# Albert Ludwigs Universität Freiburg

#### TECHNISCHE FAKULTÄT

### PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

Abgabedatum: 13. September 2022

Author: Jürgen Mattheis

Gutachter: Prof. Dr. Scholl

Betreung: M.Sc. Seufert

Eine Bachelorarbeit am Lehrstuhl für Betriebssysteme

#### **ERKLÄRUNG**

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

## Danksagungen

Bevor der Inhalt dieser Schrifftlichen Ausarbeitung der Bachelorarbeit anfängt, will ich einigen Personen noch meinen Dank aussprechen.

Wie mein Betreuer M.Sc. Tobias Seufert und wahrscheinlich auch mein Gutachter Prof. Dr. Scholll im Verlauf dieser Bachelorarbeit und des vorangegangenen Bachelorprojektes gemerkt haben, bin ich keine Person, die irgendwelche Dinge gerne so macht wie es üblich ist, ich schreibe meine Danksagung nicht auf eine bestimmte Weise, nur weil sich irgendwann mal etabliert hat wie eine Danksagung üblicherweise aussieht. Ich halte nicht viel von künstlichen Floskeln, wie "mein aufrichtigster Dank" oder "aus tiefstem Herzen", sondern drücke im Folgenden die Dinge nur so aus, wie ich sie auch wirklich meine.

Ich halte es eher so, dass wenn mir wirklich etwas am Dank gegenüber Personen liegt, ich mir wirklich den Aufwand mache einen Text zu schreiben in dem ich diesen zum Ausdruck bringe, im anderen Fall kann man sich bei mir auf die typischen Standardfloskeln einstellen. Bei dieser Bachelorarbeit kann ich nur auf ersteres Zurückgreifen. Ich hatte selten im Studium das Gefühl irgendwo Kunde zu sein, aber bei dieser Bachelorarbeit und dem vorangegangenen Bachelorprojekt hatte ich genau diese Gefühl, obwohl die Verhältnisse eigentlich genau umgekehrt sein sollten. Die Umgang mit mir wahr echt unglaublich nett und sehr respektvoll, was ich als keine Selbverständlichkeit ansehe und sehr wertgeschätzt habe.

An erster Stelle will ich zu meinem Betreuer M.Sc. Tobias Seufert kommen, der netterweise auch bereits die Betreuung meines Bachelorprojektes übernommen hatte. Wie auch während des Bachelorprojektes, haben wir uns auch bei den Meetings während der Bachelorarbeit hervorragend verstanden. Dabei ging die Freundlichkeit und das Engagement seitens Tobias weit über das heraus, was man bereits als eine gute Betreuung bezeichnen würde.

Es gibt verschiedene Typen von Menschen, es gibt Leute, die nur genauso viel tuen, wie es die Anforderungen verlangen und nichts darüberhinaus tuen, wenn es nicht einen eigenen Vorteil für sie hat und es gibt Personen, die sich für nichts zu Schade sind und dies aus einer Philanthropie oder Leidenschafft heraus tuen, auch wenn es für sie keine Vorteile hat. Tobias konnte ich während der langen Zeit, die er mein Bachelorprojekt und dann meine Bachelorarbeit betreut hat eindeutig als letzteren Typ Mensch einordnen.

Er war sich nie zu Schade für meine vielen Fragen während der Meetings, auch wenn ich meine Zeit ziemlich oft überzogen habe<sup>1</sup>, er hat sich bei der Korrektur dieser Schrifftlichen Ausarbeitung sogar die Mühe gemacht bei den einzelnen Problemstellen längere Textkommentare zu verfassen und das trotz dessen, dass meine Bachelorarbeit recht Umfangreich zu lesen ist<sup>2</sup> und war sich nicht zu Schade die Rolle des Nachrichtenübermittlers zwischen mir und Prof. Dr. Scholl zu übernehmen. All dies war absolut keine Selbverständlichkeit, vor allem wenn ich die Betreuung anderer Studenten, die ich kenne mit der vergleiche, die mir zu Teil wurde.

An den Kommentar zu meinen Betreuer Tobias will ich einen Kommentar zu meinem Gutachter Prof. Dr. Scholl anschließen. Ich hab während meines Bachelorprojekts und meiner Bachelorarbeit wahrscheinlich einen ziemlich eigensinnigen Eindruck gemacht, bei der Weise, wie ich bestimmte Dinge umsetzen wollte. Ich habe es sehr geschätzt, dass mir das durchgehen gelassen wurde. Es ist, wie ich die Universitätswelt als Student erlebe bei Arbeitsvorgaben keine Selbverständlichkeit, dass dem Studenten überhaupt die Freiheit und das Vertrauen gegeben wird diese auf seine eigenen Weise umzusetzen.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Wofür ich mich auch nochmal Entschuldigen will.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Wobei er sich kein einziges Mal in geringster Weise entnervt darüber gezeigt hat.

Vor allem, da mein eigenes Vorgehen größtenteils Vorteile für mich hatte, da ich auf diese Weise am meisten über Compilerbau gelernt hab und eher Nachteile für Prof. Dr. Scholl, da mein eigenes Vorgehen entsprechend mehr Zeit brauchte und ich daher als Bachelorarbeit keinen dazu passenden RETI-Emulator mit Graphischer Anzeige implementieren konnte, da die restlichen Funktionalitäten des PicoC-Compilers noch implementiert werden mussten.

Glücklicherweise gibt es aber doch noch einen passenden RETI-Emulator, der den PicoC-Compiler über seine Kommandozeilenargumente aufruft, um ein PicoC-Programm visuell auf einer RETI-CPU auszuführen, für dessen Implementierung Michel Giehl sich netterweise zur Verfügung gestellt hat. Daher Danke auch an Michel Giehl, dass er sich mit meinem PicoC-Compiler ausgeinandergesetzt hat und diesen in seinen RETI-Emulator integriert hat, sodass am Ende durch unsere beiden Arbeiten ein anschauliches Lerntool für die kommenden Studentengenerationen entstehen konnte. Vor allem da er auch mir darin vertrauen musste, dass ich mit meinem PicoC-Compiler nicht irgendeinen Misst baue. Der RETI-Emulator von Michel Giehl ist unter Link<sup>3</sup> zu finden.

Wofür ich meinem Gutachter Prof. Dr. Scholl sehr dankbar bin, ist, dass er meine damals sehr ambitionierten Ideen für mögliche Funktionalitäten, die ich in den PicoC-Compiler für die Bachelorarbeit implementierten wollte runtergeschraubt hat, was man auch selten im Studium erlebt, dass dem Studenten freiwillig weniger Arbeit gegeben wird. Bei den für die Bachelorarbeit zu implementierenden Funktionalitäten gab es bei der Implementierung viele unerwartete kleine Details, die ich vorher garnicht bedacht hatte, die in ihrer Masse ziemlich viel unerwartete Zeit zum Implementieren gebraucht haben. Mit den von Prof. Dr. Scholl festgelegten Funktionalitäten für die Bachelorarbeit ist der Zeitplan ziemlich perfekt aufgegangen. Mit meinen ambitionierten Plänen wäre es bei der Bachelorarbeit dagegeben wohl nichts geworden. Man hat daran gemerkt, dass Prof. Dr. Scholl das Wohlergehen der Studenten wichtig ist.

Mir hat die Implementierung des PicoC-Compilers tatsächlich ziemlich viel Spaß gemacht, da Compilerbau auch in mein perönliches Interessengebiet fällt. Das Aufschreiben dieser Schrifftlichen Ausarbeitung hat mir dagegen eher weniger Spaß gemacht<sup>4</sup>. Wobei ich allerdings sagen muss, dass ich eine große Erleichterung verspüre das ganze Wissen über Compilerbau mal aufgeschrieben zu haben, damit ich mir keine Sorgen machen muss dieses ziemlich nützliche Wissen irgendwann wieder zu vergessen. Es hilft einem auch als Programmierer ungemein weiter zu wissen, wie ein Compiler unter der Haube funktioniert, da man sich so viel besser merken, wie eine bestimmte Funktionalität einer Programmiersprache zu verwenden ist, die sonst ziemlich wilkürlich erscheinen würde, wenn man die technische Umsetzung dahinter im Compiler nicht kennt.

Ich wollte mich daher auch noch dafür Bedanken, dass mir ein so ergiebiges und interessantes Thema als Bachelorarbeit vorgeschlagen wurde und vor allem, dass auch das Vertrauen in mich gesteckt wurde, dass ich am Ende auch einen funktionsfähigen, sauber programmierten und gut durchdachten Compiler implementiere.

Zum Schluss nochmal ein abschließendes Danke an meinen Betreuer M.Sc Seufert und meinen Gutachter Prof. Dr. Scholl für die Betreuung und Bereitstellung dieser großartigen Bachelorarbeit und des vorangegangenen Bachelorprojektes und Michel Giehl für das Integrieren des PicoC-Compilers in seinen RETI-Emulator.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>https://github.com/michel-giehl/Reti-Emulator.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Da es recht stressig ist im Kopf zu behalten, was man schon erklärt hat und wo noch eine Verständnislücke vorliegen könnte.

## Inhaltsverzeichnis

| A            | bbild  | dungsverzeichnis   | I        |
|--------------|--------|--|----------|
| C            | odev   | verzeichnis  | II       |
| Ta           | abelle | enverzeichnis  | III      |
| D            | efinit | tionsverzeichnis   | V        |
| $\mathbf{G}$ | ramr   | matikverzeichnis   | VI       |
| 1            | Ein    | ıführung   | 1        |
|              | 1.1    | Compiler und Interpreter   | 1<br>3   |
|              | 1.2    | Formale Sprachen   | 5        |
|              |        | 1.2.1 Ableitungen  | 9<br>12  |
|              | 1.3    | Lexikalische Analyse   | 13       |
|              | 1.4    | Syntaktische Analyse   | 16       |
|              | 1.5    | Code Generierung   | 23       |
|              |        | 1.5.1 Monadische Normalform  | 24       |
|              |        | 1.5.2 A-Normalform   | 25       |
|              | 1.0    | 1.5.3 Ausgabe des Maschinencodes   | 27       |
|              | 1.6    | Fehlermeldungen  | 28       |
| 2            | Imp    | plementierung  | 30       |
|              | 2.1    | Lexikalische Analyse   | 32       |
|              |        | 2.1.1 Konkrete Grammatik für die Lexikalische Analyse                          | 32       |
|              |        | 2.1.2 Codebeispiel   | 34       |
|              | 2.2    | Syntaktische Analyse   | 35       |
|              |        | 2.2.1 Umsetzung von Präzedenz und Assoziativität                               | 35       |
|              |        | 2.2.2 Konkrete Grammatik für die Syntaktische Analyse                          | 40       |
|              |        | 2.2.3 Ableitungsbaum Generierung   | 42<br>43 |
|              |        | 2.2.3.1 Codebeispiel   | 43       |
|              |        | 2.2.4 Ableitungsbaum Vereinfachung   | 44       |
|              |        | 2.2.4.1 Codebeispiel   | 46       |
|              |        | 2.2.5 Generierung des Abstrakten Syntaxbaumes                                  | 47       |
|              |        | 2.2.5.1 PicoC-Knoten   | 49       |
|              |        | 2.2.5.2 RETI-Knoten  | 54       |
|              |        | 2.2.5.3 Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutun | g 55     |
|              |        | 2.2.5.4 Abstrakte Grammatik  | 57       |
|              |        | 2.2.5.5 Codebeispiel   | 59       |
|              |        | 2.2.5.6 Ausgabe des Abstrakten Syntaxbaumes                                    | 60       |
|              | 2.3    | Code Generierung   | 60       |
|              |        | 2.3.1 Passes   | 62       |
|              |        | 2.3.1.1 PicoC-Shrink Pass  | 62       |

|           | 2.3.1.1.2       | Abstrakte Grammatik                 |
|-----------|-----------------|-------------------------------------|
|           | 2.3.1.1.3       | Codebeispiel                        |
|           | 2.3.1.2 PicoC-H | Blocks Pass                         |
|           | 2.3.1.2.1       | Aufgabe                             |
|           | 2.3.1.2.2       | Abstrakte Grammatik                 |
|           | 2.3.1.2.3       | Codebeispiel                        |
|           | 2.3.1.3 PicoC-A | ANF Pass                            |
|           | 2.3.1.3.1       | Aufgabe                             |
|           | 2.3.1.3.2       | Abstrakte Grammatik                 |
|           | 2.3.1.3.3       | Codebeispiel                        |
|           | 2.3.1.4 RETI-E  | Blocks Pass                         |
|           | 2.3.1.4.1       | Aufgabe                             |
|           | 2.3.1.4.2       | Abstrakte Grammatik                 |
|           | 2.3.1.4.3       | Codebeispiel                        |
|           | 2.3.1.5 RETI-P  | atch Pass                           |
|           | 2.3.1.5.1       | Aufgabe                             |
|           | 2.3.1.5.2       | Abstrakte Grammatik                 |
|           | 2.3.1.5.3       | Codebeispiel                        |
|           | 2.3.1.6 RETI F  | 'ass                                |
|           | 2.3.1.6.1       | Aufgabe                             |
|           | 2.3.1.6.2       | Konkrete und Abstrakte Grammatik 81 |
|           | 2.3.1.6.3       | Codebeispiel                        |
| Literatur |                 | Α                                   |

# Abbildungsverzeichnis

| 1.1 | Horinzontale Übersetzungszwischenschritte zusammenfassen                              | 5  |
|-----|---|----|
| 1.2 | Vertikale Interpretierungszwischenschritte zusammenfassen                             | 5  |
| 1.3 | Veranschaulichung von Linksassoziativität und Rechtsassoziativität.                   | 12 |
| 1.4 | Veranschaulichung von Präzedenz   | 13 |
| 1.5 | Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse   | 16 |
| 1.6 | Veranschaulichung des Unterschieds zwischen Ableitungsbaum und Abstraktem Syntaxbaum. | 21 |
| 1.7 | Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse   | 22 |
| 1.8 | Codebeispiel für das Trennen von Ausdrücken mit und ohne Nebeneffekten                | 25 |
| 1.9 | Codebeispiel für das Entfernen Komplexer Ausdrücke aus Operationen.                   | 27 |
| 2.1 | Ableitungsbäume zu den beiden Ableitungen   | 37 |
| 2.2 | Ableitungsbaum nach Parsen eines Ausdrucks.   | 45 |
| 2.3 | Ableitungsbaum nach Vereinfachung   | 46 |
| 2.4 | Generierung eines Abstrakten Syntaxbaumes ohne Umdrehen                               | 48 |
| 2.5 | Generierung eines Abstrakten Syntaxbaumes mit Umdrehen.                               | 48 |
| 2.6 | Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben.                                       | 61 |
| 2.7 | Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform  | 61 |
| 2.8 | Architektur mit allen Passes ausgeschrieben   | 62 |

# Codeverzeichnis

| 2.1  | PicoC-Code des Codebeispiels   |
|------|--|
| 2.2  | Tokens für das Codebeispiel  |
| 2.3  | Ableitungsbaum nach Ableitungsbaum Generierung.                          |
| 2.4  | Ableitungsbaum nach Ableitungsbaum Vereinfachung.                        |
| 2.5  | Aus einem vereinfachtem Ableitungsbaum generierter Abstrakter Syntaxbaum |
| 2.6  | PicoC Code für Codebespiel   |
| 2.7  | Abstrakter Syntaxbaum für Codebespiel                                    |
| 2.8  | PicoC-Blocks Pass für Codebespiel  |
| 2.9  | PicoC-ANF Pass für Codebespiel   |
| 2.10 | RETI-Blocks Pass für Codebespiel   |
|      | RETI-Patch Pass für Codebespiel.   |
|      | RETI Pass für Codebespiel  |

# Tabellenverzeichnis

| 2.1 | Präzedenzregeln von PicoC  |
|-----|--|
| 2.2 | Zuordnung der Bezeichnungen von Produktionsregeln zu Operatoren            |
| 2.3 | PicoC-Knoten Teil 1  |
| 2.4 | PicoC-Knoten Teil 2  |
| 2.5 | PicoC-Knoten Teil 3  |
| 2.6 | PicoC-Knoten Teil 4  |
| 2.7 | RETI-Knoten  |
| 2.8 | Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung 50 |

# Definitionsverzeichnis

| 1.1  | Interpreter   |    |
|------|---|----|
| 1.2  | Compiler  |    |
| 1.3  | Maschinensprache  | 4  |
| 1.4  | Immediate   | 4  |
| 1.5  | Cross-Compiler  | ,  |
| 1.6  | T-Diagram Programm  | ;  |
| 1.7  | T-Diagram Übersetzer (bzw. eng. Translator)                       | 4  |
| 1.8  | T-Diagram Interpreter   | 4  |
| 1.9  | T-Diagram Maschine  | 4  |
| 1.10 | Symbol  | ļ  |
| 1.11 | Alphabet  | (  |
| 1.12 | Wort  | (  |
| 1.13 | Formale Sprache   | (  |
|      | Syntax  | (  |
|      | Semantik  | (  |
| 1.16 | Formale Grammatik   | -  |
| 1.17 | Chromsky Hierarchie   | -  |
|      | Reguläre Grammatik  | 8  |
| 1.19 | Kontextfreie Grammatik  | 8  |
|      | Wortproblem   | 9  |
|      | 1-Schritt-Ableitungsrelation                                      | (  |
|      | Ableitungsrelation  | 9  |
|      | Links- und Rechtsableitungableitung                               | (  |
| 1.24 | Linksrekursive Grammatiken  | (  |
| 1.25 | Formaler Ableitungsbaum   |    |
| 1.26 | Mehrdeutige Grammatik   |    |
|      | Assoziativität  |    |
|      | Präzedenz   |    |
|      | Pipe-Filter Architekturpattern                                    |    |
|      | Pattern   |    |
|      | Lexeme  |    |
| 1.32 | Lexer (bzw. Scanner oder auch Tokenizer)                          |    |
|      | Bezeichner (bzw. Identifier)                                      |    |
|      | Literal   |    |
|      | Konkrete Syntax   |    |
|      | Konkrete Grammatik  |    |
|      | Ableitungsbaum (bzw. Konkreter Syntaxbaum, engl. Derivation Tree) |    |
|      | Parser  |    |
|      | Recognizer (bzw. Erkenner)  |    |
|      | Transformer   |    |
|      | Visitor   |    |
|      | Abstrakte Syntax  |    |
|      | Abstrakte Grammatik   |    |
|      | Abstrakter Syntaxbaum (bzw. engl. Abstract Syntax Tree, kurz AST) |    |
|      | Pass  |    |
| 1.46 | Reiner Ausdruck (bzw. engl. pure expression)                      | 12 |

| 1.48 | Monadische Normalform (bzw. engl. monadic normal form)   |
|------|--|
| 1.49 | Location   |
| 1.50 | Atomarer Ausdruck  |
| 1.51 | Komplexer Ausdruck   |
| 1.52 | A-Normalform (ANF)   |
| 1.53 | Fehlermeldung  |
| 2.1  | Metasyntax   |
| 2.2  | Metasprache  |
| 2.3  | Erweiterte Backus-Naur-Form (EBNF)   |
| 2.4  | Dialekt der EBNF aus Lark  |
| 2.5  | Abstrakte Syntax Form (ASF)  |
| 2.6  | Earley Parser  |
| 2.7  | Label  |
| 2.8  | $Symbol tabelle \dots \dots$ |

# Grammatikverzeichnis

| 1.1 Produktionen für Ableitungsbaum in EBNF  | 11 |
|--|----|
| 2.1.1 Konkrete Grammatik der Sprache $L_{PicoC}$ für die Lexikalische Analyse in EBNF 2.2.1 Undurchdachte Konkrete Grammatik der Sprache $L_{PicoC}$ für die Syntaktische Analyse in | 34 |
|  | 36 |
| 2.2.2 Erster Schritt zu einer durchdachten Konkreten Grammatik der Sprache $L_{PicoC}$ für die Syn-  | 50 |
|  | 37 |
|  | 38 |
| 2.2.4 Beispiel für eine unäre linksassoziative Produktion  | 38 |
| 2.2.5 Beispiel für eine binäre linksassoziative Produktion   | 39 |
| 2.2.6 Beispiel für eine binäre linksassoziative Produktion ohne Linksrekursion   | 39 |
| $2.2.7$ Durchdachte Konkrete Grammatik der Sprache $L_{PicoC}$ in EBNF, die Operatorpräzidenz beachtet   | 40 |
|  | 41 |
| 2.2.9 Konkrete Grammatik der Sprache $L_{PicoC}$ für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 2  | 42 |
| 1 1 10000  | 58 |
| 1 toco _Ditt titk  | 64 |
| 1 tocc _Dtocks   | 67 |
| 1 1000 11111   | 71 |
| 1 10211250000  | 74 |
| TtD1121 atch   | 78 |
| 1 10211  | 82 |
| · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·  | 82 |
| 2.3.8 Abstrakte Grammatik der Sprache $L_{RETI}$   | 83 |

# 1 Einführung

#### 1.1 Compiler und Interpreter

Die wohl wichtigsten zu klärenden Begriffe, sind die eines Compilers (Definition 1.2) und eines Interpreters (Definition 1.1), da das Schreiben eines Compilers von der PicoC-Sprache  $L_{PicoC}$  in die RETI-Sprache  $L_{RETI}$  das Thema dieser Bachelorarbeit ist und die Definition eines Interpreters genutzt wird, um zu definieren was ein Compiler ist. Des Weiteren wurde zur Qualitätsicherung ein RETI-Interpreter implementiert, um mithilfe des GCC<sup>1</sup> und von Tests die Beziehungen in 1.2.1 zu belegen (siehe Subkapitel ??).

#### Definition 1.1: Interpreter

Z

Interpretiert die Befehle<sup>a</sup> oder Statements eines Programmes P direkt.

Auf die Implementierung bezogen arbeitet ein Interpreter auf den compilerinternen Sub-Bäumen des Abstrakten Syntaxbaumes (wird später eingeführt unter Definition 1.44) und führt je nach Komposition der Knoten des Abstrakten Syntaxbaumes, auf die er während des Darüber-Iterierens stösst unterschiedliche Anweisungen aus.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Maschinensprache kann genauso interpretiert werden, wie auch eine Programmiersprache.

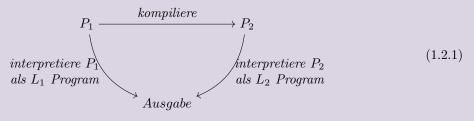
 ${}^{b}$ G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

#### Definition 1.2: Compiler

Z

Kompiliert ein beliebiges Program  $P_1$ , welches in einer Sprache  $L_1$  geschrieben ist, in ein Program  $P_2$ , welches in einer Sprache  $L_2$  geschrieben ist.

Wobei Kompilieren meint, dass ein beliebiges Program  $P_1$  in der Sprache  $L_1$  so in die Sprache  $L_2$  zu einem Programm  $P_2$  übersetzt wird, dass bei beiden Programmen, wenn sie von Interpretern ihrer jeweiligen Sprachen  $L_1$  und  $L_2$  interpretiert werden, sie die gleiche Ausgabe haben, wie es in Diagramm 1.2.1 dargestellt ist. Also beide Programme  $P_1$  und  $P_2$  die gleiche Semantik (Definition 1.15) haben und sich nur syntaktisch (Definition 1.14) durch die Sprachen  $L_1$  und  $L_2$ , in denen sie geschrieben stehen unterscheiden.



