **??**) in Abbildung 1.6 zu sehen ist, der **Python-Code** des **PicoC-Compilers** mittels eines Compilers, der z.B. auf einer $\texttt{X}_{86\_64}$-Architektur laufen könnte zu **Bytecode** kompiliert werden. Dieser **Bytecode** wird dann von der **Python-Virtual-Machine** (PVM) interpretiert, welche wiederum auf einer $\texttt{X}_{86\_64}$-Architektur laufen könnte. Und selbst dieses **T-Diagram** könnte noch ausführlicher ausgedrückt werden, indem nachgeforscht wird, in welcher Sprache eigentlich die **Python-Virtual-Machine** geschrieben war, bevor sie zu $\texttt{X}_{86\_64}$ kompiliert wurde usw.

[10] Spezielle Methode, die immer aufgerufen wird, wenn das **Object**, dass in Besitz dieser Methode ist als **String** mittels `print()` oder zur **Repräsentation** ausgegeben werden soll.

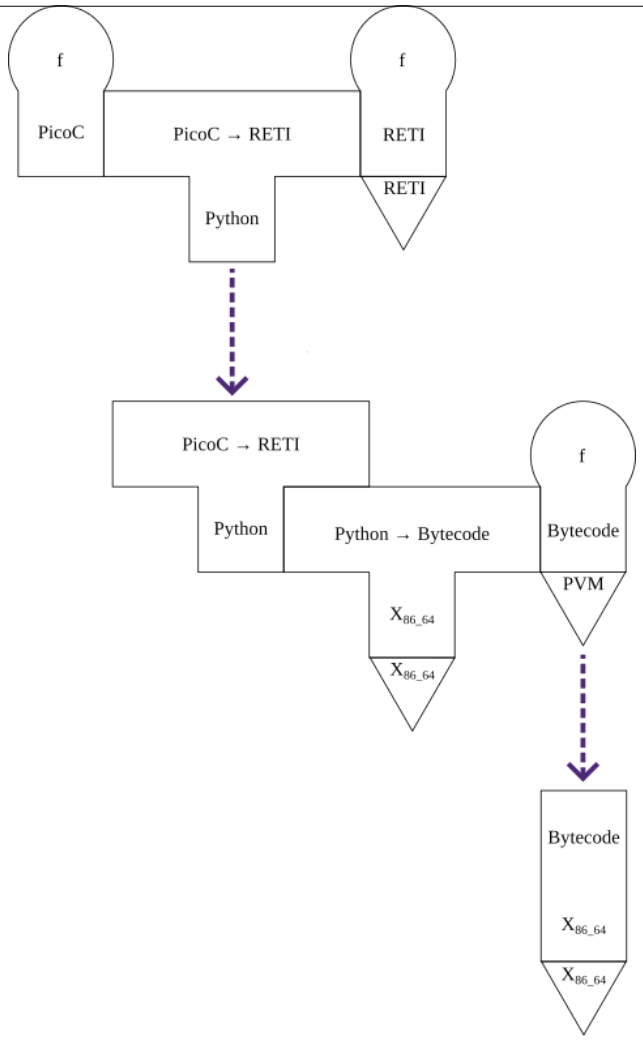

Abbildung 1.6: *Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben*

Dieses längliche **T-Diagram** in Abbildung 1.6 lässt sich zusammenfassen, sodass man das **T-Diagram** in Abbildung 1.7 erhält, in welcher direkt angegeben ist, dass der **PicoC-Compiler** in $\mathtt{X}_{86\_64}$-Maschienensprache geschrieben ist.

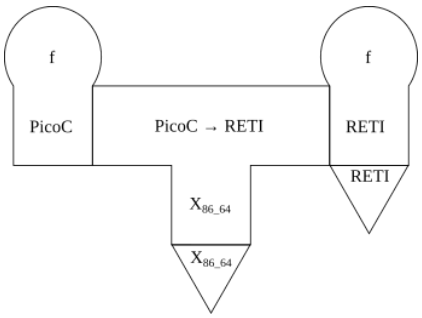

Abbildung 1.7: *Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform*

Nachdem der Kompilierprozess des **PicoC-Compiler** im **vertikalen** nun genauer angesehen wurde, wird

der Kompilierprozess im Folgenden im **horinzontalen**, auf der Ebene der verschiedenen **Passes** genauer betrachtet. Die Abbildung 1.8 gibt einen guten Überblick über alle **Passes** und wie diese in der **Pipe-Architektur** (Definition **??**) des **PicoC-Compilers** aufeinanderfolgen. In der **Pipe-Architektur** nutzt der jeweils nächste **Pass** den generierten **Abstract Syntax Tree** des vorherigen Passes oder der Syntaktischen Analyse, um einen eigenen **Abstract Syntax Tree** in seiner eigenen **Sprache** zu generieren.

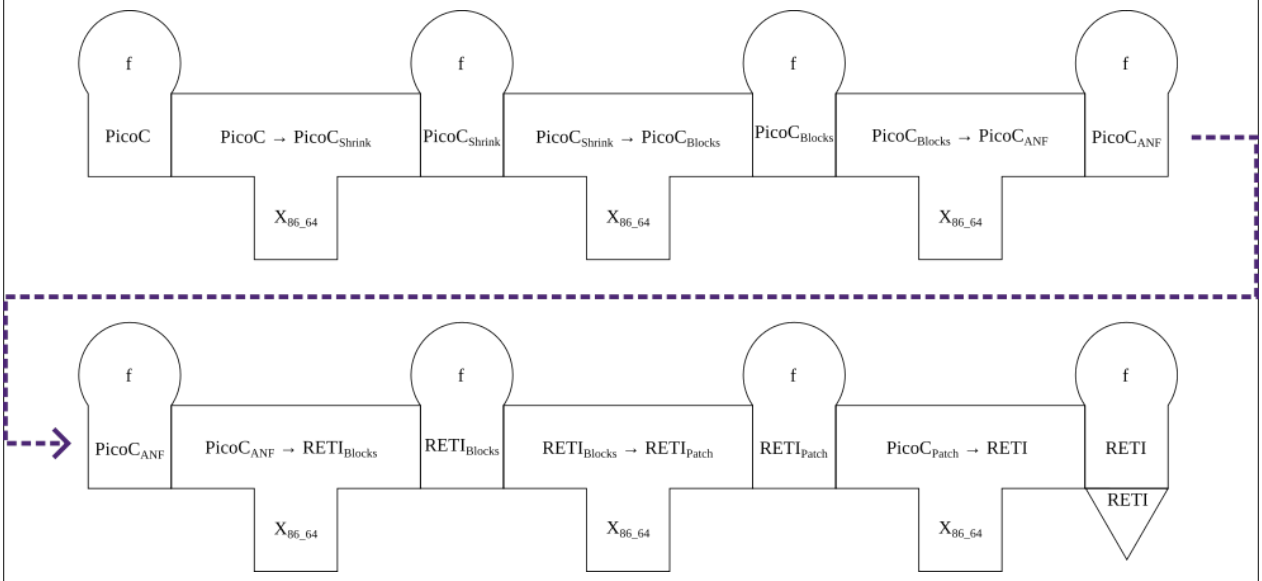

Abbildung 1.8: *Architektur mit allen Passes ausgeschrieben*

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

Um die verschiedenen Aspekte besser erklären zu können, werden **Codebeispiele** verwendet, in welchen ein kleines repräsentatives **PicoC-Programm** für einen spezifischen Aspekt in wichtigen **Zwischenstadien der Kompilierung** gezeigt wird[11]. Die **Codebeispiele** wurden alle mit dem **PicoC-Compiler** kompiliert und danach **nicht** mehr **verändert**, also genauso, wie der **PicoC-Compiler** sie kompiliert aus den Dateien in dieses Dokument eingelesen. Alle hier zur Repräsentation verwendeten **PicoC-Programme** lassen sich unter dem Link[12] finden und mithilfe der im Ordner `/code_examples` beiliegenden `Makefile` und dem Befehl `> make compile-all` genauso **kompilieren**, wie sie hier dargestellt sind[13].

