PicoC-Compiler

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

Kolloquiumspräsentation

Präsentator:
Jürgen Mattheis

Gutachter:
Prof. Dr. Scholl

Betreuung:
M.Sc. Seufert

28. September 2022

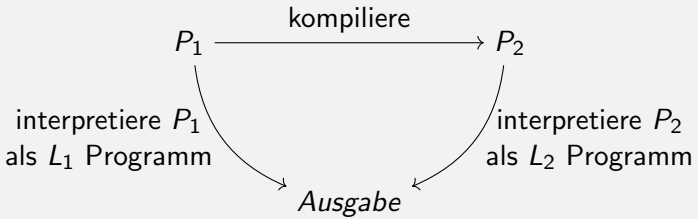
Universität Freiburg, Lehrstuhl für Betriebssysteme

Einführung

Motivation

Compiler

- übersetzt ein Programm von einer Sprache L_1 in eine andere Sprache L_2.
- beide Programme gleiche Semantik.



Aufgabenstellung

- L_C Programm kompilieren: `> gcc program.c -o machine_code` .

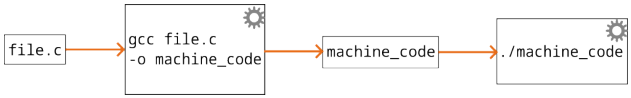


Abbildung 1: Schritte zum Ausführen eines Programmes mit dem GCC.

- L_{PicoC} Programm kompilieren: `> picoc_compiler program.picoc` .

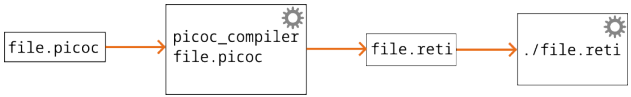


Abbildung 2: Schritte zum Ausführen eines Programmes mit dem PicoC-Compiler.

PicoC

Funktionalitäten

Die Sprache L_{PicoC} ist eine Untermenge der Sprache L_C, welche:

- **Einzeilige Kommentare** `//` und **Mehrzeilige Kommentare** `/* comment */`.
- die **Basisdatentypen** `int`, `char` und `void`.
- die Zusammengesetzten Datentypen Felder (z.B. `int ar[3]`), Verbunde (z.B. `struct st {int attr1; int attr2;}`) und Zeiger (z.B. `int *pntr`), inklusive:
  - Initialisierung (z.B. `struct st st_var = {.attr1=42, .attr2={.attr={&var, &var}}}`).
  - dazugehörige Operationen `[i]`, `.attr`, `*` und `&`.

PicoC

Funktionalitäten

- die Zusammengesetzten Datentypen Felder (z.B. `int ar[3]`), Verbunde (z.B. `struct st {int attr1; int attr2;}`) und Zeiger (z.B. `int *pntr`), inklusive:
  - Kombinationen der eben genannten Operationen (z.B. `(*complex_var[0][1])[1].attr`) und Datentypen (z.B. `struct st (*complex_var[1][2])[2]`).
  - Zeigerarithmetik (z.B. `*(var + 2)`).
- `if(cond){ }`- und `else{ }`-**Anweisungen**, inklusive:
  - Kombination von `if` und `else`, nämlich `else if(cond){ }`.
- `while(cond){ }`- und `do while(cond){ };`-**Anweisungen**.

PicoC

Funktionalitäten

- **Arihmetische und Bitweise Ausdrücke**, welche mithilfe der **binären Operatoren** `+`, `-`, `*`, `/`, `%`, `&`, `|`, `^`, `<<`, `>>` und **unären Operatoren** `-`, `~` umgesetzt sind.
- **Logische Ausdrücke**, welche mithilfe der **Relationen** `==`, `!=`, `<`, `>`, `<=`, `>=` und **Logischer Verknüpfungen** `!`, `&&`, `||` umgesetzt sind.
- **Zuweisungen**, welche mithilfe des **Zuweisungsoperators** `=` umgesetzt sind, inklusive:
  - Zuweisung an Feldelement, Verbundsattribut oder Zeigerelement (z.B. `(*var.attr)[2] = fun() + 42`).

PicoC

Funktionalitäten

- Funktionsdefinitionen (z.B. `int fun(int arg1[3], struct st arg2){}`), inklusive:
  - Funktionsdeklarationen (z.B. `int fun(int arg1[3], struct st arg2);`).
  - Funktionsaufrufe (z.B. `fun(ar, st_var)`)
  - Sichtbarkeitsbereiche innerhalb der Codeblöcke $\{\}$ der Funktionen.
  - Argumentübergabe erfolgt ausschließlich über die Call-by-Value Strategie.
  - bei Feldern wird ein Zeiger in den Stackframe der aufrufenden Funktion geschrieben.
  - bei Verbunden wird der komplette Verbund in den Strackframe der aufrufenden Funktion kopiert.

PicoC

Sonstiges

- Implementierung ist aufgebaut auf RETI-Codeschnipseln aus der Vorlesung Scholl, „Betriebssysteme“, Kapitel 3 Übersetzung höherer Programmiersprachen in Maschinensprache.
  - bei Inkonsistenzen und Umstimmigkeiten angepasst.
- im Appendix ab Folie 61 weitere Informationen.

RETI-Architektur

- 32-Bit Achitektur, die in den Vorlesungen Scholl, „Betriebssysteme“ und Scholl, „Technische Informatik“ zu Lernzwecken eingesetzt wird. Basis für L_{RETI}.

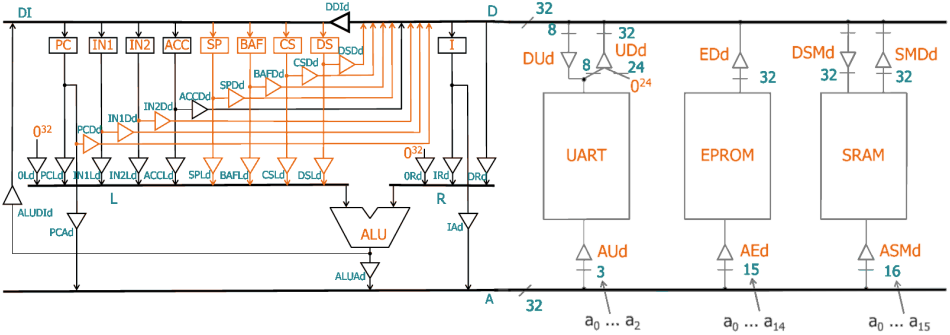


Abbildung 3: Datenpfade der RETI-Architektur, nicht selbst erstellt, leicht abgeändert.

RETI-Architektur

Speicherorganisation

- Register haben bestimmte Aufgaben bei der Umsetzung von Prozessen.

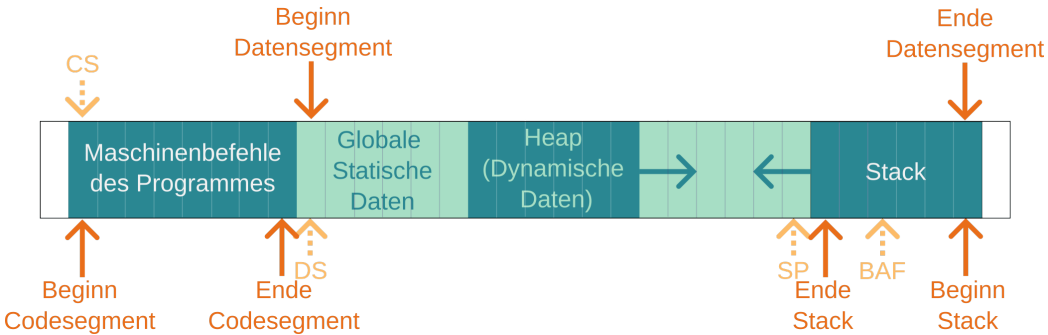


Abbildung 4: Speicherorganisation.

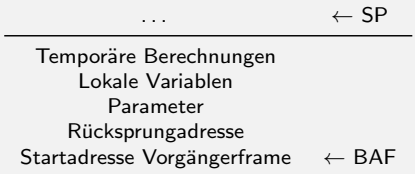
Speicherorganisation

Lokale Variablen und Parameter von Funktionen

- alle Funktionen, außer der `main`-Funktion besitzen einen Stackframe für Lokale Variablen und Parameter.
- Globale Statische Daten sind Globale Variablen, sowie Lokale Variablen und Parameter der `main`-Funktion.

Stackframe

- Datenstruktur, um Zustand einer Funktion zur Laufzeit zu „konservieren“.



Implementierung

Lexikalische Analyse

Aufgabe

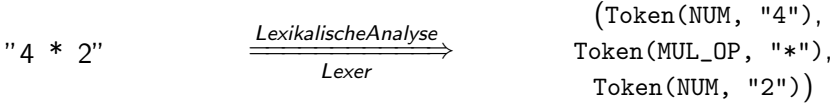


Abbildung 5: Aus Eingabewort Tokens generieren.

- im Appendix ab Folie 68 genauer erklärt.

Syntaktische Analyse

Aufgabe

```
(Token(NUM, "4"),
Token(MUL_OP, "*"),
 Token(NUM, "2"))
```

Syntaktische Analyse

Parser & Visitor & Transformer

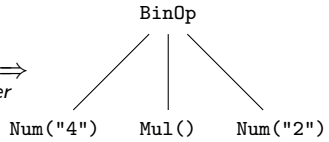


Abbildung 6: Aus Tokens einesn Abstrakten Syntaxbaum generieren.

- Parser generiert im Zusammenspiel mit Lexer den Ableitungsbaum.
- Visitor vereinfacht den Ableitungsbaum.
- Transformer generiert den Abstrakten Syntaxbaum.
- im Appendix ab Folie 71 genauer erklärt.

Syntaktische Analyse

Zwischenschritte

Abbildung 7: Aus dem Eingebewort einen Ableitungsbaum generieren.

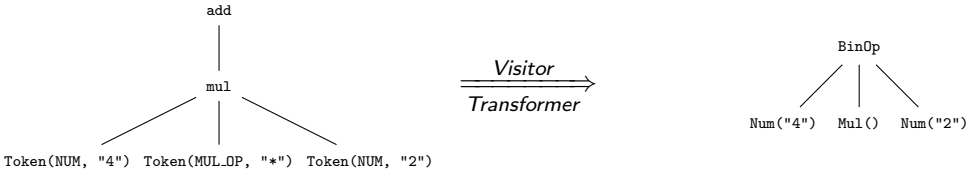


Abbildung 8: Aus Ableitungsbaum Abstrakten Syntaxbaum generieren.

Syntaktische Analyse

Lark Parsing Toolkit

- erleichtert Lexikalische Analyse und Syntaktische Analyse.
- Basic Lexer, Earley Parser, Visitor und Transformer implementiert.

NUM	::=	"4" | "2"	*L_Lex*
ADD_OP	::=	"+"	
MUL_OP	::=	"∗"	
mul	::=	*mul MUL_OP NUM* | *NUM*	*L_Parse*
add	::=	*add ADD_OP mul* | *mul*	

Grammatik 1: Grammatik für Lexer oben und Grammatik für Parser unten.

Code Generierung

Aufgabe

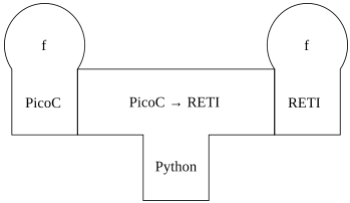


Abbildung 9: T-Diagramm für die Aufgabe der Code Generierung.

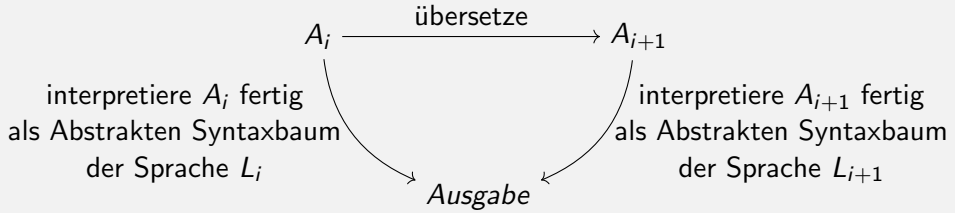
- Abstrakter Syntaxbaum für Sprache L_{PicoC} soll zu Abstraktem Syntaxbaum der Sprache L_{RETI} umgeformt werden.
- mit Passes kleinschrittig immer mehr der Syntax der Maschinensprache annähern.

Code Generierung

Definitionen

Pass

- Übersetzungsschritt eines Abstrakten Syntaxbaumes von L_i zu L_{i+1}
- beide Abstrakten Syntaxbäume gleiche Semantik
- übernimmt Teilaufgabe, keine Überschneidung



Code Generierung

Überblick über Passes des PicoC-Compilers

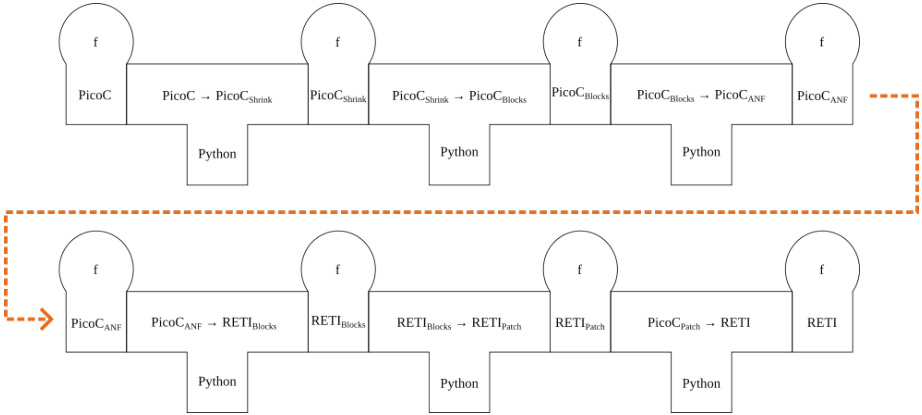
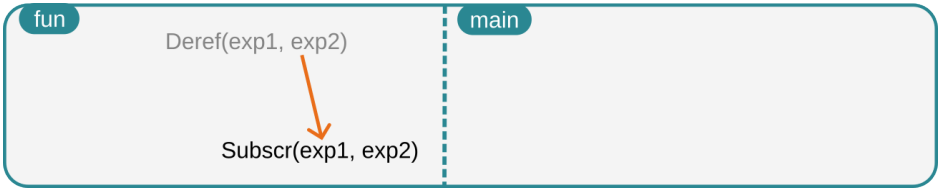


Abbildung 10: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben.