<sup>a</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Sammlung von Compilern für Linux bzw. GNU-Linux, steht für GNU Compiler Collection

#### Anmerkung Q

Im Folgenden wird ein voll ausgeschriebener Compiler als  $C_{i.w.k.min}^{o.j}$  geschrieben, wobei  $C_w$  die Sprache bezeichnet, die der Compiler als Input nimmt und zu einer nicht näher spezifizierten Maschinensprache  $L_{B_i}$  einer Maschine  $M_i$  kompiliert. Falls die Notwendigkeit besteht, die Maschine  $M_i$  anzugeben, zu dessen Maschinensprache  $L_{B_i}$  der Compiler kompiliert, wird das als  $C_i$  geschrieben. Falls die Notwendigkeit besteht die Sprache  $L_o$  anzugeben, in der der Compiler selbst geschrieben ist, wird das als  $C^o$  geschrieben. Falls die Notwendigkeit besteht die Version der Sprache, in die der Compiler kompiliert  $(L_{w.k})$  oder in der er selbst geschrieben ist  $(L_{o.j})$  anzugeben, wird das als  $C_{w.k}^{o.j}$  geschrieben. Falls es sich um einen minimalen Compiler handelt (Definition ??) kann man das als  $C_{min}$  schreiben.

Üblicherweise kompiliert ein Compiler ein Program, das in einer Programmiersprache geschrieben ist zu Maschinencode, der in Maschinensprache (Definition 1.3) geschrieben ist, aber es gibt z.B. auch Transpiler (Definition ??) oder Cross-Compiler (Definition 1.5). Des Weiteren sind Maschinensprache und Assemblersprache (Definition ??) voneinander zu unterscheiden.

#### Definition 1.3: Maschinensprache

Programmiersprache, deren mögliche Programme die hardwarenaheste Repräsentation eines möglicherweise zuvor hierzu kompilierten bzw. assemblierten Programmes darstellen. Jeder Maschinenbefehl entspricht einer bestimmten Aufgabe, die die CPU im vereinfachten Fall in einem Zyklus der Fetch- und Execute-Phase, genauergesagt in der Execute-Phase übernehmen kann oder allgemein in einer geringen konstanten Anzahl von Fetch- und Execute Phasen im Komplexeren Fall. Die Maschinenbefehle sind meist so entworfen, dass sie sich innerhalb bestimmter Wortbreiten, die Zweierpotenzen sind kodieren lassen. Im einfachsten Fall innerhalb einer Speicherzelle des Hauptspeichers.

<sup>a</sup>Viele Prozessorarchitekturen erlauben es allerdings auch z.B. zwei Maschinenbefehle in eine Speicherzelle des Hauptspeichers zu komprimieren, wenn diese zwei Maschinenbefehle keine Operanden mit zu großen Immediates (Definition 1.4) haben.

 $^b$ Scholl, "Betriebssysteme".

Der Maschinencode, den ein üblicher Compiler einer Programmiersprache generiert, enthält seine Folge von Maschinenbefehlen üblicherweise in binärer Repräsentation, da diese in erster Linie für die Maschine, die binär arbeitet verständlich sein sollen und nicht für den Programmierer.

Der PicoC-Compiler, der den Zweck erfüllt für Studenten ein Anschauungs- und Lernwerkzeug zu sein, generiert allerdings Maschinencode, der die Maschinenbefehle bzw. RETI-Befehle in menschenlesbarer Form mit ausgeschriebenen RETI-Operationen, RETI-Registern und Immediates (Definition 1.4) enthält. Für den RETI-Interpreter ist es ebenfalls nicht notwendig, dass der Maschinencode, den der PicoC-Compiler generiert, in binärer Darstellung ist, denn es ist für den RETI-Interpreter ebenfalls leichter diese einfach direkt in menschenlesbarer Form zu interpretieren, da der RETI-Interpreter nur die sichtbare Funktionsweise einer RETI-CPU simulieren soll und nicht deren mögliche interne Umsetzung<sup>2</sup>.

#### Definition 1.4: Immediate

7

Konstanter Wert, der als Teil eines Maschinenbefehls gespeichert ist und dessen Wertebereich dementsprechend auch durch die Anzahl an Bits, die ihm innerhalb dieses Maschinenbefehls zur Verfügung gestellt sind beschränkt ist. Der Wertebereich ist beschränkter als bei sonstigen Werten

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Eine RETI-CPU zu bauen, die menschenlesbaren Maschinencode in z.B. UTF-8 Kodierung ausführen kann, wäre dagegen unnötig kompliziert und aufwändig, da Hardware binär arbeitet und man dieser daher lieber direkt die binär kodierten Maschinenbefehle übergibt, anstatt z.B. eine unnötig platzverbrauchenden UTF-8 Codierung zu verwenden, die nur in sehr vielen Schritten einen Befehl verarbeiten kann, da die Register und Speicherzellen des Hauptspeichers üblicherweise nur 32- bzw. 64-Bit Breite haben.

innerhalb des Hauptspeichers, denen eine ganze Speicherzelle des Hauptspeichers zur Verfügung steht.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ljohhuh, What is an immediate value?

#### Definition 1.5: Cross-Compiler

Kompiliert auf einer Maschine  $M_1$  ein Program, dass in einer Sprache  $L_w$  geschrieben ist für eine andere Maschine  $M_2$ , wobei beide Maschinen  $M_1$  und  $M_2$  unterschiedliche Maschinensprachen  $B_1$  und  $B_2$  haben. <sup>ab</sup>

<sup>a</sup>Beim PicoC-Compiler handelt es sich um einen Cross-Compiler  $C_{PicoC}^{Python}$ .

<sup>b</sup>J. Earley und Sturgis, "A formalism for translator interactions"

Ein Cross-Compiler ist entweder notwendig, wenn eine Zielmaschine  $M_2$  nicht ausreichend Rechenleistung hat, um ein Programm in der Wunschsprache  $L_w$  selbst zeitnah zu kompilieren oder wenn noch kein Compiler  $C_w$  für die Wunschsprache  $L_w$  und andere Programmiersprachen  $L_o$ , in denen man Programmieren wollen würde existiert, der unter der Maschinensprache  $B_2$  einer Zielmaschine  $M_2$  läuft.

#### 1.1.1 T-Diagramme

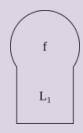
Um die Architektur von Compilern und Interpretern übersichtlich darzustellen eignen sich T-Diagramme, deren Spezifikation aus der Wissenschaftlichen Publikation J. Earley und Sturgis, "A formalism for translator interactions" entnommen ist besonders gut, da diese optimal darauf zugeschnitten sind die Eigenheiten von Compilern in ihrer Art der Darstellung unterzubringen.

Die Notation setzt sich dabei aus den Blöcken für ein Program (Definition 1.6), einen Übersetzer (Definition 1.7), einen Interpreter (Definition 1.8) und eine Maschine (Definition 1.9) zusammen.

#### Definition 1.6: T-Diagram Programm



Repräsentiert ein Programm, dass in der Sprache  $L_1$  geschrieben ist und die Funktion f berechnet.



<sup>a</sup>J. Earley und Sturgis, "A formalism for translator interactions".

#### Anmerkung Q

Es ist bei T-Diagrammen nicht notwendig beim entsprechenden Platzhalter, in den man die genutzte Sprache schreibt, den Namen der Sprache an ein L dranzuhängen, weil hier immer eine Sprache steht. Es würde in Definition 1.6 also reichen einfach eine 1 hinzuschreiben.

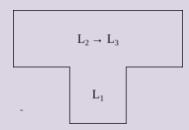
<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Die an vielen Universitäten und Schulen eingesetzen programmierbaren Roboter von Lego Mindstorms nutzen z.B. einen Cross-Compiler, um für den programmierbaren Microcontroller eine C-ähnliche Sprache in die Maschinensprache des Microcontrollers zu kompilieren, da der Microcontroller selbst nicht genug Rechenleistung besitzt, um ein Programm selbst zeitnah zu kompilieren.

#### Definition 1.7: T-Diagram Übersetzer (bzw. eng. Translator)

/

Repräsentiert einen Übersetzer, der in der Sprache  $L_1$  geschrieben ist und Programme von der Sprache  $L_2$  in die Sprache  $L_3$  kompiliert.

Für den Übersetzer gelten genauso, wie für einen Compiler<sup>a</sup> die Beziehungen in 1.2.1.<sup>b</sup>

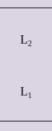


 $<sup>^</sup>a$ Zwischen den Begriffen Übersetzung und Kompilierung gibt es einen kleinen Unterschied, Übersetzung ist kleinschrittiger als Kompilierung und ist auch zwischen Passes möglich, Kompilierung beinhaltet dagegen bereits alle Passes in einem Schritt. Kompilieren ist also auch Übsersetzen, aber Übersetzen ist nicht immer auch Kompilieren.  $^b$ J. Earley und Sturgis, "A formalism for translator interactions".

#### Definition 1.8: T-Diagram Interpreter

Z

Repräsentiert einen Interpreter, der in der Sprache  $L_1$  geschrieben ist und Programme in der Sprache  $L_2$  interpretiert.



 $^a\mathrm{J}.$  Earley und Sturgis, "A formalism for translator interactions".

#### Definition 1.9: T-Diagram Maschine

Repräsentiert eine Maschine, welche ein Programm in Maschinensprache  $L_1$  ausführt. ab



<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Wenn die Maschine Programme in einer höheren Sprache als Maschinensprache ausführt, ist es auch erlaubt diese Notation zu verwenden, dann handelt es sich um eine Abstrakte Maschine, wie z.B. die Python Virtual Machine (PVM) oder Java Virtual Machine (JVM).

Aus den verschiedenen Blöcken lassen sich Kompositionen bilden, indem man sie adjazent zueinander platziert. Allgemein lässt sich grob sagen, dass vertikale Adjazenz für Interpretation und horinzontale Adjazenz für Übersetzung steht.

Sowohl horinzontale als auch vertikale Adjazenz lassen sich, wie man in den Abbildungen 1.1 und 1.2 erkennen kann zusammenfassen.

 $<sup>^</sup>b\mathrm{J}.$  Earley und Sturgis, "A formalism for translator interactions".



Abbildung 1.1: Horinzontale Übersetzungszwischenschritte zusammenfassen.



Abbildung 1.2: Vertikale Interpretierungszwischenschritte zusammenfassen.

#### 1.2 Formale Sprachen

Das Kompilieren eines Programmes hat viel mit dem Thema Formaler Sprachen (Definition 1.13) zu tuen, da bereits das Kompilieren an sich das Übersetzen eines Programmes aus der Sprache  $L_1$  in eine Sprache  $L_2$  ist. Aus diesem Grund ist es wichtig die Grundlagen Formaler Sprachen, was die Begriffe Symbol (Definition 1.10), Alphabet (Definition 1.11), Wort (Definition 1.12) beinhaltet vorher eingeführt zu haben.



#### Definition 1.11: Alphabet

Z

"Ein Alphabet ist eine endliche, nicht-leere Menge aus Symbolen (Definition 1.10)."a

<sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

#### Definition 1.12: Wort

Z

"Ein Wort  $w = a_1...a_n \in \Sigma^*$  ist eine endliche Folge von Symbolen aus einem Alphabet  $\Sigma$ .

Es gibt es die Konkatenation  $w_1w_2 = a_1 \dots a_n b_1 \dots b_n$  von Wörtern  $w_1 = a_1 \dots a_n$  und  $w_2 = b_1 \dots b_n$  und die Länge eines Wortes |w|.

Ein wichtiges Wort ist das leere Wort  $\varepsilon$  für das gilt:  $|\varepsilon|=0$  und  $\forall w \in \Sigma^*$ :  $\varepsilon w=w\varepsilon=w$ . Es handelt sich bei  $\varepsilon$  also um das Neutrale Element bei der Konkatenation von Wörtern.

Bei  $\Sigma^*$  handelt es sich um Kleenesche Hülle eines Alphabets  $\Sigma$ , es ist die Sprache aller Wörter, welche durch beliebige Konkatenation von Symbolen aus dem Alphabet  $\Sigma$  gebildet werden können, wobei  $\varepsilon \in \Sigma^*$ . Dies ist die größte Sprache über  $\Sigma$  und jede Sprache über  $\Sigma$  ist eine Teilmenge davon. "a

<sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

#### Definition 1.13: Formale Sprache



"Eine Formale Sprache ist eine Menge von Wörtern (Definition 1.12) über dem Alphabet  $\Sigma$  (Definition 1.11). "a

Das Adjektiv "formal" kann dabei weggelassen werden, wenn der Kontext indem die Sprache verwendet wird eindeutig ist, da man das Adjektiv "formal" nur verwendet um den Unterschied zum im normalen Sprachgebrauch verwendeten Begriff einer Sprache herauszustellen.

<sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

Bei der Übersetzung eines Programmes von einer Sprache  $L_1$  zur Sprache  $L_2$  muss die **Semantik** (Definition 1.15) gleich bleiben. Beide Sprachen  $L_1$  und  $L_2$  haben eine **Grammatik** (Definition 1.16), welche diese beschreibt und können verschiedene **Syntaxen** (Definition 1.14) haben.

#### Definition 1.14: Syntax



Die Syntax bezeichnet alles was mit dem Aufbau von Formalen Sprachen zu tuen hat. Die Grammatik einer Sprache, aber auch die in Natürlicher Sprache ausgedrückten Regeln, welche den Aufbau von Wörtern einer Formalen Sprache beschreiben, beschreiben die Syntax dieser Sprache. Es kann auch mehrere verschiedene Syntaxen für die gleiche Sprache geben<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Z.B. die Konkrete und Abstrakte Syntax, die später eingeführt werden.

<sup>b</sup>Thiemann, "Einführung in die Programmierung".

#### Definition 1.15: Semantik



Die Semantik bezeichnet alles was mit der Bedeutung von Formalen Sprachen zu tuen hat.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Thiemann, "Einführung in die Programmierung".

#### Definition 1.16: Formale Grammatik

1

"Eine Formale Grammatik beschriebt wie Wörter einer Sprache abgeleitet werden können. "a

Das Adjektiv "formal" kann dabei weggelassen werden, wenn der Kontext indem die Grammatik verwendet wird eindeutig ist, da man das Adjektiv "formal" nur verwendet um den Unterschied zum im normalen Sprachgebrauch verwendeten Begriff einer Grammatik herauszustellen.

Eine Grammatik wird durch das Tupel  $G = \langle N, \Sigma, P, S \rangle$  dargestellt, wobei:

- N = Nicht-Terminalsymbole.
- $\Sigma \triangleq Terminal symbole$ , wobei  $N \cap \Sigma = \emptyset^{bc}$ .
- $P \triangleq Menge\ von\ Produktionsregeln\ w \to v,\ wobei\ w,v \in (N \cup \Sigma)^* \land w \notin \Sigma^*.^{de}.$
- S = Startsymbol, wobei  $S \in N$ .

Zusätzlich ist es praktisch Nicht-Terminalsymbole N, Terminalsymbole  $\Sigma$  und das leere Wort  $\varepsilon$  allgemein als Menge der Grammatiksymbole  $C = N \cup \Sigma \cup \varepsilon$  zu definieren.

Die gerade definierten Formale Sprachen lassen sich des Weiteren in Klassen der Chromsky Hierarchie (Definition 1.17) einteilen.

#### Definition 1.17: Chromsky Hierarchie



Die Chromsky Hierarchie ist eine Hierarchie in der Formale Sprachen nach der Komplexität ihrer Formalen Grammatiken in verschiedene Klassen unterteilt werden. Jede dieser Klassen hat verschiedene Eigenschaften, wie Entscheidungeprobleme, die in dieser Klasse entscheidbar bzw. unentscheidbar sind usw.

Eine Sprache  $L_i$  ist in der Chromsky Hierarchie vom Typ  $i \in \{0, ..., 3\}$ , falls sie von einer Grammatik dieses Typs i erzeugt wird.

Zwischen den Sprachmengen benachbarter Klassen in Abbildung 1.17.1 besteht eine echte Teilmengenbeziehung:  $L_3 \subset L_2 \subset L_1 \subset L_0$ . Jede Reguläre Sprache ist auch eine Kontextfreie Sprache, aber nicht jede Kontextfreie Sprache ist auch eine Reguläre Sprache.

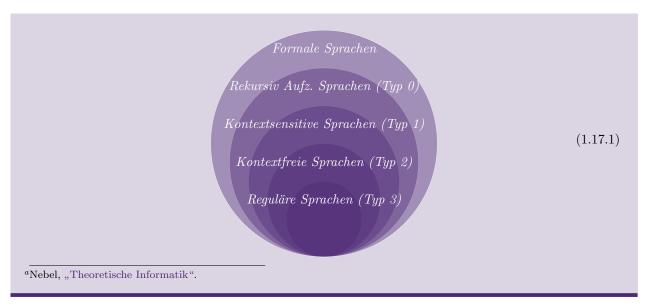
<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Weil mit ihnen terminiert wird.

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup>Kann auch als **Alphabet** bezeichnet werden.

<sup>&</sup>lt;sup>d</sup>w muss mindestens ein Nicht-Terminalsymbol enthalten.

<sup>&</sup>lt;sup>e</sup>Bzw.  $w, v \in V^* \land w \notin \Sigma^*$ .



Für diese Bachelorarbeit sind allerdings nur die Spracheklassen der Chromsky-Hierarchie relevant, die von Regulären (Definition 1.18) und Kontextfreien Grammatiken (Definition 1.19) beschrieben werden.

#### Definition 1.18: Reguläre Grammatik

"Ist eine Grammatik für die gilt, dass alle Produktionen eine der Formen:

$$A \to cB, \qquad A \to c, \qquad A \to \varepsilon$$
 (1.18.1)

haben, wobei A, B Nicht-Terminalsymbole sind und c ein Terminalsymbol ist<sup>ab</sup>."<sup>c</sup>

#### Definition 1.19: Kontextfreie Grammatik

1

"Ist eine Grammatik für die gilt, dass alle Produktionen die Form:

$$A \to v \tag{1.19.1}$$

 $haben,\ wobei\ A\ ein\ Nicht-Terminal symbol\ ist\ und\ v\ ein\ beliebige\ Folge\ von\ Grammatik symbolen^a$  ist."

Ob sich ein Programm überhaupt kompilieren lässt entscheidet sich anhand des Wortproblems (Definition 1.20). In einem Compiler oder Interpreter ist das Wortproblem üblicherweise immer entscheidbar. Wenn das Programm ein Wort der Sprache ist, die der Compiler kompiliert, so klappt das Kompilieren, ist es kein Wort der Sprache, die der Compiler kompiliert, wird eine Fehlermeldung ausgegeben.

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Diese Definition einer Regulären Grammatik ist rechtsregulär, es ist auch möglich diese Definition linksregulär zu formulieren, aber diese Details sind für die Bachelorarbeit nicht relevant.

 $<sup>^</sup>b$ Dadurch, dass die linke Seite immer nur ein Nicht-Terminalsymbol sein darf ist jede Reguläre Grammatik auch eine Kontextfrei Grammatik.

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Also eine beliebige Folge von Nicht-Terminalsymbolen und Terminalsymbolen.

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

#### Definition 1.20: Wortproblem

Z

Ein Entscheidungeproblem, bei dem man zu einem Wort  $w \in \Sigma^*$  und einer Sprache L als Eingabe 1 oder  $0^a$  ausgibt, je nachdem, ob dieses Wort w Teil der Sprache L ist  $w \in L$  oder nicht  $w \notin L$ .

Das Wortproblem kann durch die folgende Indikatorfunktion<sup>c</sup> zusammengefasst werden:

$$\mathbb{1}_L: \Sigma^* \to \{0, 1\}: w \mapsto \begin{cases} 1 & falls \ w \in L \\ 0 & sonst \end{cases}$$
 (1.20.1)

<sup>a</sup>Bzw. "ja" oder "nein" usw., es muss nicht umgedingt 1 oder 0 sein.

#### 1.2.1 Ableitungen

Um sicher zu wissen, ob ein Compiler ein **Programm**<sup>4</sup> kompilieren kann, ist es möglich das Programm mithilfe der **Grammatik** der **Sprache** des Compilers abzuleiten. Hierbei wird zwischen der **1-Schritt-Ableitungsrelation** (Definition 1.21) und der normalen **Ableitungsrelation** (Definition 1.22) unterschieden.

#### Definition 1.21: 1-Schritt-Ableitungsrelation



"Eine binäre Relattion  $\Rightarrow$  zwischen Wörtern aus  $(N \cup \Sigma)^*$ , die alle möglichen Wörter  $(N \cup \Sigma)^*$  in Relation zueinander setzt, die sich nur durch das einmalige Anwenden einer Produktionsregel voneinander unterschieden.

Es gilt  $u \Rightarrow v$  genau dann wenn  $u = w_1 x w_2$ ,  $v = w_1 y w_2$  und es eine Regel  $x \rightarrow y \in P$  gibt, wobei  $w_1, w_2, x, y \in (N \cup \Sigma)^*$  "a

<sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

#### Definition 1.22: Ableitungsrelation



"Eine binäre Relation  $\Rightarrow$ \*, welche der reflexive, transitive Abschluss der 1-Schritt-Ableitungsrelation  $\Rightarrow$  ist. Auf der rechten Seite der Ableitungsrelation  $\Rightarrow$ \* steht also ein Wort aus  $(N \cup \Sigma)$ \*, welches durch beliebig häufiges Anwenden von Produktionsregeln entsteht.

Es gilt  $u \Rightarrow^* v$  genau dann wenn  $u = w_1 \Rightarrow \ldots \Rightarrow w_n = v$ , wobei  $n \geq 1$  und  $w_1, \ldots, w_n \in (N \cup \Sigma)^*$ . "a

Beim Ableiten kann auf verschiedene Weisen vorgegangen werden, dasselbe **Programm**<sup>5</sup> kann z.B. über eine **Linksableitung** als auch eine **Rechtsableitung** (Definition 1.23) abgeleitet werden. Das ist später bei den verschiedenen **Ansätzen** für das **Parsen** eines Programmes in Unterkapitel 1.4 relevant.

#### Definition 1.23: Links- und Rechtsableitungableitung



"In jedem Ableitungsschritt wird bei Typ-3- und Typ-2-Grammatiken auf das am weitesten links (Linksableitung) bzw. rechts (Rechtsableitung) stehende Nicht-Terminalsymbol eine Produktionsregel angewandt, bei Typ-1- und Typ-0-Grammatiken ist es statt einem Nicht-Terminalsymbol

 $<sup>^</sup>b$ Nebel, "Theoretische Informatik".

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup>Auch Charakteristische Funktion genannt.

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Bzw. Wort.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Bzw. Wort.

die linke Seite einer Produktion.

Mit diesem Vorgehen kann man jedes ableitbare Wort generieren, denn dieses Vorgehen entspricht Tiefensuche von links-nach-rechts. "a

<sup>a</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

Manche der **Ansätze** für das **Parsen** eines Programmes haben ein Problem, wenn die Grammatik, die zur Entscheidung des **Wortproblems** für das Programm verwendet wird eine **Linksrekursive Grammatik** (Definition 1.24) ist<sup>6</sup>.

#### Definition 1.24: Linksrekursive Grammatiken

**I** 

Eine Grammatik ist linksrekursiv, wenn sie ein Nicht-Terminalsymbol enthält, dass linksrekursiv ist.