1.3.2 Passes

Im Folgenden werden die verschiedenen **Passes** des **PicoC-Compilers** für die Generierung von **RETI-Code** besprochen. Viele dieser **Passes** haben **Aufgaben**, die eher unter die Themenbereiche des **Bachelorprojekts** fallen. Allerdings ist das Verständnis der **Passes** auch für das Verständnis der veschiedenen Aspekte[14] der

[11] Also die verschiedenen in den **Passes** generierten **Abstract Syntax Trees**, sofern der **Pass** für den gezeigten Aspekt relevant ist.
[12] https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit/tree/master/code_examples.
[13] Es wurden zu diesem Zweck spezielle neue **Command-line Optionen** erstellt, die bestimmte Kommentare **herausfiltern** und manche Container-Knoten **einzeilig** machen, damit die generierten **Abstract Syntax Trees** in den verscchiedenen Zwischenstufen der Kompilierung **nicht** zu langgestreckt und **überfüllt** mit Kommentaren sind.
[14] In kurz: **Pointer**, **Arrays**, **Strcuts** und **Funktionen**.

Bachelorarbeit wichtig.

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

1.3.2.1 PicoC-Shrink Pass

1.3.2.1.1 Aufgabe

Der Aufgabe des **PicoC-Shrink Pass** ist in Unterkapitel **??** ausführlich an einem Beispiel erklärt. Kurzgefasst hat der **PicoC-Shrink Pass** die Aufgabe, die Eigenheit auszunutzen, dass der **Dereferenzierungoperator** `*pntr` und die damit einhergehende **Pointer Arithmetik** `*(pntr + i)` sich in der Untermenge der Sprache L_C, welche die Sprache L_{PicoC} darstellt genau gleich verhält, wie der **Operator** für den **Zugriff** auf den **Index** eines **Arrays** `ar[i]`.

Daher wandelt der **PicoC-Shrink Pass** alle Verwendungen des **Knoten** `Deref(exp, i)` im jeweiligen **Abstract Syntax Tree** in **Knoten** `Subscr(exp, i)` um, sodass sich dadurch viele vermeidbare **Fallunterscheidungen** und **doppelter Code** bei der Implementierung vermeiden lassen. Man lässt die **Derefenzierung** `*(var + i)` einfach von den Routinen für einen **Zugriff auf einen Arrayindex** `var[i]` übernehmen.

1.3.2.1.2 Abstrakte Syntax

Die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{PicoC_Shrink} in Tabelle 1.3.1 ist fast **identisch** mit der **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{PiocC} in Tabelle 1.2.10, nach welcher der **erste** Abstract Syntax Tree in der **Syntaktischen Analyse** generiert wurde. Der einzige **Unterschied** liegt darin, dass es den Knoten `Deref(exp, exp)` in Tabelle 1.3.1 **nicht** mehr gibt. Das liegt daran, dass dieser Pass alle **Vorkommnisse** des Knoten `Deref(exp, exp)` durch den Knoten `Subscr(exp, exp)` auswechselt, der ebenfalls bereits in der **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{PicoC} definiert ist.

stmt	::=	$SingleLineComment(str, str) \mid RETIComment()$	*L_Comment*
un_op	::=	$Minus() \mid Not()$	*L_Arith*
bin_op	::=	$Add() \mid Sub() \mid Mul() \mid Div() \mid Mod()$	
	|	$Oplus() \mid And() \mid Or()$	
exp	::=	$Name(str) \mid Num(str) \mid Char(str)$	
	|	$BinOp(\langle exp\rangle, \langle bin\_op\rangle, \langle exp\rangle)$	
	|	$UnOp(\langle un\_op\rangle, \langle exp\rangle) \mid Call(Name('input'), Empty())$	
	|	$Call(Name('print'), \langle exp\rangle)$	
stmt	::=	$Exp(\langle exp\rangle)$	
un_op	::=	$LogicNot()$	*L_Logic*
rel	::=	$Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt() \mid GtE()$	
bin_op	::=	$LogicAnd() \mid LogicOr()$	
exp	::=	$Atom(\langle exp\rangle, \langle rel\rangle, \langle exp\rangle) \mid ToBool(\langle exp\rangle)$	
type_qual	::=	$Const() \mid Writeable()$	*L_Assign_Alloc*
datatype	::=	$IntType() \mid CharType() \mid VoidType()$	
exp	::=	$Alloc(\langle type\_qual\rangle, \langle datatype\rangle, Name(str))$	
stmt	::=	$Assign(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle)$	
datatype	::=	$PntrDecl(Num(str), \langle datatype\rangle)$	*L_Pntr*
exp	::=	$Deref(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle) \mid Ref(\langle exp\rangle)$	
datatype	::=	$ArrayDecl(Num(str)+, \langle datatype\rangle)$	*L_Array*
exp	::=	$Subscr(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle) \mid Array(\langle exp\rangle+)$	
datatype	::=	$StructSpec(Name(str))$	*L_Struct*
exp	::=	$Attr(\langle exp\rangle, Name(str))$	
	|	$Struct(Assign(Name(str), \langle exp\rangle)+)$	
decl_def	::=	$StructDecl(Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))+)$	
stmt	::=	$If(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	*L_If_Else*
	|	$IfElse(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*, \langle stmt\rangle*)$	
stmt	::=	$While(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	*L_Loop*
	|	$DoWhile(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	
exp	::=	$Call(Name(str), \langle exp\rangle*)$	*L_Fun*
stmt	::=	$Return(\langle exp\rangle)$	
decl_def	::=	$FunDecl(\langle datatype\rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))*)$	
	|	$FunDef(\langle datatype\rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))*, \langle stmt\rangle*)$	
file	::=	$File(Name(str), \langle decl\_def\rangle*)$	*L_File*

Grammar 1.3.1: *Abstrakte Syntax der Sprache* L_{PiocC_Shrink}

Der rot markierte Knoten bedeutet, dass dieser im Vergleich zur voherigen **Abstrakten Syntax** nicht mehr da ist.

1.3.2.1.3 Codebeispiel

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

aus der Vorlesung Scholl, „Betriebssysteme“, welcher in der Vorlesung allerdings **rekursiv** implementiert ist.

Dieser **rekursive** Algoirthmus ist allerdings **kein** gutes **Anschaungsbeispiel**, dass viele der Aufgaben der verschiedenen **Passes** bei der Kompilierung veranschaulicht hätte. Viele Aufgaben der **Passes**, wie z.B. bei der Kompilierung von `if-`, `if-else-`, `while-` und `do-while`-Statements wären im Beispiel aus der Vorlesung **nicht** enthalten gewesen. Daher wurde das Beispiel aus der Vorlesung zu einem **iterativen** Algorithmus 1.5 umgeschrieben, um `if-` und `while`-Statemtens zu enthalten.

Beide Varianten des **Algorithmus** wurden zum **Testen** des PicoC-Compilers verwendet und sind als Tests im Ordner `/tests` unter Link[15], unter den Testbezeichnungen `example_faculty_rec.picoc` und `example_faculty_it.picoc` zu finden.

Die Codebeispiele in diesem und den folgenden Unterkapiteln dienen allerdings nur als **Anschauung** des jeweiligen **Passes**, der in diesem Unterkapitel beschrieben wird und werden nicht im Detail erläutert, da viele Details der Passes später in den Unterkapiteln **??**, **??**, **??** und **??** zu **Pointern**, **Arrays**, **Structs** und **Funktionen** mit eigenen **Codebeispielen** erklärt werden und alle sonstigen Details dem **Bachelorprojekt** zuzurechnen sind.