Code Generierung

PicoC-Shrink Pass

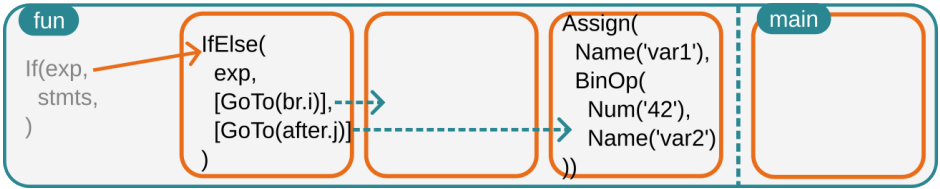
- gleiche Semantik des Dereferenzierungsoperators `*(pntr_or_ar + i)` und des Operators für Indexzugriff auf ein Feld `pntr_or_ar[i]`, sind austauschbar.
- Ersetzen von `Deref(exp, i)` durch `Subscr(exp, i)`.
- Derefenzierung `*(pntr_or_ar + i)` wird von den Routinen für einen Indexzugriff auf ein Feld `pntr_or_ar[i]` übernommen $\Rightarrow$ kein redundanter Code.



Code Generierung

PicoC-Blocks Pass

- `If(exp, stmts)`, `IfElse(exp, stmts1, stmts2)`, `While(exp, stmts)` und `DoWhile(exp, stmts)` durch `Block(name, stmts_instrs-`, `GoTo(lable)-` und `IfElse(exp, stmts1, stmts2)` ersetzt.
- im Appendix ab Folie 84 genauer erklärt.



Code Generierung

PicoC-ANF Pass

- formt Abstrakten Syntaxbaum um, sodass er die Syntax der Sprache L_{PicoC_ANF} erfüllt, deren Grammatik in A-Normalform ist.
- Funktionen werden aufgelöst.
- im Appendix ab Folie 86 genauer erklärt.

```
Exp(Global(Num('addr1'))),
IfElse(Stack(Num('1'),
  [GoTo(br.i)],
  [GoTo(after.j)]
)
```

```
Exp(Num('42')),
Exp(Global(Num('addr1'))),
BinOp(Stack(Num('2')), Mul(), Stack(Num('1')))),
Assign(Global(Num('addr2')), Stack(Num('1'))),
```

PicoC-ANF Pass

A-Normalform

- Zweck: Maschinenbefehlen annähern, die meist nur eine Aktion ausführen. Eine Anweisung wird aufgespalten, wenn sie mehreren Aktionen entspricht. Nebeneffekte, die den Kompiliervorgang beeinflussen werden isoliert.
- im Appendix ab Folie 90 genauer erklärt.

ziehe Komplexe Ausdrücke aus Anweisungen und Ausdrücken vor

Code

```
void main() {
  int x = 1 - 5 * 4;
}
```

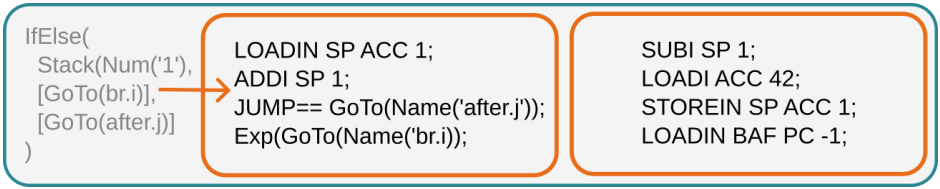
Code in A-Normalform

```
void main() {
  int x;  // allocate at address
↪  0 relative to DS Register
  1;
  5;
  4;
  stack(2) * stack(1);
  stack(2) - stack(1);
  global(0) = stack(1);
}
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass

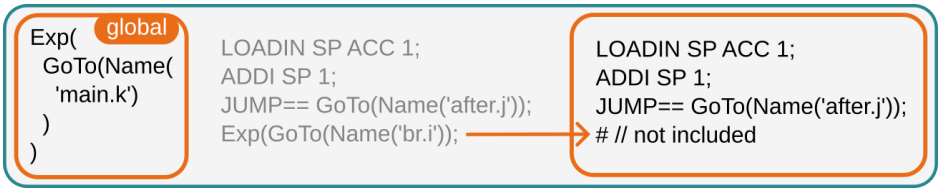
- PicoC-Knoten, die Anweisungen darstellen, werden durch semantisch entsprechende RETI-Knoten, die Befehle darstellen ersetzt.



Code Generierung

RETI-Patch Pass

- Ausbessern (engl. to patch) des Abstrakten Syntaxbaumes durch:
  - Einfügen eines `GoTo(Name('main'))` in den `global.<number>`-Block, wenn `main`-Funktion nicht die erste Funktion ist.
  - Entfernen von `GoTo()`s, deren Sprung nur eine Adresse weiterspringt.
  - weitere Aufgaben im Appendix ab Folie 96 aufgezählt.



Code Generierung

RETI Pass

- verbliebene PicoC-Knoten werden durch entsprechende RETI-Knoten ersetzt:
  - keine Blöcke mehr, Knoten genauso zusammengefügt, wie sie in diesen angeordnet waren.
  - `GoTo(Name(str))` werden duch einen Immediate mit passender Distanz / Adresse oder einen Sprungbefehl mit passender Distanz `Jump(Always(), Im(str(distance)))` ersetzt.

Code Generierung

Codebeispiel

- im Appendix ab Folie 123 sind Tokens, Ableitungsbaum, Vereinfachter Ableitungsbaum, Abstrakter Syntaxbaum und die modifzierten Abstrakten Synxtaxbäume der verschiedenen Passes an einem Codebeispiel erklärt.
- `> make test TESTNAME=example_presentation VERBOSE=-v`

Code Generierung

Zugriff auf Zusammengesetzte Datentypen

```
1  // in:1
2  // expected:42
3  // datasegment:36
4
5  struct stt {int attr1; int attr2[2];};
6
7  struct stt ar_of_sts[3][2];
8
9  int fun(struct stt (*param)[3][2]){
10   (*(*param+2))[1].attr2[input()] = 42;
11   return 1;
12 }
13
14 void main() {
15   struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2] = &ar_of_sts;
16   int res = fun(pntr_on_ar_of_sts);
17   if (res) {
18     print((*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]);
19   }
20 }
```

Datentyp der Variable

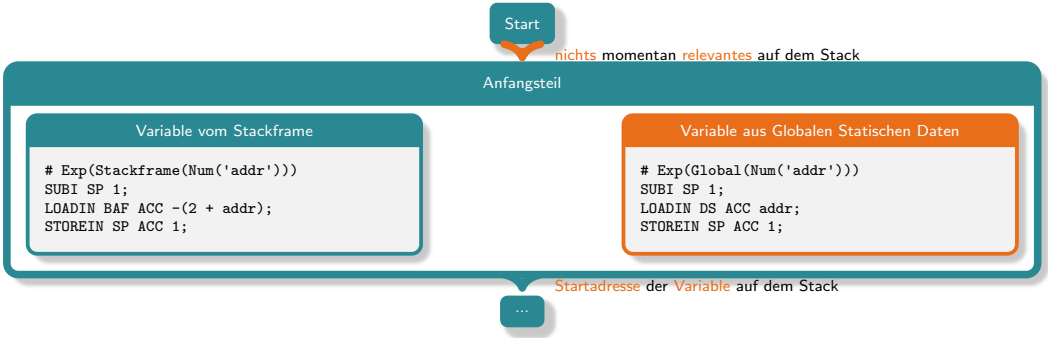
```
// ...
struct stt
↪  (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2] =
↪  &ar_of_sts;
// ...
```

- ein „Zeiger auf ein Feld der Mächtigkeit 3 von Feldern der Mächtigkeit 2 von Verbunden des Typs `stt`“.
- *Clockwise/Spiral Rule*

Code Generierung

Codebeispiel

- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]`



- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]` `struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2]...`

...

Startadresse der Variable auf dem Stack

Mittelteil

Feldindexzugriff auf Feld

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN1 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j)·size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Feldindexzugriff auf Zeiger

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN2 2;
LOADIN IN2 IN1 0;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j)·size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Verbundsattribut-zugriff auf Verbund

```
# Ref(Attr(Stack(Num('1')),
↪  Name('attr')))
LOADIN SP IN1 1;
ADDI IN1 Σ_{k=1}^{idx_i-1} size(datatype_{1,k});
STOREIN SP IN1 1;
```

*1

...

*1: Startadresse eines Zeigerelementes, Feldelementes oder Verbundsattributes auf dem Stack

- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]` `struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2]...`

Startadresse der Variable auf dem Stack

Mittelteil

Feldindexzugriff auf Feld

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN1 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j)·size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Feldindexzugriff auf Zeiger

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN2 2;
LOADIN IN2 IN1 0;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j)·size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Verbundsattribut-zugriff auf Verbund

```
# Ref(Attr(Stack(Num('1')),
↪  Name('attr')))
LOADIN SP IN1 1;
ADDI IN1 Σ_{k=1}^{idx_i-1} size(datatype_{1,k});
STOREIN SP IN1 1;
```

*1

*1: Startadresse eines Zeigerelementes, Feldelementes oder Verbundsattributes auf dem Stack

- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]` `struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2]...`

Startadresse der Variable auf dem Stack

Mittelteil

Feldindexzugriff auf Feld

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN1 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j) · size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Feldindexzugriff auf Zeiger

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN2 2;
LOADIN IN2 IN1 0;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j) · size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Verbundsattribut-zugriff auf Verbund

```
# Ref(Attr(Stack(Num('1')),
↪  Name('attr')))
LOADIN SP IN1 1;
ADDI IN1 Σ_{k=1}^{idx_i-1} size(datatype_{1,k});
STOREIN SP IN1 1;
```

*1

*1: Startadresse eines Zeigerelementes, Feldelementes oder Verbundsattributes auf dem Stack

- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]` `struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2]...`

Startadresse der Variable auf dem Stack

Mittelteil

Feldindexzugriff auf Feld

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN1 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j)·size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Feldindexzugriff auf Zeiger

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN2 2;
LOADIN IN2 IN1 0;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j)·size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Verbundsattribut-zugriff auf Verbund

```
# Ref(Attr(Stack(Num('1')),
↪  Name('attr')))
LOADIN SP IN1 1;
ADDI IN1 Σ_{k=1}^{idx_i-1} size(datatype_{1,k});
STOREIN SP IN1 1;
```

*1

*1: Startadresse eines Zeigerelementes, Feldelementes oder Verbundsattributes auf dem Stack

- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1],` `struct stt {int attr1; int attr2[2];};`

Startadresse der Variable auf dem Stack

Mittelteil

Feldindexzugriff auf Feld

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN1 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j) · size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

Feldindexzugriff auf Zeiger

```
# z.B. Exp(Num('idx'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC idx;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')),
↪  Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN2 2;
LOADIN IN2 IN1 0;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 (∏_{i=i+1}^{n} dim_j) · size(datatype);
ADD IN1 IN2;
ADDI SP 1;
STOREIN SP IN1 1;
```

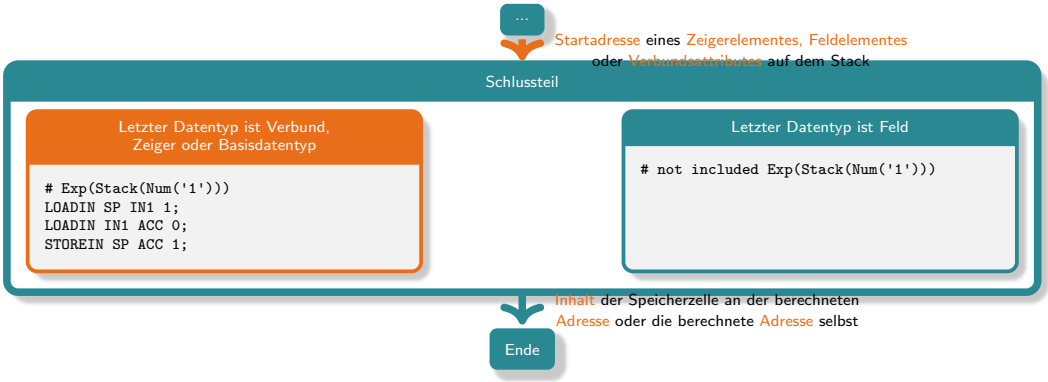
Verbundsattribut-zugriff auf Verbund

```
# Ref(Attr(Stack(Num('1')),
↪  Name('attr')))
LOADIN SP IN1 1;
ADDI IN1 Σ_{k=1}^{idx_i-1} size(datatype_{1,k});
STOREIN SP IN1 1;
```

*1

*1: Startadresse eines Zeigerelementes, Feldelementes oder Verbundsattributes auf dem Stack

- `(*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1],` `struct stt {int attr1; int attr2[2];};`



Fehlermeldungen

Kategorien

- `UnexpectedCharacter`
- `UnexpectedToken`
- `UnexpectedEOF`
- `DivisionByZero`
- `UnknownIdentifier`
- `UnknownAttribute`
- `ReDeclarationOrDefinition`
- `TooLargeLiteral`
- `NoMainFunction`
- `ConstAssign`
- `DatatypeMismatch`
- `PrototypeMismatch`
- `ArgumentMismatch`
- `WrongNumberArguments`
- `WrongReturnType`
- im Appendix ab Folie 101 mit Erklärung.

Qualitätssicherung

Tests

Typischer Test