Ein Nicht-Terminalsymbol ist linksrekursiv, wenn das linkeste Symbol in einer seiner Produktionen es selbst ist oder zu sich selbst gemacht werden kann durch eine Folge von Ableitungen:

$$A \Rightarrow^* Aa$$
,

wobei a eine beliebige Folge von Terminalsymbolen und Nicht-Terminalsymbolen ist. a

 $^aParsing\ Expressions\ \cdot\ Crafting\ Interpreters.$ 

Um herauszufinden, ob eine Grammatik mehrdeutig (Definition 1.26) ist, werden Ableitungen als Formale Ableitungsbäume (Definition 1.25) dargestellt. Formale Ableitungsbäume werden im Unterkapitel 1.4 nochmal relevant, da in der Syntaktischen Analyse Ableitungsbäume (Definition 1.37) als eine compilerinterne Datenstruktur umgesetzt werden.

#### Definition 1.25: Formaler Ableitungsbaum



Ist ein Baum, in dem die Syntax eines Wortes<sup>a</sup> nach den Produktionen der zugehörigen Grammatik, die angewendet werden mussten um das Wort abzuleiten hierarchisch zergliedert dargestellt wird.

Das Adjektiv "formal" kann dabei weggelassen werden, wenn der Kontext indem der Ableitungsbaum verwendet wird eindeutig ist, da man das Adjektiv "formal" nur verwendet um den Unterschied zum compilerinternen Ableitungsbaum herauszustellen, der den Formalen Ableitungsbaum als Datentstruktur zur einfachen Weiterverarbeitung umsetzt.

Den Knoten dieses Baumes sind Grammatiksymbole  $C = N \cup \Sigma \cup \varepsilon$  (Definition 1.16) zugeordnet. Die Inneren Knoten des Baumes sind Nicht-Terminalsymbole N und die Blätter sind entweder Terminalsymbole  $\Sigma$  oder das leere Wort  $\varepsilon$ .

<sup>a</sup>Z.B. Programmcode.

<sup>b</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

In Abbildung 1.25.2 ist ein Beispiel für einen Formalen Ableitungsbaum zu sehen, der sich aus der Ableitung 1.25.1 nach den im Dialekt der Erweiterter Backus-Naur-Form des Lark Parsing Toolkit (Definition 2.3) angegebenen Produktionen 1.1 einer ansonsten nicht näher spezifizierten Grammatik  $G = \langle N, \Sigma, P, add \rangle$  ergibt.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Für den im PicoC-Compiler verwendeten Earley Parsers stellt dies allerdings kein Problem dar.

| $DIG\_NO\_0$   | ::= | "1"   "2"   "3"   "4"   "5"   "6" | $L_{-}Lex$ |
|----------------|-----|-----------------------------------|------------|
|                | '   | "7"   "8"   "9"                   |            |
| $DIG\_WITH\_0$ | ::= | "0"   DIG_NO_0                    |            |
| NUM            | ::= | "0"   DIG_NO_0 DIG_WITH_0*        |            |
| add            | ::= | add "+" $mul$   $mul$             | $L\_Parse$ |
| mul            | ::= | $mul$ "*" $NUM \mid NUM$          |            |

Grammatik 1.1: Produktionen für Ableitungsbaum in EBNF

#### Anmerkung Q

Werden die Produktionen einer Grammatik in z.B. EBNF angegeben, wie in Grammatik 2.1.1, wird die Angabe dieser Produktionen auch oft als Grammatik bezeichnet, obwohl Grammatiken eigentlich durch ein Tupel  $G = \langle N, \Sigma, P, S \rangle$  dargestellt sind.

$$add \Rightarrow mul \Rightarrow mul \ "*" \ NUM \Rightarrow NUM \ "*" \ NUM \Rightarrow 4 \ "*" \ NUM \Rightarrow 4 \ "*" \ 2$$
 (1.25.1)

Bei Ableitungsbäumen gibt es keine einheutliche Regelung, wie damit umgegangen wird, wenn die Alternativen einer Produktion unterschiedliche viele Nicht-Terminalsymbole enthalten. Es gibt einmal die Möglichkeit, wie im Ableitungsbaum 1.25.2 von der Maximalzahl auszugehen und beim Nicht-Erreichen der Maximalzahl entsprechend der Differenz zur Maximalzahl viele Blätter mit dem leeren Wort  $\varepsilon$  hinzuzufügen.



Eine andere Möglichkeit ist, wie im Ableitungsbaum 1.25.3 nur die vorhandenen **Nicht-Terminalsymbole** als Kinder hinzuzufügen<sup>7</sup>.



Für einen Compiler ist es notwendig, dass die Konkrete Grammatik keine Mehrdeutige Grammatik (Definition 1.26) ist, denn sonst können unter anderem die Präzedenzregeln der verschiedenen Operatoren nicht gewährleistet werden, wie später in Unterkapitel 2.2.1 an einem Beispiel demonstriert wird.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>Diese Option wurde beim **PicoC-Compiler** gewählt.

#### Definition 1.26: Mehrdeutige Grammatik

Z

"Eine Grammatik ist mehrdeutig, wenn es ein Wort  $w \in L(G)$  gibt, das mehrere Ableitungsbäume zulässt".  $^{ab}$ 

 $^a$ Alternativ, wenn es für w mehrere unterschiedliche Linksableitungen gibt.

#### 1.2.2 Präzedenz und Assoziativität

Will man die Operatoren aus einer Programmiersprache in einer Konkreten Grammatik ausdrücken, die nicht mehrdeutig ist, so lässt sich das nach einem klaren Schema machen, wenn die Assoziativität (Definiton 1.27) und Präzedenz (Definition 1.28) dieser Operatoren festgelegt ist. Dieses Schema wird in Unterkapitel 2.2.1 genauer erklärt.

#### Definition 1.27: Assoziativität

Z

"Bestimmt, welcher Operator aus einer Reihe gleicher Operatoren zuerst ausgewertet wird."

Es wird grundsätzlich zwischen linksassoziativen Operatoren, bei denen der linke Operator vor dem rechten Operator ausgewertet wird und rechtsassoziativen Operatoren, bei denen es genau anders rum ist unterschieden.<sup>a</sup>

 ${}^a Parsing \ Expressions \ \cdot \ Crafting \ Interpreters.$ 

Bei Assoziativität ist z.B. der Multitplikationsoperator \* ein Beispiel für einen linksassoziativen Operator und ein Zuweisungsoperator = ein Beispiel für einen rechtsassoziativen Operator. Dies ist in Abbildung 1.3 mithilfe von Klammern () veranschaulicht.

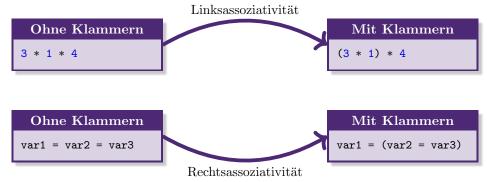


Abbildung 1.3: Veranschaulichung von Linksassoziativität und Rechtsassoziativität.

#### Definition 1.28: Präzedenz

"Bestimmt, welcher Operator zuerst in einem Ausdruck, der eine Mischung verschiedener Operatoren enthält, ausgewertet wird. Operatoren mit einer höheren Präzedenz, werden vor Operatoren mit niedrigerer Präzedenz ausgewertet."

<sup>a</sup> Parsing Expressions  $\cdot$  Crafting Interpreters.

Bei Präzedenz ist die Mischung der Operatoren für Subraktion '-' und für Multiplikation \* ein Beispiel für den Einfluss von Präzedenz. Dies ist in Abbildung 1.4 mithilfe der Klammern () veranschaulicht. Im Beispiel in Abbildung 1.4 ist bei den beiden Subtraktionsoperatoren '-' nacheinander und dem darauffolgenden Multitplikationsoperator \* sowohl Assoziativität als auch Präzedenz im Spiel.

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Nebel, "Theoretische Informatik".

Abbildung 1.4: Veranschaulichung von Präzedenz.

#### 1.3 Lexikalische Analyse

Die Lexikalische Analyse bildet üblicherweise den ersten Filter innerhalb des Pipe-Filter Architekturpatterns (Definition 1.29) bei der Implementierung von Compilern. Die Aufgabe der lexikalischen Analyse ist vereinfacht gesagt in einem Eingabewort<sup>8</sup> endliche Folgen Symbolen<sup>9</sup> zu finden, die durch bestimmte Pattern (Definition 1.30) erkannt werden, die durch eine reguläre Grammatik spezifiziert sind. Diese Folgen endlicher Symoble werden auch Lexeme (Definition 1.31) genannt.

#### Definition 1.29: Pipe-Filter Architekturpattern

Z

Ist ein Archikteturpattern, welches aus Pipes und Filtern besteht, wobei der Ausgang eines Filters der Eingang des durch eine Pipe verbundenen adjazenten nächsten Filters ist, falls es einen gibt.

Ein Filter stellt einen Schritt dar, indem eine Eingabe weiterverarbeitet wird und weitergereicht wird. Bei der Weiterverarbeitung können Teile der Eingabe entfernt, hinzugefügt oder vollständig ersetzt werden.

Eine Pipe stellt ein Bindeglied zwischen zwei Filtern dar. ab



<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Das ein Bindeglied eine eigene Bezeichnung erhält, bedeutet allerdings nicht, dass es eine eigene wichtige Aufgabe erfüllt. Wie bei vielen Pattern, soll mit dem Namen des Pattern, in diesem Fall durch das Pipe die Anlehung an z.B. die Pipes aus Unix, z.B. cat /proc/bus/input/devices | less zum Ausdruck gebracht werden. Und so banal es klingt, sollen manche Bezeichnungen von Pattern auch einfach nur gut klingen.

#### Definition 1.30: Pattern



Beschreibung aller möglichen Lexeme, die eine Menge  $\mathbb{P}_T$  bilden und einem bestimmten Token T zugeordnet werden. Die Menge  $\mathbb{P}_T$  ist eine möglicherweise unendliche Menge von Wörtern, die sich mit den Produktionen einer regulären Grammatik  $G_{Lex}$  einer regulären Sprache  $L_{Lex}$  beschreiben lassen a, die für die Beschreibung eines Tokens T zuständig sind.

#### Definition 1.31: Lexeme



Ein Lexeme ist ein Teilwort aus dem Eingabewort, welches von einem Pattern für eines der Token T einer Sprache  $L_{Lex}$  erkannt wird.<sup>a</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Westphal, "Softwaretechnik".

 $<sup>^</sup>a\mathrm{Als}$  Beschreibungswerkzeug können aber auch z.B. reguläre Ausdrücke hergenommen werden.

 $<sup>{}^</sup>b$ Thiemann, "Compilerbau".

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup>Z.B. dem Inhalt einer Datei, welche in UTF-8 kodiert ist.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Also Teilwörter des Eingabeworts.

<sup>a</sup>Thiemann, "Compilerbau".

Diese Lexeme werden vom Lexer (Definition 1.32) im Eingabewort identifziert und Tokens T zugeordnet. Das jeweils nächste Lexeme fängt dabei genau nach dem letzten Symbol des Lexemes an, das zuletzt vom Lexer erkannt wurde. Die Tokens (Definition 1.32) sind es, die letztendlich an die Syntaktische Analyse weitergegeben werden.

Ein Lexeme ist dabei nicht immer das gleiche wie der Tokenwert, denn z.B. im Fall von  $L_{PicoC}$  kann der Wert 99 durch zwei verschiedene Literale (Definition 1.34) dargestellt werden, einmal als ASCII-Zeichen 'c', das dann als Tokenwert den entsprechenden Wertes aus der ASCII-Tabelle hat und des Weiteren auch in Dezimalschreibweise als 99<sup>10</sup>. Zu einem Lexeme wie z.B. 'c' wäre das entsprechende Token dazu Token('CHAR', '99'). Bei einem Lexeme wie z.B. '99' wäre das entsprechende Token Token('NUM', '99'), bei dem das Lexeme mit dem Tokenwert übereinstimmt. Der Tokenwert ist der letztendlich verwendete Wert an sich, unabhängig von der Darstellungsform.

#### Definition 1.32: Lexer (bzw. Scanner oder auch Tokenizer)



Ein Lexer ist eine partielle Funktion  $lex : \Sigma^* \to (N \times W)^*$ , welche ein Wort bzw. Lexeme aus  $\Sigma^*$  auf ein Token T mit einem Tokennamen N und einem Tokenwert W abbildet, falls dieses Wort sich unter der regulären Grammatik  $G_{Lex}$ , der regulären Sprache  $L_{Lex}$  abbleiten lässt bzw. einem der Pattern der Sprache  $L_{Lex}$  entspricht.

<sup>a</sup>Thiemann, "Compilerbau".

Ein Lexer ist im Allgemeinen eine partielle Funktion, da es Zeichenfolgen geben kann, die von keinem Pattern eines Tokens der Sprache  $L_{Lex}$  erkannt werden. In Bezug auf eine Implementierung, wird, wenn der Lexer Teil der Implementierung eines Compilers ist, in diesem Fall eine Fehlermeldung ausgegeben.

#### Anmerkung 9

Um Verwirrung verzubeugen ist es wichtig folgende Unterscheidung hervorzuheben:

Wenn von Symbolen die Rede ist, so werden in der Lexikalischen Analyse, der Syntaktischen Analyse und der Code Generierung, auf diesen verschiedenen Ebenen unterschiedliche Konzepte als Symbole bezeichnet.

In der Lexikalischen Analyse sind einzelne Zeichen eines Zeichensatzes die Symbole.

In der Syntaktischen Analyse sind die Tokennamen die Symbole.

In der Code Generierung sind die Bezeichner (Definition 1.33) von Variablen, Konstanten und Funktionen die Symbole<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>Das ist der Grund, warum die Tabelle, in der Informationen zu Bezeichnern gespeichert werden, in Kapitel 2 Symboltabelle genannt wird.

#### Definition 1.33: Bezeichner (bzw. Identifier)



 $To kenwert, \ der \ eine \ Konstante, \ Variable, \ Funktion \ usw. \ innerhalb \ ihres \ Sichtbarkeitsbereichs \ eindeutigbenennt. \ ^{ab}$ 

<sup>a</sup>Außer wenn z.B. bei Funktionen die Programmiersprache das Überladen erlaubt usw. In diesem Fall wird die Signatur der Funktion als weiteres Unterschiedungsmerkmal hinzugenommen, damit es eindeutig ist.

 $<sup>^{10}</sup>$ Die Programmiersprache  $L_{Python}$  erlaubt es z.B. dieser Wert auch mit den Literalen 0b1100011 und 0x63 darzustellen.

<sup>b</sup>Thiemann, "Einführung in die Programmierung".

Der Grund warum nicht einfach nur die Lexeme an die Syntaktische Analyse weitergegeben werden und der Grund für die Aufteilung des Tokens in Tokenname und Tokenwert, ist, weil z.B. die Bezeichner von Variablen, Konstanten und Funktionen beliebige Zeichenfolgen sein können, wie my\_fun, my\_var oder my\_const und es auch viele verschiedenen Zahlen gibt, wie 42, 314 oder 12. Die Tokennamen sind Überbegriffe für beliebige Bezeichner von Variablen, Konstanten und Funktionen und beliebige Zahlen.

Für die zuvor als Beispiel genannten Bezeichner und Zahlen wären z.B. NAME<sup>12</sup> und NUM<sup>13</sup> passende Tokennamen<sup>14</sup>, bzw. wenn man sich nicht Kurzformen sucht IDENTIFIER und NUMBER. Für Lexeme, wie if oder } sind die Tokennamen genau die Bezeichnungen, die man diesen Zeichenfolgen geben würde, nämlich IF und RBRACE.

Die Konkrete Grammatik  $G_{Lex}$ , die zur Beschreibung der Token T der Sprache  $L_{Lex}$  verwendet wird ist üblicherweise regulär, da ein typischer Lexer immer nur ein Symbol vorausschaut<sup>15</sup>, sich nichts merkt, also unabhängig davon, was für Symbole und wie oft bestimmte Symbole davor aufgetaucht sind funktioniert. Auch für den PicoC-Compiler lässt sich aus der Grammatik 2.1.1 schlussfolgern, dass die Sprache des PicoC-Compilers für die Lexikalische Analyse  $L_{PicoC\_Lex}$  regulär ist, da alle ihre Produktionen die Definition 1.18 erfüllen.

Produktionen mit Alternative, wie z.B.  $DIG\_WITH\_0 := "0" \mid DIG\_NO\_0$  sind unproblematisch, denn sie können immer auch als  $\{DIG\_WITH\_0 := "0", DIG\_WITH\_0 := DIG\_NO\_0\}$  ausgedrückt werden und die Schreibweise " $\_$ ".." $\sim$ " in Grammatik 2.1.1 ist eine Abkürzung dafür alle ASCII-Symbole zwischen  $\_$  und  $\sim$  als Alternative aufzuschreiben, womit diese Alternativen wie gerade gezeigt umgeformt werden können, um ebenfalls regulär zu sein. Somit existiert mit der Grammatik 2.1.1 eine reguläre Grammatik, welche die Sprache  $L_{PicoC\_Lex}$  beschreibt und damit ist die Sprache  $L_{PicoC\_Lex}$  nach der Chromsky Hierarchie (Definition 1.17) regulär.

#### Definition 1.34: Literal

Z

Eine von möglicherweise vielen weiteren Darstellungsformen (als Zeichenkette) für ein und denselben Wert eines Datentyps.<sup>a</sup>

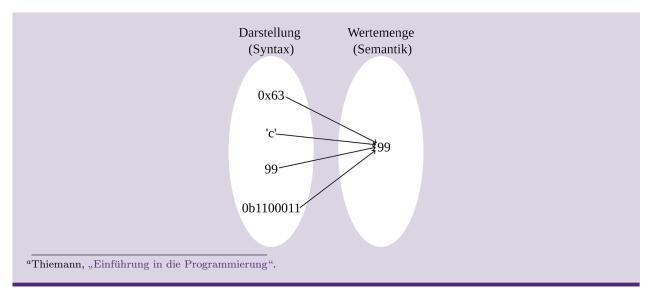
<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>In Unix Systemen wird für Newline das ASCII Symbol line feed, in Windows hingegen die ASCII Symbole carriage return und line feed nacheinander verwendet. Das wird aber meist durch die verwendete Porgrammiersprache, die man zur Inplementierung des Lexers nutzt wegabstrahiert.

 $<sup>^{12}\</sup>mathrm{F\ddot{u}r}$  z.B.  $\mathrm{my\_fun},\,\mathrm{my\_var}$  und  $\mathrm{my\_const}.$ 

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup>Für z.B. 42, 314 und 12.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>Diese Tokennamen wurden im PicoC-Compiler verwendet, da man beim Programmieren möglichst kurze und leicht verständliche Bezeichner für seine Knoten haben will, damit unter anderem mehr Code in eine Zeile passt.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>Man nennt das auch einem Lookahead von 1



Um eine Gesamtübersicht über die Lexikalische Analyse zu geben, ist in Abbildung 1.5 die Lexikalische Analyse an einem Beispiel veranschaulicht.

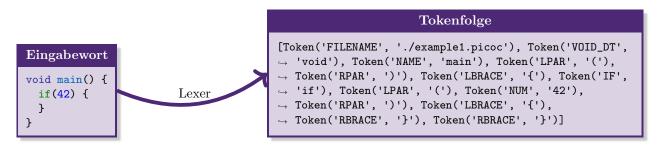


Abbildung 1.5: Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse.

#### 1.4 Syntaktische Analyse

In der Syntaktischen Analyse ist für einige Sprachen eine Kontextfreie Grammatik  $G_{Parse}$  notwendig, um diese Sprachen zu beschreiben, da viele Programmiersprachen z.B. für Funktionsaufrufe fun(arg) und Codeblöcke if(1){} syntaktische Mittel verwenden, die es notwendig machen sich zu merken, wieviele öffnende runde Klammern '(' bzw. öffnende geschweifte Klammern '{'} es momentan gibt, die noch nicht durch eine entsprechende schließende runde Klammer ')' bzw. schließende geschweifte Klammer '}' geschlossen wurden. Dies lässt sich nicht mehr mit einer Regulären Grammatik (Definition 1.18) beschreiben, sondern es braucht eine Kontextfreie Grammatik (Definition 1.19) hierfür, die es erlaubt zwischen zwei Terminalsymbolen ein Nicht-Terminalsymbol abzuleiten.

Für den PicoC-Compiler lässt sich aus der Grammatik 2.2.8 schlussfolgern, dass die Sprache des PicoC-Compilers für die Syntaktische Analyse  $L_{PicoC\_Parse}$  kontextfrei, aber nicht mehr regulär ist, da alle ihre Produktionen die Definition für Kontextfreie Grammatiken 1.19 erfüllen, aber nicht die Definition für Reguläre Grammatiken 1.18.

Dass die Grammatik kontextfrei ist lässt sich auch sehr leicht erkennen, weil alle Produktionen auf der linken Seite des ::=-Symbols immer nur ein Nicht-Terminalsymbol haben und auf der rechten Seite

eine beliebige Folge von Grammatiksymbolen<sup>16</sup>. Dass diese Grammatik aber nicht regulär sein kann, lässt sich sehr einfach an z.B. der Produktion  $if\_stmt ::= "if"" ("logic\_or")" exec\_part$  erkennen, bei der das Nicht-Terminalsymbol  $logic\_or$  von den Terminalsymbolen für öffnende Klammer { und schließende Klammer } eingeschlossen sein muss, was mit einer Regulären Grammatik nicht ausgedrückt werden kann.

Somit existiert mit der Grammatik 2.2.8 eine Kontextfreie Grammatik und nicht Reguläre Grammatik, welche die Sprache  $L_{PicoC\_Parse}$  beschreibt und damit ist die Sprache  $L_{PicoC\_Parse}$  nach der Chromsky Hierarchie (Definition 1.17) kontextfrei, aber nicht regulär.

Die Syntax, in welcher ein Programm aufgeschrieben ist, wird auch als Konkrete Syntax (Definition 1.35) bezeichnet. In einem Zwischenschritt, dem Parsen wird aus diesem Programm mithilfe eines Parsers (Definition 1.38) ein Ableitungsbaum (Definition 1.37) generiert, der als Zwischenstufe hin zum einem Abstrakten Syntaxbaum (Definition 1.44) dient. Beim Compilerbau ist es förderlich kleinschrittig vorzugehen, deshalb erst die Generierung des Ableitungsbaumes und dann erst des Abstrakten Syntaxbaumes.

#### Definition 1.35: Konkrete Syntax

Z

Steht für alles, was mit dem Aufbau von Ableitungen nach einer Konkretten Grammatik zu tuen hat.

Ein Programm in seiner Textrepräsentation, wie es in einer Textdatei nach den Produktionen der Grammatiken  $G_{Lex}$  und  $G_{Parse}$  abgeleitet steht, bevor man es kompiliert, ist in Konkreter Syntax aufgeschrieben.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Um einen kurzen Begriff für die Grammatik, welche die Konkrete Syntax einer Sprache beschreibt zu haben, wird diese im Folgenden als Konkrete Grammatik (Definition 1.36) bezeichnet.

#### Definition 1.36: Konkrete Grammatik



Grammatik, die eine Konkrete Syntax beschreibt.

In der Konkreten Grammatik entsprechen die Terminalsymbole den Tokennamen, der in der Lexikalischen Analyse generierten Tokens<sup>a</sup> und Nicht-Terminalsymbole entsprechen bei einem Ableitungsbaum den Stellen, wo ein Teilbaum eingehängt ist.

<sup>a</sup>Wobei das Lark Parsing Toolkit, welches später bei der Implementierung verwendet wird eine spezielle Metasyntax zur Spezifikation von Grammatiken nutzt, bei der für bestimmten häufig genutzte Terminalsymbolen ein Tokenwert in die Grammatik geschrieben wird.