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

Code 1.5: *PicoC Code für Codebespiel*

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

```
1  File
2    Name './example_faculty_it.ast',
3    [
4      FunDef
5        IntType 'int',
6        Name 'faculty',
7        [
8          Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('n'))
9        ],
```

[15] https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/tree/new_architecture/tests.

```
10      [
11        Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1')),
12        While
13          Num '1',
14          [
15            If
16              Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')),
17              [
18                Return(Name('res'))
19              ]
20            Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
21            Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
22          ]
23      ],
24    FunDef
25      VoidType 'void',
26      Name 'main',
27      [],
28      [
29        Exp(Call(Name('print'), [Call(Name('faculty'), [Num('4')])]))
30      ]
31  ]
```

Code 1.6: *Abstract Syntax Tree für Codebespiel*

Im **PicoC-Shrink-Pass** ändert sich nichts im Vergleich zum **Abstract Syntax Tree** in Code 1.6, da das Codebeispiel keine **Dereferenzierung** enthält.

1.3.2.2 PicoC-Blocks Pass

1.3.2.2.1 Aufgabe

Die Aufgabe des **PicoC-Blocks Passes** ist es die Knoten `If(exp, stmts)`, `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`, `While(exp, stmts)` und `DoWhile(exp, stmts)` mithilfe von `Block(name, stmts_instrs-`, `GoTo(lable)-` und `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`-Knoten umzusetzen. Der `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`-Knoten wird zur Umsetzung der **Bedingung** verwendet und es wird, je nachdem, ob die Bedingung **wahr** oder **falsch** ist mithilfe der `GoTo(label)`-Knoten in einen von zwei **alternativen Branches** gesprungen oder ein **Branch** erneut aufgerufen usw.

1.3.2.2.2 Abstrakte Syntax

Zur Umsetzung dieses Passes ist es notwendig die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{PicoC_Shrink} in Tabelle 1.3.1 um die Knoten zu erweitern, die im Unterkapitel 1.3.2.2.1 erwähnt wurden. Die Knoten `If(exp, stmts)`, `While(exp, stmts)` und `DoWhile(exp, stmts)` gibt es nicht mehr, da sie durch `Block(name, stmts_instrs-`, `GoTo(lable)-` und `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`-Knoten ersetzt wurden. Die **Funktionsdefinition** `FunDef(⟨datatype⟩, Name(str), Alloc(Writeable(), ⟨datatype⟩, Name(str))*, ⟨block⟩*)` ist nun ein Container für **Blöcke** `Block(Name(str), ⟨stmt⟩*)` und keine Statements `stmt` mehr. Das resultiert in der **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{PicoC_Blocks} in Tabelle 1.3.2.

stmt	::=	$SingleLineComment(str, str) \mid RETIComment()$	*L_Comment*
un_op	::=	$Minus() \mid Not()$	*L_Arith*
bin_op	::=	$Add() \mid Sub() \mid Mul() \mid Div() \mid Mod()$	
	|	$Oplus() \mid And() \mid Or()$	
exp	::=	$Name(str) \mid Num(str) \mid Char(str)$	
	|	$BinOp(\langle exp\rangle, \langle bin\_op\rangle, \langle exp\rangle)$	
	|	$UnOp(\langle un\_op\rangle, \langle exp\rangle) \mid Call(Name('input'), Empty())$	
	|	$Call(Name('print'), \langle exp\rangle)$	
stmt	::=	$Exp(\langle exp\rangle)$	
un_op	::=	$LogicNot()$	*L_Logic*
rel	::=	$Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt() \mid GtE()$	
bin_op	::=	$LogicAnd() \mid LogicOr()$	
exp	::=	$Atom(\langle exp\rangle, \langle rel\rangle, \langle exp\rangle) \mid ToBool(\langle exp\rangle)$	
type_qual	::=	$Const() \mid Writeable()$	*L_Assign_Alloc*
datatype	::=	$IntType() \mid CharType() \mid VoidType()$	
exp	::=	$Alloc(\langle type\_qual\rangle, \langle datatype\rangle, Name(str))$	
stmt	::=	$Assign(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle)$	
datatype	::=	$PntrDecl(Num(str), \langle datatype\rangle)$	*L_Pntr*
exp	::=	$Ref(\langle exp\rangle)$	
datatype	::=	$ArrayDecl(Num(str)+, \langle datatype\rangle)$	*L_Array*
exp	::=	$Subscr(\langle exp\rangle, \langle exp\rangle) \mid Array(\langle exp\rangle+)$	
datatype	::=	$StructSpec(Name(str))$	*L_Struct*
exp	::=	$Attr(\langle exp\rangle, Name(str))$	
	|	$Struct(Assign(Name(str), \langle exp\rangle)+)$	
decl_def	::=	$StructDecl(Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))+)$	
stmt	::=	$If(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	*L_If_Else*
	|	$IfElse(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*, \langle stmt\rangle*)$	
stmt	::=	$While(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	*L_Loop*
	|	$DoWhile(\langle exp\rangle, \langle stmt\rangle*)$	
exp	::=	$Call(Name(str), \langle exp\rangle*)$	*L_Fun*
stmt	::=	$Return(\langle exp\rangle)$	
decl_def	::=	$FunDecl(\langle datatype\rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))*)$	
	|	$FunDef(\langle datatype\rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype\rangle, Name(str))*, \langle block\rangle*)$	
block	::=	$Block(Name(str), \langle stmt\rangle*)$	*L_Blocks*
stmt	::=	$GoTo(Name(str))$	
file	::=	$File(Name(str), \langle decl\_def\rangle*)$	*L_File*

Grammar 1.3.2: *Abstrakte Syntax der Sprache* L_{PiocC_Blocks}

Alles rot markierte bedeutet, es wurde **entfernt** oder **abgeändert**. Alles ausgegraute bedeutet, es hat sich im Vergleich zur letzten Abstrakten Syntax **nichts** geändert. Alle normal in `schwarz` geschriebenen Knoten wurden **neu** hinzugefügt.

Die **Abstrakte Syntax** soll im Gegensatz zur **Konkretten Syntax** meist nur vom **Programmierer**

verstanden werden, der den Compiler implementiert und sollte daher vor allem **einfach verständlich** sein und stellt daher eine **Obermenge** aller tatsächlich möglichen **Kompositionen** von **Knoten** dar[a].

Man bezeichnet hier die **Abstrakte Syntax** als **„Abstrakte Syntax der Sprache** L_{Picoc_Blocks}**“**. Diese Sprache L_{Picoc_Blocks} wird durch eine **Konkrette Syntax** beschrieben, die allerdings nicht weiter relevant ist, da in den **Passes** nur **Abstract Syntax Trees** umgeformt werden. Es ist hierbei nur wichtig zu wissen, dass die **Abstrakte Syntax** theoretisch zur Kompilierung der Sprache L_{Picoc_Blocks} definiert ist, also die Sprache L_{PicoC_Blocks} nicht die Sprache ist, die von der **Abstrakten Syntax** beschrieben ist.

[a] D.h. auch wenn dort `exp` als **Attribut** steht, kann dort **nicht** jeder Knoten, der sich aus der **Produktion** `exp` ergibt auch wirklich eingesetzt werden.