```
// in:21 2 6 7
// expected:42 42
// datasegment:4

void main() {
  print(input() * input());
  print(input() * input());
}
```

convert_to_c.py ⟹

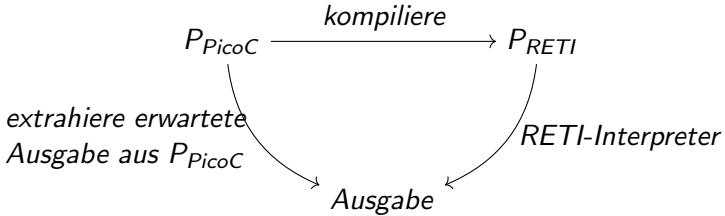
```
#include<stdio.h>

void main() {
  printf(" %d", 21 * 2);
  printf(" %d", 6 * 7);
}
```

- `// in:<space-sep-values>` sind Eingaben für die `input()`-Anweisungen.
- `// expected:<space-sep-values>` sind die Erwarteten Ausgaben der `print(exp)`-Anweisungen.
- `// datasegment:<size>` ist die optionale Datensegmentgröße.
- `convert_to_c.py`: jedes `print(exp)` wird durch `printf("%d", exp)` und jedes `input()` wird der Reihenfolge nach duch die Eingaben ersetzt.

Tests

Ablauf

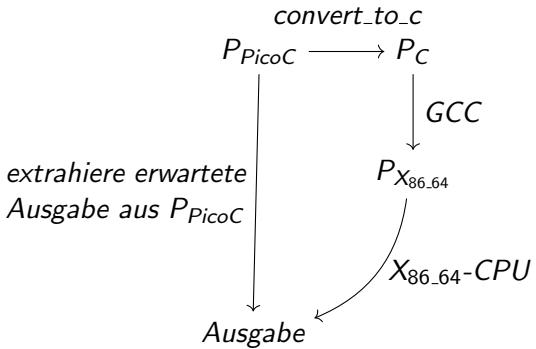
- prüfen, ob Erwartete Ausgaben und Ausgaben der `print(exp)`-Anweisungen identisch sind.
- Schreiber der Tests = Implementierer des PicoC-Compiler $\Rightarrow$ Tests bestätigen nur das PicoC-Compiler genauso implementiert, wie diese Person die Semantik von L_{PicoC} interpretiert hat.



Tests

Ablauf

- der GCC setzt die Semantik von L_{PicoC} sehr wahrscheinlich korrekt um.
- prüfen, ob Erwartete Ausgaben und Ausgaben der `printf("%d", exp)`-Anweisungen identisch sind.



Tests

Durchlauf aller Tests

- `> make test <more-options>` (siehe Appendix auf Folie 118)

```
> make test
====================================
= ./tests/basic_array_init.picoc  =
====================================
...
====================================
=           Verification           =
====================================
./tests/basic_array_init.c
...
====================================
=             Results              =
====================================
Verified: 104 / 104
Not verified:
Running through: 180 / 180
Not running through:
Passed: 180 / 180
Not passed:
```

Tests

Sonstiges

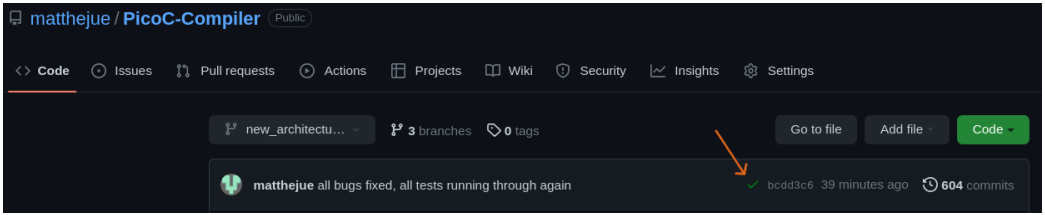


Abbildung 11: Autotesting mit GitHub Actions.

- https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler.
- im Appendix auf Folie 119 sind die verschiedenen Bedienmöglichkeiten zum Ausführen der Tests erklärt.
- im Appendix auf Folie 122 sind die verschiedenen Testkategorien mit Erklärung zu finden.

Vorführung

Bedienung

Wichtigste Funktionalitäten

- Kompilieren: `> picoc_compiler <cli-options> program.picoc`.
  - alle `<cli-options>` im Appendix ab Folie 105 aufgelistet.
- Kompilieren + Interpretieren:
  `> picoc_compiler <cli-options> -R program.picoc`.
- Shell-Mode: `> picoc_compiler` ohne Argumente.
  - alle Befehle des Shell-Modes im Appendix ab Folie 111 aufgelistet.
- Show-Mode:
  - Bedienung des Show-Modes im Appendix ab Folie 114 erklärt.

Bedienung

Shell-Mode

```
> picoc_compiler
PicoC Shell. Enter `help` (shortcut `?`) to see the manual.
PicoC> cpl "6 * 7;";
--------------------------- RETI ---------------------------
SUBI SP 1;
LOADI ACC 6;
STOREIN SP ACC 1;
SUBI SP 1;
LOADI ACC 7;
STOREIN SP ACC 1;
LOADIN SP ACC 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULT ACC IN2;
STOREIN SP ACC 2;
ADDI SP 1;
LOADIN BAF PC -1;

Compilation successfull

PicoC> quit
```

Code 1: Shell-Mode und die Befehle `compile` und `quit`.

Bedienung

Shell-Mode

```
PicoC> mu "int var = 42;";
---------------------------- Code ----------------------------
// stdin.picoc:
void main() {int var = 42;}
--------------------------- Tokens ---------------------------
...
------------------ Abstract Syntax Tree --------------------
...
---------------------- PicoC Shrink ------------------------
...
--------------------------- RETI -----------------------------
SUBI SP 1;
LOADI ACC 42;
STOREIN SP ACC 1;
LOADIN SP ACC 1;
STOREIN DS ACC 0;
ADDI SP 1;
LOADIN BAF PC -1;
------------------------ RETI Run --------------------------
...

Compilation successfull
```

Code 2: Shell-Mode und der Befehl `most_used`.

Bedienung

Show-Mode

- `> make test-show TESTNAME=<testname> PAGES=<pages>`

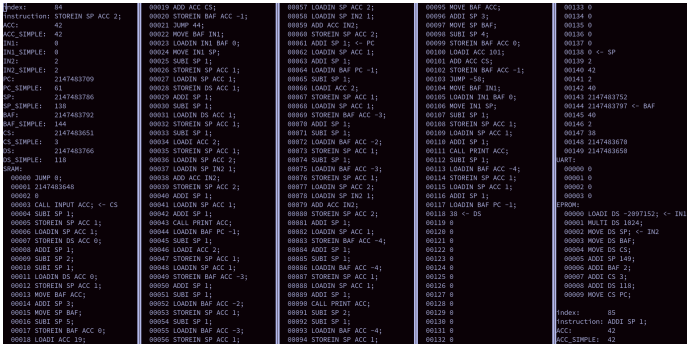


Abbildung 12: Show-Mode in der Verwendung.

Codebeispiel 1

Finbonacci

```
// in:10
// expected:55
// datasegment:64
// from the Operating Systems Lecture by Prof. Dr. Christoph Scholl

int ar[11] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};

int fib_efficient(int n, int* res){
    if (n == 0)
        return 0;
    else if (n == 1){
        res[0] = 0;
        res[1] = 1;
        return 1;
    }
    res[n] = fib_efficient(n - 1, res) + res[n - 2];
    return res[n];
}

void main() {
  print(fib_efficient(input(), ar));
}
```

Codebeispiel 2

Bubble Sort

```
1  // in:0 5
2  // expected:-2 314
3  // based on a function from the Operating Systems Lecture by Prof. Dr. Christoph Scholl and
   ↪ https://de.wikipedia.org/wiki/Bubblesort
4
5  struct stt {int len; int *ar;};
6
7  int ar[6] = {314, 42, 4, 42, -2, 5};
8
9  struct stt st_ar = {.len=6, .ar=ar};
10
11 int swap(int *x, int *y) {
12   // in the lecture this function is called pairsort
13   int h;
14   int swapped = 0;
15   if (*x > *y) {
16     h = *x; *x = *y; *y = h; swapped = 1;
17   }
18   return swapped;
19 }
```

Codebeispiel 2

Bubble Sort, Teil 2

```
1  void main() {
2    int swapped;
3    int i;
4    int n = st_ar.len-1;
5    do {
6      i = 0;
7      while (i < n) {
8        swapped = swap(&st_ar.ar[i], &st_ar.ar[i+1]);
9        i = i + 1;
10     }
11     n = n - 1;
12   } while(swapped);
13   print(st_ar.ar[input()]);
14   print(st_ar.ar[input()]);
15 }
```

Codebeispiel 3

Min Sort

```
1  // in:
2  // expected:-2 4 5 42 42 314
3  // from the Algorithms and Datastructures Lecture by Prof. Dr. Bast
4
5  struct stt {int len; int *ar;};
6
7  void min_sort(int *ar, int len) {
8    int i = 0;
9    int j;
10   int minimum;
11   int minimum_index;
12   int tmp;
13   while (i < len) {
14     minimum = ar[i];
15     minimum_index = i;
16     j = i + 1;
17     while (j < len) {
18       if (ar[j] < minimum) {
19         minimum = ar[j];
20         minimum_index = j;
21       }
22       j = j + 1;
23     }
```

Codebeispiel 3

Min Sort, Teil 2

```
    tmp = ar[i];
    ar[i] = ar[minimum_index];
    ar[minimum_index] = tmp;
    i = i + 1;
  }
}

void main() {
  int len = 6;
  int ar[6] = {314, 42, 4, 42, -2, 5};
  min_sort(ar, len);
  print(ar[0]);
  print(ar[1]);
  print(ar[2]);
  print(ar[3]);
  print(ar[4]);
  print(ar[5]);
}
```

Codebeispiel 4

Fakultät

```
1  // in:3 4
2  // expected:6 24
3  // from the Operating Systems Lecture by Prof. Dr. Christoph Scholl
4
5  int fakul(int n) {
6    int res_f; int h;
7    if (n == 1) {
8      res_f = 1;
9    } else {
10     h = fakul(n-1);
11     res_f = n * h;
12   }
13   return res_f;
14 }
15
16 void main() {
17   int res;
18   print(fakul(input()));
19   res = fakul(input());
20   print(res);
21 }
```

Codebeispiel 5

Binary Search

```
1  // in:41 42
2  // expected:-1 5
3  // datasegment:64
4  // from the Introduction to Programming Lecture by Peter Thiemann
5
6  struct ar_with_lent {int len; int *ar;};
7
8  int ar[10] = {1, 3, 4, 7, 19, 42, 128, 314, 512, 1024};
9
10 struct ar_with_lent ar_with_len = {.len=10, .ar=ar};
11
12 int bsearch_rec(int *ar, int key, int lo, int hi) {
13     int m;
14     if (lo == hi)
15         return -1;  // key not in empty segment
16     m = (lo + hi) / 2;  // position of root
17     if (ar[m] == key)
18         return m;
19     else if (ar[m] > key)
20         return bsearch_rec(ar, key, lo, m);
21     else  // ar[m] < key
22         return bsearch_rec(ar, key, m+1, hi);
23 }
```

Codebeispiel 5

Binary Search, Teil 2

```
1  void main() {
2    print(bsearch_rec(ar_with_len.ar, input(), 0, ar_with_len.len - 1));
3    print(bsearch_rec(ar_with_len.ar, input(), 0, ar_with_len.len - 1));
4  }
```

Codebeispiel 6

Primzahlen bis Zahl n

```
1  // in:30
2  // expected:2 3 5 7 11 13 17 19 23 29
3  // from the Introduction to Programming Lecture by Peter Thiemann
4
5  int ar[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
6  int len = 10;
7
8  void primes(int *primes, int n) {
9    int i = 3;
10   int j;
11   int idx = 1;
12   char undividable = 1;
13   if (n <= 1)
14       return;
15   primes[0] = 2;
16
17   while (i <= n) {
18     j = 0;
19     while (j < idx) {
20       if (i % primes[j] == 0) {
21         undividable = 0;
22       }
23       j = j + 1;
24     }
```

Codebeispiel 6

Primzahlen bis Zahl n, Teil 2

```
    if (undividable) {
      primes[idx] = i;
      idx = idx + 1;
    }
    undividable = 1;
    i = i + 1;
  }
}