#### Definition 1.37: Ableitungsbaum (bzw. Konkreter Syntaxbaum, engl. Derivation Tree)

Compilerinterne Datenstruktur für den Formalen Ableitungsbaum (Definition 1.25) eines in Konkreter Syntax geschriebenen Programmes.<sup>a</sup>

Der Formale Ableitungsbaum visualiert dabei die Ableitungen, die nach der entsprechenden Konkreten Grammatik abgeleitet sind hierarchisch in einem Baum.

 $^a JSON\ parser$  - Tutorial —  $Lark\ documentation$ .

Die Konkrete Grammatik nach der Ableitungsbaum konstruiert ist, wird optimalerweise immer so definiert, dass sich möglichst einfach aus dem Ableitungsbaum ein Abstrakter Syntaxbaum konstruieren lässt.

 $<sup>^{16}</sup>$ Also eine beliebige Folge von Nicht-Terminalsymbolen und Terminalsymbolen.

#### Definition 1.38: Parser

/

Ein Parser ist ein Programm, dass aus einem Eingabewort<sup>a</sup>, welches in Konkreter Syntax geschrieben ist eine compilerinterne Datenstruktur, den Ableitungsbaum generiert, was auch als Parsen bezeichnet wird<sup>b</sup>.<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Z.B. wiederum ein **Programm**.

<sup>b</sup>Es gibt allerdings auch alternative Definitionen, denen nach ein Parser in Bezug auf Compilerbau ein Programm ist, dass ein Eingabewort von Konkreter Syntax in Abstrakte Syntax übersetzt. Im Folgenden wird allerdings die Definition 1.38 verwendet.

 $^c$  JSON parser - Tutorial — Lark documentation.

#### Anmerkung Q

An dieser Stelle könnte möglicherweise eine Verwirrung enstehen, welche Rolle dann überhaupt ein Lexer hier spielt.

In Bezug auf Compilerbau ist ein Lexer ein Teil eines Parsers. Der Lexer ist auschließlich für die Lexikalische Analyse verantwortlich und entspricht z.B., wenn man bei einem Wanderausflug verschiedene Insekten entdeckt, dem Nachschlagen in einem Insektenlexikon und dem Aufschreiben, welchen Insekten man in welcher Reihenfolge begegnet ist. Zudem kann man bestimmte Sehenswürdigkeiten an denen man während des Ausflugs vorbeikommt ebenfalls festhalten, da es eine Rolle spielen kann in welchem örtlichen Kontext man den Insekten begegnet ist<sup>a</sup>.

Der Parser vereinigt sowohl die Lexikalische Analyse, als auch einen Teil der Syntaktischen Analyse in sich und entspricht, um auf das Beispiel zurückzukommen, dem Darstellen von Beziehungen zwischen den Insektenbegnungen in einer für die Weiterverarbeitung tauglichen Form<sup>b</sup>.

In der Weiterverarbeitung kann der Interpreter das interpretieren und daraus bestimmte Schlüsse ziehen und ein Compiler könnte es vielleicht in eine für Menschen leichter entschüsselbare Sprache kompilieren.

 $^a\mathrm{Das}$ würde z.B. der Rolle eines Semikolon ; in der Sprache  $L_{PicoC}$ entsprechen.

<sup>b</sup>Z.B. gibt es bestimmte Wechselbeziehungen zwischen Insekten, Insekten beinflussen sich gegenseitig und ihre Umwelt.

Die vom Lexer im Eingabewort identifizierten Token werden in der Syntaktischen Analyse vom Parser als Wegweiser verwendet, da je nachdem, in welcher Reihenfolge die Token auftauchen, dies einer anderen Ableitung in der Grammatik  $G_{Parse}$  entspricht. Dabei wird in der Grammatik  $L_{Parse}$  nach dem Tokennamen unterschieden und nicht nach dem Tokenwert, da es nur von Interesse ist, ob an einer bestimmten Stelle z.B. eine Zahl steht und nicht, welchen konkreten Wert diese Zahl hat. Der Tokenwert ist erst später in der Code Generierung in 1.5 wieder relevant.

Ein Parser ist genauergesagt ein erweiterter Recognizer (Definition 1.39), denn ein Parser löst das Wortproblem (Definition 1.20) für die Sprache, in der das Programm, welches kompiliert werden soll geschrieben ist und konstruiert parallel dazu oder im Nachgang aus den Informationen, die während der Ausführung des Recognition Algorithmus gesichert wurden den Ableitungsbaum.

#### Definition 1.39: Recognizer (bzw. Erkenner)



Entspricht einem Kellerautomaten<sup>a</sup>, in dem Wörter bestimmter Kontextfreier Sprachen erkannt werden. Der Recognizer ist ein Algorithmus, der erkennt, ob ein Eingabewort sich mit den Produktionen der Konkreten Grammatik einer Sprache ableiten lässt, also ob er bzw. es Teil der Sprache ist, die von der Konkreten Grammatik beschrieben wird oder nicht. Das vom Recognizer gelöste Problem ist auch als Wortproblem (Definition 1.20) bekannt. bc

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Automat mit dem Kontextfreie Grammatiken erkannt werden.

<sup>b</sup>Der deutsche Begriff "Erkenner" scheint nicht wirklich etabliert und geläufig zu sein, daher wird im Folgenden der englische Begriff "Recognizer" verwendet.

<sup>c</sup>Thiemann, "Compilerbau".

#### Anmerkung 9

Für das Parsen gibt es grundsätzlich drei verschiedene Ansätze:

• Top-Down Parsing: Der Ableitungsbaum wird von oben-nach-unten generiert, also von der Wurzel zu den Blättern. Dementsprechend fängt die Generierung des Ableitungsbaumes mit dem Startsymbol der Konkreten Grammatik an und wendet in jedem Schritt eine Linksableitung auf die Nicht-Terminalsymbole an, bis man Terminalsymbole hat, die sich zum gewünschten Eingabewort abgeleitet haben oder sich herausstellt, dass dieses nicht abgeleitet werden kann.

Der Grund, warum die Linksableitung verwendet wird und nicht z.B. die Rechtsableitung, ist, weil das Eingabewort von links nach rechts eingelesen wird, was gut damit zusammenpasst, dass die Linksableitung die Blätter von links-nach-rechts generiert.

Welche der Produktionen für ein Nicht-Terminalsymbol angewandt wird, wenn es mehrere Alternativen gibt, wird entweder durch Backtracking oder durch Vorausschauen gelöst.

Eine sehr einfach zu implementierende Technik für Top-Down Parser ist hierbei der Rekursive Abstieg (Definition ??).

Mit dieser Methode ist das Parsen Linksrekursiver Grammatiken (Definition 1.24) allerdings nicht möglich, ohne die Konkrete Grammatik vorher umgeformt zu haben und jegliche Linksrekursion aus der Konkreten Grammatik entfernt zu haben, da diese zu Unendlicher Rekursion führt.

Rekursiver Abstieg kann mit Backtracking verbunden werden, um auch Konkrete Grammatiken parsen zu können, die nicht LL(k) (Definition ??) sind. Dabei werden meist nach dem Prinzip der Tiefensuche alle Produktionen für ein Nicht-Terminalsymbol solange durchgegangen bis der gewüschte Inpustring abgeleitet ist oder alle Alternativen für einen Schritt abgesucht sind, bis man wieder beim ersten Schritt angekommen ist und da auch alle Alternativen abgesucht sind, was dann bedeutet, dass das Eingabewort sich nicht mit der verwendeten Konkreten Grammatik ableiten lässt.<sup>b</sup>

Wenn man eine LL(k)-Grammatik hat, kann man auf Backtracking verzichten und es reicht einfach nur immer k Token im Eingabewort vorauszuschauen. Mehrdeutige Grammatiken sind dadurch ausgeschlossen, weil LL(k) keine Mehrdeutigkeit zulässt.

- Bottom-Up Parsing: Es wird mit dem Eingabewort gestartet und versucht Rechtsableitungen entsprechend der Produktionen einer Konkreten Grammatik rückwärts anzuwenden, bis man beim Startsymbol landet.<sup>d</sup>
- Chart Parsing: Es wird Dynamische Programmierung verwendet und partielle Zwischenergebnisse werden in einer Tabelle (bzw. einem Chart) gespeichert und können wiederverwendet werden. Das macht das Parsen Kontextfreier Grammatiken effizienter, sodass es nur noch polynomielle Zeit braucht, da Backtracking nicht mehr notwendig ist<sup>e</sup>. Chart Parser können dabei top-down oder bottom-up Ansätze umsetzen. Da die Implementierung von Chart Parsern fundamental anders ist als bei Top-Down und Bottom-Up Parsern, wird diese Kategorie von Parsern nochmal speziell unterschieden und nicht gesagt, es sei ein Top-Down Parser oder Bottom-Up Parser, der Dynamische Programmierung verwendet.

<sup>a</sup>What is Top-Down Parsing?

<sup>c</sup>Diese Art von Parser ist im RETI-Interpreter implementiert, da die RETI-Sprache eine besonders simple LL(1) Grammatik besitzt. Diese Art von Parser wird auch als Predictive Parser oder LL(k) Recursive Descent Parser bezeichnet, wobei Recursive Descent das englische Wort für Rekursiven Abstieg ist.

<sup>d</sup>What is Bottom-up Parsing?

<sup>e</sup>Der Earley Parser, den Lark und damit der PicoC-Compiler verwendet fällt unter diese Kategorie.

Der Abstrakte Syntaxbaum wird mithilfe von Transformern (Definition 1.40) und Visitors (Definition 1.41) generiert und ist das Endprodukt der Syntaktischen Analyse, welches an die Code Generierung weitergegeben wird. Wenn man die gesamte Syntaktische Analyse betrachtet, so übersetzt diese ein Programm von der Konkreten Syntax in die Abstrakte Syntax (Definition 1.42).

#### Definition 1.40: Transformer



Ein Programm, das von unten-nach-oben<sup>a</sup> nach dem Prinzip der Breitensuche alle Knoten des Ableitungsbaum besucht und beim Antreffen eines bestimmten Knoten des Ableitungsbaumes je nach Kontext einen entsprechenden Knoten des Abstrakten Syntaxbaumes erzeugt und diesen anstelle des Knotens des Ableitungsbaumes setzt und so Stück für Stück den Abstrakten Syntaxbaum konstruiert.<sup>b</sup>

<sup>a</sup>In der Informatik wachsen Bäume von oben-nach-unten, von der Wurzel zur den Blättern.

 $^b$  Transformers & Visitors — Lark documentation.

#### Definition 1.41: Visitor



Ein Programm, das von unten-nach-oben<sup>a</sup>, nach dem Prinzip der Breitensuche alle Knoten des Ableitungsbaumes besucht und beim Antreffen eines bestimmten Knoten des Ableitungsbaumes, diesen in-place mit anderen Knoten tauscht oder manipuliert, um den Ableitungbaum für die weitere Verarbeitung durch z.B. einen Transformer zu vereinfachen.<sup>bc</sup>

<sup>a</sup>In der Informatik wachsen Bäume von oben-nach-unten, von der Wurzel zur den Blättern.

<sup>b</sup>Kann theoretisch auch zur Konstruktion eines Abstrakten Syntaxbaumes verwendet werden, wenn z.B. eine externe Klasse verwendet wird, welches für die Konstruktion des Abstrakten Syntaxbaumes verantwortlich ist. Aber dafür ist ein Transformer besser geeignet.

<sup>c</sup>Transformers & Visitors — Lark documentation.

#### Definition 1.42: Abstrakte Syntax



Steht für alles, was mit dem Aufbau von Abstrakten Syntaxbäumen zu tuen hat.

Ein Abstrakter Syntaxbaum, der zur Kompilierung eines Wortes<sup>a</sup> generiert wurde befindet sich in Abstrakter Syntax.<sup>b</sup>

 $^a\mathrm{Z.B.}$  Programmcode.

<sup>b</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Um einen kurzen Begriff für die Grammatik, welche die Abstrakte Syntax einer Sprache beschreibt zu haben, wird diese im Folgenden als Abstrakte Grammatik (Definition 1.43) bezeichnet.

#### Definition 1.43: Abstrakte Grammatik



Grammatik, die eine Abstrakte Syntax beschreibt, also beschreibt was für Arten von Kompositionen mit den Knoten eines Abstrakten Syntaxbaumes möglich sind.

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Diese Form von Parsing wurde im PicoC-Compiler implementiert, als dieser noch auf dem Stand des Bachelorprojektes war, bevor er durch den nicht selbst implementierten Earley Parser von Lark (siehe Webseite Lark - a parsing toolkit for Python) ersetzt wurde.

Jene Produktionen, die in der Konkreten Grammatik für die Umsetzung von Präzedenz notwendig waren, sind in der Abstrakten Grammatik abgeflacht. Dadurch sind die Kompositionen, welche die Knoten im Abstrakten Syntaxbaum bilden können syntaktisch meist näher an der Syntax von Maschinenbefehlen.

#### Definition 1.44: Abstrakter Syntaxbaum (bzw. engl. Abstract Syntax Tree, kurz AST)

Ist ein compilerinterne Datenstruktur, welche eine Abstraktion eines dazugehörigen Ableitungsbaumes darstellt, in dessen Aufbau auch das Erfordernis eines leichten Zugriffs und einer leichten Weiterverarbeitbarkeit eingeflossen ist. Bei der Betrachtung eines Knoten, der für einen Teil des Programms steht, soll man möglichst schnell die Fragen beantworten können, welche Funktionalität der Sprache dieser umsetzt, welche Bestandteile er hat und welche Funktionalität der Sprache diese Bestandteile umsetzen usw.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Im Gegensatz zum Formalen Ableitungsbaum, ergibt es beim Abstrakten Syntaxbaum keinen Sinn zusätzlich einen Formalen Abstrakten Syntaxbaum zu unterschieden, da das Konzept eines Abstrakten Syntaxbaumes ohne eine Datenstruktur zu sein für sich allein gesehen keine Anwendung hat. Wenn von Abstrakten Syntaxbäumen die Rede ist, ist immer eine Datenstruktur gemeint.

Die Abstrakte Grammatik nach der ein Abstrakter Syntaxbaum konstruiert ist wird optimalerweise immer so definiert, dass der Abstrakte Syntaxbaum in den darauffolgenden Verarbeitungsschritten<sup>17</sup> möglichst einfach weiterverarbeitet werden kann.

In Abbildung 1.6 wird das Beispiel aus Unterkapitel 1.2.1 fortgeführt, welches den Arithmetischen Ausdruck 4 \* 2 in Bezug auf die Konkrete Grammatik 1.1, welche die höhere Präzedenz der Multipikation \* berücksichtigt in einem Ableitungsbaum darstellt. In Abbildung 1.6 wird der Ableitungsbaum zu einem Abstrakten Syntaxbaum abstrahiert. Das geschieht bezogen auf das Beispiel aus Unterkapitel 1.2.1, indem jegliche Knoten wewgabstrahiert werden, die im Ableitungsbaum nur existieren, weil die Konkrete Grammatik so umgesetzt ist, dass es nur einen einzigen möglichen Ableitungsbaum geben kann.



Abbildung 1.6: Veranschaulichung des Unterschieds zwischen Ableitungsbaum und Abstraktem Syntaxbaum.

Die Baumdatenstruktur des Ableitungsbaumes und Abstrakten Syntaxbaumes ermöglicht es die Operationen, die ein Compiler bzw. Interpreter bei der Weiterverarbeitung des Programmes ausführen muss möglichst effizient auszuführen und auf unkomplizierte Weise direkt zu erkennen, welche er ausführen muss.

Um eine Gesamtübersicht über die Syntaktische Analyse zu geben, ist in Abbildung 1.7 die Syntaktische mit dem Beispiel aus Subkapitel 1.3 fortgeführt.

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup>Den verschiedenen Passes.

#### Abstrakter Syntaxbaum File Name './example1.ast', FunDef VoidType 'void', Tokenfolge Name 'main', [], [Token('FILENAME', './example1.picoc'), Token('VOID\_DT', → 'void'), Token('NAME', 'main'), Token('LPAR', '('), Ιf → Token('RPAR', ')'), Token('LBRACE', '{'), Token('IF', Num '42', $_{\hookrightarrow}$ 'if'), Token('LPAR', '('), Token('NUM', '42'), → Token('RPAR', ')'), Token('LBRACE', '{'), ] → Token('RBRACE', '}'), Token('RBRACE', '}')] ] Parser Visitors und Transformer Ableitungsbaum file ./example1.dt decls\_defs decl\_def fun\_def type\_spec prim\_dt void pntr\_deg name main fun\_params decl\_exec\_stmts exec\_part exec\_direct\_stmt if\_stmt logic\_or logic\_and eq\_exp rel\_exp arith\_or arith\_oplus arith\_and arith\_prec2 arith\_prec1 un\_exp post\_exp 42 prim\_exp exec\_part compound\_stmt

Abbildung 1.7: Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse.

Kapitel 1. Einführung 1.5. Code Generierung

#### 1.5 Code Generierung

In der Code Generierung steht man nun dem Problem gegenüber einen Abstrakten Syntaxbaum einer Sprache  $L_1$  in den Abstrakten Syntaxbaum einer Sprache  $L_2$  umformen zu müssen. Dieses Problem lässt sich vereinfachen, indem man das Problem in mehrere Schritte unterteilt, die man Passes (Definition 1.45) nennt. So wie es auch schon mit dem Ableitungsbaum in der Syntaktischen Analyse gemacht wurde, den man als Zwischenstufe zum Abstrakten Syntaxbaum kontstruiert hatte. Aus dem Ableitungsbaum konnte dann unkompliziert und einfach mit Transformern und Visitors ein Abstrakter Syntaxbaum generiert werden.

#### Anmerkung Q

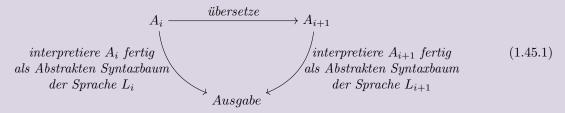
Man spricht hier von dem "Abstrakten Syntaxbaum einer Sprache  $L_1$  (bzw.  $L_2$ )" und meint hier mit der Sprache  $L_1$  (bzw.  $L_2$ ) nicht die Sprache, welche durch die Abstrakte Grammatik, nach welcher der Abstrakte Syntaxbaum abgeleitet ist beschrieben wird. Es ist damit immer die Sprache gemeint, die kompiliert werden soll und zu deren Zweck der Abstrakte Syntaxbaum überhaupt konstruiert wird. Für die tatsächliche Sprache, die durch die Abstrakte Grammatik beschrieben wird, interessiert man sich nie wirklich explizit. Diese Konvention wurde aus dem Buch G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513) übernommen.

#### Definition 1.45: Pass

**I** 

Einzelner Übersetzungsschritt in einem Kompiliervorgang von einem beliebigen Abstrakten Syntaxbaum  $A_i$  einer Sprache  $L_i$  zu einem Abstrakten Syntaxbaum  $A_{i+1}$  einer Sprache  $L_{i+1}$ , der meist eine bestimmte Teilaufgabe übernimmt, die sich mit keiner Teilaufgabe eines anderen Passes überschneidet und möglichst wenig Ähnlichkeit mit den Teilaufgaben anderer Passes haben sollte.

Für jeden Pass und für einen beliebigen Abstrakten Syntaxbaum  $A_i$  gilt ähnlich, wie bei einem vollständigen Compiler in 1.45.1, dass:



wobei man hier so tut, als gäbe es zwei Interpreter für die zwei Sprachen  $L_i$  und  $L_{i+1}$ , welche den jeweiligen Abstrakten Syntaxbaum  $A_i$  bzw.  $A_{i+1}$  fertig interpretieren.  $^{cd}$ 

Die von den Passes umgeformten Abstrakten Syntaxbäume sollten dabei mit jedem Pass der Syntax von Maschinenbefehlen immer ähnlicher werden, bis es schließlich nur noch Maschinenbefehle sind.

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Ein Pass kann mit einem Transpiler ?? (Definition ??) verglichen werden, da sich die zwei Sprachen  $L_i$  und  $L_{i+1}$  aufgrund der Kleinschrittigkeit meist auf einem ähnlichen Abstraktionslevel befinden. Der Unterschied ist allerdings, dass ein Transpiler zwei Programme, die in  $L_i$  bzw.  $L_{i+1}$  geschrieben sind kompiliert. Ein Pass ist dagegen immer kleinschrittig und operiert auschließlich auf Abstrakten Syntaxbäumen, ohne Parsing usw.

 $<sup>^</sup>b$ Der Begriff kommt aus dem Englischen von "passing over", da der gesamte Abstrakte Syntaxbaum in einem Pass durchlaufen wird.

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup>Interpretieren geht immer von einem Programm in Konkreter Syntax aus, wobei der Abstrakte Syntaxbaum ein Zwischenschritt bei der Interpretierung ist.

<sup>&</sup>lt;sup>d</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Kapitel 1. Einführung 1.5. Code Generierung

#### 1.5.1 Monadische Normalform

Hat man es mit einer Sprache zu tuen, welche Unreine Ausdrücke (Definition 1.47) besitzt, so ist es sinnvoll einen Pass einzuführen, der Reine (Definition 1.46) und Unreine Ausdrücke voneinander trennt. Das wird erreicht, indem man aus den Unreinen Ausdrücken vorangestellte Statements macht, die man vor den jeweiligen reinen Ausdruck, mit dem sie gemischt waren stellt. Der Unreine Ausdruck muss als erstes ausgeführt werden, für den Fall, dass der Effekt, denn ein Unreiner Ausdruck hatte den Reinen Ausdruck, mit dem er gemischt war in irgendeinerweise beeinflussen könnte.

#### Definition 1.46: Reiner Ausdruck (bzw. engl. pure expression)

!

Ein Reiner Ausdruck ist ein Ausdruck, der rein ist. Das bedeutet, dass dieser Ausdruck keine Nebeneffekte erzeugt. Ein Nebeneffekt ist eine Bedeutung, die ein Ausdruck hat, die sich nicht mit RETI-Code darstellen lässt. ab

 $^a\mathbf{Sondern}$ z.B. intern etwas am Kompilier<br/>prozess ändert.

<sup>b</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

#### Definition 1.47: Unreiner Ausdruck

Z

Ein Unreiner Ausdruck ist ein Ausdruck, der kein Reiner Ausdruck ist.

Auf diese Weise sind alle Statements und Ausdrücke in Monadischer Normalform (Definiton 1.48).

#### Definition 1.48: Monadische Normalform (bzw. engl. monadic normal form)

Z

Ein Statement oder Ausdruck ist in Monadischer Normalform, wenn es oder er nach einer Konkreten Grammatik in Monadischer Normalform abgeleitet wurde.

Eine Konkrete Grammatik ist in Monadischer Normalform, wenn sie reine Ausdrücke und unreine Ausdrücke nicht miteinander mischt, sondern voneinander trennt.<sup>a</sup>

Eine Abstrakte Grammatik ist in Monadischer Normalform, wenn die Konkrete Grammatik für welche sie definiert wurde in Monadischer Normalform ist.

<sup>a</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist in Abbildung 1.8 zu sehen, wo der Einfachheit halber auf die Darstellung in Abstrakter Syntax verzichtet wurde und die Codebeispiele in der entsprechenden Konkreten Syntax<sup>18</sup> aufgeschrieben wurden.

In der Abbildung 1.8 ist der Ausdruck mit dem Nebeneffekt eine Variable zu allokieren: int var, mit dem Ausdruck für eine Zuweisung exp = 5 % 4 gemischt, daher muss der Unreine Ausdruck als eigenständiges Statement vorangestellt werden.

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup>Für deren Kompilierung die Abstrakte Syntax überhaupt definiert wurde.