1.3.2.2.3 Codebeispiel

In Code 1.7 sieht man den **Abstract-Syntax-Tree** des **PiocC-Blocks Passes** für das aus Unterkapitel 1.5 weitergeführte Beispiel, indem nun eigene **Blöcke** für die Funktion `faculty` und die `main`-Funktion erstellt werden, in denen die **ersten** Statements der jeweiligen Funktionen bis zum **letzten** Statement oder bis zum ersten **Auftauchen** eines `If(exp, stmts)`-, `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`-, `While(exp, stmts)`- oder `DoWhile(exp, stmts)`-Knoten stehen. Je nachdem, ob ein `If(exp, stmts)`-, `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`-, `While(exp, stmts)`- oder `DoWhile(exp, stmts)`-Knoten auftaucht, werden für die **Bedingung** und mögliche **Branches** eigene **Blöcke** erstellt.

```
File
  Name './example_faculty_it.picoc_blocks',
  [
    FunDef
      IntType 'int',
      Name 'faculty',
      [
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('n'))
      ],
      [
        Block
          Name 'faculty.6',
          [
            Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1'))
            // While(Num('1'), [])
            GoTo(Name('condition_check.5'))
          ],
        Block
          Name 'condition_check.5',
          [
            IfElse
              Num '1',
              [
                GoTo(Name('while_branch.4'))
              ],
              [
                GoTo(Name('while_after.1'))
              ]
          ],
        Block
          Name 'while_branch.4',
```

```
32          [
33            // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), []),
34            IfElse
35              Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')),
36              [
37                GoTo(Name('if.3'))
38              ],
39              [
40                GoTo(Name('if_else_after.2'))
41              ]
42          ],
43        Block
44          Name 'if.3',
45          [
46            Return(Name('res'))
47          ],
48        Block
49          Name 'if_else_after.2',
50          [
51            Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
52            Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
53            GoTo(Name('condition_check.5'))
54          ],
55        Block
56          Name 'while_after.1',
57          []
58      ],
59    FunDef
60      VoidType 'void',
61      Name 'main',
62      [],
63      [
64        Block
65          Name 'main.0',
66          [
67            Exp(Call(Name('print'), [Call(Name('faculty'), [Num('4')])]))
68          ]
69      ]
70  ]
```

Code 1.7: *PicoC-Blocks Pass für Codebespiel*

1.3.2.3 PicoC-ANF Pass

1.3.2.3.1 Aufgabe

Die Aufgabe des **PicoC-ANF Passes** ist es den **Abstract Syntax Tree** der Sprache L_{PicoC_Blocks} in die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{PicoC_ANF} umzuformen, welche in **A-Normalform** (Definition **??**) und damit auch in **Monadischer Normalform** (Definition **??**) ist. Um Wiederholung zu vermeiden wird zur Erklärung der **A-Normalform** auf Unterkapitel **??** verwiesen.

Zudem wird eine **Symboltabelle** (Definition 1.5) eingeführt. In der **Symboltabelle** wird beim Anlegen eines **neuen Eintrags** für eine Variable zunächst eine **Adresse** zugewiesen, die dem Wert einer von zwei **Countern** `rel_global_addr` und `rel_stack_addr` entspricht. Der Counter `rel_global_addr` ist für Variablen in den **Globalen Statischen Daten** und der **Counter** `rel_stack_addr` ist für Variablen auf dem **Stackframe**. Einer der beiden **Counter** wird entsprechend der **Größe** der angelegten Variable **hochgezählt**.

Kommt im **Programmcode** an einer späteren Stelle diese Variable `Name('symbol')` vor, so wird mit dem **Symbol**[16] als Schlüssel in der **Symboltabelle** nachgeschlagen und anstelle des `Name(str)`-Knotens die in der **Symboltabelle** nachgeschlagene Adresse in einem `Global(Num('addr'))`- bzw. `Stackframe(Num('addr'))`-Knoten eingesetzt eingefügt. Ob der `Global(Num('addr'))`- oder der `Stackframe(Num('addr'))`-Knoten zum Einsatz kommt, entscheidet sich anhand des **Scopes** (z.B. `@scope`), der in der **Symboltabelle** an den **Bezeichner** drangehängt ist (z.B. `identifier@scope`).[17]

Definition 1.5: Symboltabelle

*Eine über ein **Assoziatives Feld** umgesetzte **Datenstruktur**, die notwendig ist, um das Konzept einer **Variablen** in einer Sprache umzusetzen. Diese Datenstruktur ordnet jedem **Symbol**[a] einer **Variablen**, **Konstanten** oder **Funktion** aus einem **Programm**, Informationen, wie die **Adresse**, die **Position** im Programmcode oder den **Datentyp** zu.*

*Die **Symboltabelle** muss nur während des **Kompiliervorgangs** im **Speicher** existieren, da die Einträge in der **Symboltabelle** beeinflussen, was für **Maschinencode** generiert wird und dadurch im **Maschinencode** bereits die richtigen **Adressen** usw. angesprochen werden und es die Symboltabelle selbst **nicht** mehr braucht.*

[a] In einer **Symboltabelle** werden **Bezeichner** als **Symbole** bezeichnet.

1.3.2.3.2 Abstrakte Syntax

Zur Umsetzung dieses Passes ist es notwendig die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{PicoC_Blocks} in Tabelle 1.3.2 in die **A-Normalform** zu bringen. Darunter fällt es unter anderem, dafür zu sorgen, dass **Komplexe Knoten**, wie z.B. `BinOp(exp, bin_op, exp)` nur **Atomare Knoten**, wie z.B. `Stack(Num(str))` enthalten können. Des Weiteren werden auch **Funktionen** und **Funktionsaufrufe** aufgelöst, sodass u.a. die **Blöcke** `Block(Name(str), stmt*)` nun direkt im `File(Name(str), block*)`-Knoten liegen usw., was in Unterkapitel **??** genauer erklärt wird. Die **Symboltabelle** ist ebenfalls als **Abstract Syntax Tree** umgesetzt, wofür in der **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{PicoC_ANF} in Grammatik 1.3.3 neue Knoten eingeführt werden.

Das ganze resultiert in der **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{PicoC_ANF} in Grammatik 1.3.3.

[16] Bzw. der **Bezeichner**
[17] Die Umsetzung von **Scopes** wird in Unterkapitel **??** genauer beschrieben.