void main() {
  int i = 0;
  primes(ar, input());
  while (i < len) {
    print(ar[i]);
    i = i + 1;
  }
}
```

Bedienung

Tutorials und Dokumentation

Abbildung 13: README.md des PicoC-Compilers Repositories.

- https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/blob/new_architecture/doc/getting_started.md.

Appendix

Schwerpunkte

- Syntax und Semantik der Sprache L_{PicoC} identisch zur Sprache L_C.
  - außer bei Kommandozeilenoptionen, Fehlermeldungen usw. kein Unterschied zu z.B. dem GCC.
- möglichst die RETI-Codeschnipsel aus der Vorlesung Scholl, „Betriebssysteme“, Kapitel 3 Übersetzung höherer Programmiersprachen in Maschinensprache.
  - bei Inkonsistenzen und Umstimmigkeiten angepasst.

PicoC

Grammatik

- https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/blob/new_architecture/src/concrete_syntax_picoc.lark

RETI-Architektur

Grammatik

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"	

Grammatik 2: Grammatik des Lexers für die Sprache L_{RETI} in EBNF.

RETI-Architektur

Grammatik

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	::=	(instr";")*	

Grammatik 3: Grammatik des Parsers für die Sprache L_{RETI} in EBNF.

PicoC

Definitionen

Call-by-Value

- Kopie des Arguments wird im Stackframe der aufgerufenen Funktion an Parameter gebunden.
- Argument bleibt bei Änderungen am entsprechenden Parameter in der aufgerufenen Funktion in der aufrufenden Funktion unverändert.

Call-by-Reference

- Referenz des Arguments wird im Stackframe der aufgerufenen Funktion an Parameter gebunden.
- Argument ändert sich bei Änderungen am entsprechenden Parameter in der aufgerufenen Funktion auch in der aufrufenden Funktion .

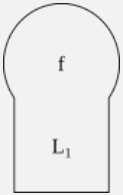
Weitere Definitionen

Interpreter

- führt Anweisungen „direkt“ aus.

T-Diagramm Programm

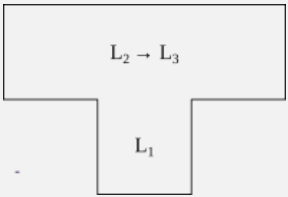
- in der Sprache L_1 geschrieben und berechnet Funktion f.



Weitere Definitionen

T-Diagramm Übersetzer

- in der Sprache L_1 geschrieben und übersetzt von Sprache L_2 in die Sprache L_3.
- gleiche Semantik.
- Kompilieren ist immer Übersetzen, aber Übersetzen ist nicht immer Kompilieren.



Lexikalische Analyse

Aufgabe

NUM	::=	"4"	| "2"	*L_Lex*
ADD_OP	::=	"+"		
MUL_OP	::=	"∗"		

Grammatik 4: Grammatik des Lexers

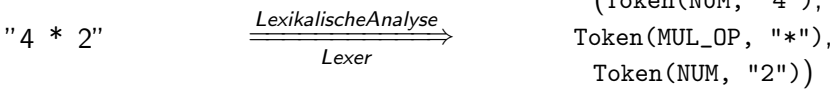


Abbildung 14: Aus Eingabewort Tokens generieren.

Lexikalische Analyse

Definitionen

Token

- Tupel (T, V), wobei:
  - Tokentyp $T \mathrel{\hat{=}}$
    - bestimmtes Nicht-Terminalsymbol auf der linken Seite des ::=-Symbols in der Grammatik des Lexers.
    - Überbegriff für möglicherweise unendliche Menge von Tokenwerten, die sich aus einem bestimmten Nicht-Terminalsymbol ableiten lassen.
    - in der Grammatik des Parsers ein Terminalsymbol.
  - Tokenwert $V \mathrel{\hat{=}}$ aus einem bestimmten Nicht-Terminalsymbol ableitbares Wort in der Grammatik des Lexers.

Lexikalische Analyse

Definitionen

NUM	::=	"4"	| "2"	*L_Lex*
ADD_OP	::=	"+"		
MUL_OP	::=	"∗"		

Grammatik 5: Grammatik des Lexers in EBNF

Lexer

- bildet Eingabewort $w \in \Sigma^*$ auf Folge von Tokens $(t_1, v_n) \dots (t_n, v_n) \in (T \times V)^*$ ab: $lex : \Sigma^* \to (T \times V)^*, w \mapsto (t_1, v_1) \dots (t_n, v_n)$.

Syntaktische Analyse

Ausgelassene Zwischenschritte

NUM	::=	"4" | "2"	*L_Lex*
ADD_OP	::=	"+"	
MUL_OP	::=	"∗"	
mul	::=	*mul MUL_OP NUM* | *NUM*	*L_Parse*
add	::=	*add ADD_OP mul* | *mul*	

Grammatik 6: Grammatik des Parsers unten und Grammatik des Lexers oben

- Tokentypen T sind in der Grammatik des Parsers Terminalsymbole

$$add \Rightarrow mul \Rightarrow mul\ \ MUL\_OP\ \ NUM \Rightarrow NUM\ \ MUL\_OP\ \ NUM \Rightarrow^* \text{"4"}\ \ \text{"}*\text{"}\ \ \text{"2"}$$

Syntaktische Analyse

Ausgelassene Zwischenschritte

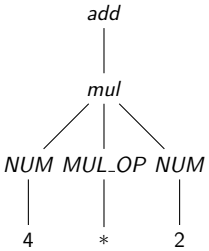


Abbildung 15: Formaler Ableitungsbaum

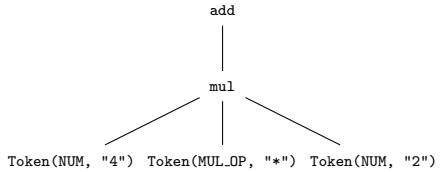
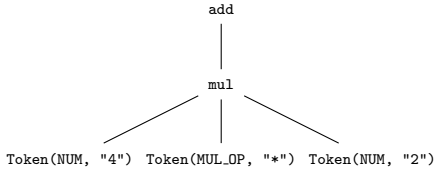


Abbildung 16: Compilerinterner Ableitungsbaum

Syntaktische Analyse

Ausgelassene Zwischenschritte

"4 * 2"



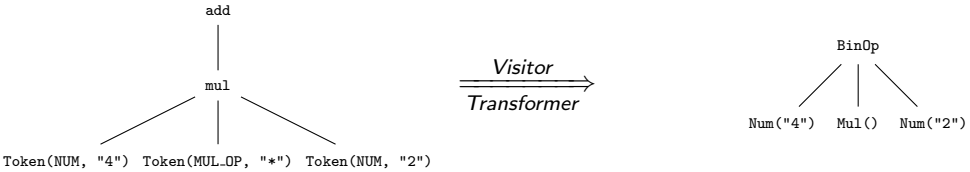
- Lexer ist Teil des Parsers.

Syntaktische Analyse

Ausgelassene Zwischenschritte

bin_op	::=	$Add() \mid Mul()$
exp	::=	$BinOp(\langle exp \rangle, \langle bin\_op \rangle, \langle exp \rangle) \mid Num(\langle str \rangle)$

Grammatik 7: Produktionen für Abstrakten Syntaxbaum



Syntaktische Analyse

Lark Parsing Toolkit

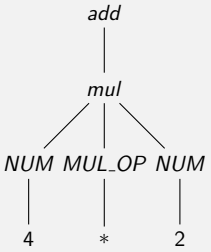
- erleichtert Syntaktische Analyse.
- Grammatik spezifizieren nach der Lark ein Eingabewort parst und einen Ableitungsbaum generiert.
- Earley Parser implementiert.
- Implementierung von Visitor und Transformer.
- Quellcode: `https://github.com/lark-parser/lark`.
- Dokomentation: `https://lark-parser.readthedocs.io/en/latest/index.html`.

Syntaktische Analyse

Definitionen

Formaler Ableitungsbaum

- Darstellung einer Ableitung als Baum.
- Innere Knoten $\hat{=}$ Nicht-Terminalsymbole.
- Blätter $\hat{=}$ Terminalsymbole oder das leere Wort ε.

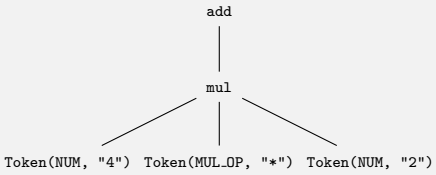


Syntaktische Analyse

Definitionen

(Compilerinterner) Ableitungsbaum

- compilerinterne Datenstruktur für Formalen Ableitungsbaum
- Innere Knoten $\hat{=}$ Nicht-Terminalsymbolen N der Grammatik des Parsers $G = \langle N, \Sigma, P, S \rangle$
- Blätter $\hat{=}$ Tokens (T, V), Grammatik des Lexers interessiert nicht mehr



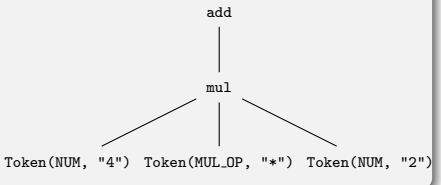
Syntaktische Analyse

Definitionen

Parser

- generiert aus Eingabewort einen compilerinternen Ableitungsbaum
- beeinhaltet Lexer

"4 * 2" $\Rightarrow$



Syntaktische Analyse

Definitionen

Visitor

- von unten-nach-oben nach Prinzip der Breitensuche über Ableitungsbaum.
- manipuliert Knoten oder tauscht Knoten in-place mit anderen Knoten des Ableitungsbaumes, indem beim Antreffen bestimmter Knoten des Ableitungsbaumes bestimmte Aktionen ausgeführt werden.

Transformer

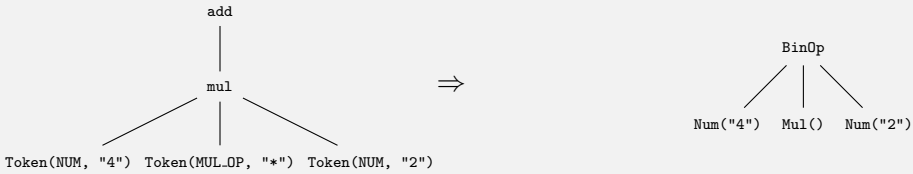
- von unten-nach-oben nach Prinzip der Breitensuche über Ableitungsbaum.
- generiert Abstrakten Syntaxbaum, indem beim Antreffen bestimmter Knoten des Ableitungsbaumes, diese durch Knoten des Abstrakten Syntaxbaumes ersetzt werden.

Syntaktische Analyse

Definitionen

Abstrakter Syntaxbaum

- compilerinterne Datenstruktur
- Abstraktion eines Ableitungsbaumes, Knoten für z.B. Präzedenz sind weg.
- leichter Zugriff und Weiterverarbeitbarkeit
- setzt Funktionalität einer Sprache um und erlaut es schnell herauszufinden aus welchen Bestandteilen der Sprache mit unterscheidbarer Semantik diese zusammengesetzt ist.



Code Generierung

Definitionen

Konkrete Syntax

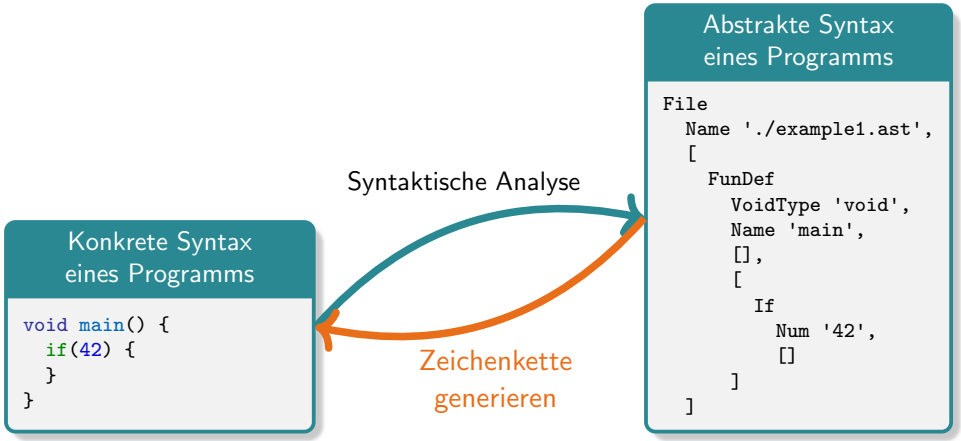
- bezeichnet den Aufbau von Programmen, wie man sie in eine Textdatei schreibt, um sie kompilieren zu lassen.

Abstrakte Syntax

- bezeichnet den Aufbau von Abstrakten Syntaxbäumen.
- nur bestimmte Kompositionen von Knoten sind erlaubt.

Code Generierung

Definitionen



Code Generierung

PicoC-Shrink Pass

- gleiche Semantik des Dereferenzierungsoperators `*(pntr_or_ar + i)` und des Operators für Indexzugriff auf ein Feld `pntr_or_ar[i]`, sind austauschbar.
- Ersetzen von `Deref(exp, i)` durch `Subscr(exp, i)`.
- Derefenzierung `*(pntr_or_ar + i)` wird von den Routinen für einen Indexzugriff auf ein Feld `pntr_or_ar[i]` übernommen $\Rightarrow$ kein redundanter Code.

Code Generierung

PicoC-Blocks Pass

- `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)` umgesetzt.
  - für Bedingungen und Branches ist jeweils ein eigener Block zuständig.
  - `IfElse(exp, stmts1, stmts2)` wird zur Umsetzung von Bedingungen verwendet.
  - für beide Fälle, wenn die Bedingung wahr oder falsch ist, wird mithilfe von `GoTo(label)` in einen von zwei alternativen Blöcken gesprungen oder ein Block erneut aufgerufen usw.

Code Generierung

PicoC-Blocks Pass

- jede Funktion erhält eigenen Block, der alle Anweisungen bis zum ersten Auftauchen oder Nicht-Auftauchen eines `If(exp, stmts)`, `While(exp, stmts)` oder `DoWhile(exp, stmts)` enthält.

Code Generierung

PicoC-ANF Pass

- formt Abstrakten Syntaxbaum um, sodass er die Syntax der Sprache L_{PicoC_ANF} erfüllt, deren Grammatik in A-Normalform ist.
- Funktionen mit ihren Lokalen Variablen, Parametern und Sichtbarkeitsbereichen, sowie Verbunstypen mit ihren Verbundsattributen werden mithilfe einer Symboltabelle aufgelöst.

Symboltabelle

- $sym : \{my\_var, my\_fun, \ldots\} \rightarrow \{Adresse, Datentyp, \ldots\}^n, \ Bezeichner \mapsto (Information_1, \ldots, Information_n)$.
- um während dem Kompiliervorang Informationen zu speichern, die später nicht mehr so einfach zugänglich sind.

Code Generierung

PicoC-ANF Pass

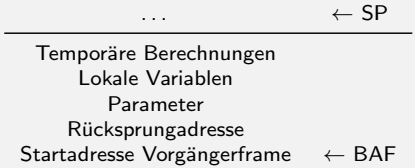
- alle Funktionen, außer der `main`-Funktion besitzen einen Stackframe für Lokale Variablen und Parameter.
- Globale Statische Daten sind Globale Variablen, sowie Lokale Variablen und Parameter der `main`-Funktion.

Code Generierung

PicoC-ANF Pass

Stackframe

- Datenstruktur, um Zustand einer Funktion zur Laufzeit zu „konservieren“.
- in einem Stack übereinander gestappelt und in die entgegengesetzte Richtung wieder abgebaut.
- die Startadresse des Vorgängerframes und die Rücksprungadresse beide im Stackframe der aufgerufenen Funktion.



Code Generierung

PicoC-ANF Pass

- Zweck: Maschinenbefehlen annähern, die meist nur eine Aktion ausführen, indem eine Anweisung, die mehreren Aktionen entspricht, aufgespalten wird und Nebeneffekte vorgeschoben werden.

ziehe Komplexe Ausdrücke aus Anweisungen und Ausdrücken vor

Code

```
void main() {
  int x = 1 - 5 * 4;
}
```

Code in A-Normalform

```
void main() {
  int x;  // allocate at address
↪  0 relative to DS Register
  1;
  5;
  4;
  stack(2) * stack(1);
  stack(2) - stack(1);
  global(0) = stack(1);
}
```

PicoC-ANF Pass

A-Normalform

Unreiner Ausdruck

- Ausdruck mit Nebeneffekt.

Reiner Ausdruck

- Ausdruck ohne Nebeneffekt.

PicoC-ANF Pass

A-Normalform

Monadische Normalform

- alle Anweisungen enthalten keine Unreinen Ausdrücke.
- Reine und Unreine Ausdrücke voneinander getrennt.

Code

```
void main() {
  int var = 5 % 4;
}
```

ziehe Unreine Ausdrücke aus Anweisungen vor

Code in Monadischer Normalform

```
void main() {
  int var;
  var = 5 % 4;
}
```

PicoC-ANF Pass

A-Normalform

Atomarer Ausdruck

- übersetzt sich in keinen kompletten Maschinenbefehl und keine Folge von Maschinenbefehlen.
- legt z.B. einen Immediate in einem Maschinenbefehl fest.

Komplexer Ausdruck

- ein Ausdruck, der nicht atomar ist.
- lässt sich in einen Maschinenbefehl oder eine Folge von Maschinenbefehlen übersetzen.

PicoC-ANF Pass

A-Normalform

A-Normalform

- ist bereits in Monadischer Normalform.
- alle Anweisungen und Ausdrücke enthalten ausschließlich Atomare Ausdrücke.

ziehe Komplexe Ausdrücke aus Anweisungen und Ausdrücken vor

Code