Kapitel 1. Einführung 1.5. Code Generierung



Abbildung 1.8: Codebeispiel für das Trennen von Ausdrücken mit und ohne Nebeneffekten.

Die Aufgabe eines solchen Passes ist es, den Abstrakten Syntaxbaum der Syntax von Maschinenbefehlen anzunähren, indem Subbäume vorangestellt werden, die keine Entsprechung in RETI-Knoten haben. Somit wird eine Seperation von Subbäumen, die keine Entsprechung in RETI-Knoten haben und denen, die eine haben bewerkstelligt wird. Ein Reiner Ausdruck ist Maschinenbefehlen ähnlicher als ein Ausdruck, indem ein Reiner und Unreiner Ausdruck gemischt sind. Somit sparrt man sich in der Implementierung Fallunterscheidungen, indem die Reinen Ausdrücke direkt in RETI-Code übersetzt werden können und nicht unterschieden werden muss, ob darin Unreine Ausdrücke vorkommen.

#### 1.5.2 A-Normalform

Im Falle dessen, dass es sich bei der Sprache  $L_1$  um eine höhere Programmiersprache und bei  $L_2$  um Maschinensprache handelt, ist es fast unerlässlich einen Pass einzuführen, der Komplexe Ausdrücke (Definition 1.51) aus Statements und Ausdrücken entfernt. Das wird erreicht, indem man aus den Komplexen Ausdrücken vorangestellte Statements macht, in denen die Komplexen Ausdrücke temporären Locations zugewiesen werden (Definiton 1.49) und dann anstelle des Komplexen Ausdrücks auf die jeweilige temporäre Location zugegriffen wird.

Sollte in dem Statemtent, indem der Komplexe Ausdruck einer temporären Location zugewiesen wird, der Komplexe Ausdruck Teilausdrücke enthalten, die komplex sind, muss die gleiche Prozedur erneut für die Teilausdrücke angewandt werden, bis Komplexe Ausdrücke nur noch in Statements zur Zuweisung an Locations auftauchen, aber die Komplexen Ausdrücke nur Atomare Ausdrücke (Definiton 1.50) enthalten.

Sollte es sich bei dem Komplexen Ausdruck um einen Unreinen Ausdruck handeln, welcher nur einen Nebeneffekt ausführt und sich nicht in RETI-Befehle übersetzt, so wird aus diesem ein vorangestelltes Statement gemacht, welches einfach nur den Nebeneffekt dieses Unreinen Ausdrucks ausführt.

# Definition 1.49: Location

Kollektiver Begriff für Variablen, Attribute bzw. Elemente von Variablen bestimmter Datentypen, Speicherbereiche auf dem Stack, die temporäre Zwischenergebnisse speichern und Register.

Im Grunde genommen alles, was mit einem Programm zu tuen hat und irgendwo gespeichert ist oder als Speicherort dient.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Auf diese Weise sind alle Statements und Ausdrücke in A-Normalform (Definition 1.52). Wenn eine Konkrete Grammatik in A-Normalform ist, ist diese auch automatisch in Monadischer Normalform (Definition 1.52), genauso, wie ein Atomarer Ausdruck auch ein Reiner Ausdruck ist (nach Definition 1.50).

Kapitel 1. Einführung 1.5. Code Generierung

#### Definition 1.50: Atomarer Ausdruck

/

Ein Atomarer Ausdruck ist ein Ausdruck, der ein Reiner Ausdruck ist und der in eine Folge von RETI-Befehlen übersetzt werden kann, die atomar ist, also nicht mehr weiter in kleinere Folgen von RETI-Befehlen zerkleinert werden kann, welche die Übersetzung eines anderen Ausdrucks sind.

Also z.B. im Fall der Sprache  $L_{PicoC}$  entweder eine Variable var, eine Zahl 12, ein ASCII-Zeichen 'c' oder ein Zugriff auf eine Location, wie z.B. stack(1).

<sup>a</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

#### Definition 1.51: Komplexer Ausdruck

Z

Ein Komplexer Ausdruck ist ein Ausdruck, der nicht atomar ist, wie z.B. 5 % 4, -1, fun(12) oder int var. ab

<sup>a</sup>int var ist eine Allokation.

<sup>b</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

#### Definition 1.52: A-Normalform (ANF)

Z

Ein Statement oder Ausdruck ist in A-Normalform, wenn es oder er nach einer Konkreten Grammatik in A-Normalform abgeleitet wurde.

Eine Konkrete Grammatik ist in A-Normalform, wenn sie in Monadischer Normalform ist und wenn alle Komplexen Ausdrücke nur Atomare Ausdrücke enthalten und einer Location zugewiesen sind.

Eine Abstrakte Grammatik ist in A-Normalform, wenn die Konkrete Grammatik für welche sie definiert wurde in A-Normalform ist. ab c

<sup>a</sup>A-Normalization: Why and How (with code).

<sup>b</sup>Bolingbroke und Peyton Jones, "Types are calling conventions".

<sup>c</sup>G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Ein Beispiel für dieses Vorgehen ist in Abbildung 1.9 zu sehen, wo der Einfachheit halber auf die Darstellung in Abstrakter Syntax verzichtet wurde und die Codebeispiele in der entsprechenden Konkreten Syntax<sup>19</sup> aufgeschrieben wurden.

Der PicoC-Compiler nutzt, anders als es geläufig ist keine Register und Graph Coloring (Definition ??) inklusive Liveness Analysis (Definition ??) usw., um Werte von Variablen, temporäre Zwischenergebnisse usw. abzuspeichern, sondern immer nur den Hauptspeicher, wobei temporäre Zwischenergebnisse auf den Stack gespeichert werden.<sup>20</sup>

Aus diesem Grund verwendet das Beispiel in Abbildung 1.9 eine andere Definition für Komplexe und Atomare Ausdrücke, da dieses Beispiel, um später keine Verwirrung zu erzeugen der Art nachempfunden ist, wie im PicoC-ANF Pass der Abstrakte Syntaxbaum umgeformt wird. Weil beim PicoC-Compiler temporäre Zwischenergebnisse auf den Stack gespeichert werden, wird nur noch ein Zugriffen auf den Stack, wie z.B. stack('1') als Atomarer Ausdrück angesehen. Dementsprechend werden Ausdrücke für Zahl 4, Variable var und ASCII-Zeichen 'c' nun ebenfalls zu den Komplexen Ausdrücken gezählt.

Im Fall, dass Register für z.B. temporäre Zwischenergebnisse genutzt werden und der Maschinen-

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup>Für deren Kompilierung die Abstrakte Syntax überhaupt definiert wurde.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup>Die in diesem Paragraph erwähnten Begriffe werden nur grob erläutert, da sie für den PicoC-Compiler keine Rolle spielen. Aber sie wurden erwähnt, damit in dieser Bachelorarbeit auch das übliche Vorgehen Erwähnung findet und vom Vorgehen beim PicoC-Compiler abgegrenzt werden kann.

Kapitel 1. Einführung 1.5. Code Generierung

befehlssatz es erlaubt zwei Register miteinander zu verechnen<sup>21</sup>, ist es möglich Ausdrücke für Zahl 4, Variable var und ASCII-Zeichen c' als atomar zu definieren, da sie mit einem Maschinenbefehl verarbeitet werden können<sup>22</sup>. Werden allerdings keine Register für Zwischenergebnisse genutzt werden, braucht man mehrere Maschinenbefehle, um die Zwischenergebnisse vom Stack zu holen, zu verrechnen und das Ergebnis wiederum auf den Stack zu speichern und das SP-Register anzupassen. Daher werden die Ausdrücke für Zahl 4, Variable var und ASCII-Zeichen c' als Komplexe Ausdrücke gewertet, da sie niemals in einem Maschinenbefehl miteinander verechnet werden können.

Die Statements 4, x, usw. für sich sind in diesem Fall Statements, bei denen ein Komplexer Ausdruck einer Location, in diesem Fall einer Speicherzelle des Stack zugewiesen wird, da 4, x usw. in diesem Fall auch als Komplexe Ausdrücke zählen. Auf das Ergebnis dieser Komplexen Ausdrücke wird mittels stack(2) und stack(1) zugegriffen, um diese im Komplexen Ausdruck stack(2) % stack(1) miteinander zu verrechnen und wiederum einer Speicherzelle des Stack zuzuweisen.

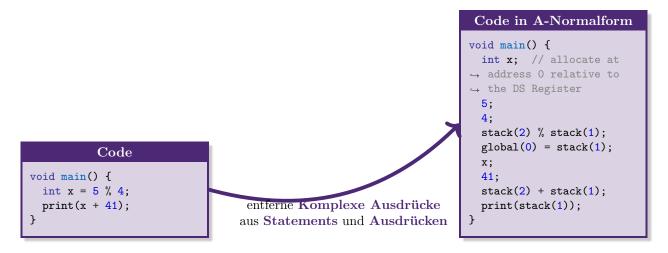


Abbildung 1.9: Codebeispiel für das Entfernen Komplexer Ausdrücke aus Operationen.

Ein solcher Pass hat vor allem in erster Linie die Aufgabe den Abstrakten Syntaxbaum der Syntax von Maschinenbefehlen besonders dadurch anzunähren, dass er die Statements weniger komplex macht und diese dadurch den ziemlich simplen Maschinenbefehlen syntaktisch ähnlicher sind. Des Weiteren vereinfacht dieser Pass die Implementierung der nachfolgenden Passes enorm, da Statements z.B. nur noch die Form global(rel\_addr) = stack(1) haben, die viel einfacher verarbeitet werden kann.

Alle weiteren denkbaren Passes sind zu spezifisch auf bestimmte Statements und Ausdrücke ausgelegt, als das sich zu diesen allgemein etwas mit einer Theorie dahinter sagen lässt. Alle Passes, die zur Implementierung des PicoC-Compilers geplant und ausgedacht wurden sind im Unterkapitel 2.3.1 definiert.

#### 1.5.3 Ausgabe des Maschinencodes

Nachdem alle Passes durchgearbeitet wurden ist es notwendig aus dem finalen Abstrakten Syntaxbaum den eigentlichen Maschinencode in Konkreter Syntax zu generieren. In üblichen Compilern wird hier für den Maschinencode eine binäre Repräsentation gewählt. Da der PicoC-Compiler vor allem zu Lernzwecken konzipiert ist, wird bei diesem der Maschinencode allerdings in einer menschenlesbaren Repräsentation ausgegeben. Der Weg von der Abstrakten Syntax zur Konkreten Syntax ist allerdings wesentlich einfacher, als der Weg von der Konkreten Syntax zur Abstrakten Syntax, für die eine gesamte Syntaktische Analyse, die eine Lexikalische Analyse beinhaltet durchlaufen werden musste.

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup>Z.B. Addieren oder Subtraktion von zwei Registerinhalten.

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup>Mit dem RETI-Befehlssatz wäre das durchaus möglich, durch z.B. MULT ACC IN2.

Kapitel 1. Einführung 1.6. Fehlermeldungen

Jeder Knoten des Abstrakten Syntaxbaumes erhält dazu eine Methode, welche hier to\_string genannt wird, die eine Textrepräsentation seiner selbst und all seiner Knoten mit an den richtigen Stellen passend gesetzten Semikolons; usw. ausgibt. Dabei wird nach dem Prinzip der Tiefensuche der gesamte Abstrakte Syntaxbaum durchlaufen und die Methode to\_string zur Ausgabe der Textrepräsentation der verschiedenen Knoten aufgerufen, die immer wiederum die Methode to\_string ihrer Kinder aufrufen und die zurückgegebene Textrepräsentation passend zusammenfügen und selbst zurückgebeben.

# 1.6 Fehlermeldungen

Wenn bei einem Compiler ein unerwünschtes Verhalten der folgenden Kategorien<sup>23</sup> eintritt:

- 1. der Parser<sup>24</sup> entscheidet das Wortproblem für ein Eingabeprogramm<sup>25</sup> mit 0, also das Eingabeprogramm befolgt nicht die Syntax der Sprache des Compilers<sup>26</sup>.
- 2. in den Passes tritt eine Fall ein, der nicht in der Semantik der Sprache des Compilers abgedeckt ist, z.B.:
  - eine Variable wird verwendet, obwohl sie noch nicht deklariert ist.
  - bei einem Funktionsaufruf werden mehr Argumente oder Argumente des falschen Datentyps übergeben, als in der Funktionsdeklaration oder Funktionsdefinition angegeben ist.
- 3. Während der Laufzeit des Compilers tritt ein Ereignis ein, das nicht durch die Semantik der Sprache des Compilers abgedeckt ist oder das Betriebssystem nicht erlaubt, z.B.:
  - eine nicht erlaubte Operation, wie Division durch 0 (z.B. 42 / 0) soll ausgeführt werden.
  - Segmentation Fault: Wenn auf Speicher zugegriffen wird, der vom Betriebssystem geschützt ist.

oder während des des Linkens (Definition ??) etwas nicht zusammenpasst, wie z.B.:

- es gibt keine oder mehr als eine main-Funktion.
- eine Funktion, die in einer Objektdatei (Definition ??) benötigt wird, wird von keiner anderen oder mehr als einer Objektdatei bereitsgestellt.

wird eine Fehlermeldung (Definition 1.53) ausgegeben.

#### Definition 1.53: Fehlermeldung



Benachrichtigung beliebiger Form, die einen Grund angibt weshalb ein Programm nicht weiter ausgeführt werden kann<sup>a</sup>. Das Ausgeben einer Fehlermeldung kann dabei auf verschiedene Weisen erfolgen, wie z.B.

- über stdout oder stderr im einem Terminal Emulator oder richtigen Terminal<sup>b</sup>.
- ullet über eine Dialogbox in einer Graphischen Benutzerfläche^c oder Zeichenorientierten Benutzerschnittstelle^d.

 $<sup>^{23}</sup>Errors\ in\ C/C++$  - Geeks for Geeks.

 $<sup>^{24}</sup>$ Bzw. der Recognizer im Parser.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup>Bzw. Wort.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup>Bzw. das Eingabeprogramm lässt sich nicht mit der Konkreten Grammatik des Compilers ableiten.

Kapitel 1. Einführung 1.6. Fehlermeldungen

- in ein Register oder an eine spezielle Adresse des Hauptspeichers wird ein Wert geschrie-
- Logdatei<sup>e</sup> auf einem Speichermedium.

 $<sup>^</sup>a$ Dieses Programm kann z.B. ein Compiler sein oder ein Programm, dass dieser Compiler selbst kompiliert hat.

 $<sup>{}^</sup>b$ Nur unter Linux, Windows hat sowas nicht.

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup>In engl. Graphical User Interface, kurz GUI.

 $<sup>^</sup>d\mathrm{In}$ engl. Text-based User Interface, kurz TUI.  $^e\mathrm{In}$ engl. log file.

# 2 Implementierung

In diesem Kapitel wird, nachdem im Kapitel 1 die nötigen theoretischen Grundlagen des Compilerbau vermittelt wurden, nun auf die Implementierung des PicoC-Compilers eingegangen. Aufgeteilt in die selben Kategorien Lexikalische Analyse 2.1, Syntaktische Analyse 2.2 und Code Generierung 2.3, wie in Kapitel 1, werden in den folgenden Unterkapiteln die einzelnen Zwischenschritte vom einem Programm in der Konkreten Syntax der Sprache  $L_{PicoC}$  hin zum einem Programm mit derselben Semantik in der Konkreten Syntax der Sprache  $L_{RETI}$  erklärt.

Für das Parsen<sup>1</sup> des Programmes in der Konkreten Syntax der Sprache  $L_{PicoC}$  wird das Lark Parsing Toolkit<sup>2 3</sup> verwendet. Das Lark Parsing Toolkit ist eine Bibliothek, die es ermöglicht mittels einer in einem eigenen Dialekt der Erweiterten Back-Naur-Form (Definition 2.3 bzw. für den Dialekt von Lark Definition 2.4) spezifizierten Konkreten Grammatik ein Programm in Konkreter Syntax zu parsen und daraus einen Ableitungsbaum für die kompilerintere Weiterverarbeitung zu generieren.

## Definition 2.1: Metasyntax

Z

Steht für den Aufbau einer Metasprache (Definition 2.2), der durch eine Grammatik oder Natürliche Sprache beschrieben werden kann.

#### Definition 2.2: Metasprache

1

 ${\it Eine \ Sprache, \ die \ dazu \ genutzt \ wird \ andere \ Sprachen \ zu \ beschreiben^a.}$ 

<sup>a</sup>Das "Meta" drückt allgemein aus, dass sich etwas auf einer höheren Ebene befindet. Um über die Ebene sprechen zu können, in der man sich selbst befindet, muss man von einer höheren, außenstehenden Ebene darüber reden.

#### Definition 2.3: Erweiterte Backus-Naur-Form (EBNF)



Die Erweiterte Backus-Naur-Form<sup>a</sup> ist eine Metasyntax (Definition 2.1), die dazu verwendet wird Kontextfreie Grammatiken darzustellen.<sup>bc</sup>

Die Erweiterte Backus-Naur-Form ist zwar standartisiert und die Spezifikation des Standards kann unter  $Link^d$  aufgefunden werden, allerdings werden in der Praxis, wie z.B. in Lark oft eigene Notationen verwendet.

 $<sup>^</sup>a$ Der Name kommt daher, dass es eine Erweiterung der Backus-Naur-Form ist, die hier allerdings nicht weiter erläutert wird.

 $<sup>{}^</sup>b {
m Nebel},$  "Theoretische Informatik".

<sup>&</sup>lt;sup>c</sup> Grammar Reference — Lark documentation.

dhttps://standards.iso.org/ittf/PubliclyAvailableStandards/.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Wobei beim **Parsen** auch das **Lexen** inbegriffen ist.

 $<sup>^2\</sup>mathit{Lark}$  - a parsing toolkit for Python.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Shinan, lark.

## Definition 2.4: Dialekt der EBNF aus Lark

/

Das Lark Parsing Toolkit verwendet eine eigene Notation für die Erweiterte Backus-Naur-Form, die sich teilweise in einzelnen Aspekten von der Syntax aus dem Standard unterscheidet und unter Link<sup>a</sup> dokumentiert ist.

Ein wichtiger Unterschied ist z.B., dass dieser Dialekt anstelle von geschweiften Klammern {} für die Darstellung von Wiederholung, den aus regulären Ausdrücken bekannten \*-Quantor optional zusammen mit runden Klammern () verwendet: ()\*.

Um bei einer Produktion auszudrücken, wozu die linke Seite abgeleitet werden kann, also "kann abgeleitet werden zu", wird das ::=-Symbol verwendet.

Das Lark Parsing Toolkit wurde vor allem deswegen gewählt, weil es sehr einfach in der Verwendung ist. Andere derartige Tools, wie z.B. ANTLR<sup>4</sup> sind Parser Generatoren, die zur Konkreten Grammatik einer Sprache einen Parser in einer vorher bestimmten Programmiersprache generieren, anstatt wie das Lark Parsing Toolkit bei Angabe einer Konkreten Grammatik direkt ein Programm in dieser Konkreten Grammatik parsen und einen Ableitungsbaum dafür generieren zu können.

Eine möglichst geringe Laufzeit durch Verwenden der effizientesten Algorithmen zu erreichen war keine der Hauptzielsetzungen für den PicoC-Compiler, da der PicoC-Compiler vor allem als Lerntool konzipiert ist, mit dem Studenten lernen können, wie der Kompiliervorgang von der Programmiersprache  $L_{PicoC}$  zur Maschinensprache  $L_{RETI}$  funktioniert. Eine ausführliche Diskussion zur Priorisierung Laufziet wurde in Unterkapitel ?? geführt. Lark besitzt des Weiteren eine sehr gute Dokumentation Welcome to Lark's documentation! — Lark documentation, sodass anderen Studenten, die den PicoC-Compiler vielleicht in ihr Projekt einbinden wollen, unkompliziert Erweiterungen für den PicoC-Compiler schreiben können.

Neben den Konkreten Grammatiken, die aufgrund der Verwendung des Lark Parsing Toolkit in einem eigenen Dialekt der Erweiterten Back-Naur-Form spezifiziert sind, werden in den folgenden Unterkapiteln die Abstrakten Grammatiken, welche spezifizieren, welche Kompositionen für die Abstrakten Syntaxbäume der verschiedenden Passes erlaubt sind in einer bewusst anderen Notation aufgeschrieben, die allerdings Ähnlichkeit mit dem Dialekt der Erweiterten Backus-Naur-Form aus dem Lark Parsing Toolkit hat.

Die Notation für die Abstrakte Syntax unterscheidet sich bewusst von der Erweiterten Backus-Naur-Form, da in der Abstrakten Syntax Kompositionen von Knoten beschrieben werden, die klar auszumachen sind, wodurch es die Abstrakten Grammatiken nur unnötig verkomplizieren würde, wenn man die Erweiterte Backus-Naur-Form verwenden würde. Es gibt leider keine Standardnotation für Abstrakte Grammatiken, die sich deutlich durchgesetzt hat, daher wird für Abstrakte Grammatiken eine eigene Abstrakte Syntax Form Notation (Definition 2.5) verwendet. Des Weiteren trägt das Verwenden einer unterschiedlichen Notation für Konkrete und Abstrakte Syntax auch dazu bei, dass man beide direkter voneinander unterscheiden kann.

## Definition 2.5: Abstrakte Syntax Form (ASF)

Die Abstrakte Syntax Form ist eine eigene Metasyntax für Abstrakte Grammatiken, die für diese Bachelorarbeit definiert wurde und sich von dem Dialekt der Backus-Naur-Form des Lark Parsing Toolkit nur dadurch unterschiedet, dass Terminalsymbole nicht von "" engeschlossen sein müssen, da die Knoten in der Abstrakten Syntax, sowieso schon klar auszumachen sind und von anderen Symbolen der Metasprache leicht zu unterschiden sind.

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>https://lark-parser.readthedocs.io/en/latest/grammar.html.

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Bzw. kann der \*-Quantor auch keinmal wiederholen bedeuteten.

 $<sup>^4</sup>ANTLR.$ 

Letztendlich geht es allerdings nur darum, dass aufgrund der Verwendung des Lark Parsing Toolkit die Konkrete Grammatik in einem eigenen Dialekt der Erweiterter Backus-Naur-Form angegeben sein muss und für das Implementieren der Passes die Abstrakte Grammatik für den Programmierer möglichst einfach verständlich sein sollte, weshalb sich die Abstrake Syntax Form gut dafür eignet.

# 2.1 Lexikalische Analyse

Für die Lexikalische Analyse ist es nur notwendig eine Konkrete Grammatik zu definieren, die den Teil der Konkreten Syntax beschreibt, der die verschiedenen Pattern für die verschiedenen Token der Sprache  $L_{PicoC}$  beschreibt, also den Teil der für die Lexikalische Analyse wichtig ist. Diese Konkrete Grammatik wird dann vom Lark Parsing Toolkit dazu verwendet ein Programm in Konkreter Syntax zu lexen und daraus Tokens für die Syntaktische Analyse zu erstellen, wie es im Unterkapitel 1.3 erläutert ist.

## 2.1.1 Konkrete Grammatik für die Lexikalische Analyse

In der Konkreten Grammatik 2.1.1 für die Lexikalische Analyse stehen großgeschriebene Nicht-Terminalsymbole entweder für einen Tokennamen oder einen Teil der Beschreibung eines Tokennamen. Zum Beispiel handelt es sich bei dem großgeschriebenen Nicht-Terminalsymbol NUM um einen Tokennamen, der durch die Produktion NUM ::= "0" | DIG\_NO\_0 DIG\_WITH\_0\* beschrieben wird und beschreibt, wie ein möglicher Tokenwert, in diesem Fall eine Zahl aufgebaut sein kann. Das ist daran festzumachen, dass das Nicht-Terminalsymbol NUM in keiner anderen Produktion vorkommt, die auf der linken Seite des ::=-Symbols ebenfalls ein großgeschriebenen Nicht-Terminalsymbol hat. Dagegen dient das großgeschriebene Nicht-Terminalsymbol DIG\_NO\_0 aus der Produktion NUM ::= "0" | DIG\_NO\_0 DIG\_WITH\_0\* nur zu Beschreibung von NUM.