stmt	::=	*SingleLineComment*(*str*, *str*) | *RETIComment*()	*L_Comment*
un_op	::=	*Minus*() | *Not*()	*L_Arith*
bin_op	::=	*Add*() | *Sub*() | *Mul*() | *Div*() | *Mod*()	
	|	*Oplus*() | *And*() | *Or*()	
exp	::=	*Name*(*str*) | *Num*(*str*) | *Char*(*str*) | *Global*(*Num*(*str*))	
	|	*Stackframe*(*Num*(*str*)) | *Stack*(*Num*(*str*))	
	|	*BinOp*(*Stack*(*Num*(*str*)), ⟨*bin_op*⟩, *Stack*(*Num*(*str*)))	
	|	*UnOp*(⟨*un_op*⟩, *Stack*(*Num*(*str*))) | *Call*(*Name*('*input*'), *Empty*())	
	|	*Call*(*Name*('*print*'), ⟨*exp*⟩)	
	|	*Exp*(⟨*exp*⟩)	
un_op	::=	*LogicNot*()	*L_Logic*
rel	::=	*Eq*() | *NEq*() | *Lt*() | *LtE*() | *Gt*() | *GtE*()	
bin_op	::=	*LogicAnd*() | *LogicOr*()	
exp	::=	*Atom*(*Stack*(*Num*(*str*)), ⟨*rel*⟩, *Stack*(*Num*(*str*)))	
	|	*ToBool*(*Stack*(*Num*(*str*)))	
type_qual	::=	*Const*() | *Writeable*()	*L_Assign_Alloc*
datatype	::=	*IntType*() | *CharType*() | *VoidType*()	
exp	::=	*Alloc*(⟨*type_qual*⟩, ⟨*datatype*⟩, *Name*(*str*))	
stmt	::=	*Assign*(*Global*(*Num*(*str*)), *Stack*(*Num*(*str*)))	
	|	*Assign*(*Stackframe*(*Num*(*str*)), *Stack*(*Num*(*str*)))	
	|	*Assign*(*Stack*(*Num*(*str*)), *Global*(*Num*(*str*)))	
	|	*Assign*(*Stack*(*Num*(*str*)), *Stackframe*(*Num*(*str*)))	
datatype	::=	*PntrDecl*(*Num*(*str*), ⟨*datatype*⟩)	*L_Pntr*
	|	*Ref*(*Global*(*str*)) | *Ref*(*Stackframe*(*str*))	
	|	*Ref*(*Subscr*(⟨*exp*⟩, ⟨*exp*⟩ | *Ref*(*Attr*(⟨*exp*⟩, *Name*(*str*))))	
datatype	::=	*ArrayDecl*(*Num*(*str*)+, ⟨*datatype*⟩)	*L_Array*
exp	::=	*Subscr*(⟨*exp*⟩, *Stack*(*Num*(*str*))) | *Array*(⟨*exp*⟩+)	
datatype	::=	*StructSpec*(*Name*(*str*))	*L_Struct*
exp	::=	*Attr*(⟨*exp*⟩, *Name*(*str*))	
	|	*Struct*(*Assign*(*Name*(*str*), ⟨*exp*⟩)+)	
decl_def	::=	*StructDecl*(*Name*(*str*), *Alloc*(*Writeable*(), ⟨*datatype*⟩, *Name*(*str*))+)	
stmt	::=	*IfElse*(*Stack*(*Num*(*str*)), ⟨*stmt*⟩∗, ⟨*stmt*⟩∗)	*L_If_Else*
exp	::=	*Call*(*Name*(*str*), ⟨*exp*⟩∗)	*L_Fun*
stmt	::=	*StackMalloc*(*Num*(*str*)) | *NewStackframe*(*Name*(*str*), *GoTo*(*str*))	
	|	*Exp*(*GoTo*(*Name*(*str*))) | *RemoveStackframe*()	
	|	*Return*(*Empty*()) | *Return*(⟨*exp*⟩)	
decl_def	::=	*FunDecl*(⟨*datatype*⟩, *Name*(*str*) *Alloc*(*Writeable*(), ⟨*datatype*⟩, *Name*(*str*))∗)	
	|	*FunDef*(⟨*datatype*⟩, *Name*(*str*), *Alloc*(*Writeable*(), ⟨*datatype*⟩, *Name*(*str*))∗, ⟨*block*⟩∗)	
block	::=	*Block*(*Name*(*str*), ⟨*stmt*⟩∗)	*L_Blocks*
stmt	::=	*GoTo*(*Name*(*str*))	
file	::=	*File*(*Name*(*str*), ⟨*block*⟩∗)	*L_File*
symbol_table	::=	*SymbolTable*(⟨*symbol*⟩∗)	*L_Symbol_Table*
symbol	::=	*Symbol*(⟨*type_qual*⟩, ⟨*datatype*⟩, ⟨*name*⟩, ⟨*val*⟩, ⟨*pos*⟩, ⟨*size*⟩)	
type_qual	::=	*Empty*()	
datatype	::=	*BuiltIn*() | *SelfDefined*()	
name	::=	*Name*(*str*)	
val	::=	*Num*(*str*) | *Empty*()	
pos	::=	*Pos*(*Num*(*str*), *Num*(*str*)) | *Empty*()	
size	::=	*Num*(*str*) | *Empty*()	

Grammar 1.3.3: *Abstrakte Syntax der Sprache* L_{PiocC_ANF}

1.3.2.3.3 Codebeispiel

In Code 1.8 sieht man den **Abstract-Syntax-Tree** des **PiocC-ANF Passes** für das aus Unterkapitel 1.5 weitergeführte Beispiel, indem alls Statements und Ausdrücke in **A-Normalform** sind. Die `IfElse(exp, stmts, stmts)`-Knoten sind hier in **A-Normalform** gebracht worden, indem ihre **Komplexe Bedingung** vorgezogen wurde und das Ergebnis der **Komplexen Bedingung** einer **Location** zugewiesen ist und sie selbst das Ergebnis über den **Atomaren Ausdruck** `Stack(Num(str))` vom Stack lesen: `IfElse(Stack(Num(str)), stmts, stmts)`. **Funktionen** sind nur noch über die **Labels** von Blöcken zu erkennen, die den gleichen Bezeichner haben, wie die ursprüngliche Funktion und es lässt sich nur durch das **Nachverfolgen** der `GoTo(Name('label'))`-Knoten nachvollziehen, was ursprünglich zur Funktion gehörte.

```
File
 Name './example_faculty_it.picoc_mon',
 [
   Block
     Name 'faculty.6',
     [
       // Assign(Name('res'), Num('1'))
       Exp(Num('1'))
       Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
       // While(Num('1'), [])
       Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
     ],
   Block
     Name 'condition_check.5',
     [
       // IfElse(Num('1'), [], [])
       Exp(Num('1')),
       IfElse
         Stack
           Num '1',
         [
           GoTo(Name('while_branch.4'))
         ],
         [
           GoTo(Name('while_after.1'))
         ]
     ],
   Block
     Name 'while_branch.4',
     [
       // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
       // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
       Exp(Stackframe(Num('0')))
       Exp(Num('1'))
       Exp(Atom(Stack(Num('2')), Eq('=='), Stack(Num('1')))),
       IfElse
         Stack
           Num '1',
         [
           GoTo(Name('if.3'))
         ],
         [
           GoTo(Name('if_else_after.2'))
         ]
     ],
```

```
46    Block
47      Name 'if.3',
48      [
49        // Return(Name('res'))
50        Exp(Stackframe(Num('1')))
51        Return(Stack(Num('1')))
52      ],
53    Block
54      Name 'if_else_after.2',
55      [
56        // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
57        Exp(Stackframe(Num('0')))
58        Exp(Stackframe(Num('1')))
59        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
60        Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
61        // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
62        Exp(Stackframe(Num('0')))
63        Exp(Num('1'))
64        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
65        Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
66        Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
67      ],
68    Block
69      Name 'while_after.1',
70      [
71        Return(Empty())
72      ],
73    Block
74      Name 'main.0',
75      [
76        StackMalloc(Num('2'))
77        Exp(Num('4'))
78        NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
79        Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
80        RemoveStackframe()
81        Exp(ACC)
82        Exp(Call(Name('print'), [Stack(Num('1'))]))
83        Return(Empty())
84      ]
85  ]
```

Code 1.8: *PicoC-ANF Pass für Codebespiel*

1.3.2.4 RETI-Blocks Pass

1.3.2.4.1 Aufgabe

Die Aufgabe des **RETI-Blocks Passes** ist es die **Statements** in der **Blöcken**, die durch **PicoC-Knoten** im **Abstract Syntax Tree** der Sprache L_{PicoC_ANF} dargestellt sind durch ihren entsprechenden **RETI-Knoten** zu ersetzen.