```
void main() {
  int x = 1 - 5 * 4;
}
```

Code in A-Normalform

```
void main() {
  int x;  // allocate at address
↪  0 relative to DS Register
  1;
  5;
  4;
  stack(2) * stack(1);
  stack(2) - stack(1);
  global(0) = stack(1);
}
```

PicoC-ANF Pass

A-Normalform

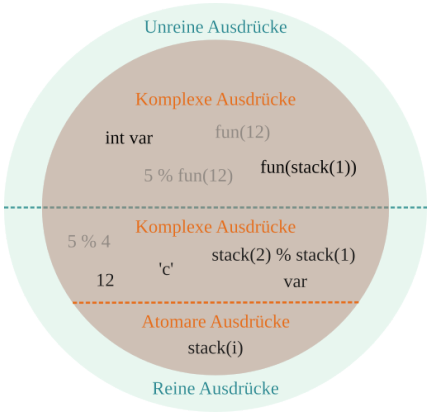


Abbildung 17: Überblick über Komplexe, Atomare, Unreine und Reine Ausdrücke.

Code Generierung

RETI-Blocks Pass

- PicoC-Knoten, die Anweisungen darstellen, werden durch semantisch entsprechende RETI-Knoten, die Befehle darstellen ersetzt.

Code Generierung

RETI-Patch Pass

- Ausbessern (engl. to patch) des Abstrakten Syntaxbaumes durch:
  - Einfügen eines `GoTo(Name('main'))` in den `global.<number>`-Block, wenn `main`-Funktion nicht die erste Funktion ist.
  - Entfernen von `GoTo()`s, deren Sprung nur eine Adresse weiterspringt.
  - RETI-Code vor jede Division, der prüft, ob durch `0` geteilt wird.
    - Fehlercode 1 in `ACC`-Register für `DivisionByZero`.
    - Ausführung wird beendet.

Code Generierung

RETI-Patch Pass

- Ausbessern (engl. to patch) des Abstrakten Syntaxbaumes durch:
  - Überprüfen, ob Immediates `Im(str)` in Befehlen $< -(2^{21})$ oder $> 2^{21} - 1$.
    - Bitshiften und Anwenden von Bitweise ODER.
    - Immediate $< -(2^{31})$ oder $> 2^{31} - 1 \Rightarrow$ `TooLargeLiteral`.

Code Generierung

RETI Pass

- letzte verbliebene PicoC-Knoten werden durch entsprechende RETI-Knoten ersetzt:
  - keine Blöcke mehr, Knoten genauso zusammengefügt, wie sie in entfernten Blöcken angeordnet waren.
  - `GoTo(Name(str))` werden duch einen Immediate mit passender Distanz / Adresse oder einen Sprungbefehl mit passender Distanz `Jump(Always(), Im(str(distance)))` ersetzt.

Code Generierung

RETI Pass

- $adr_{danach} = \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} + idx + 4$
- $Dist_{Zielbl.} = \begin{cases} \#Bef_{vor\ Zielbl.} - \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} - idx & \#Bef_{vor\ Zielbl.} != \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} \\ -idx & \#Bef_{vor\ Zielbl.} = \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} \end{cases}$

Code Generierung

RETI Pass

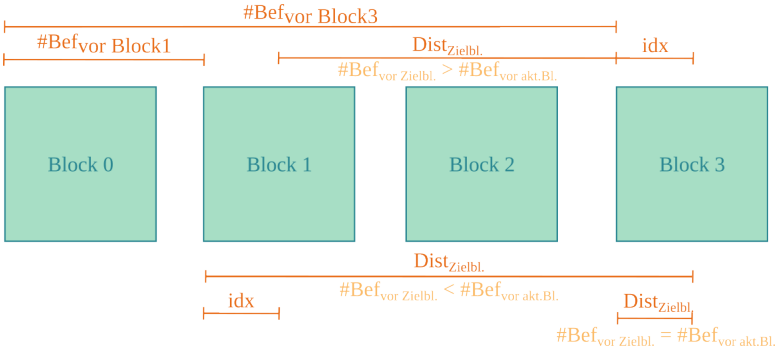


Abbildung 18: Veranschaulichung Distanzberechnung.

Fehlermeldungen

Kategorien

Fehlerkategorie	Beschreibung
`UnexpectedCharacter`	Der Lexer ist auf eine unerwartete Zeichenfolge gestossen, die in der Grammatik des Lexers nicht abgeleitet werden kann.
`UnexpectedToken`	Der Parser hat ein unerwartetes Token erhalten, das in dem Kontext in dem es sich befand in der Grammatik des Parsers nicht abgeleitet werden kann.
`UnexpectedEOF`	Der Parser hat in dem Kontext in dem er sich befand bestimmte Tokens erwartet, aber die Eingabe endete abrupt.

Tabelle 1: Fehlerarten in der Lexikalischen und Syntaktischen Analyse.

Fehlerkategorie	Beschreibung
`DivisionByZero`	Wenn bei einer Division durch 0 geteilt wird (z.B. `var / 0`).

Tabelle 2: Fehlerarten, die zur Laufzeit auftreten.

Fehlermeldungen

Kategorien, Teil 2

Fehlerkategorie	Beschreibung
`UnknownIdentifier`	Es wird ein Zugriff auf einen Bezeichner gemacht (z.B. `unknown_var + 1`), der noch nicht deklariert und ist daher nicht in der Symboltabelle aufgefunden werden kann.
`UnknownAttribute`	Der Verbundstyp (z.B. `struct st {int attr1; int attr2;}`) auf dessen Attribut im momentanen Kontext zugegriffen wird (z.B. `var[3].unknown_attr`) besitzt das Attribut (z.B. `unknown_attr`) auf das zugegriffen werden soll nicht.
`ReDeclarationOrDefinition`	Ein Bezeichner von z.B. einer Funktion oder Variable, der bereits deklariert oder definiert ist (z.B. `int var`) wird erneut deklariert oder definiert (z.B. `int var[2]`). Dieser Fehler ist leicht festzustellen, indem geprüft wird ob das Assoziative Feld durch welches die Symboltabelle umgesetzt ist diesen Bezeichner bereits als Schlüssel besitzt.
`TooLargeLiteral`	Der Wert eines Literals ist größer als $2^{31} - 1$ oder kleiner als -2^{31}.
`NoMainFunction`	Das Programm besitzt keine oder mehr als eine `main`-Funktion.

Tabelle 3: Fehlerarten in den Passes.

Fehlermeldungen

Kategorien, Teil 3

Fehlerkategorie	Beschreibung
`ConstAssign`	Wenn einer intialisierten Konstante (z.B. `const int const_var = 42`) ein Wert zugewiesen wird (z.B. `const_var = 41`). Der einzige Weg, wie eine Konstante einen Wert erhält ist bei ihrere Initialisierung.
`PrototypeMismatch`	Der Prototyp einer deklarierten Funktion (z.B. `int fun(int arg1, int arg2[3])`) stimmt nicht mit dem Prototyp der späteren Definition dieser Funktion (z.B. `void fun(int arg1[2], int arg2) { }`) überein.
`ArgumentMismatch`	Wenn die Argumente eines Funktionsaufrufs (z.B. `fun(42, 314)`) nicht mit dem Prototyp der Funktion die aufgerufen werden soll (z.B. `void fun(int arg[2]) { }`) nach Datentypen oder Anzahl Argumente bzw. Parameter übereinstimmt.
`WrongReturnType`	Wenn eine Funktion, die ihrem Prototyp zufolge einen Rückgabewert hat, der nicht mit dem dem Datentyp übereinstimmt, der von einer `return`-Anweisung zurückgegeben wird.

Tabelle 4: Fehlerarten in den Passes, Teil 2.

Fehlermeldungen

Kategorien, Teil 4

Fehlerkategorie	Beschreibung
`DatatypeMismatch`	Wenn die Operation und der Datentyp des Attributes oder Elementes auf welches in diesem Kontext zugegriffen wird nicht zueinander passen.

Tabelle 5: Fehlerarten in den Passes, Teil 3.

Bedienung des PicoC-Compilers

Kommandozeilenargumente `<cli-options>` für den Compiler

Kommandozeilen-option	Beschreibung	Standard-wert
`-i, --intermediate_stages`	Gibt Zwischenstufen der Kompilierung in Form der verschiedenen Tokens, Ableitungsbäume, Abstrakten Syntaxbäume der verschiedenen Passes in Dateien mit entsprechenden Dateiendungen aber gleichem Basisnamen aus. Wenn die `--run`-Option aktiviert ist, wird der Zustand der RETI nach der Ausführung des letzten Befehls in eine Datei ausgegeben. Im Shell-Mode erfolgt keine Ausgabe in Dateien, sondern nur im Terminal.	`False`, most_used: `True`
`-p, --print`	Gibt alle Dateiausgaben auch im Terminal aus. Diese Option ist im Shell-Mode dauerhaft aktiviert.	`False`, Shell-Mode und most_used: `True`

Bedienung des PicoC-Compilers

Kommandozeilenargumente `<cli-options>` für den Compiler, Teil 2

Kommandozeilen-option	Beschreibung	Standard-wert
`-v`, `--verbose`	Fügt den verschiedenen Zwischenschritten der Kompilierung, unter anderem auch dem finalen RETI-Code Kommentare hinzu. Diese Kommentare beinhalten eine Anweisung oder einen Befehl aus einem vorherigen Pass, der durch die darunterliegenden Anweisungen oder Befehle ersetzt wurde. Wenn die `--run` und die `--immediate_stages`-Option aktiviert sind, wird der Zustand der virtuellen RETI-CPU vor und nach jedem Befehl ausgegeben.	`False`
`-vv`, `--double_verbose`	Hat dieselben Effekte, wie die `--verbose`-Option, aber bewirkt zusätzlich weitere Effekte. PicoC-Knoten erhalten bei der Ausgabe als zusammenhängende Abstrakte Syntaxbäume zustätzliche runde Klammern, sodass direkter abgelesen werden kann, wo ein Knoten anfängt und wo einer aufhört. In Fehlermeldungen werden mehr Tokens angezeigt, die an der Stelle der Fehlermeldung erwartet worden wären. Bei Aktivierung der `--intermediate_stages`-Option werden in den dadurch ausgegebenen Abstrakten Syntaxbäumen zusätzlich versteckte Attribute angezeigt, die Informationen zu Datentypen und Informationen für Fehlermeldungen beinhalten.	`False`

Bedienung des PicoC-Compilers

Kommandozeilenargumente `<cli-options>` für den Compiler, Teil 3

Kommandozeilen-option	Beschreibung	Standard-wert
`-h, --help`	Zeigt diese Dokumentation mithilfe des im Betriebssystem eingestellten PDF-Viewers an.	`False`
`-l, --lines`	Es lässt sich einstellen, wieviele Zeilen rund um die Stelle an welcher ein Fehler aufgetreten ist angezeigt werden sollen.	2
`-c, --color`	Aktiviert farbige Ausgabe für Fehlermeldungen, PicoC- und RETI-Code, Tokens, Ableitungsbäume und Abstrakte Syntaxbäume der verschiedenen Passes.	`False`, most_used: `True`
`-e, --example`	Filtert für übersichtliche Codebeispiele bestimmte Kommentare in den Abstrakten Syntaxbäumen heraus. Diese Option wurde für die Codebeispiele in der schriftlichen Ausarbeitung der Bachelorarbeit implementiert.	`False`

Bedienung des PicoC-Compilers

Kommandozeilenargumente `<cli-options>` für den Compiler, Teil 4

Kommandozeilen-option	Beschreibung	Standard-wert
`-t`, `--traceback`	Nutzt das Python Package `traceback` um bei Fehlermeldungen Stacktraces des Compilers auszugeben.	`False`
`-d`, `--debug`	Startet den PuDB-Debugger (`pip install pudb`) vor Beginn des Kompilierens oder Interpretierens.	`False`
`-s`, `--supress_errors`	Obwohl eine Fehlermeldung ausgegeben werden müsste, wird bei manchen Fehlermeldungen die Ausgabe unterdrückt.	`False`

Bedienung des PicoC-Compilers

Kommandozeilenargumente `<cli-options>` für den Interpreter

Kommandozeilen-option	Beschreibung	Standard-wert
`-R`, `--run`	Führt die RETI-Befehle, die das Ergebnis der Kompilierung sind mit einer virtuellen RETI-CPU aus. Wenn die `--intermediate_stages`-Option aktiviert ist, wird eine Datei `<basename>.reti_states` erstellt, welche den Zustsand der RETI-CPU nach dem letzten ausgeführten RETI-Befehl enthält. Wenn die `--verbose`- oder `--double_verbose`-Option aktiviert ist, wird der Zustand der RETI-CPU vor und nach jedem Befehl auch noch zusätlich in die Datei `<basename>.reti_states` ausgegeben.	`False`, Show-Mode und most_used: `True`
`-B`, `--process_begin`	Setzt die Adresse, wo der Prozess bzw. das Codesegment für das ausgeführte Programm beginnt.	3
`-D`, `--datasegment_size`	Setzt die Größe des Datensegments. Diese Option muss mit Vorsicht gesetzt werden, denn wenn der Wert zu niedrig gesetzt wird, dann können die Globalen Statischen Daten und der Stack miteinander kollidieren.	32

Bedienung des PicoC-Compilers

Kommandozeilenargumente `<cli-options>` für den Interpreter, Teil 2

Kommandozeilen-option	Beschreibung	Standardwert
`-S, --show_mode`	Startet den Show-Mode. Der Show-Mode zeigt eine Zeichenfolge über mehrere Seiten verteilt an. Standardmäßig wird dies für die Zustände der RETI nach und vor der Ausführung eines bestimmten RETI-Befehls gemacht. Der Eindruck des Debuggens kommt dadurch, dass durch Drücken entsprechender Tasten immer an die richtigen Stellen gesprungen wird, an denen der nächste oder vorherige Zustand anfängt.	`False`, compile_show und interpret_show: `True`
`-P, --pages`	Setzt auf wieviele Seiten im Show-Mode eine Zeichenfolge verteilt werden soll.	`5`
`-E, --extension`	Setzt welcher Dateityp, der durch eine bestimte Dateiendung spezifiziert ist im Show-Mode angezeigt werden soll.	`reti_states`

Bedienung des PicoC-Compilers

Shell-Mode

- Starten: `> picoc_compiler`.
- Kompilieren: `> compile <cli-options> "<seq-of-stmts>"` (`cpl`).
  - automatisch in `main`-Funktion eingefügt: `void main(){<seq-of-stmts>}`.
- Kompilieren, meist genutzt:
  `> must_used <cli-options> "<seq-of-stmts>"` (`mu`).
- Kompilieren und dann Show-Mode:
  `> compile-show <cli-options> "<seq-of-stmts>"` (`cs`).
- Interpretieren und dann Show-Mode:
  `> interpret-show <cli-options> "<seq-of-instrs>"` (`is`).

Bedienung des PicoC-Compilers

Shell-Mode, Teil 2

- Beenden: `> quit`.
- Dokumentation: `> help` (`?`).
- Multiline-Command: weitere Zeile mit ↩ und mit `;` terminieren.
- Farben toggeln: `> color_toggle` (`ct`).
- Cursor bewegen: ←, →.
- Befehlshistorie: ↑, ↓.
- Autovervollständigung: `Tab`.

Bedienung des PicoC-Compilers

Shell-Mode, Teil 3

- Befehlshistorie anzeigen: `> history`.
- Aktion mit Befehlshistorie ausführen `> history <opt>`.
  - Befehl erneut ausführen: `-r <cmd-nr>`.
  - Befehl editieren `-e <cmd-nr>` (Editor durch Environment Variable `$EDITOR` bestimmt).
  - Befehlshistorie leeren: `-c`.
  - Befehl suchen: `ctrl + r`.

Bedienung des PicoC-Compilers

Show-Mode

- Starten: `> picoc_compiler -S <cli-options> program.(reti|picoc)`.
  - Shell-Mode Befehle: `> cs <cli-options> "<seq-of-stmts>"` bzw. `> is <cli-options> "<seq-of-instrs>"`.
  - Anzahl Seiten: `-P <num>`.
  - Dateiendung der gewünschten Datei: `-E <extension>`.
- Spezielle Einstellungen: `/interp_showcase.vim`.
- Neovim: `:help`, `:Tutor`.

Bedienung des PicoC-Compilers

Show-Mode, Teil 2

- Zustände vor / nach Befehl ansehen: `Tab`, `⇑ −Tab`.
- Beenden: `q`, `Esc`.
- Fenster minimieren / maximieren: `m`, `M`.
- Alle Fenster gleich aufteilen: `E`.
- Kommentare toggeln: `C`.
- (Relative) Zeilennummern toggeln: `N`, `R`.
- Zeile farbig markieren: `c − 1`, ..., `c − 9`.
- Farbig markierte Zeilen verstecken / wieder einblenden: `H`.

Bedienung des PicoC-Compilers

Show-Mode, Teil 3

- Farbig markierte Zeilen entfernen D.
- Weiteres Fenster öffnen: S.

Makefile Bedienung

Show-Mode

- Starten für bestimmtes Programm:
  ```
  > make show FILEPATH=<path-to-file> <more-options>
  ```
  .
- Starten für bestimmten Test in `/tests`:
  ```
  > make test-show TESTNAME=<testname> <more-options>
  ```
  .

Makefile Bedienung

Makefile Optionen `<more-options>`

Kommandozeilenoption	Beschreibung	Standardwert
`FILEPATH`	Pfad zur Datei, die im Show-Mode angezeigt werden soll.	∅
`TESTNAME`	Name des Tests. Alles andere als der Basisname, wie die Dateiendung wird abgeschnitten.	∅
`EXTENSION`	Dateiendung, die an `TESTNAME` angehängt werden soll, damit daraus z.B. `./tests/TESTNAME.EXTENSION` wird.	`reti_states`
`NUM_WINDOWS`	Anzahl Fenster auf die ein Dateiinhalt verteilt werden soll.	5
`VERBOSE`	Möglichkeit für eine ausführlichere Ausgabe die Kommandozeilenoption `-v` oder `-vv` zu aktivieren.	∅ bzw. `-v` für `test-show`
`DEBUG`	Möglichkeit die Kommandozeilenoption `-d` zu aktivieren, um bei `make test-show TESTNAME=<testname>` den Debugger für den entsprechenden Test `<testname>` zu starten.	∅

Tests

Bedienung

- Tests in `/tests` verifizieren und ausführen: `> make test <more-options>`.
  - `/run_tests.sh`, welches zuerst `/extract_input_and_expected.sh`, `/convert_to_c.py` und `/verify_tests.sh` ausführt.
- Tests vom GCC verifizieren lassen: `> make verify TESTNAME=<testname>`.
  - vorher `/extract_input_and_expected.sh`, `/convert_to_c.py` ausgeführt.
  - `/verify_tests.sh`.

Tests

Bedienung, Teil 2

- Informationen aus Tests extrahieren:
  `> make extract TESTNAME=<testname>`.
  - Eingabe `// in:<space-sep-values>` in `<program>.in`, Ausgabe `// expected:<space-sep-values>` in `<program>.out_expected`, Datensegmentgröße `// datasegment:<size>` optional in `<program>.datasegment_size`.
  - `/extract_input_and_expected.sh`.

Tests

Bedienung, Teil 3

- Testdatei erstellen, die vom GCC kompiliert werden kann:
  `> make convert TESTNAME=<testname>`.
  - `input()`s werden durch Eingaben in `<program>.in` ersetzt.
  - `print(exp)`s werden durch `#include<stdio.h>` und `printf("%d", exp)` ersetzt.
  - `/convert_to_c.py`.

Tests

Testkategorien

Testkategorie	Beschreibung	Anzahl
`basic`	Grundlegende Funktionalitäten des PicoC-Compilers.	23
`advanced`	Spezialfälle und Kombinationen verschiedener Funktionalitäten des PicoC-Compilers.	20
`hard`	Lange und komplexe Tests, für welche die Funktionalitäten des PicoC-Compilers in perfekter Harmonie miteinander funktionieren müssen.	8
`example`	Bekannte Algorithmen, die als gutes, repräsentatives Beispiel für die Funktionsfähigkeit des PicoC-Compilers dienen.	24
`error`	Fehlermeldungen testen. Keine Verifikation wird ausgeführt.	69
`exclude`	Aufgrund vielfältiger Gründe soll keine Verifikation ausgeführt werden.	7
`thesis`	Codebeispiele der schriftlichen Ausarbeitung der Bachelorarbeit, die etwas umgeschrieben wurden, damit nicht nur das Durchlaufen dieser Tests getestet wird.	28
`tobias`	Vom Betreuer dieser Bachelorarbeit, M.Sc. Tobias Seufert geschrieben.	1

Codebeispiel

PicoC-Code