Die in der Konkreten Grammatik 2.1.1 für die Lexikalische Analyse definierten Nicht-Terminalsymbole können in der Konkreten Grammatik 2.2.8 für die Syntaktischen Analayse verwendet werden, um z.B. zu beschreiben, in welchem Kontext z.B. eine Zahl NUM stehen darf.

Die in der Konkrete Grammatik vereinzelt kleingeschriebenen Nicht-Terminalsymbole, wie name haben nur den Zweck mehrere Tokennamen, wie NAME | INT\_NAME | CHAR\_NAME unter einem Überbegriff zu sammeln.

In Lark steht eine Zahl .Zahl, die an ein Nicht-Terminalsymbol angehängt ist, dass auf der linken Seite des ::=-Symbols einer Produktion steht für die Priorität der Produktion dieses Nicht-Terminalsymbols. Es gibt den Fall, dass ein Wort von mehreren Produktionen erkannt wird, z.B. wird das Wort int sowohl von der Produktion NAME, als auch von der Produktion INT\_DT erkannt. Daher ist es notwendig für INT\_DT eine Priorität INT\_DT.2 zu setzen<sup>5</sup>, damit das Wort int den Tokennamen INT\_DT zugewiesen bekommt und nicht NAME.

Allerdings muss für den Fall, dass int der Präfix eines Wortes ist, z.B. int\_var noch die Produktion INT\_NAME.3 definiert werden, da der im Lark Parsing Toolkit verwendete Basic Lexer sobald ein Wort von einer Produktion erkannt wird, diesem direkt einen Tokennamen zuordnet, auch wenn das Wort eigentlich von einer anderen Produktion erkannt werden sollte. In diesem Fall würden aus int\_var die Token Token('INT\_DT', 'int'), Token('NAME', '\_var') generiert, anstatt Token(NAME, 'int\_var'). Daher muss die Produktion INT\_NAME.3 eingeführt werden, die immer zuerst geprüft wird. Wenn es sich nur um das Wort int handelt, wird zuerst die Produktion INT\_NAME.3 geprüft, es stellt sich heraus, dass int von der Produktion INT\_NAME.3 nicht erkannt wird, daher wird als nächstes INT\_DT.2 geprüft, welches int erkennt.

Die Implementierung des Basic Lexer aus dem Lark Parsing Toolkit ist unter Link<sup>6</sup> zu finden ist. Diese

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Es wird immer die höchste Priorität zuerst genommen.

<sup>6</sup>https://github.com/lark-parser/lark/blob/d03f32be7f418dc21cfa45acc458e67fe0580f60/lark/lexer.py

Implementierung ist allerdings zu spezifisch auf Lark zugeschnitten und ist aufgrund dessen, dass sie in der Lage ist nach einer spezifizierten Konkreten Grammatik zu lexen, zu komplex, um sie an dieser Stelle allgemein erklären zu können.

Der Basic Lexer verhält sich allerdings grundlegend so, wie es im Unterkapitel 1.3 erklärt wurde, allerdinds berücksichtigt der Basic Lexer ebenfalls Priortiäten, sodass für den aktuellen Index im Eingabeprogramm zuerst alle Produktionen der höchsten Priorität geprüft werden. Sobald eine dieser Produktionen ein Wort an dem aktuellen Index im Eingabeprogramm erkennt, bekommt es direkt den Tokenwert dieser Produktion zugewiesen. Weitere Produktionen werden nicht mehr geprüft. Ansonsten werden alle Produktionen der nächstniedrigeren Priorität geprüft usw.

| COMMENT<br>RETI_COMMENT.2 | ::= | "//" /[ $\land \ n$ ]*/   "/*" /(.   $\ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ $ "/""""""#"/[ $\land \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \$ | $L_{-}Comment$     |
|---------------------------|-----|--|--------------------|
| DIG_NO_0                  | ::= | "1"   "2"   "3"   "4"   "5"   "6"   "7"   "8"   "9"  | $L\_Arith$         |
| $DIG\_WITH\_0$            | ::= | "0"   DIG_NO_0   |                    |
| NUM                       | ::= | "0"   DIG_NO_0 DIG_WITH_0*   |                    |
| CHAR                      | ::= | " _"" <del>~</del> "   |                    |
| FILENAME                  | ::= | CHAR + ".picoc"  |                    |
| LETTER                    | ::= | " $a$ "" $z$ "   " $A$ "" $Z$ "  |                    |
| NAME                      | ::= | $(LETTER \mid "\_")$   |                    |
|                           |     | (LETTER   DIG_WITH_0   "_")*   |                    |
| name                      | ::= | $NAME \mid INT\_NAME \mid CHAR\_NAME$  |                    |
|                           |     | $VOID\_NAME$   |                    |
| $LOGIC\_NOT$              | ::= | "!"  |                    |
| NOT                       | ::= | " ~ "  |                    |
| $REF\_AND$                | ::= | " &"   |                    |
| $un\_op$                  | ::= | $SUB\_MINUS \mid LOGIC\_NOT \mid NOT$  |                    |
|                           |     | $MUL\_DEREF\_PNTR \mid REF\_AND$   |                    |
| $MUL\_DEREF\_PNTR$        | ::= | "*"  |                    |
| DIV                       | ::= | " /"   |                    |
| MOD                       | ::= | "%"  |                    |
| $prec1\_op$               | ::= | $MUL\_DEREF\_PNTR \mid DIV \mid MOD$   |                    |
| ADD                       | ::= | "+"  |                    |
| $SUB\_MINUS$              | ::= | "_"  |                    |
| prec2_op                  | ::= | ADD   SUB_MINUS  |                    |
| LT                        | ::= | "<"  | $L_{-}Logic$       |
| LTE                       | ::= | "<="   |                    |
| GT                        | ::= | ">"  |                    |
| GTE                       | ::= | ">="   |                    |
| $rel\_op$                 | ::= | $LT \mid LTE \mid GT \mid GTE$   |                    |
| EQ                        | ::= | "=="   |                    |
| NEQ                       | ::= | "!="   |                    |
| $eq\_op$                  | ::= | $EQ \mid NEQ$  |                    |
| $\overline{INT\_DT.2}$    | ::= | "int"  | $L\_Assign\_Alloc$ |
| $INT\_NAME.3$             | ::= | " $int$ " ( $LETTER \mid DIG\_WITH\_0 \mid$ "_")+  | 3                  |
| $CHAR\_DT.2$              | ::= | "char"   |                    |
| $CHAR\_NAME.3$            | ::= | "char" (LETTER   DIG_WITH_0   "_")+  |                    |
| $VOID\_DT.2$              | ::= | "void"   |                    |
| $VOID\_NAME.3$            | ::= | " $void$ " ( $LETTER \mid DIG\_WITH\_0 \mid$ "_")+   |                    |
|                           |     | $INT\_DT \mid CHAR\_DT \mid VOID\_DT$  |                    |

Grammatik 2.1.1: Konkrete Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  für die Lexikalische Analyse in EBNF

# 2.1.2 Codebeispiel

In den folgenden Unterkapiteln wird das Beispiel in Code 2.1 dazu verwendet die Konstruktion eines Abstrakten Syntaxbaumes in seinen einzelnen Zwischenschritten zu erläutern.

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

Code 2.1: PicoC-Code des Codebeispiels.

Die vom Basic Lexer des Lark Parsing Toolkit erkannten Token sind Code 2.2 zu sehen.

Code 2.2: Tokens für das Codebeispiel.

# 2.2 Syntaktische Analyse

In der Syntaktischen Analyse ist es die Aufgabe des Parsers aus einem Programm in Konkreter Syntax unter Verwendung der Tokens aus der Lexikalischen Analyse einen Ableitungsbaum zu generieren. Es ist danach die Aufgabe möglicher Visitors und die Aufgabe des Transformers aus diesem Ableitungsbaum einen Abstrakten Syntaxbaum in Abstrakter Syntax zu generieren.

#### 2.2.1 Umsetzung von Präzedenz und Assoziativität

In diesem Unterkapitel wird eine ähnliche Erklärweise, wie in Quelle Parsing Expressions · Crafting Interpreters verwendet. Die Programmiersprache  $L_{PicoC}$  hat dieselben Präzedenzregeln implementiert, wie die Programmiersprache  $L_{C}$ . Die Präzedenzregeln der verschiedenen Operatoren der Programmiersprache  $L_{PicoC}$  sind in Tabelle 2.1 aufgelistet.

 $<sup>^7</sup>C$  Operator Precedence - cppreference.com.

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

Tabelle 2.1: Präzedenzregeln von PicoC.

Würde man diese Operatoren ohne Beachtung von Präzedenzreglen (Definition 1.28) und Assoziativität (Definition 1.27) in eine Konkrete Grammatik verarbeiten wollen, so könnte eine Konkrete Grammatik  $G = \langle N, \Sigma, P, exp \rangle$  mit Produktionen P 2.2.1 dabei rauskommen.

```
"'"CHAR"'" |
                            NUM
                                                                                              L_Arith
prim_{-}exp
                  exp"["exp"]" \mid exp"."name \mid name"("fun\_args")"
                                                                                               +L_{-}Logic
                  [exp(","exp)*]
"-" | " ~ "
fun\_args
            ::=
                                                                                               + L_-Pntr
                                    | "!" | "*" | "&:"
                                                                                               + L_Array
un\_op
un_{-}exp
                  un\_op \ exp
                                                                                               + L_Struct
                  "*" | "/" | "%" | "+" | "-" | "&" |
"<" | "<=" | ">" | ">=" | "!=" | "=="
                                                                                               + L_{-}Fun
bin\_op
                  "&&" | "||" | " = "
bin_exp
                  exp\ bin\_op\ exp
                  prim_{exp} \mid un_{exp} \mid bin_{exp}
exp
```

Grammatik 2.2.1: Undurchdachte Konkrete Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  für die Syntaktische Analyse in EBNF, die Operatorpräzidenz nicht beachtet

Die Konkrete Grammatik 2.2.1 ist allerdings mehrdeutig, d.h. verschiedene Linksableitungen in der Konkreten Grammatik können zum selben Wort abgeleitet werden. Z.B. kann das Wort 3 \* 1 && 4 sowohl über die Linksableitung 2.5.1 als auch über die Linksableitung 2.5.2 abgeleitet werden.

exp 
$$\Rightarrow$$
 bin\_exp  $\Rightarrow$  exp bin\_op exp  $\Rightarrow$  bin\_exp bin\_op exp  $\Rightarrow$  exp bin\_op exp bin\_op exp  $\Rightarrow$  3 \* 1 && 4

```
\exp \Rightarrow \text{bin\_exp} \Rightarrow \exp \text{bin\_op exp} \Rightarrow \text{prim\_exp bin\_op exp} \Rightarrow \text{NUM bin\_op exp}
\Rightarrow 3 \text{ bin\_op exp} \Rightarrow 3 * \exp \Rightarrow 3 * \text{bin\_exp} \Rightarrow 3 * \exp \Rightarrow 3 * 1 && 4
```

Beide Wörter sind gleich, allerdings sind die Ableitungsbäume unterschiedlich, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist.



Abbildung 2.1: Ableitungsbäume zu den beiden Ableitungen.

Der linke Baum entspricht Ableitung 2.5.1 und der rechte Baum entspricht Ableitung 2.5.2. Würde man in den Ausdrücken, die von diesen Bäumen darsgestellt sind in Klammern setzen, um die Präzedenz sichtbar zu machen, so würde Ableitung 2.5.1 die Klammerung (3 \* 1) & 4 haben und die Ableitung 2.5.2 die Klammerung 3 \* (1 & 4) haben.

Aus diesem Grund ist es wichtig die Präzedenzregeln und die Assoziativität der Operatoren beim Erstellen der Konkreten Grammatik miteinzubeziehen. Hierzu wird nun Tabelle 2.1 betrachtet. Für jede Präzedenzstufe in der Tabelle 2.1 wird eine eigene Regel erstellt werden, wie es in Grammatik 2.2.2 dargestellt ist. Zudem braucht es eine Produktion prim\_exp für die höchste Präzedenzstufe, welche Literale, wie 'c', 5 oder var und geklammerte Ausdrücke wie (3 & 14) abdeckt.

| $prim\_exp$    | ::= | <br>$L\_Arith + L\_Array$ |
|----------------|-----|---------------------------|
| $post\_exp$    | ::= | <br>+ $LPntr + LStruct$   |
| $un\_exp$      | ::= | <br>$+ L_{-}Fun$          |
| $arith\_prec1$ | ::= |                           |
| $arith\_prec2$ | ::= |                           |
| $arith\_and$   | ::= |                           |
| $arith\_oplus$ | ::= |                           |
| $arith\_or$    | ::= |                           |
| $rel\_exp$     | ::= | <br>L_Logic               |
| $eq\_exp$      | ::= |                           |
| $logic\_and$   | ::= |                           |
| $logic\_or$    | ::= |                           |
| $assign\_stmt$ | ::= | <br>$L\_Assign$           |

Grammatik 2.2.2: Erster Schritt zu einer durchdachten Konkreten Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  für die Syntaktische Analyse in EBNF, die Operatorpräzidenz beachtet

Einige Bezeichnungen von Nicht-Terminalsymbolen auf der linken Seite des ::=-Operators der Produktionen sind in Tabelle 2.2 ihren jeweiligen Operatoren zugeordnet, für welche sie zuständig sind.

| Bezeichnung der<br>Produktionsregel | Operatoren                     |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| post_exp                            | a() a[] a.b                    |
| un_exp                              | -a !a ∼a *a &a                 |
| arith_prec1                         | a*b a/b a%b                    |
| arith_prec2                         | a+b a-b                        |
| $\mathtt{arith\_and}$               | a <b a="" a<="b">b a&gt;=b</b> |
| arith_oplus                         | a==b a!=b                      |
| arith_or                            | a&b                            |
| rel_exp                             | a^b                            |
| eq_exp                              | a b                            |
| logic_and                           | a&&b                           |
| logic_or                            | a  b                           |
| assign                              | a=b                            |

Tabelle 2.2: Zuordnung der Bezeichnungen von Produktionsregeln zu Operatoren.

Als nächstes müssen die einzelnen **Produktionen** entsprechend der **Ausdrücke** für die sie zuständig sind definiert werden. Jede der **Produktionen** soll nur Ausdrücke **erkennen** können, deren **Präzedenzstufe** die ist, für welche die jeweilige Produktion verantwortlich ist oder deren Präzedenzstufe **höher** ist. Z.B. soll un\_op sowohl den Ausdruck -(3 \* 14) als auch einfach nur (3 \* 14)<sup>8</sup> erkennen können, aber nicht 3 \* 14 ohne Klammern, da dieser Ausdruck eine **geringe Präzedenz** hat. Des Weiteren muss bei Produktionen für Ausdrücke mit **Operatoren** unterschieden werden, ob die Operatoren linksassoziativ oder **rechtsassoziativ**, unär, binär usw. sind.

Bei z.B. der Produktion um\_exp in 2.2.3 für die rechtsassoziativen unären Operatoren -a, !a ~a, \*a und &a ist die Alternative um\_op um\_exp dafür zuständig, dass diese unären Operatoren rechtsassoziativ geschachtelt werden können (z.B. !-~42). Die Alternative post\_exp ist dafür zuständig, dass die Produktion auch terminieren kann und es auch möglich ist auschließlich einen Ausdruck höherer Präzedenz (z.B. 42) zu haben.

$$un\_exp ::= un\_op un\_exp \mid post\_exp$$

Grammatik 2.2.3: Beispiel für eine unäre rechtsassoziative Produktion

Bei z.B. der Produktion post\_exp in 2.2.4 für die linksassoziativen unären Operatoren a(), a[] und a.b sind die Alternativen post\_exp"["logic\_or"]" und post\_exp"."name dafür zuständig, dass diese unären Operatoren linksassoziativ geschachtelt werden können (z.B. ar[3][1].car[4]). Die Alternative name"("fun\_args")" ist für einen einzelnen Funktionsaufruf zuständig. Die Alternative prim\_exp ist dafür zuständig, dass die Produktion nicht nur bei name"("fun\_args")" terminieren kann und es auch möglich ist auschließlich einen Ausdruck der höchsten Präzedenz (z.B. 42) zu haben.

Bei z.B. der Produktion prec2\_exp in 2.2.5 für die binären linksassoziativen Operatoren a+b und a-b ist die Alternative arith\_prec2 prec2\_op arith\_prec1 dafür zuständig, dass mehrere Operationen der Präzedenzstufe 4 in Folge erkannt werden können<sup>9</sup> (z.B. 3 + 1 - 4, wobei - und + beide Präzedenzstufe 4

 $<sup>^8</sup>$ Geklammerte Ausdrücke werden nämlich von prim\_exp erkannt, welches eine höhere Präzedenzstufe hat.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Bezogen auf Tabelle 2.1.

haben). Das Nicht-Terminalsymbol arith\_prec1 auf der rechten Seite ermöglicht es, dass zwischen den Operationen der Präzedenzstufe 4 auch Operationen der Präzedenzstufe 3 auftauchen können (z.B. 3 + 1 / 4 - 1, wobei - und + beide Präzedenzstufe 4 haben und / Präzedenzstufe 3). Mit der Alternative arith\_prec1 ist es möglich, dass auschließlich ein Ausdruck höherer Präzedenz erkannt wird (z.B. 1 / 4).

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

Grammatik 2.2.5: Beispiel für eine binäre linksassoziative Produktion

## Anmerkung Q

Manche Parser<sup>a</sup> haben allerdings ein Problem mit Linksrekursion (Definition 1.24), wie sie z.B. in der Produktion 2.2.5 vorliegt. Dieses Problem lässt sich allerdings einfach lösen, indem man die Produktion 2.2.5 zur Produktion 2.2.6 umschreibt.

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

Grammatik 2.2.6: Beispiel für eine binäre linksassoziative Produktion ohne Linksrekursion

Die von der Grammatik 2.2.6 erkannten Ausdrücke sind dieselben, wie für die Grammatik 2.2.5, allerdings ist die Grammatik 2.2.6 flach gehalten und ruft sich nicht selber auf, sondern nutzt den in der EBNF (Definition 2.3) definierten \*-Operator, um mehrere Operationen der Präzedenzstufe 4 in Folge erkennen zu können (z.B. 3 + 1 - 4, wobei - und + beide Präzedenzstufe 4 haben).

Das Nicht-Terminalsymbol arith\_prec1 erlaubt es, dass zwischen der Folge von Operationen der Präzedenzstufe 4 auch Operationen der Präzedenzstufe 3 auftauchen können (z.B. 3 + 1 / 4 - 1, wobei - und + beide Präzedenzstufe 4 haben und / Präzedenzstufe 3). Da der in der EBNF definierte \*-Operator auch bedeutet, dass das Teilpattern auf das er sich bezieht kein einziges mal vorkommen kann, ist es mit dem linken Nicht-Terminalsymbol arith\_prec1 möglich, dass auschließlich ein Ausdruck höherer Präzedenz erkannt wird (z.B. 1 / 4).

<sup>a</sup>Darunter zählt der Earley Parser, der im PicoC-Compiler verwendet wird nicht.

Alle Operatoren der Sprache  $L_{PicoC}$  sind also entweder binär und linksassoziativ (z.B. a\*b, a-b, a>=b oder a&&b), unär und rechtsassoziativ (z.B. &a oder !a) oder unär und linksassoziativ (z.B. a[] oder a()). Somit ergibt sich die Konkrete Grammatik 2.2.7.

| prec1_op<br>prec2_op<br>rel_op<br>eq_op<br>fun_args                          | ::=               | " * "   "/"   "%" " + "   " - " " < "   " <= "   " > "   " >= " " == "   "! = " [logic_or("," logic_or)*]  | $L\_Misc$                              |
|--|-------------------|--|--|
| $\begin{array}{c} prim\_exp \\ post\_exp \end{array}$                        | ::=               | $name \mid NUM \mid CHAR \mid$ "("logic_or")"<br>$post\_exp$ "["logic_or"]" $\mid post\_exp$ "." $name \mid name$ "("fun_args")"<br>$prim\_exp$  | $L_Arith$<br>+ $L_Array$<br>+ $L_Pntr$ |
| un_exp<br>arith_prec1<br>arith_prec2<br>arith_and<br>arith_oplus<br>arith_or | ::= ::= ::= ::=   | un_op_un_exp   post_exp<br>arith_prec1 prec1_op_un_exp   un_exp<br>arith_prec2 prec2_op_arith_prec1   arith_prec1<br>arith_and "&" arith_prec2   arith_prec2<br>arith_oplus "\\" arith_and   arith_and<br>arith_or " " arith_oplus   arith_oplus | + L_Struct<br>+ L_Fun                  |
| rel_exp<br>eq_exp<br>logic_and<br>logic_or                                   | ::=<br>::=<br>::= | rel_exp rel_op arith_or   arith_or<br>eq_exp eq_op rel_exp   rel_exp<br>logic_and "&&" eq_exp   eq_exp<br>logic_or "  " logic_and   logic_and  | $L\_Logic$                             |
| $assign\_stmt$   | ::=               | un_exp "=" logic_or";"   | $L_{-}Assign$                          |

Grammatik 2.2.7: Durchdachte Konkrete Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  in EBNF, die Operatorpräzidenz beachtet

## 2.2.2 Konkrete Grammatik für die Syntaktische Analyse

Die gesamte Konkrete Grammatik 2.2.8 ergibt sich wenn man die Konkrete Grammatik 2.2.7 um die restliche Syntax der Sprache  $L_{PicoC}$  erweitert, die sich nach einem **ähnlichen Prinzip** wie in Unterkapitel 2.2.7 erläutert ergibt.

Später in der Entwicklung des PicoC-Compilers wurde die Konkrete Grammatik an die aktuellste kostenlos auffindbare Version der echten Konkreten Grammatik der Sprache  $L_C$ , zusammengesetzt aus einer Grammatik für die Syntaktische Analyse  $ANSI\ C\ grammar\ (Yacc)$  und Lexikalische Analyse  $ANSI\ C\ grammar\ (Lex)$  angepasst<sup>10</sup>, damit es sicherer gewährleistet werden kann, dass der PicoC-Compiler sich genauso verhält, wie geläufige Compiler der Programmiersprache  $L_C$ . Wobei z.B. die Compiler GCC<sup>11</sup> und Clang<sup>12</sup> zu nennen wären.

In der Konkreten Grammatik 2.2.8 für die Syntaktischen Analyse werden einige der Tokennamen aus der Konkreten Grammatik 2.1.1 für die Lexikalischen Analyse verwendet, wie z.B. NUM aber auch name, welches eine Produktion ist, die mehrere Tokennamen unter einem Überbegriff zusammenfasst.

Terminalsymbole, wie ; oder && gehören eigentlich zur Lexikalischen Analyse, jedoch erlaubt das Lark Parsing Toolkit um die Konkrete Grammatik leichter lesbar zu machen einige Terminalsymbole einfach direkt in die Konkrete Grammatik 2.2.8 für die Syntaktische Analyse zu schreiben. Der Tokenname für diese Terminalsymbole wird in diesem Fall vom Lark Parsing Toolkit bestimmt, welches einige sehr häufige verwendete Terminalsymbole, wie; oder && bereits einen eigenen Tokennamen zugewiesen hat.