1.3.2.4.2 Abstrakte Syntax

Die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{RETI_Blocks} in Grammatik 1.3.4 ist verglichen mit der **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{PicoC_ANF} in Grammatik 1.3.3 stark verändert, denn der Großteil der **PicoC-Knoten** wird in diesem Pass durch entsprechende **RETI-Knoten** ersetzt. Die einzigen verbleibenden **PicoC-Knoten**

sind `Exp(GoTo(str))`, `Block(Name(str), ⟨instr⟩*)` und `File(Name(str), ⟨block⟩*)`, da das gesamte Konzept mit den **Blöcken** erst im **RETI-Pass** in Unterkapitel 1.3.8 aufgelöst wird.

reg	$::=$	$ACC() \mid IN1() \mid IN2() \mid PC() \mid SP() \mid BAF()$	*L_RETI*
	$\mid$	$CS() \mid DS()$	
arg	$::=$	$Reg(\langle reg \rangle) \mid Num(str)$	
rel	$::=$	$Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt() \mid GtE()$	
	$\mid$	$Always() \mid NOp()$	
op	$::=$	$Add() \mid Addi() \mid Sub() \mid Subi() \mid Mult() \mid Multi()$	
	$\mid$	$Div() \mid Divi() \mid Mod() \mid Modi() \mid Oplus() \mid Oplusi()$	
	$\mid$	$Or() \mid Ori() \mid And() \mid Andi()$	
	$\mid$	$Load() \mid Loadin() \mid Loadi() \mid Store() \mid Storein() \mid Move()$	
$instr$	$::=$	$Instr(\langle op \rangle, \langle arg \rangle+) \mid Jump(\langle rel \rangle, Num(str)) \mid Int(Num(str))$	
	$\mid$	$RTI() \mid Call(Name('print'), \langle reg \rangle) \mid Call(Name('input'), \langle reg \rangle)$	
	$\mid$	$SingleLineComment(str, str)$	
	$\mid$	$Instr(Loadi(), [Reg(Acc()), GoTo(Name(str))]) \mid Jump(Eq(), GoTo(Name(str)))$	
$instr$	$::=$	$Exp(GoTo(str))$	*L_PicoC*
$block$	$::=$	$Block(Name(str), \langle instr \rangle*)$	
$file$	$::=$	$File(Name(str), \langle block \rangle*)$	

Grammar 1.3.4: *Abstrakte Syntax der Sprache* L_{RETI_Blocks}

1.3.2.4.3 Codebeispiel

In Code 1.9 sieht man den **Abstract-Syntax-Tree** des **RETI-Blocks Passes** für das aus Unterkapitel 1.5 weitergeführte Beispiel, indem die **Statements**, die durch entsprechende **PicoC-Knoten** im **Abstrakt Syntax Tree** der Sprache L_{PicoC_ANF} in Grammatik 1.3.3 repräsentiert waren nun durch ihre entsprechennden **RETI-Knoten** ersetzt werden.

```
File
  Name './example_faculty_it.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'faculty.6',
      [
        # // Assign(Name('res'), Num('1'))
        # Exp(Num('1'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 1;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
        LOADIN SP ACC 1;
        STOREIN BAF ACC -3;
        ADDI SP 1;
        # // While(Num('1'), [])
        # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
        Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
      ],
    Block
      Name 'condition_check.5',
      [
        # // IfElse(Num('1'), [], [])
        # Exp(Num('1'))
```

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

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

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

Code 1.9: *RETI-Blocks Pass für Codebespiel*

Wenn der **Abstract Syntax Tree** ausgegeben wird, ist die Darstellung nicht ausschließlich in **Abstrakter Syntax**, da die **RETI-Knoten** aus bereits im Unterkapitel 1.2.5.6 vermitteltem Grund in **Konkretter Syntax** ausgeben werden.

1.3.2.5 RETI-Patch Pass

1.3.2.5.1 Aufgabe

Die Aufgabe des **RETI-Patch Passes** ist das **Ausbessern** (engl. to patch) des **Abstract Syntax Trees**, durch:

- das **Einfügen** eines `start.<nummer>`-Blockes, welcher ein `GoTo(Name('main'))` zur `main`-Funktion enthält, wenn in manchen Fällen die `main`-Funktion **nicht** die erste Funktion ist und daher am Anfang zur `main`-Funktion gesprungen werden muss.
- das **Entfernen** von `GoTo()`'s, deren Sprung nur **eine** Adresse weiterspringen würde.
- das **Voranstellen** von **RETI-Knoten**, die vor jeder **Division** `Instr(Div(), args)` prüfen, ob, nicht durch `0` geteilt wird.[18]
- das Überprüfen darauf, ob bestimmte **Immediates** `Im(str)` in Befehlen, wie z.B. `Jump(rel, Im(str))`, `Instr(Loadin(), [reg, reg, Im(str)])`, `Instr(Loadi(), [reg, Im(str)])` usw. **kleiner** -2^{21} oder **größer** $2^{21} - 1$ sind. Im Fall dessen, dass es so ist, muss der **gewünschte Zahlenwert** durch **Bitshiften** und Anwenden von **bitweise Oder** berechnet werden. Im Fall, dessen, dass der **Immediate** allerdings **kleiner** $-(2^{31})$ oder **größer** $2^{31} - 1$ ist, wird eine Fehlermeldung `TooLargeLiteral` ausgegeben.

1.3.2.5.2 Abstrakte Syntax

[18] Das fällt unter die Themenbereiche des **Bachelorprojekts** und wird daher **nicht** genauer erläutert.

Die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{RETI_Patch} in Grammatik 1.3.5 ist im Vergleich zur **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{RETI_Blocks} in Grammatik 1.3.4 kaum verändert. Es muss nur ein Knoten `Exit()` hinzugefügt werden, der im Falle einer **Division durch** 0 die Ausführung des Programs beendet.

reg	$::=$	$ACC() \mid IN1() \mid IN2() \mid PC() \mid SP() \mid BAF()$	L_RETI
		$\mid CS() \mid DS()$	
arg	$::=$	$Reg(\langle reg \rangle) \mid Num(str)$	
rel	$::=$	$Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt() \mid GtE()$	
		$\mid Always() \mid NOp()$	
op	$::=$	$Add() \mid Addi() \mid Sub() \mid Subi() \mid Mult() \mid Multi()$	
		$\mid Div() \mid Divi() \mid Mod() \mid Modi() \mid Oplus() \mid Oplusi()$	
		$\mid Or() \mid Ori() \mid And() \mid Andi()$	
		$\mid Load() \mid Loadin() \mid Loadi() \mid Store() \mid Storein() \mid Move()$	
$instr$	$::=$	$Instr(\langle op \rangle, \langle arg \rangle+) \mid Jump(\langle rel \rangle, Num(str)) \mid Int(Num(str))$	
		$\mid RTI() \mid Call(Name('print'), \langle reg \rangle) \mid Call(Name('input'), \langle reg \rangle)$	
		$\mid SingleLineComment(str, str)$	
		$\mid Instr(Loadi(), [Reg(Acc()), GoTo(Name(str))]) \mid Jump(Eq(), GoTo(Name(str)))$	
$instr$	$::=$	$Exp(GoTo(str)) \mid Exit(Num(str))$	L_PicoC
$block$	$::=$	$Block(Name(str), \langle instr \rangle*)$	
$file$	$::=$	$File(Name(str), \langle block \rangle*)$	

Grammar 1.3.5: *Abstrakte Syntax der Sprache* L_{RETI_Patch}

1.3.2.5.3 Codebeispiel

In Code 1.10 sieht man den **Abstract-Syntax-Tree** des **PiocC-Patch Passes** für das aus Unterkapitel 1.5 weitergeführte Beispiel. Durch den **RETI-Patch Pass** wurde hier ein `start.<nummer>`-Block[19] eingesetzt, da die `main`-Funktion **nicht** die **erste** Funktion ist. Des Weiteren wurden durch diesen Pass einzelne `GoTo(Name(str))`-**Statements** entfernt[20], die nur einen Sprung um **eine** Position entsprochen hätten.

```
File
  Name './example_faculty_it.reti_patch',
  [
    Block
      Name 'start.7',
      [
        # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
        Exp(GoTo(Name('main.0')))
      ],
    Block
      Name 'faculty.6',
      [
        # // Assign(Name('res'), Num('1'))
        # Exp(Num('1'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 1;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
        LOADIN SP ACC 1;
        STOREIN BAF ACC -3;
```