```
1  // in:1
2  // expected:42
3  // datasegment:36
4
5  struct stt {int attr1; int attr2[2];};
6
7  struct stt ar_of_sts[3][2];
8
9  int fun(struct stt (*param)[3][2]){
10   (*(*param+2))[1].attr2[input()] = 42;
11   return 1;
12 }
13
14 void main() {
15   struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2] = &ar_of_sts;
16   int res = fun(pntr_on_ar_of_sts);
17   if (res) {
18     print((*(*pntr_on_ar_of_sts+2))[1].attr2[1]);
19   }
20 }
```

Lexikalische Analyse

Tokens generieren

PicoC-Code

```
// ...
struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2]
↪  = &ar_of_sts;
// ...
```

Lexer

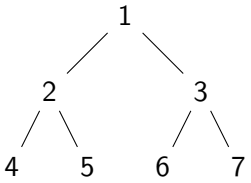
Tokenfolge

```
... Token('STRUCT', 'struct'),
↪  Token('NAME', 'stt'), Token('LPAR',
↪  '('), Token('MUL_DEREF_PNTR', '*'),
↪  Token('NAME', 'pntr_on_ar_of_sts'),
↪  Token('RPAR', ')'), Token('LSQB',
↪  '['), Token('NUM', '3'),
↪  Token('RSQB', ']'), Token('LSQB',
↪  '['), Token('NUM', '2'),
↪  Token('RSQB', ']'), Token('EQUAL',
↪  '='), Token('REF_AND', '&'),
↪  Token('NAME', 'ar_of_sts'),
↪  Token('SEMICOLON', ';'), ...
```

- ein „Zeiger auf ein Feld der Mächtigkeit 3 von Feldern der Mächtigkeit 2 von Verbunden des Typs `stt`“.
- *Clockwise/Spiral Rule*

Syntaktische Analyse

Darstellung von Bäumen



$\Rightarrow$

Baum in der Darstellung des PicoC-Compilers

```
1
  2
    4
    5
  3
    6
    7
```

- wächst von links-nach-rechts und alle Kinderknoten sind unter dem Elternknoten.

Syntaktische Analyse

Ableitungsbaum generieren

PicoC-Code

```
// ...
struct stt (*pntr_on_ar_of_sts)[3][2] =
↪  &ar_of_sts;
// ...
```

Parser & Lexer

Ableitungsbaum

```
...
  init_stmt
    alloc
      type_spec
        struct_spec
          name          stt
      pntr_decl
        pntr_deg
        array_decl
          pntr_decl
            pntr_deg          *
            array_decl
              name  pntr_on_ar_of_sts
              array_dims
          array_dims
            3
            2
    initializer
      ...
```

- ein „Zeiger auf ein Feld der Mächtigkeit 3 von Feldern der Mächtigkeit 2 von Verbunden des Typs `stt`“.
- *Clockwise/Spiral Rule*

Syntaktische Analyse

Ableitungsbaum vereinfachen

Ableitungsbaum

```
...
  init_stmt
    alloc
      type_spec
        struct_spec
          name          stt
      pntr_decl
        pntr_deg
        array_decl
          pntr_decl
            pntr_deg          *
            array_decl
              name   pntr_on_ar_of_sts
              array_dims
          array_dims
            3
            2
    initializer
      ...
```

Vereinfachter Ableitungsbaum

```
...
  init_stmt
    alloc
      pntr_decl
        pntr_deg
        array_decl
          array_dims
            3
            2
          pntr_decl
            pntr_deg  *
            array_decl
              array_dims
              type_spec
                struct_spec
                  name          stt
      name          pntr_on_ar_of_sts
    initializer
      ...
```

Syntaktische Analyse

Abstrakten Syntaxbaum generieren

Vereinfachter Ableitungsbaum

```
...
  init_stmt
    alloc
      pntr_decl
        pntr_deg
        array_decl
          array_dims
            3
            2
          pntr_decl
            pntr_deg  *
            array_decl
              array_dims
              type_spec
                struct_spec
                  name          stt
    name          pntr_on_ar_of_sts
    initializer
      ...
```

Transformer ohne Umdrehen

Abstrakter Syntaxbaum

```
...
  Assign
    Alloc
      Writeable,
      ArrayDecl
        [
          Num '3',
          Num '2'
        ],
        PntrDecl
          Num '1',
          StructSpec
            Name 'stt',
      Name 'pntr_on_ar_of_sts',
    Ref
      Name 'ar_of_sts',
  ...
```

Syntaktische Analyse

Abstrakten Syntaxbaum generieren

Vereinfachter Ableitungsbaum

```
...
  init_stmt
    alloc
      pntr_decl
        pntr_deg
        array_decl
          array_dims
            3
            2
          pntr_decl
            pntr_deg  *
            array_decl
              array_dims
              type_spec
                struct_spec
                  name         stt
    name          pntr_on_ar_of_sts
  initializer
    ...
```

Abstrakter Syntaxbaum

```
...
  Assign
    Alloc
      Writeable,
      PntrDecl
        Num '1',
        ArrayDecl
          [
            Num '3',
            Num '2'
          ],
          StructSpec
            Name 'stt',
      Name 'pntr_on_ar_of_sts',
    Ref
      Name 'ar_of_sts',
  ...
```

Syntaktische Analyse

Abstrakten Syntaxbaum generieren

Tokenfolge

```
... Token('STRUCT', 'struct'), Token('NAME',
↪ 'stt'), Token('LPAR', '('),
↪ Token('MUL_DEREF_PNTR', '*'),
↪ Token('NAME', 'pntr_on_ar_of_sts'),
↪ Token('RPAR', ')'), Token('LSQB', '['),
↪ Token('NUM', '3'), Token('RSQB', ']'),
↪ Token('LSQB', '['), Token('NUM', '2'),
↪ Token('RSQB', ']'), Token('EQUAL', '='),
↪ Token('REF_AND', '&'), Token('NAME',
↪ 'ar_of_sts'), Token('SEMICOLON', ';'),
↪ ...
```

Syntaktische Analyse

Abstrakter Syntaxbaum

```
...
  Assign
    Alloc
      Writeable,
      PntrDecl
        Num '1',
        ArrayDecl
          [
            Num '3',
            Num '2'
          ],
          StructSpec
            Name 'stt',
      Name 'pntr_on_ar_of_sts',
    Ref
      Name 'ar_of_sts',
  ...
```

Code Generierung

Abstrakter Syntaxbaum nach Syntaktischer Analyse

```
File
  Name './example_presentation.ast',
  [
    StructDecl
      Name 'stt',
      [
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('attr1'))
        Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr2'))
      ],
    Exp
      Alloc
        Writeable,
        ArrayDecl
          [
            Num '3',
            Num '2'
          ],
          StructSpec
            Name 'stt',
        Name 'ar_of_sts',
```

Code Generierung

Abstrakter Syntaxbaum nach Syntaktischer Analyse, Teil 2

```
21      FunDef
22        IntType 'int',
23        Name 'fun',
24        [
25          Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))),
          ↪  Name('param'))
26        ],
27        [
28          Assign(Subscr(Attr(Subscr(Deref(Deref(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')), Name('attr2')),
          ↪  Call(Name('input'), [])), Num('42'))
29          Return(Num('1'))
30        ],
```

Code Generierung

Abstrakter Syntaxbaum nach Syntaktischer Analyse, Teil 3

```
31      FunDef
32        VoidType 'void',
33        Name 'main',
34        [],
35        [
36          Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))),
            ↪  Name('pntr_on_ar_of_sts')), Ref(Name('ar_of_sts')))
37          Assign(Name('res'), Call(Name('fun'), [Name('pntr_on_ar_of_sts')])),
38          If
39            Name 'res',
40            [
41              Exp(Call(Name('print'), [Subscr(Attr(Subscr(Deref(Deref(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Num('0')),
                ↪  Num('2')), Num('1')), Name('attr2')), Num('1'))]))
42            ]
43        ]
44    ]
```

Code Generierung

PicoC-Shrink Pass