 $<sup>^{10}</sup>$ An der für die Programmiersprache  $L_{PicoC}$  relevanten Syntax hat sich allerdings über die Jahre nichts verändert, wie die Konkreten Grammatiken für die Syntaktische Analyse ANSI C grammar (Yacc) old und Lexikalische Analyse ANSI C grammar (Lex) old aus dem Jahre 1985 zeigen.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project.

 $<sup>^{12}</sup>$  clang: C++ Compiler.

| prim_exp<br>post_exp<br>un_exp   | ::=<br>::=<br> <br>::=          | name   NUM   CHAR   "("logic_or")"  array_subscr   struct_attr   fun_call input_exp   print_exp   prim_exp un_op_un_exp   post_exp  | $L\_Arith + L\_Array$<br>+ $L\_Pntr + L\_Struct$<br>+ $L\_Fun$ |
|--|---------------------------------|---|--|
| input_exp<br>print_exp<br>arith_prec1<br>arith_prec2<br>arith_and<br>arith_oplus<br>arith_or | ::=<br>::=<br>::=<br>::=<br>::= | "input""("")"  "print""("logic_or")"  arith_prec1 prec1_op un_exp   un_exp  arith_prec2 prec2_op arith_prec1   arith_prec1  arith_and "&" arith_prec2   arith_prec2  arith_oplus "\\" arith_and   arith_and  arith_or " " arith_oplus   arith_oplus |  |
| rel_exp<br>eq_exp<br>logic_and<br>logic_or   | ::=<br>::=<br>::=               | rel_exp rel_op arith_or   arith_or<br>eq_exp eq_op rel_exp   rel_exp<br>logic_and "&&" eq_exp   eq_exp<br>logic_or "  " logic_and   logic_and   | $L\_Logic$   |
| type_spec<br>alloc<br>assign_stmt<br>initializer<br>init_stmt<br>const_init_stmt             | ::=<br>::=<br>::=<br>::=<br>::= | <pre>prim_dt   struct_spec type_spec pntr_decl un_exp "=" logic_or";" logic_or   array_init   struct_init alloc "=" initializer";" "const" type_spec name "=" NUM";"</pre>  | $L\_Assign\_Alloc$   |
| $pntr\_deg \\ pntr\_decl$  | ::=                             | "*"*  pntr_deg array_decl   array_decl  | $L_{-}Pntr$  |
| array_dims<br>array_decl<br>array_init<br>array_subscr                                       | ::=<br>::=<br>::=               | ("["NUM"]")*  name array_dims   "("pntr_decl")"array_dims  "{"initializer("," initializer) * "}"  post_exp"["logic_or"]"  | $L\_Array$   |
| struct_spec<br>struct_params<br>struct_decl<br>struct_init<br>struct_attr                    | ::= ::= ::=                     | "struct" name (alloc";")+  "struct" name "{"struct_params"}"  "{""."name"="initializer  ("," "."name"="initializer)*"}"  post_exp"."name  | $L_{-}Struct$  |
| $if\_stmt$ $if\_else\_stmt$  | ::=                             | "if""("logic_or")" exec_part "if""("logic_or")" exec_part "else" exec_part  | $L\_If\_Else$  |
| while_stmt<br>do_while_stmt  | ::=                             | "while""("logic_or")" exec_part "do" exec_part "while""("logic_or")"";"   | $L_{-}Loop$  |

Grammatik 2.2.8: Konkrete Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 1

```
alloc";"
                                                                                                    L\_Stmt
decl\_exp\_stmt
                    ::=
decl\_direct\_stmt
                          assign_stmt | init_stmt | const_init_stmt
                    ::=
decl\_part
                          decl\_exp\_stmt \mid decl\_direct\_stmt \mid RETI\_COMMENT
                    ::=
                          "{"exec_part * "}"
compound\_stmt
                    ::=
                          logic\_or";"
exec\_exp\_stmt
                    ::=
exec\_direct\_stmt
                          if\_stmt \mid if\_else\_stmt \mid while\_stmt \mid do\_while\_stmt
                    ::=
                          assign\_stmt \quad | \quad fun\_return\_stmt
                          compound\_stmt \mid exec\_exp\_stmt \mid exec\_direct\_stmt
exec\_part
                    ::=
                          RETI\_COMMENT
                          decl\_part * exec\_part *
decl\_exec\_stmts
                    ::=
                                                                                                    L_{-}Fun
fun\_args
                          [logic\_or("," logic\_or)*]
                    ::=
                          name"("fun\_args")"
fun\_call
                    ::=
fun\_return\_stmt
                          "return" [logic_or]";"
                    ::=
                          [alloc("," alloc)*]
fun\_params
                    ::=
fun\_decl
                          type_spec pntr_deg name" ("fun_params")"
                    ::=
                          type_spec_pntr_deg_name"("fun_params")" "{"decl_exec_stmts"}"
fun_{-}def
                    ::=
                          (struct\_decl
                                           fun\_decl)";"
decl\_def
                                                              fun\_def
                                                                                                    L_File
                    ::=
                          decl\_def*
decls\_defs
                    ::=
file
                    ::=
                          FILENAME\ decls\_defs
```

Grammatik 2.2.9: Konkrete Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  für die Syntaktische Analyse in EBNF, Teil 2

## Anmerkung Q

In der Konkreten Grammatik 2.2.8 sind alle Grammatiksymbole ausgegraut, die das Bachelorprojekt betreffen. Alle nicht ausgegrauten Grammatiksymbole wurden für die Implementierung der neuen Funktionalitäten, welche die Bachelorarbeit betreffen hinzugefügt.

## 2.2.3 Ableitungsbaum Generierung

Die in Unterkapitel 2.2.2 definierte Konkrete Grammatik 2.2.8 lässt sich mithilfe des Earley Parsers (Definition 2.6) von Lark dazu verwenden Code, der in der Sprache  $L_{PicoC}$  geschrieben ist zu parsen um einen Ableitungsbaum zu generieren.

#### Definition 2.6: Earley Parser

Ist ein Algorithmus für das Parsen von Wörtern einer Kontextfreien Sprache, der ein Chart Parser ist, welcher einen mittels Dynamischer Programmierung und dem Top-Down Ansatz arbeitenden Earley Recognizer (Defintion ?? im Kapitel ??) nutzt, um einen Ableitungsbaum zu konstruieren.

Zur Konstruktion des Ableitungsbaumes muss dafür gesorgt werden, dass der Earley Recognizer bei der Vervollständigungsoperation Zeiger auf den vorherigen Zustand hinzugefügt, um durch Rückwärtsverfolgen dieser Zeiger die Ableitung wieder nachvollziehen zu können und so einen Ableitungsbaum konstruieren zu können.<sup>a</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup>Jay Earley, "An efficient context-free parsing".

#### 2.2.3.1 Codebeispiel

Der Ableitungsbaum, der mithilfe des Earley Parsers und der Token der Lexikalischen Analyse aus dem Beispiel in Code 2.1 generiert wurde, ist in Code 2.3 zu sehen. Im Code 2.3 wurden einige Zeilen markiert, die später in Unterkapitel 2.2.4.1 zum Vergleich wichtig sind.

```
1 file
     ./verbose_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.dt
     decls_defs
       decl_def
         struct_decl
 6
           name
                        st
           struct_params
             alloc
 9
                type_spec
10
                 prim_dt
                                  int
11
                pntr_decl
12
                 pntr_deg
13
                 array_decl
14
                    pntr_decl
15
                      pntr_deg
                      array_decl
                        name
                                     attr
18
                        array_dims
19
                    array_dims
20
                      4
                      5
22
       decl_def
23
         fun_def
24
           type_spec
25
             prim_dt
                             void
26
           pntr_deg
27
           name
                        main
28
           fun_params
29
           decl_exec_stmts
30
             decl_part
31
                decl_exp_stmt
33
                    type_spec
34
                      struct_spec
35
                        name
                                     st
36
                    pntr_decl
37
                      pntr_deg
38
                      array_decl
39
                        pntr_decl
40
                          pntr_deg
                          array_decl
                            name
                                         var
                            array_dims
44
                               3
45
                               2
                        array_dims
```

Code 2.3: Ableitungsbaum nach Ableitungsbaum Generierung.

#### 2.2.3.2 Ausgabe des Ableitunsgbaumes

Die Ausgabe des Ableitungsbaumes wird komplett vom Lark Parsing Toolkit übernommen. Für die Inneren Knoten werden die Nicht-Terminalsymbole, welche in der Konkreten Grammatik den linken Seiten des ::=-Symbols<sup>13</sup> entsprechen hergenommen und die Blätter sind Terminalsymbole, genauso, wie es in der Definition 1.37 eines Ableitungsbaumes auch schon definiert ist. Die EBNF-Grammatik 2.2.8 des PicoC-Compilers erlaubt es allerdings auch, dass in einem Blatt garnichts  $\varepsilon$  steht, weil es z.B. Produktionen, wie array\_dims ::= ("["NUM"]")\* gibt, in denen auch das leere Wort  $\varepsilon$  abgeleitet werden kann.

Die Ausgabe des Abstrakten Syntaxbaumes ist bewusst so gewählt, dass sie sich optisch vom Ableitungsbaum unterscheidet, indem die Bezeichner der Knoten in UpperCamelCase<sup>14</sup> geschrieben sind, im Gegensatz zum Ableitungsbaum, dessen Innere Knoten im snake\_case geschrieben sind, wie auch die Nicht-Terminalsymbole auf den linken Seiten des ::=-Symbols.

## 2.2.4 Ableitungsbaum Vereinfachung

Der Ableitungsbaum in Code 2.3, dessen Generierung in Unterkapitel 2.2.3.1 besprochen wurde ist noch untauglich, damit aus ihm mittels eines Tramsformers ein Abstrakter Syntaxbaum generiert werden kann. Das Problem ist, dass um den Datentyp einer Variable in der Programmiersprache  $L_C$  und somit auch die Programmiersprache  $L_{PicoC}$  korrekt bestimmen zu können, wie z.B. ein "Feld der Mächtigkeit 3 von Zeigern auf Felder der Mächtigkeit 2 von Integern" int (\*ar[3])[2] die Spiralregel<sup>15</sup> in der Implementeirung des PicoC-Compilers umgesetzt werden muss und das ist nicht alleinig möglich, indem man die entsprechenden Produktionen in der Konkreten Grammatik 2.2.8 auf eine spezielle Weise passend spezifiziert.

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

Es sind hierbei mehrere Probleme zu lösen. Hat man den Ausdruck struct st \*(\*var[3][2]) wird dieser zu einem Ableitungsbaum, wie er in Abbildung 2.2 zu sehen ist.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Grammar: The language of languages (BNF, EBNF, ABNF and more).

 $<sup>^{14}</sup>Naming\ convention\ (programming).$ 

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup> Clockwise/Spiral Rule.

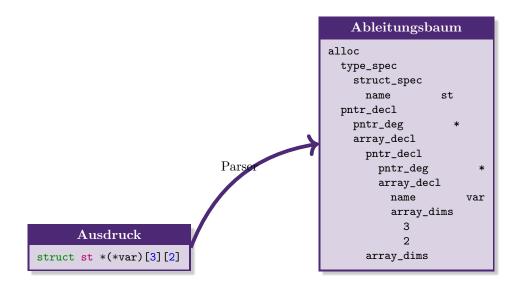


Abbildung 2.2: Ableitungsbaum nach Parsen eines Ausdrucks.

Dieser Ableitungsbaum für den Ausdruck struct st \*(\*var[3][2]) hat allerdings einen Aufbau welcher durch die Syntax der Zeigerdeklaratoren pntr\_decl(num, datatype) und Felddeklaratoren array\_decl(datatype, nums) bestimmt ist, die spiralähnlich ist. Man würde allerdings gerne einen entarteten Baum erhalten, bei dem der Datentyp immer im zweiten Attribut weitergeht, anstatt abwechselnd im zweiten und ersten, wie beim Zeigerdeklarator pntr\_decl(num, datatype) und Felddeklarator array\_decl(datatype, nums). Daher muss beim FeldDeclarator array\_decl(datatype, nums) immer das erste Attribut datatype mit dem zweiten Attribut nums getauscht werden.

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

In Abbildung 2.3 ist daher zu sehen, wie der **Ableitungsbaum** aus Abbildung 2.2 mithilfe eines **Visitors** (Definition 1.41) **vereinfacht** wird, sodass er die gerade erläuterten Ansprüche erfüllt.

Die Implementierung des Visitors aus dem Lark Parsing Toolkit ist unter Link<sup>16</sup> zu finden ist. Diese Implementierung ist allerdings zu spezifisch auf Lark zugeschnitten, um sie an dieser Stelle allgemein erklären zu können. Der Visitor verhält sich allerdings grundlegend so, wie es in Definition 1.41 erklärt wurde.

 $<sup>^{16}</sup>$ https://github.com/lark-parser/lark/blob/d03f32be7f418dc21cfa45acc458e67fe0580f60/lark/visitors.py.



Abbildung 2.3: Ableitungsbaum nach Vereinfachung.

## 2.2.4.1 Codebeispiel

In Code 2.4 ist der Ableitungsbaum aus Code 2.3 nach der Vereinfachung mithilfe eines Visitors zu sehen.

```
file
     ./verbose_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.dt_simple
     decls_defs
 4
5
       decl_def
         struct_decl
           name
                        st
 7
8
9
           struct_params
             alloc
               pntr_decl
10
                  pntr_deg
                  array_decl
                    array_dims
                      4
14
                      5
                    pntr_decl
16
                      pntr_deg
17
                      array_decl
18
                        array_dims
19
                        type_spec
20
                          prim_dt
                                          int
               name
                             attr
22
       decl_def
23
         fun_def
24
           type_spec
25
             prim_dt
                              void
26
           pntr_deg
27
           name
                        main
28
           fun_params
           decl_exec_stmts
```

```
decl_part
31
                decl_exp_stmt
32
                   alloc
33
                     pntr_decl
34
                       pntr_deg
35
                       array_decl
36
                          array_dims
37
                         pntr_decl
38
                            pntr_deg
39
                            array_decl
40
                              array_dims
41
                                3
42
                                2
43
                              type_spec
44
                                 struct_spec
45
                                                 st
                                   name
46
                     name
                                   var
```

Code 2.4: Ableitungsbaum nach Ableitungsbaum Vereinfachung.

## 2.2.5 Generierung des Abstrakten Syntaxbaumes

Nachdem der Ableitungsbaum in Unterkapitel 2.2.4 vereinfacht wurde, ist der vereinfachte Ableitungsbaum in Code 2.4 nun dazu geeignet, um mit einem Transformer (Definition 1.40) einen Abstrakten Syntaxbaum aus ihm zu generieren. Würde man den vereinfachten Ableitungsbaum des Ausdrucks struct st \*(\*var[3][2]) auf passende Weise in einen Abstrakten Syntaxbaum umwandeln, so würde dabei ein Abstrakter Syntaxbaum wie in Abbildung 2.4 rauskommen.

Die Implementierung des **Transformers** aus dem **Lark Parsing Toolkit** ist unter Link<sup>17</sup> zu finden ist. Diese Implementierung ist allerdings **zu spezifisch** auf Lark zugeschnitten, um sie an dieser Stelle allgemein erklären zu können. Der **Transformer** verhält sich allerdings grundlegend so, wie es in Definition 1.40 erklärt wurde.

Den Teilbaum, der den Datentyp darstellt würde man von von oben-nach-unten<sup>18</sup> als "Zeiger auf einen Zeiger auf ein Feld der Mächtigkeit 2 von Feldern der Mächtigkeit 3 von Verbunden des Typs st" lesen, also genau anders herum, als man den Ausdruck struct st \*(\*var[3][2]) mit der Spiralregel lesen würde. Bei der Spiralregel fängt man beim Ausdruck struct st \*(\*var[3][2]) bei der Variable var an und arbeitet sich dann auf "Spiralbahnen", von innen-nach-außen durch den Ausdruck, um herauszufinden, dass dieser Datentyp ein "Feld der Mächtigkeit 3 von Feldern der Mächtigkeit 2 von Zeigern auf einen Zeiger auf einen Verbund vom Typ st" ist.

 $<sup>^{17}</sup> https://github.com/lark-parser/lark/blob/d03f32be7f418dc21cfa45acc458e67fe0580f60/lark/visitors.py.$ 

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup>In der Informatik wachsen Bäume von oben-nach-unten, von der Wurzel zur den Blättern, bzw. in diesem Beispiel von links-nach-rechts.



Abbildung 2.4: Generierung eines Abstrakten Syntaxbaumes ohne Umdrehen.

Dieser Abstrakte Syntaxbaum ist für die Weiterverarbeitung ungeeignet, denn für die Adressberechnung für eine Aneinandereihung von Zugriffen auf Zeigerelemente, Feldelemente oder Verbundattribute, welche in Unterkapitel ?? genauer erläutert wird, will man den Datentyp in umgekehrter Reihenfolge. Aus diesem Grund muss der Transformer bei der Konstruktion des Abstrakten Syntaxbaumes zusätzlich dafür sorgen, dass jeder Teilbaum, der für einen Datentyp steht umgedreht wird. Auf diese Weise kommt ein Abstrakter Syntaxbaum mit richtig rum gedrehtem Datentyp, wie in Abbildung 2.5 zustande, der für die Weiterverarbeitung geeignet ist.

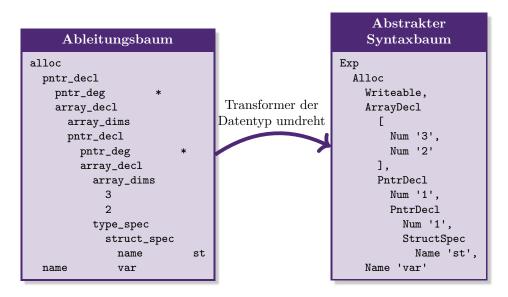


Abbildung 2.5: Generierung eines Abstrakten Syntaxbaumes mit Umdrehen.

Die Weiterverarbeitung des Abstrakten Syntaxbaumes geschieht mithilfe von Passes, welche im Unterkapitel 1.5 genauer beschrieben werden. Da die Knoten des Abstrakten Syntaxbaumes anders als beim Ableitungsbaum nicht die gleichen Bezeichnungen haben wie Produktionen der Konkreten Grammatik

ist es in den folgenden Unterkapiteln 2.2.5.1, 2.2.5.2 und 2.2.5.3 notwendig die Bedeutung der einzelnen PicoC-Knoten, RETI-Knoten und bestimmter Kompositionen dieser Knoten zu dokumentieren, die alle in den unterschiedlichen von den Passes umgeformten Abstrakten Syntaxbäumen vorkommen.

Des Weiteren gibt die Abstrakte Grammatik 2.2.10 in Unterkapitel 2.2.5.4 Aufschluss darüber welche Kompositionen von PicoC-Knoten neben den bereits in Tabelle 2.8 definierten Kompositionen mit Bedeutung insgesamt überhaupt möglich sind.

#### 2.2.5.1 PicoC-Knoten

Bei den PicoC-Knoten handelt es sich um Knoten, die irgendeinen Ausdruck aus der Sprache  $L_{PicoC}$  darstellen. Für die PicoC-Knoten wurden möglichst kurze und leicht verständliche Bezeichner gewählt, da auf diese Weise bei der Implementierung der einzelnen Passes möglichst viel Code in eine Zeile passt und dieser Code auch durch leicht verständliche Bezeichner von Knoten intuitiv verständlich sein sollte<sup>19</sup>. Alle PicoC-Knoten, die in den von den verschiedenen Passes generierten Abstrakten Syntaxbäumen vorkommen sind in Tabelle 2.3 mit einem Beschreibungstext dokumentiert.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup>Z.B. steht der PicoC-Knoten Name(str) für einen Bezeichner. Anstatt diesen Knoten in englisch Identifier(str) zu nennen, wurde dieser als Name(str) gewählt, da Name(str) kürzer ist und inuitiver verständlich.

| PiocC-Knoten   | Beschreibung  |
|--|---|
| Name(val)  | Ein Bezeichner, z.B. my_fun, my_var usw., aber da es keine gute Kurzform für Identifier() (englisches Wort für Bezeichner) gibt, wurde dieser Knoten Name() genannt.  |
| Num(val)   | Eine Zahl, z.B. 42, -3 usw.   |
| Char(val)  | Ein Zeichen der ASCII-Zeichenkodierung, z.B. 'c', '*' usw.  |
| <pre>Minus(), Not(), DerefOp(), RefOp(), LogicNot()</pre>                      | Die unären Operatoren un_op: -a, ~a, *a, &a !a.   |
| Add(), Sub(), Mul(), Div(), Mod(), Oplus(), And(), Or(), LogicAnd(), LogicOr() | Die binären Operatoren bin_op: a + b, a - b, a * b, a / b, a % b, a % b, a % b, a   b, a && b, a    b.  |
| Eq(), NEq(), Lt(), LtE(), Gt(), GtE()  | Die Relationen rel: a == b, a != b, a < b, a <= b, a > b, a >= b.   |
| <pre>Const(), Writeable()</pre>  | Die Type Qualifier type_qual: const, was für ein nicht<br>beschreibbare Konstante steht und das nicht Angeben<br>von const, was für einen beschreibbare Variable steht.   |
| <pre>IntType(), CharType(), VoidType()</pre>                                   | Die Type Specifier für Primitiven Datentypen, die in der<br>Abstrakten Syntax, um eine intuitive Bezeichnung zu haben<br>einfach nur als Datentypen datatype eingeordnet werden:<br>int, char, void.  |
| Placeholder()  | Platzhalter für einen Knoten, der diesen später ersetzt.  |
| BinOp(exp, bin_op, exp)  | Container für eine binäre Operation mit 2 Expressions:<br><exp1> <bin_op> <exp2></exp2></bin_op></exp1>   |
| UnOp(un_op, exp)   | Container für eine <b>unäre Operation</b> mit einer Expression:<br><un_op> <exp>.</exp></un_op>   |
| Exit(num)  | Container für einen Exit Code, der vor der Beendigung in das ACC Register geschrieben wird und steht für die Beendigung des laufenden Programmes.   |
| Atom(exp, rel, exp)  | Container für eine binäre Relation mit 2 Expressions: <exp1> <rel> <exp2></exp2></rel></exp1>   |
| ToBool(exp)  | Container für einen Arithmetischen Ausdruck, wie z.B. 1 + 3 oder einfach nur 3, der nicht nur 1 oder 0 als Ergebnis haben kann und daher bei einem Ergebnis $x > 1$ auf 1 abgebildet wird.  |
| Alloc(type_qual, datatype, name, local_var_or_param)                           | Container für eine Allokation <type_qual> <datatype> <name> mit den notwendigen Knoten type_qual, datatype und name, die alle für einen Eintrag in der Symboltabelle notwendigen Informationen enthalten. Zudem besitzt er ein verstecktes Attribut local_var_or_param, dass die Information trägt, ob es sich bei der Variable um eine Lokale Variable oder einen Parameter handelt.</name></datatype></type_qual> |
| Assign(lhs, exp)   | Container für eine <b>Zuweisung</b> , wobei 1hs ein Subscr(exp1, exp2), Deref(exp1, exp2), Attr(exp, name) oder Name('var') sein kann und exp ein beliebiger <b>Logischer Ausdruck</b> sein kann: 1hs = exp.  |

Tabelle 2.3: PicoC-Knoten Teil 1.