[19] Dieser **Block** wurde im Code 1.7 markiert.
[20] Diese **entfernten** `GoTo(Name(str))`'s' wurden ebenfalls im Code 1.7 markiert.

```
21        ADDI SP 1;
22        # // While(Num('1'), [])
23        # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
24        # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
25      ],
26    Block
27      Name 'condition_check.5',
28      [
29        # // IfElse(Num('1'), [], [])
30        # Exp(Num('1'))
31        SUBI SP 1;
32        LOADI ACC 1;
33        STOREIN SP ACC 1;
34        # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
35        LOADIN SP ACC 1;
36        ADDI SP 1;
37        JUMP== GoTo(Name('while_after.1'));
38        # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.4')))
39      ],
40    Block
41      Name 'while_branch.4',
42      [
43        # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
44        # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
45        # Exp(Stackframe(Num('0')))
46        SUBI SP 1;
47        LOADIN BAF ACC -2;
48        STOREIN SP ACC 1;
49        # Exp(Num('1'))
50        SUBI SP 1;
51        LOADI ACC 1;
52        STOREIN SP ACC 1;
53        LOADIN SP ACC 2;
54        LOADIN SP IN2 1;
55        SUB ACC IN2;
56        JUMP== 3;
57        LOADI ACC 0;
58        JUMP 2;
59        LOADI ACC 1;
60        STOREIN SP ACC 2;
61        ADDI SP 1;
62        # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
63        LOADIN SP ACC 1;
64        ADDI SP 1;
65        JUMP== GoTo(Name('if_else_after.2'));
66        # // not included Exp(GoTo(Name('if.3')))
67      ],
68    Block
69      Name 'if.3',
70      [
71        # // Return(Name('res'))
72        # Exp(Stackframe(Num('1')))
73        SUBI SP 1;
74        LOADIN BAF ACC -3;
75        STOREIN SP ACC 1;
76        # Return(Stack(Num('1')))
77        LOADIN SP ACC 1;
```

```
78        ADDI SP 1;
79        LOADIN BAF PC -1;
80      ],
81    Block
82      Name 'if_else_after.2',
83      [
84        # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
85        # Exp(Stackframe(Num('0')))
86        SUBI SP 1;
87        LOADIN BAF ACC -2;
88        STOREIN SP ACC 1;
89        # Exp(Stackframe(Num('1')))
90        SUBI SP 1;
91        LOADIN BAF ACC -3;
92        STOREIN SP ACC 1;
93        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
94        LOADIN SP ACC 2;
95        LOADIN SP IN2 1;
96        MULT ACC IN2;
97        STOREIN SP ACC 2;
98        ADDI SP 1;
99        # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
100       LOADIN SP ACC 1;
101       STOREIN BAF ACC -3;
102       ADDI SP 1;
103       # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
104       # Exp(Stackframe(Num('0')))
105       SUBI SP 1;
106       LOADIN BAF ACC -2;
107       STOREIN SP ACC 1;
108       # Exp(Num('1'))
109       SUBI SP 1;
110       LOADI ACC 1;
111       STOREIN SP ACC 1;
112       # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
113       LOADIN SP ACC 2;
114       LOADIN SP IN2 1;
115       SUB ACC IN2;
116       STOREIN SP ACC 2;
117       ADDI SP 1;
118       # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
119       LOADIN SP ACC 1;
120       STOREIN BAF ACC -2;
121       ADDI SP 1;
122       # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
123       Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
124     ],
125   Block
126     Name 'while_after.1',
127     [
128       # Return(Empty())
129       LOADIN BAF PC -1;
130     ],
131   Block
132     Name 'main.0',
133     [
134       # StackMalloc(Num('2'))
```

```
135         SUBI SP 2;
136         # Exp(Num('4'))
137         SUBI SP 1;
138         LOADI ACC 4;
139         STOREIN SP ACC 1;
140         # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
141         MOVE BAF ACC;
142         ADDI SP 3;
143         MOVE SP BAF;
144         SUBI SP 4;
145         STOREIN BAF ACC 0;
146         LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
147         ADD ACC CS;
148         STOREIN BAF ACC -1;
149         # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
150         Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
151         # RemoveStackframe()
152         MOVE BAF IN1;
153         LOADIN IN1 BAF 0;
154         MOVE IN1 SP;
155         # Exp(ACC)
156         SUBI SP 1;
157         STOREIN SP ACC 1;
158         LOADIN SP ACC 1;
159         ADDI SP 1;
160         CALL PRINT ACC;
161         # Return(Empty())
162         LOADIN BAF PC -1;
163       ]
164   ]
```

Code 1.10: *RETI-Patch Pass für Codebespiel*

1.3.2.6 RETI Pass

1.3.2.6.1 Aufgabe

Die Aufgabe des **RETI-Patch Passes** ist es die `GoTo(Name(str))`-Knoten in den den Knoten `Instr(Loadi(), [reg, GoTo(Name(str))])`, `Jump(Eq(), GoTo(Name(str)))` und `Exp(GoTo(Name(str)))` durch eine entsprechende **Adresse** zu ersetzen, die entsprechende **Distanz** oder einen entsprechenden **Sprungbefehl** mit passender **Distanz** `Jump(Always(), Im(str(distance)))`. Die **Distanz-** und **Adressberechnung** wird in Unterkapitel **??** genauer mit **Formeln** erklärt.

1.3.2.6.2 Konkrette und Abstrakte Syntax

Die **Abstrakte Syntax** der Sprache L_{RETI} in Grammatik 1.3.8 hat im Vergleich zur **Abstrakten Syntax** der Sprache L_{RETI_Patch} in Grammatik 1.3.5 nur noch ausschließlich **RETI-Knoten**. Alle **RETI-Knoten** stehen nun einem `Program(Name(str), instr)`-Knoten.

Ausgegeben wird der finale **Maschinencode** allerdings in **Konkretter Syntax**, die sich aus den Grammatiken 1.3.6 und 1.3.7 für jeweils die **Lexikalische** und **Syntaktische Analyse** zusammensetzt. Der Grund, warum die **Konkrette Syntax** der Sprache L_{RETI} auch nochmal in einen Teil für die **Lexikalische** und **Syntaktische Analyse** unterteilt ist, hat den Grund, dass für die Bachelorarbeit zum **Testen** des **PicoC-Compilers** ein **RETI-Interpreter** implementiert wurde, der den RETI-Code **lexen** und **parsen** muss, um ihn später **interpretieren** zu können.

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

Grammar 1.3.6: *Konkrette Syntax der Sprache L_{RETI} für die Lexikalische Analyse in EBNF*

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

Grammar 1.3.7: *Konkrette Syntax der Sprache L_{RETI} für die Syntaktische Analyse in EBNF*

reg	::=	*ACC*() | *IN*1() | *IN*2() | *PC*() | *SP*() | *BAF*()	*L_RETI*
		| *CS*() | *DS*()	
arg	::=	*Reg*(⟨*reg*⟩) | *Num*(*str*)	
rel	::=	*Eq*() | *NEq*() | *Lt*() | *LtE*() | *Gt*() | *GtE*()	
		| *Always*() | *NOp*()	
op	::=	*Add*() | *Addi*() | *Sub*() | *Subi*() | *Mult*() | *Multi*()	
		| *Div*() | *Divi*() | *Mod*() | *Modi*() | *Oplus*() | *Oplusi*()	
		| *Or*() | *Ori*() | *And*() | *Andi*()	
		| *Load*() | *Loadin*() | *Loadi*() | *Store*() | *Storein*() | *Move*()	
instr	::=	*Instr*(⟨*op*⟩, ⟨*arg*⟩+) | *Jump*(⟨*rel*⟩, *Num*(*str*)) | *Int*(*Num*(*str*))	
		| *RTI*() | *Call*(*Name*('*print*'), ⟨*reg*⟩) | *Call*(*Name*('*input*'), ⟨*reg*⟩)	
		| *SingleLineComment*(*str*, *str*)	
		| *Instr*(*Loadi*(), [*Reg*(*Acc*()), *GoTo*(*Name*(*str*))]) | *Jump*(*Eq*(), *GoTo*(*Name*(*str*)))	
program	::=	*Program*(*Name*(*str*), ⟨*instr*⟩$*$)	
instr	::=	*Exp*(*GoTo*(*str*)) | *Exit*(*Num*(*str*))	*L_PicoC*
block	::=	*Block*(*Name*(*str*), ⟨*instr*⟩$*$)	
file	::=	*File*(*Name*(*str*), ⟨*block*⟩$*$)	