```
File
  Name './example_presentation.picoc_shrink',
  [
    StructDecl
      Name 'stt',
      [
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('attr1'))
        Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr2'))
      ],
    Exp
      Alloc
        Writeable,
        ArrayDecl
          [
            Num '3',
            Num '2'
          ],
          StructSpec
            Name 'stt',
        Name 'ar_of_sts',
```

Code Generierung

PicoC-Shrink Pass, Teil 2

```
21      FunDef
22        IntType 'int',
23        Name 'fun',
24        [
25          Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))),
            ↪ Name('param'))
26        ],
27        [
28          Assign(Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')), Name('attr2')),
            ↪ Call(Name('input'), [])), Num('42'))
29          Return(Num('1'))
30        ],
```

Code Generierung

PicoC-Shrink Pass, Teil 3

```
31      FunDef
32        VoidType 'void',
33        Name 'main',
34        [],
35        [
36          Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))),
            ↪  Name('pntr_on_ar_of_sts')), Ref(Name('ar_of_sts')))
37          Assign(Name('res'), Call(Name('fun'), [Name('pntr_on_ar_of_sts')])),
38          If
39            Name 'res',
40            [
41              Exp(Call(Name('print'), [Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Num('0')),
                ↪  Num('2')), Num('1')), Name('attr2')), Num('1'))]))
42            ]
43        ]
44    ]
```

Code Generierung

PicoC-Blocks Pass

```
File
  Name './example_presentation.picoc_blocks',
  [
    StructDecl
      Name 'stt',
      [
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('attr1'))
        Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr2'))
      ],
    Exp
      Alloc
        Writeable,
        ArrayDecl
          [
            Num '3',
            Num '2'
          ],
          StructSpec
            Name 'stt',
        Name 'ar_of_sts',
```

Code Generierung

PicoC-Blocks Pass, Teil 2

```
21      FunDef
22        IntType 'int',
23        Name 'fun',
24        [
25          Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))),
            ↪ Name('param'))
26        ],
27        [
28          Block
29            Name 'fun.3',
30            [
31              Assign(Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')),
                ↪ Name('attr2')), Call(Name('input'), [])), Num('42'))
32              Return(Num('1'))
33            ]
34      ],
```

Code Generierung

PicoC-Blocks Pass, Teil 3

```
35      FunDef
36        VoidType 'void',
37        Name 'main',
38        [],
39        [
40          Block
41            Name 'main.2',
42            [
43              Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')],
                ↪  StructSpec(Name('stt')))), Name('pntr_on_ar_of_sts')), Ref(Name('ar_of_sts')))
44              Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('res')), Call(Name('fun'),
                ↪  [Name('pntr_on_ar_of_sts')]))
45              // If(Name('res'), []),
46              IfElse
47                Name 'res',
48                [
49                  GoTo(Name('if.1'))
50                ],
51                [
52                  GoTo(Name('if_else_after.0'))
53                ]
54            ],
```

Code Generierung

PicoC-Blocks Pass, Teil 4

```
55          Block
56            Name 'if.1',
57            [
58              Exp(Call(Name('print'), [Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Num('0')),
                ↪  Num('2')), Num('1')), Name('attr2')), Num('1'))]))
59              GoTo(Name('if_else_after.0'))
60            ],
61          Block
62            Name 'if_else_after.0',
63            []
64        ]
65    ]
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass - Symboltabelle

```
SymbolTable
  [
    Symbol
      {
        type qualifier:          Empty()
        datatype:                IntType('int')
        name:                    Name('attr1@stt')
        value or address:        Empty()
        position:                Pos(Num('5'), Num('16'))
        size:                    Num('1')
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:          Empty()
        datatype:                ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))
        name:                    Name('attr2@stt')
        value or address:        Empty()
        position:                Pos(Num('5'), Num('27'))
        size:                    Num('2')
      },
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass - Symboltabelle, Teil 2

```
21      Symbol
22        {
23          type qualifier:          Empty()
24          datatype:                StructDecl(Name('stt'), [Alloc(Writeable(), IntType('int'),
          ↪  Name('attr1'))Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr2'))])
25          name:                    Name('stt')
26          value or address:        [Name('attr1@stt'), Name('attr2@stt')]
27          position:                Pos(Num('5'), Num('7'))
28          size:                    Num('3')
29        },
30      Symbol
31        {
32          type qualifier:          Writeable()
33          datatype:                ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))
34          name:                    Name('ar_of_sts@global!')
35          value or address:        Num('0')
36          position:                Pos(Num('7'), Num('11'))
37          size:                    Num('18')
38        },
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass - Symboltabelle, Teil 3

```
39      Symbol
40        {
41          type qualifier:          Empty()
42          datatype:                FunDecl(IntType('int'), Name('fun'), [Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'),
          ↪  ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt')))), Name('param'))])
43          name:                    Name('fun')
44          value or address:        Empty()
45          position:                Pos(Num('9'), Num('4'))
46          size:                    Empty()
47        },
48      Symbol
49        {
50          type qualifier:          Writeable()
51          datatype:                PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt'))))
52          name:                    Name('param@fun')
53          value or address:        Num('0')
54          position:                Pos(Num('9'), Num('21'))
55          size:                    Num('1')
56        },
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass - Symboltabelle, Teil 4

```
57    Symbol
58      {
59        type qualifier:          Empty()
60        datatype:                FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
61        name:                    Name('main')
62        value or address:        Empty()
63        position:                Pos(Num('14'), Num('5'))
64        size:                    Empty()
65      },
66    Symbol
67      {
68        type qualifier:          Writeable()
69        datatype:                PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3'), Num('2')], StructSpec(Name('stt'))))
70        name:                    Name('pntr_on_ar_of_sts@main')
71        value or address:        Num('18')
72        position:                Pos(Num('15'), Num('15'))
73        size:                    Num('1')
74      },
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass - Symboltabelle, Teil 5

```
75      Symbol
76        {
77          type qualifier:         Writeable()
78          datatype:               IntType('int')
79          name:                   Name('res@main')
80          value or address:       Num('19')
81          position:               Pos(Num('16'), Num('6'))
82          size:                   Num('1')
83        }
84    ]
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass

```
File
  Name './example_presentation.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'global.4',
      [],
    Block
      Name 'fun.3',
      [
        // Assign(Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')),
        ↪  Name('attr2')), Call(Name('input'), [])), Num('42'))
        Exp(Num('42'))
        Ref(Stackframe(Num('0')))
        Exp(Num('0'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Num('2'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Num('1'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
        Exp(Call(Name('input'), []))
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass, Teil 2

```
21          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
22          Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
23          // Return(Num('1'))
24          Exp(Num('1'))
25          Return(Stack(Num('1')))
26        ],
27      Block
28        Name 'main.2',
29        [
30          // Assign(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Ref(Name('ar_of_sts')))
31          Ref(Global(Num('0')))
32          Assign(Global(Num('18')), Stack(Num('1')))
33          // Assign(Name('res'), Call(Name('fun'), [Name('pntr_on_ar_of_sts')]))
34          StackMalloc(Num('2'))
35          Exp(Global(Num('18')))
36          NewStackframe(Name('fun.3'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
37          Exp(GoTo(Name('fun.3')))
38          RemoveStackframe()
39          Exp(ACC)
40          Assign(Global(Num('19')), Stack(Num('1')))
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass, Teil 3

```
41          // If(Name('res'), [])
42          // IfElse(Name('res'), [], [])
43          Exp(Global(Num('19'))),
44          IfElse
45            Stack
46              Num '1',
47            [
48              GoTo(Name('if.1'))
49            ],
50            [
51              GoTo(Name('if_else_after.0'))
52            ]
53        ],
54      Block
55        Name 'if.1',
56        [
57          Ref(Global(Num('18')))
58          Exp(Num('0'))
59          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
```

Code Generierung

PicoC-ANF Pass, Teil 4

```
60          Exp(Num('2'))
61          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
62          Exp(Num('1'))
63          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
64          Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
65          Exp(Num('1'))
66          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
67          Exp(Stack(Num('1')))
68          Exp(Call(Name('print'), [Stack(Num('1'))]))
69          Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
70        ],
71      Block
72        Name 'if_else_after.0',
73        [
74          Return(Empty())
75        ]
76    ]
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass

```
File
  Name './example_presentation.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'global.4',
      [],
    Block
      Name 'fun.3',
      [
        # // Assign(Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')),
        ↪  Name('attr2')), Call(Name('input'), [])), Num('42'))
        # Exp(Num('42'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 42;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Ref(Stackframe(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        MOVE BAF IN1;
        SUBI IN1 2;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Exp(Num('0'))
        SUBI SP 1;
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 2

```
22          LOADI ACC 0;
23          STOREIN SP ACC 1;
24          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
25          LOADIN SP IN2 2;
26          LOADIN IN2 IN1 0;
27          LOADIN SP IN2 1;
28          MULTI IN2 18;
29          ADD IN1 IN2;
30          ADDI SP 1;
31          STOREIN SP IN1 1;
32          # Exp(Num('2'))
33          SUBI SP 1;
34          LOADI ACC 2;
35          STOREIN SP ACC 1;
36          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
37          LOADIN SP IN1 2;
38          LOADIN SP IN2 1;
39          MULTI IN2 6;
40          ADD IN1 IN2;
41          ADDI SP 1;
42          STOREIN SP IN1 1;
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 3

```
43          # Exp(Num('1'))
44          SUBI SP 1;
45          LOADI ACC 1;
46          STOREIN SP ACC 1;
47          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
48          LOADIN SP IN1 2;
49          LOADIN SP IN2 1;
50          MULTI IN2 3;
51          ADD IN1 IN2;
52          ADDI SP 1;
53          STOREIN SP IN1 1;
54          # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
55          LOADIN SP IN1 1;
56          ADDI IN1 1;
57          STOREIN SP IN1 1;
58          CALL INPUT ACC;
59          SUBI SP 1;
60          STOREIN SP ACC 1;
61          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
62          LOADIN SP IN1 2;
63          LOADIN SP IN2 1;
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 4

```
64          MULTI IN2 1;
65          ADD IN1 IN2;
66          ADDI SP 1;
67          STOREIN SP IN1 1;
68          # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
69          LOADIN SP IN1 1;
70          LOADIN SP ACC 2;
71          ADDI SP 2;
72          STOREIN IN1 ACC 0;
73          # // Return(Num('1'))
74          # Exp(Num('1'))
75          SUBI SP 1;
76          LOADI ACC 1;
77          STOREIN SP ACC 1;
78          # Return(Stack(Num('1')))
79          LOADIN SP ACC 1;
80          ADDI SP 1;
81          LOADIN BAF PC -1;
82        ],
83      Block
84        Name 'main.2',
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 5

```
85        [
86          # // Assign(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Ref(Name('ar_of_sts')))
87          # Ref(Global(Num('0')))
88          SUBI SP 1;
89          LOADI IN1 0;
90          ADD IN1 DS;
91          STOREIN SP IN1 1;
92          # Assign(Global(Num('18')), Stack(Num('1')))
93          LOADIN SP ACC 1;
94          STOREIN DS ACC 18;
95          ADDI SP 1;
96          # // Assign(Name('res'), Call(Name('fun'), [Name('pntr_on_ar_of_sts')]))
97          # StackMalloc(Num('2'))
98          SUBI SP 2;
99          # Exp(Global(Num('18')))
100         SUBI SP 1;
101         LOADIN DS ACC 18;
102         STOREIN SP ACC 1;
103         # NewStackframe(Name('fun.3'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
104         MOVE BAF ACC;
105         ADDI SP 3;
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 6

```
106         MOVE SP BAF;
107         SUBI SP 3;
108         STOREIN BAF ACC 0;
109         LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
110         ADD ACC CS;
111         STOREIN BAF ACC -1;
112         # Exp(GoTo(Name('fun.3')))
113         Exp(GoTo(Name('fun.3')))
114         # RemoveStackframe()
115         MOVE BAF IN1;
116         LOADIN IN1 BAF 0;
117         MOVE IN1 SP;
118         # Exp(ACC)
119         SUBI SP 1;
120         STOREIN SP ACC 1;
121         # Assign(Global(Num('19')), Stack(Num('1')))
122         LOADIN SP ACC 1;
123         STOREIN DS ACC 19;
124         ADDI SP 1;
125         # // If(Name('res'), [])
126         # // IfElse(Name('res'), [], [])
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 7

```
127         # Exp(Global(Num('19')))
128         SUBI SP 1;
129         LOADIN DS ACC 19;
130         STOREIN SP ACC 1;
131         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
132         LOADIN SP ACC 1;
133         ADDI SP 1;
134         JUMP== GoTo(Name('if_else_after.0'));
135         Exp(GoTo(Name('if.1')))
136       ],
137     Block
138       Name 'if.1',
139       [
140         # Ref(Global(Num('18')))
141         SUBI SP 1;
142         LOADI IN1 18;
143         ADD IN1 DS;
144         STOREIN SP IN1 1;
145         # Exp(Num('0'))
146         SUBI SP 1;
147         LOADI ACC 0;
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 8

```
148         STOREIN SP ACC 1;
149         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
150         LOADIN SP IN2 2;
151         LOADIN IN2 IN1 0;
152         LOADIN SP IN2 1;
153         MULTI IN2 18;
154         ADD IN1 IN2;
155         ADDI SP 1;
156         STOREIN SP IN1 1;
157         # Exp(Num('2'))
158         SUBI SP 1;
159         LOADI ACC 2;
160         STOREIN SP ACC 1;
161         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
162         LOADIN SP IN1 2;
163         LOADIN SP IN2 1;
164         MULTI IN2 6;
165         ADD IN1 IN2;
166         ADDI SP 1;
167         STOREIN SP IN1 1;
168         # Exp(Num('1'))
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 9

```
169         SUBI SP 1;
170         LOADI ACC 1;
171         STOREIN SP ACC 1;
172         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
173         LOADIN SP IN1 2;
174         LOADIN SP IN2 1;
175         MULTI IN2 3;
176         ADD IN1 IN2;
177         ADDI SP 1;
178         STOREIN SP IN1 1;
179         # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
180         LOADIN SP IN1 1;
181         ADDI IN1 1;
182         STOREIN SP IN1 1;
183         # Exp(Num('1'))
184         SUBI SP 1;
185         LOADI ACC 1;
186         STOREIN SP ACC 1;
187         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
188         LOADIN SP IN1 2;
189         LOADIN SP IN2 1;
```