Grammar 1.3.8: *Abstrakte Syntax der Sprache L_{RETI}*

1.3.2.6.3 Codebeispiel

Nach dem **RETI-Pass** ist das Programm komplett in **RETI-Knoten** übersetzt, die allerdings in ihrer **Konkretten Syntax** ausgegeben werden, wie in Code 1.11 zu sehen ist. Es gibt **keine Blöcke** mehr und die **RETI-Befehle** in diesen Blöcken wurden **zusammengesetzt**, wie sie in den **Blöcken** angeordnet waren. Die letzten **Nicht-RETI-Befehle** oder **RETI-Befehle**, die **nicht** auschließlich aus **RETI-Ausdrücken** bestehen[21], die sich in den **Blöcken** befunden haben, wurden durch **RETI-Befehle** ersetzt.

Der `Program(Name(str), instr)`-Knoten, indem alle **RETI-Knoten** stehen gibt alleinig die **RETI-Knoten**, die er beinhaltet aus und fügt ansonsten nichts hinzu, wodurch der **Abstract Syntax Tree**, wenn er in eine Datei ausgegeben wird, direkt **RETI-Code** in **menschenlesbarer Repräsentation** erzeugt.

```
1  # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
2  JUMP 67;
3  # // Assign(Name('res'), Num('1'))
4  # Exp(Num('1'))
5  SUBI SP 1;
6  LOADI ACC 1;
7  STOREIN SP ACC 1;
8  # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
9  LOADIN SP ACC 1;
10 STOREIN BAF ACC -3;
11 ADDI SP 1;
12 # // While(Num('1'), [])
13 # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
14 # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
15 # // IfElse(Num('1'), [], [])
16 # Exp(Num('1'))
17 SUBI SP 1;
18 LOADI ACC 1;
19 STOREIN SP ACC 1;
20 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
21 LOADIN SP ACC 1;
22 ADDI SP 1;
23 JUMP== 54;
24 # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.4')))
25 # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
26 # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
27 # Exp(Stackframe(Num('0')))
28 SUBI SP 1;
29 LOADIN BAF ACC -2;
30 STOREIN SP ACC 1;
31 # Exp(Num('1'))
32 SUBI SP 1;
33 LOADI ACC 1;
34 STOREIN SP ACC 1;
35 LOADIN SP ACC 2;
36 LOADIN SP IN2 1;
37 SUB ACC IN2;
38 JUMP== 3;
39 LOADI ACC 0;
40 JUMP 2;
41 LOADI ACC 1;
42 STOREIN SP ACC 2;
```

[21] Wie z.B. `LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'))`, `Exp(GoTo(Name('main.0')))` und `JUMP== GoTo(Name('if_else_after.2'))`.

```
ADDI SP 1;
# IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
LOADIN SP ACC 1;
ADDI SP 1;
JUMP== 7;
# // not included Exp(GoTo(Name('if.3')))
# // Return(Name('res'))
# Exp(Stackframe(Num('1')))
SUBI SP 1;
LOADIN BAF ACC -3;
STOREIN SP ACC 1;
# Return(Stack(Num('1')))
LOADIN SP ACC 1;
ADDI SP 1;
LOADIN BAF PC -1;
# // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
# Exp(Stackframe(Num('0')))
SUBI SP 1;
LOADIN BAF ACC -2;
STOREIN SP ACC 1;
# Exp(Stackframe(Num('1')))
SUBI SP 1;
LOADIN BAF ACC -3;
STOREIN SP ACC 1;
# Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
LOADIN SP ACC 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULT ACC IN2;
STOREIN SP ACC 2;
ADDI SP 1;
# Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
LOADIN SP ACC 1;
STOREIN BAF ACC -3;
ADDI SP 1;
# // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
# Exp(Stackframe(Num('0')))
SUBI SP 1;
LOADIN BAF ACC -2;
STOREIN SP ACC 1;
# Exp(Num('1'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC 1;
STOREIN SP ACC 1;
# Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
LOADIN SP ACC 2;
LOADIN SP IN2 1;
SUB ACC IN2;
STOREIN SP ACC 2;
ADDI SP 1;
# Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
LOADIN SP ACC 1;
STOREIN BAF ACC -2;
ADDI SP 1;
# Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
JUMP -58;
# Return(Empty())
LOADIN BAF PC -1;
```

```
100 # StackMalloc(Num('2'))
101 SUBI SP 2;
102 # Exp(Num('4'))
103 SUBI SP 1;
104 LOADI ACC 4;
105 STOREIN SP ACC 1;
106 # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
107 MOVE BAF ACC;
108 ADDI SP 3;
109 MOVE SP BAF;
110 SUBI SP 4;
111 STOREIN BAF ACC 0;
112 LOADI ACC 80;
113 ADD ACC CS;
114 STOREIN BAF ACC -1;
115 # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
116 JUMP -78;
117 # RemoveStackframe()
118 MOVE BAF IN1;
119 LOADIN IN1 BAF 0;
120 MOVE IN1 SP;
121 # Exp(ACC)
122 SUBI SP 1;
123 STOREIN SP ACC 1;
124 LOADIN SP ACC 1;
125 ADDI SP 1;
126 CALL PRINT ACC;
127 # Return(Empty())
128 LOADIN BAF PC -1;
```

Code 1.11: *RETI Pass für Codebespiel*

Literatur

Online

- *ANSI C grammar (Lex)*. URL: https://www.lysator.liu.se/c/ANSI-C-grammar-l.html (besucht am 29. 07. 2022).
- *ANSI C grammar (Yacc)*. URL: http://www.quut.com/c/ANSI-C-grammar-y.html (besucht am 29. 07. 2022).
- *ANSI C grammar (Yacc)*. URL: https://www.lysator.liu.se/c/ANSI-C-grammar-y.html (besucht am 29. 07. 2022).
- *C Operator Precedence - cppreference.com*. URL: https://en.cppreference.com/w/c/language/operator_precedence (besucht am 27. 04. 2022).
- *clang: C++ Compiler*. URL: http://clang.org/ (besucht am 29. 07. 2022).
- *Clockwise/Spiral Rule*. URL: https://c-faq.com/decl/spiral.anderson.html (besucht am 29. 07. 2022).
- *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project*. URL: https://gcc.gnu.org/ (besucht am 13. 07. 2022).

Bücher

- G. Siek, Jeremy. *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*. 28. Jan. 2022. URL: https://iucompilercourse.github.io/IU-Fall-2021/ (besucht am 28. 01. 2022).

Vorlesungen

- Scholl, Christoph. „Betriebssysteme“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2020. URL: https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach_main.php?id=157 (besucht am 09. 07. 2022).
- Thiemann, Peter. „Compilerbau“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2021. URL: http://proglang.informatik.uni-freiburg.de/teaching/compilerbau/2021ws/ (besucht am 09. 07. 2022).