Code Generierung

RETI-Blocks Pass, Teil 10

```
190         MULTI IN2 1;
191         ADD IN1 IN2;
192         ADDI SP 1;
193         STOREIN SP IN1 1;
194         # Exp(Stack(Num('1')))
195         LOADIN SP IN1 1;
196         LOADIN IN1 ACC 0;
197         STOREIN SP ACC 1;
198         LOADIN SP ACC 1;
199         ADDI SP 1;
200         CALL PRINT ACC;
201         # Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
202         Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
203       ],
204     Block
205       Name 'if_else_after.0',
206       [
207         # Return(Empty())
208         LOADIN BAF PC -1;
209       ]
210   ]
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass

```
File
  Name './example_presentation.reti_patch',
  [
    Block
      Name 'global.4',
      [
        # // Exp(GoTo(Name('main.2')))
        Exp(GoTo(Name('main.2')))
      ],
    Block
      Name 'fun.3',
      [
        # // Assign(Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')),
        ↪  Name('attr2')), Call(Name('input'), [])), Num('42'))
        # Exp(Num('42'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 42;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Ref(Stackframe(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        MOVE BAF IN1;
        SUBI IN1 2;
        STOREIN SP IN1 1;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 2

```
23          # Exp(Num('0'))
24          SUBI SP 1;
25          LOADI ACC 0;
26          STOREIN SP ACC 1;
27          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
28          LOADIN SP IN2 2;
29          LOADIN IN2 IN1 0;
30          LOADIN SP IN2 1;
31          MULTI IN2 18;
32          ADD IN1 IN2;
33          ADDI SP 1;
34          STOREIN SP IN1 1;
35          # Exp(Num('2'))
36          SUBI SP 1;
37          LOADI ACC 2;
38          STOREIN SP ACC 1;
39          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
40          LOADIN SP IN1 2;
41          LOADIN SP IN2 1;
42          MULTI IN2 6;
43          ADD IN1 IN2;
44          ADDI SP 1;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 3

```
45          STOREIN SP IN1 1;
46          # Exp(Num('1'))
47          SUBI SP 1;
48          LOADI ACC 1;
49          STOREIN SP ACC 1;
50          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
51          LOADIN SP IN1 2;
52          LOADIN SP IN2 1;
53          MULTI IN2 3;
54          ADD IN1 IN2;
55          ADDI SP 1;
56          STOREIN SP IN1 1;
57          # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
58          LOADIN SP IN1 1;
59          ADDI IN1 1;
60          STOREIN SP IN1 1;
61          CALL INPUT ACC;
62          SUBI SP 1;
63          STOREIN SP ACC 1;
64          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
65          LOADIN SP IN1 2;
66          LOADIN SP IN2 1;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 4

```
67          MULTI IN2 1;
68          ADD IN1 IN2;
69          ADDI SP 1;
70          STOREIN SP IN1 1;
71          # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
72          LOADIN SP IN1 1;
73          LOADIN SP ACC 2;
74          ADDI SP 2;
75          STOREIN IN1 ACC 0;
76          # // Return(Num('1'))
77          # Exp(Num('1'))
78          SUBI SP 1;
79          LOADI ACC 1;
80          STOREIN SP ACC 1;
81          # Return(Stack(Num('1')))
82          LOADIN SP ACC 1;
83          ADDI SP 1;
84          LOADIN BAF PC -1;
85        ],
86      Block
87        Name 'main.2',
88        [
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 5

```
89          # // Assign(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Ref(Name('ar_of_sts')))
90          # Ref(Global(Num('0')))
91          SUBI SP 1;
92          LOADI IN1 0;
93          ADD IN1 DS;
94          STOREIN SP IN1 1;
95          # Assign(Global(Num('18')), Stack(Num('1')))
96          LOADIN SP ACC 1;
97          STOREIN DS ACC 18;
98          ADDI SP 1;
99          # // Assign(Name('res'), Call(Name('fun'), [Name('pntr_on_ar_of_sts')]))
100         # StackMalloc(Num('2'))
101         SUBI SP 2;
102         # Exp(Global(Num('18')))
103         SUBI SP 1;
104         LOADIN DS ACC 18;
105         STOREIN SP ACC 1;
106         # NewStackframe(Name('fun.3'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
107         MOVE BAF ACC;
108         ADDI SP 3;
109         MOVE SP BAF;
110         SUBI SP 3;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 6

```
111         STOREIN BAF ACC 0;
112         LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
113         ADD ACC CS;
114         STOREIN BAF ACC -1;
115         # Exp(GoTo(Name('fun.3')))
116         Exp(GoTo(Name('fun.3')))
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         # Assign(Global(Num('19')), Stack(Num('1')))
125         LOADIN SP ACC 1;
126         STOREIN DS ACC 19;
127         ADDI SP 1;
128         # // If(Name('res'), [])
129         # // IfElse(Name('res'), [], [])
130         # Exp(Global(Num('19')))
131         SUBI SP 1;
132         LOADIN DS ACC 19;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 7

```
133         STOREIN SP ACC 1;
134         # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
135         LOADIN SP ACC 1;
136         ADDI SP 1;
137         JUMP== GoTo(Name('if_else_after.0'));
138         # // not included Exp(GoTo(Name('if.1')))
139       ],
140     Block
141       Name 'if.1',
142       [
143         # Ref(Global(Num('18')))
144         SUBI SP 1;
145         LOADI IN1 18;
146         ADD IN1 DS;
147         STOREIN SP IN1 1;
148         # Exp(Num('0'))
149         SUBI SP 1;
150         LOADI ACC 0;
151         STOREIN SP ACC 1;
152         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
153         LOADIN SP IN2 2;
154         LOADIN IN2 IN1 0;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 8

```
155         LOADIN SP IN2 1;
156         MULTI IN2 18;
157         ADD IN1 IN2;
158         ADDI SP 1;
159         STOREIN SP IN1 1;
160         # Exp(Num('2'))
161         SUBI SP 1;
162         LOADI ACC 2;
163         STOREIN SP ACC 1;
164         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
165         LOADIN SP IN1 2;
166         LOADIN SP IN2 1;
167         MULTI IN2 6;
168         ADD IN1 IN2;
169         ADDI SP 1;
170         STOREIN SP IN1 1;
171         # Exp(Num('1'))
172         SUBI SP 1;
173         LOADI ACC 1;
174         STOREIN SP ACC 1;
175         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
176         LOADIN SP IN1 2;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 9

```
177         LOADIN SP IN2 1;
178         MULTI IN2 3;
179         ADD IN1 IN2;
180         ADDI SP 1;
181         STOREIN SP IN1 1;
182         # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
183         LOADIN SP IN1 1;
184         ADDI IN1 1;
185         STOREIN SP IN1 1;
186         # Exp(Num('1'))
187         SUBI SP 1;
188         LOADI ACC 1;
189         STOREIN SP ACC 1;
190         # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
191         LOADIN SP IN1 2;
192         LOADIN SP IN2 1;
193         MULTI IN2 1;
194         ADD IN1 IN2;
195         ADDI SP 1;
196         STOREIN SP IN1 1;
197         # Exp(Stack(Num('1')))
198         LOADIN SP IN1 1;
```

Code Generierung

RETI-Patch Pass, Teil 10

```
199         LOADIN IN1 ACC 0;
200         STOREIN SP ACC 1;
201         LOADIN SP ACC 1;
202         ADDI SP 1;
203         CALL PRINT ACC;
204         # Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
205         # // not included Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
206       ],
207     Block
208       Name 'if_else_after.0',
209       [
210         # Return(Empty())
211         LOADIN BAF PC -1;
212       ]
213   ]
```

Code Generierung

RETI Pass

```
# // Exp(GoTo(Name('main.2')))
JUMP 58;
# // Assign(Subscr(Attr(Subscr(Subscr(Subscr(Name('param'), Num('0')), Num('2')), Num('1')), Name('attr2')),
↪  Call(Name('input'), [])), Num('42'))
# Exp(Num('42'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC 42;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Stackframe(Num('0')))
SUBI SP 1;
MOVE BAF IN1;
SUBI IN1 2;
STOREIN SP IN1 1;
# Exp(Num('0'))
SUBI SP 1;
LOADI ACC 0;
STOREIN SP ACC 1;
# Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
LOADIN SP IN2 2;
LOADIN IN2 IN1 0;
LOADIN SP IN2 1;
MULTI IN2 18;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 2

```
22 ADD IN1 IN2;
23 ADDI SP 1;
24 STOREIN SP IN1 1;
25 # Exp(Num('2'))
26 SUBI SP 1;
27 LOADI ACC 2;
28 STOREIN SP ACC 1;
29 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
30 LOADIN SP IN1 2;
31 LOADIN SP IN2 1;
32 MULTI IN2 6;
33 ADD IN1 IN2;
34 ADDI SP 1;
35 STOREIN SP IN1 1;
36 # Exp(Num('1'))
37 SUBI SP 1;
38 LOADI ACC 1;
39 STOREIN SP ACC 1;
40 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
41 LOADIN SP IN1 2;
42 LOADIN SP IN2 1;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 3

```
43 MULTI IN2 3;
44 ADD IN1 IN2;
45 ADDI SP 1;
46 STOREIN SP IN1 1;
47 # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
48 LOADIN SP IN1 1;
49 ADDI IN1 1;
50 STOREIN SP IN1 1;
51 CALL INPUT ACC;
52 SUBI SP 1;
53 STOREIN SP ACC 1;
54 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
55 LOADIN SP IN1 2;
56 LOADIN SP IN2 1;
57 MULTI IN2 1;
58 ADD IN1 IN2;
59 ADDI SP 1;
60 STOREIN SP IN1 1;
61 # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
62 LOADIN SP IN1 1;
63 LOADIN SP ACC 2;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 4

```
64 ADDI SP 2;
65 STOREIN IN1 ACC 0;
66 # // Return(Num('1'))
67 # Exp(Num('1'))
68 SUBI SP 1;
69 LOADI ACC 1;
70 STOREIN SP ACC 1;
71 # Return(Stack(Num('1')))
72 LOADIN SP ACC 1;
73 ADDI SP 1;
74 LOADIN BAF PC -1;
75 # // Assign(Name('pntr_on_ar_of_sts'), Ref(Name('ar_of_sts')))
76 # Ref(Global(Num('0')))
77 SUBI SP 1;
78 LOADI IN1 0;
79 ADD IN1 DS;
80 STOREIN SP IN1 1;
81 # Assign(Global(Num('18')), Stack(Num('1')))
82 LOADIN SP ACC 1;
83 STOREIN DS ACC 18;
84 ADDI SP 1;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 5

```
# // Assign(Name('res'), Call(Name('fun'), [Name('pntr_on_ar_of_sts')]))
# StackMalloc(Num('2'))
SUBI SP 2;
# Exp(Global(Num('18')))
SUBI SP 1;
LOADIN DS ACC 18;
STOREIN SP ACC 1;
# NewStackframe(Name('fun.3'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
MOVE BAF ACC;
ADDI SP 3;
MOVE SP BAF;
SUBI SP 3;
STOREIN BAF ACC 0;
LOADI ACC 78;
ADD ACC CS;
STOREIN BAF ACC -1;
# Exp(GoTo(Name('fun.3')))
JUMP -76;
# RemoveStackframe()
MOVE BAF IN1;
LOADIN IN1 BAF 0;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 6

```
106 MOVE IN1 SP;
107 # Exp(ACC)
108 SUBI SP 1;
109 STOREIN SP ACC 1;
110 # Assign(Global(Num('19')), Stack(Num('1')))
111 LOADIN SP ACC 1;
112 STOREIN DS ACC 19;
113 ADDI SP 1;
114 # // If(Name('res'), [])
115 # // IfElse(Name('res'), [], [])
116 # Exp(Global(Num('19')))
117 SUBI SP 1;
118 LOADIN DS ACC 19;
119 STOREIN SP ACC 1;
120 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
121 LOADIN SP ACC 1;
122 ADDI SP 1;
123 JUMP== 51;
124 # // not included Exp(GoTo(Name('if.1')))
125 # Ref(Global(Num('18')))
126 SUBI SP 1;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 7

```
127 LOADI IN1 18;
128 ADD IN1 DS;
129 STOREIN SP IN1 1;
130 # Exp(Num('0'))
131 SUBI SP 1;
132 LOADI ACC 0;
133 STOREIN SP ACC 1;
134 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
135 LOADIN SP IN2 2;
136 LOADIN IN2 IN1 0;
137 LOADIN SP IN2 1;
138 MULTI IN2 18;
139 ADD IN1 IN2;
140 ADDI SP 1;
141 STOREIN SP IN1 1;
142 # Exp(Num('2'))
143 SUBI SP 1;
144 LOADI ACC 2;
145 STOREIN SP ACC 1;
146 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
147 LOADIN SP IN1 2;
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 8

```
148 LOADIN SP IN2 1;
149 MULTI IN2 6;
150 ADD IN1 IN2;
151 ADDI SP 1;
152 STOREIN SP IN1 1;
153 # Exp(Num('1'))
154 SUBI SP 1;
155 LOADI ACC 1;
156 STOREIN SP ACC 1;
157 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
158 LOADIN SP IN1 2;
159 LOADIN SP IN2 1;
160 MULTI IN2 3;
161 ADD IN1 IN2;
162 ADDI SP 1;
163 STOREIN SP IN1 1;
164 # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('attr2')))
165 LOADIN SP IN1 1;
166 ADDI IN1 1;
167 STOREIN SP IN1 1;
168 # Exp(Num('1'))
```

Code Generierung

RETI Pass, Teil 9

```
169 SUBI SP 1;
170 LOADI ACC 1;
171 STOREIN SP ACC 1;
172 # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
173 LOADIN SP IN1 2;
174 LOADIN SP IN2 1;
175 MULTI IN2 1;
176 ADD IN1 IN2;
177 ADDI SP 1;
178 STOREIN SP IN1 1;
179 # Exp(Stack(Num('1')))
180 LOADIN SP IN1 1;
181 LOADIN IN1 ACC 0;
182 STOREIN SP ACC 1;
183 LOADIN SP ACC 1;
184 ADDI SP 1;
185 CALL PRINT ACC;
186 # Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
187 # // not included Exp(GoTo(Name('if_else_after.0')))
188 # Return(Empty())
189 LOADIN BAF PC -1;
```

Literatur

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).


— „Technische Informatik“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 3. Aug. 2022. (Besucht am 03. 08. 2022).

Online


Clockwise/Spiral Rule. URL: https://c-faq.com/decl/spiral.anderson.html (besucht am 29. 07. 2022).