| PiocC-Knoten                              | Beschreibung  |
|---|---|
| <pre>Exp(exp, datatype, error_data)</pre> | Container für einen beliebigen Ausdruck, dessen Ergebnis<br>auf den Stack soll. Zudem besitzt er 2 versteckte Attribu-<br>te, wobei datatype im RETI Blocks Pass wichtig ist und<br>error_data für Fehlermeldungen wichtig ist.   |
| Stack(num)                                | Container, der für das temporäre Ergebnis einer Berechnung,<br>das num Speicherzellen relativ zum Stackpointer Register<br>SP steht.  |
| Stackframe(num)                           | Container, der für eine Variable steht, die num Speicherzellen relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF steht.  |
| Global(num)                               | Container, der für eine Variable steht, die num Speicherzellen relativ zum Datensegment Register DS steht.  |
| StackMalloc(num)                          | Container, der für das Allokieren von num Speicherzellen auf dem Stack steht.   |
| PntrDecl(num, datatype)                   | Container, der für den Zeigerdatentyp steht: <pre><pre><pre><pre>*<var></var></pre>, wobei das Attribut num die Anzahl zusammen- gefasster Zeiger angibt und datatype der Datentyp ist, auf den der oder die Zeiger zeigen.</pre></pre></pre>   |
| Ref(exp, datatype, error_data)            | Container, der für die Anwendung des Referenz-Operators & <var> steht und die Adresse einer Location (Definition 1.49) auf den Stack schreiben soll, die über exp eingegrenzt wird. Zudem besitzt er 2 versteckte Attribute, wobei datatype im RETI Blocks Pass wichtig ist und error_data für Fehlermeldungen wichtig ist.</var>   |
| Deref(lhs, exp)                           | Container für den Indexzugriff auf einen Feld- oder Zei-<br>gerdatentyp: <var>[<i>], wobei exp1 eine angehängte weite-<br/>re Subscr(exp1, exp2), Deref(exp1, exp2), Attr(exp, name)<br/>oder ein Name('var') sein kann und exp2 der Index ist auf den<br/>zugegriffen werden soll.</i></var>   |
| ArrayDecl(nums, datatype)                 | Container, der für den Felddatentyp steht: <pri>cvar&gt;[<i>], wobei das Attribut nums eine Liste von Num('x') ist, die die Dimensionen des Feld angibt und datatype der Datentyp ist, der über das Anwenden von Subscript() auf das Feld zugreifbar ist.</i></pri>   |
| Array(exps, datatype)                     | Container für den Initializer eines Feldes, dessen Einträge exps weitere Initializer für eine Feld-Dimension oder ein Initializer für ein Struct oder ein Logischer Ausdruck sein können, z.B. {{1, 2}, {3, 4}}. Des Weiteren besitzt er ein verstecktes Attribut datatype, welches für den PicoC-ANF Pass Informationen transportiert, die für Fehlermeldungen wichtig sind. |
| Subscr(exp1, exp2)                        | Container für den Indexzugriff auf einen Feld- oder Zeigerdatentyp: <var>[<i>], wobei exp1 eine angehängte weitere Subscr(exp1, exp2), Deref(exp1, exp2) oder Attr(exp, name) Operation sein kann oder ein Name('var') sein kann und exp2 der Index ist auf den zugegriffen werden soll.</i></var>  |
| StructSpec(name)                          | Container für einen selbst definierten Verbundstyp: struct <name>, wobei das Attribut name festlegt, welchen selbst definierten Verbundstyp dieser Knoten repräsentiert.</name>   |
| Attr(exp, name)                           | Container für den Attributzugriff auf einen Structdatentyp: <var>.<attr>, wobei exp1 eine angehängte weitere Subscr(exp1, exp2), Deref(exp1, exp2) oder Attr(exp, name) Operation sein kann oder ein Name('var') sein kann und name das Attribut ist, auf das zugegriffen werden soll.</attr></var>   |

| PiocC-Knoten                           | Beschreibung   |
|--|--|
| Struct(assigns, datatype)              | Container für den Initializer eines Structs, z.B {. <attr1>={1, 2}, .<attr2>={3, 4}}, dessen Eintrag assigns eine Liste von Assign(1hs, exp) ist mit einer Zuordnung eines Attributezeichners, zu einem weiteren Initializer für eine Feld-Dimension oder zu einem Initializer für ein Struct oder zu einem Logischen Ausdruck. Des Weiteren besitzt er ein verstecktes Attribut datatype, welches für den PicoC-ANF Pass Informationen transportiert, die für Fehlermeldungen wichtig sind.</attr2></attr1> |
| StructDecl(name, allocs)               | Container für die Deklaration eines selbstdefinierten Verbundstyps, z.B. struct <var> {<datatype> <attr1>; <datatype> <attr2>;};, wobei name der Bezeichner des Verbundstyps ist und allocs eine Liste von Bezeichnern der Attribute des Verbundstyps mit dazugehörigem Datentyp, wofür sich der Knoten Alloc(type_qual, datatype, name) sehr gut als Container eignet.</attr2></datatype></attr1></datatype></var>  |
| If(exp, stmts)                         | Container für ein If Statement if( <exp>) { <stmts> } in-<br/>klusive Condition exp und einem Branch stmts, indem<br/>eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes<br/>GoTo(Name('block.xyz')).</stmts></exp>  |
| <pre>IfElse(exp, stmts1, stmts2)</pre> | Container für ein If-Else Statement if( <exp>) { <stmts2> } else { <stmts2> } inklusive Codition exp und 2 Branches stmts1 und stmts2, die zwei Alternativen Darstellen in denen jeweils Listen von Statements oder GoTo(Name('block.xyz'))'s stehen können.</stmts2></stmts2></exp>   |
| While(exp, stmts)                      | Container für ein While-Statement while( <exp>) { <stmts> } inklusive Condition exp und einem Branch stmts, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).</stmts></exp>  |
| DoWhile(exp, stmts)                    | Container für ein Do-While-Statement do { <stmts> } while(<exp>); inklusive Condition exp und einem Branch stmts, indem eine Liste von Statements stehen kann oder ein einzelnes GoTo(Name('block.xyz')).</exp></stmts>  |
| Call(name, exps)                       | Container für einen Funktionsaufruf: fun_name(exps), wobei name der Bezeichner der Funktion ist, die aufgerufen werden soll und exps eine Liste von Argumenten ist, die an die Funktion übergeben werden soll.   |
| Return(exp)                            | Container für ein Return-Statement: return <exp>, wobei das Attribut exp einen Logischen Ausdruck darstellt, dessen Ergebnis vom Return-Statement zurückgegeben wird.</exp>  |
| FunDecl(datatype, name, allocs)        | Container für eine Funktionsdeklaration, z.B. <datatype> <fun_name>(<datatype> <param1>, <datatype> <param2>), wobei datatype der Rückgabewert der Funktion ist, name der Bezeichner der Funktion ist und allocs die Parameter der Funktion sind, wobei der Knoten Alloc(type_spec, datatype, name) als Cotainer für die Parameter dient.</param2></datatype></param1></datatype></fun_name></datatype>  |

Tabelle 2.5: PicoC-Knoten Teil 3.

| PiocC-Knoten  | Beschreibung   |
|---|--|
| FunDef(datatype, name, allocs,  | Container für eine Funktionsdefinition, z.B. <datatype></datatype>   |
| stmts_blocks)   | <pre><fun_name>(<datatype> <param/>) {<stmts>}, wobei datatype</stmts></datatype></fun_name></pre>   |
| SUMUS_DIOCKS)   | der Rückgabewert der Funktion ist, name der Bezeichner der Funktion ist, allocs die Parameter der Funktion sind, wobei der Knoten Alloc(type_spec, datatype, name) als Container für die Parameter dient und stmts_blocks eine Liste von Statemetns bzw. Blöcken ist, welche diese Funktion beinhaltet.  |
| Novetackfromo(fun namo  |  |
| NewStackframe(fun_name, goto_after_call)  | Container für die Erstellung eines neuen Stackframes und Speicherung des Werts des BAF-Registers der aufrufenden Funktion und der Rücksprungadresse nacheinander an den Anfang des neuen Stackframes. Das Attribut fun_name stehte dabei für den Bezeichner der Funktion, für die ein neuer Stackframe erstellt werden soll. Das Attribut fun_name dient später dazu den Block dieser Funktion zu finden, weil dieser für den weiteren Kompiliervorang wichtige Information in seinen versteckte Attributen gespeichert hat. Des Weiteren ist das Attribut goto_after_call ein GoTo(Name('addr@next_instr')), welches später durch die Adresse des Befehls, der direkt auf den Sprungbefehl folgt, ersetzt wird. |
| RemoveStackframe()  | Container für das Entfernen des aktuellen Stackframes durch das Wiederherstellen des im noch aktuellen Stackframe gespeicherten Werts des BAF-Registes der aufrufenden Funktion und das Setzen des SP-Registers auf den Wert des BAF-Registesr vor der Wiederherstellung.  |
| File(name, decls_defs_blocks)   | Container für alle Funkionen oder Blöcke, welche eine Datei als Ursprung haben, wobei name der Dateiname der Datei ist, die erstellt wird und decls_defs_blocks eine Liste von Funktionen bzw. Blöcken ist.  |
| Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size) | Container für Statements, der auch als Block bezeichnet wird, wobei das Attribut name der Bezeichner des Labels (Definition 2.7) des Blocks ist und stmts_instrs eine Liste von Statements oder Befehlen. Zudem besitzt er noch 3 versteckte Attribute, wobei instrs_before die Zahl der Befehle vor diesem Block zählt, num_instrs die Zahl der Befehle ohne Kommentare in diesem Block zählt, param_size die voraussichtliche Anzahl an Speicherzellen aufaddiert, die für die Parameter der Funktion belegt werden müssen und local_vars_size die voraussichtliche Anzahl an Speicherzellen aufaddiert, die für die lokalen Variablen der Funktion belegt werden müssen.                                      |
| GoTo(name)  | Container für ein Goto zu einem anderen Block, wobei das<br>Attribut name der Bezeichner des Labels des Blocks ist zu<br>dem Gesprungen werden soll.   |
| SingleLineComment(prefix, content)  | Container für einen Kommentar, den der Compiler selber während des Kompiliervorangs erstellt, der im RETI-Interpreter selbst später nicht sichtbar sein wird, aber in den Immediate-Dateien, welche die Abstrakten Syntaxbäume nach den verschiedenen Passes enthalten.  |
| RETIComment(value)  | Container für einen Kommentar im Code der Form: // # comment, der im RETI-Intepreter später sichtbar sein wird und zur Orientierung genutzt werden kann, allerdings in einer tatsächlichen Implementierung einer RETI-CPU nicht umsetzbar ist und auch nicht sinnvoll wäre umzusetzen. Der Kommentar ist im Attribut value, welches jeder Knoten besitzt gespeichert.  |

#### Definition 2.7: Label

/

Durch einen Bezeichner eindeutig zuordenbares Sprungziel im Programmcode.<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Thiemann, "Compilerbau".

## Anmerkung Q

Die ausgegrauten Attribute der PicoC-Knoten sind versteckte Attribute, die nicht direkt bei der Erstellung der PicoC-Knoten mit einem Wert initialisiert werden, sondern im Verlauf der Kompilierung beim Durchlaufen der verschiedenen Passes etwas zugewiesen bekommen, dass im weiteren Kompiliervorgang Informationen transportiert, die später im Kompiliervorgang nicht mehr so leicht zugänglich wären.

Jeder Knoten hat darüberhinaus auch noch 2 Attribute value und position, wobei value bei einem Knoten, der einen Blatt darstellt dem Tokenwert des Tokens, welches es ersetzt entspricht und Inneren Knoten unbesetzt ist. Das Attribut position wird für Fehlermeldungen gebraucht.

#### 2.2.5.2 RETI-Knoten

Bei den RETI-Knoten handelt es sich um Knoten, die irgendeinen Ausdruck aus der Sprache  $L_{RETI}$  darstellen. Für die RETI-Knoten wurden aus bereits in Unterkapitel 2.2.5.1 erläutertem Grund, genauso wie für die RETI-Knoten möglichst kurze und leicht verständliche Bezeichner gewählt. Alle RETI-Knoten, die in den von den verschiedenen Passes generierten Abstrakten Syntaxbäumen vorkommen sind in Tabelle 2.2.5.1 mit einem Beschreibungstext dokumentiert.

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

<sup>&</sup>lt;sup>a</sup> Scholl, "Betriebssysteme"

Tabelle 2.7: RETI-Knoten.

## 2.2.5.3 Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung

In Tabelle 2.8 sind jegliche Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten aufgelistet, die eine besondere Bedeutung haben.

| Komposition  | Beschreibung  |
|--|---|
| Ref(Global(Num('addr')))   | Speichert Adresse der Speicherzelle, die Num ('addr') Speicherzellen relativ zum Datensegment Register DS steht auf den Stack.  |
| Ref(Stackframe(Num('addr')))   | Speichert Adresse der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register baf steht auf den Stack.   |
| <pre>Ref(Subscr(Stack(Num('addr1')), Stack(Num('addr2'))))</pre>       | Berechnet die nächste Adresse aus der Adresse, die an Speicherzelle Stack(Num('addr1')) steht und dem Subscript Index, der an Speicherzelle Stack(Num('addr2')) steht und speichert diese auf den Stack. Die Berechnung ist abhängig davon ob der Datentyp ArrayDecl(datatype) oder PntrDecl(datatype) ist. Der Datentyp ist ein verstecktes Attribut von Ref(exp). |
| <pre>Ref(Attr(Stack(Num('addr1')), Name('attr')))</pre>                | Berechnet die nächste Adresse aus der Adresse, die an Speicherzelle Stack(Num('addr1')) steht und dem Attributnamen Name('attr') und speichert diese auf den Stack. Zur Berechnung ist der Name des Struct in StructSpec(Name('st')) notwendig, dessen Attribut Name('attr') ist. StructSpec(Name('st')) ist ein verstecktes Attribut von Ref(exp).                 |
| <pre>Assign(Stack(Num('size'))), Global(Num('addr')))</pre>            | Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die ab Global(Num('addr')) relativ zum Datensegment Register DS stehen, versetzt genauso auf den Stack.  |
| <pre>Assign(Stack(Num('size')),</pre>                                  | Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die ab   |
| Stackframe(Num('addr')))   | Stackframe(Num('addr')) relativ zum Begin-Aktive-<br>Funktion Register BAF stehen, versetzt genauso auf den<br>Stack.   |
| <pre>Exp(Global(Num('addr'))</pre>                                     | Speichert Inhalt der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Datensegment Register DS steht auf den Stack.  |
| <pre>Exp(Stackframe(Num('addr'))</pre>                                 | Speichert Inhalt der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF steht auf den Stack.  |
| <pre>Exp(Stack(Num('addr')))</pre>                                     | Speichert Inhalt der Speicherzelle, die Num('addr') Speicherzellen relativ zum Stackpointer Register SP steht auf den Stack.  |
| <pre>Assign(Stack(Num('addr1')), Stack(Num('addr2')))</pre>            | Speichert Inhalt der Speicherzelle Stack(Num('addr2')),<br>die Num('addr2') Speicherzellen relativ zum Stackpoin-<br>ter Register SP steht an der Adresse in der Speicherzelle,<br>die Num('addr1') Speicherzellen relativ zum Stackpoin-<br>ter Register SP steht.   |
| <pre>Assign(Global(Num('addr')), Stack(Num('size')))</pre>             | Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die auf dem Stack stehen, versetzt genauso auf die Speicherzellen ab Num('addr') relativ zum Datensegment Register DS.   |
| <pre>Assign(Stackframe(Num('addr')), Stack(Num('size')))</pre>         | Schreibt Num('size') viele Speicherzellen, die auf dem Stack stehen, versetzt genauso auf die Speicherzellen ab Num('addr') relativ zum Begin-Aktive-Funktion Register BAF.   |
| <pre>Exp(Reg(reg))</pre>   | Schreibt den aktuellen Wert des Registers reg auf den Stack.  |
| <pre>Instr(Loadi(), [Reg(Acc()), GoTo(Name('addr@next_instr'))])</pre> | Lädt in das Register ACC die Adresse des Befehls, der in diesem Kontext direkt nach dem Sprung zum Block einer anderen Funktion steht.  |

Tabelle 2.8: Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten mit besonderer Bedeutung.

## Anmerkung Q

Um die obige Tabelle 2.8 nicht mit unnötig viel repetetiven Inhalt zu füllen wurden die zahlreichen Kompostionen ausgelassen, bei denen einfach nur exp durch  $Stack(Num('x')), x \in \mathbb{N}$  ersetzt wurde.

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

## 2.2.5.4 Abstrakte Grammatik

Die Abstrakte Syntax der Sprache  $L_{PicoC}$  wird durch die Abstrakte Grammatik 2.2.10 beschrieben.

| stmt  | ::=  | $SingleLineComment(str, str) \mid RETIComment()$   | $L_{-}Comment$     |
|---|--|--|--------------------|
| $un\_op$ $bin\_op$ $exp$ $stmt$                       | ::=<br> <br> <br>::=<br> <br> <br> <br>::= | $\begin{array}{c cccc} Minus() &   & Not() \\ Add() &   & Sub() &   & Mul() &   & Div() &   & Mod() \\ Oplus() &   & And() &   & Or() \\ Name(str) &   & Num(str) &   & Char(str) \\ BinOp(\langle exp\rangle, \langle bin\_op\rangle, \langle exp\rangle) &   & Char(str) \\ UnOp(\langle un\_op\rangle, \langle exp\rangle) &   & Call(Name('input'), Empty()) \\ Call(Name('print'), \langle exp\rangle) &   & Exp(\langle exp\rangle) \end{array}$ | $L\_Arith$         |
| un_op<br>rel<br>bin_op<br>exp                         | ::=<br>::=<br>::=                          | $\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $   | $L\_Logic$         |
| $type\_qual$ $datatype$ $exp$ $stmt$                  | ::=<br>::=<br>::=                          | $Const() \mid Writeable() \\ IntType() \mid CharType() \mid VoidType() \\ Alloc(\langle type\_qual \rangle, \langle datatype \rangle, Name(str)) \\ Assign(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle)$  | $L\_Assign\_Alloc$ |
| $\begin{array}{c} \hline datatype \\ exp \end{array}$ | ::=  | $PntrDecl(Num(str), \langle datatype \rangle)$<br>$Deref(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle) \mid Ref(\langle exp \rangle)$  | $L\_Pntr$          |
| $\begin{array}{c} datatype \\ exp \end{array}$        | ::=  | $\begin{array}{l} ArrayDecl(Num(str)+,\langle datatype\rangle) \\ Subscr(\langle exp\rangle,\langle exp\rangle) &    Array(\langle exp\rangle+) \end{array}$   | $L\_Array$         |
| datatype<br>exp<br>decl_def                           | ::=<br>::=<br> <br>::=                     | $StructSpec(Name(str)) \\ Attr(\langle exp \rangle, Name(str)) \\ Struct(Assign(Name(str), \langle exp \rangle) +) \\ StructDecl(Name(str), \\ Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) +) \\$  | $L\_Struct$        |
| stmt  | ::=  | $If(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$ $IfElse(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *, \langle stmt \rangle *)$  | $L\_If\_Else$      |
| stmt  | ::=  | $While(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *) \\ DoWhile(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$   | $L\_Loop$          |
| $exp$ $stmt$ $decl\_def$                              | ::=<br>::=<br>::=                          | $Call(Name(str), \langle exp \rangle *)$ $Return(\langle exp \rangle)$ $FunDecl(\langle datatype \rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) *)$ $FunDef(\langle datatype \rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) *, \langle stmt \rangle *)$  | L_Fun              |
| file  | ::=  | $File(Name(str), \langle decl\_def \rangle *)$   | $L\_File$          |

Grammatik 2.2.10: Abstrakte Grammatik der Sprache  $L_{PiocC}$ 

## Anmerkung Q

In dieser Schrifftlichen Ausarbeitung der Bachelorarbeit wird oft von der "Abstrakten Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$ " gesprochen. Gemeint ist mit der Sprache  $L_{PicoC}$  nicht die Sprache, welche durch die Abstrakte Grammatik beschrieben wird. Es ist damit immer die Sprache gemeint, die kompiliert werden soll und zu deren Zweck die Abstrakt Grammatik überhaupt definiert wird. Für die tatsächliche Sprache, die durch die Abstrakt Grammatik beschrieben wird, interessiert man sich nicht explizit. Diese Konvention wurde aus dem Buch G. Siek, Course Webpage for Compilers (P423,

```
P523,\ E313,\ and\ E513) übernommen. {}^a\overline{\rm Manchmal} auch von der Abstrakten Syntax der Sprache L_{PicoC}.
```

## 2.2.5.5 Codebeispiel

In Code 2.5 ist der Abstrakte Syntaxbaum zu sehen, der aus dem vereinfachten Ableitungsbaum aus Code 2.4 mithilfe eines Transformers generiert wurde.

```
File
     Name './verbose_dt_simple_ast_gen_array_decl_and_alloc.ast',
 4
5
       StructDecl
         Name 'st',
 6
7
8
9
            Alloc
              Writeable,
              PntrDecl
                Num '1',
11
                ArrayDecl
12
13
                     Num '4',
14
                     Num '5'
                  ],
16
                  PntrDecl
17
                     Num '1',
18
                     IntType 'int',
19
              Name 'attr'
20
         ],
       FunDef
22
         VoidType 'void',
23
         Name 'main',
24
          [],
25
          [
            Exp
26
27
              Alloc
28
                Writeable,
29
                ArrayDecl
30
31
                     Num '3',
                     Num '2'
33
                  ],
34
                  {\tt PntrDecl}
35
                     Num '1',
36
                     PntrDecl
                       Num '1',
37
38
                       StructSpec
39
                         Name 'st',
40
                Name 'var'
41
         ]
42
     ]
```

Code 2.5: Aus einem vereinfachtem Ableitungsbaum generierter Abstrakter Syntaxbaum.

#### 2.2.5.6 Ausgabe des Abstrakten Syntaxbaumes

Ein Teilbaum eines Abstrakten Syntaxbaumes kann entweder in der Konkreten Syntax der Sprache, für dessen Kompilierung er generiert wurde oder in der Abstrakten Syntax, die beschreibt, wie der Abstrakte Syntaxbaum selbst aufgebaut sein darf ausgegeben werden.

Das Ausgeben eines Abstrakten Syntaxbaumes wird im PicoC-Compiler über die Magische Methode  $\_repr\_()^{20}$  der Programmiersprache  $L_{Python}$  umgesetzt. Sobald ein PicoC-Knoten oder RETI-Knoten ausgegeben werden soll, gibt seine Magische Methode  $\_repr\_()$  eine nach der Abstrakten oder Konkreten Syntax aufgebaute Textrepräsentation seiner selbst und all seiner Knoten mit an den richtigen Stellen passend gesetzten runden öffnenden ( und schließenden ) Klammern, sowie Kommas ', ', Semikolons ; usw. zur Darstellung der Hierarchie und zur Abtrennung zurück. Dabei wird nach dem Prinzip der Tiefensuche der gesamte Abstrakte Syntaxbaum durchlaufen und die Magische  $\_repr\_()$ -Methode der verschiedenen Knoten aufgerufen, die immer jeweils die  $\_repr\_()$ -Methode ihrer Kinder aufrufen und die zurückgegebene Textrepräsentation passend zusammenfügen und selbst zurückgeben.

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

# 2.3 Code Generierung

Nach der Generierung eines Abstrakten Syntaxbaumes als Ergebnis der Lexikalischen und Syntaktischen Analyse in Unterkapitel 1.4, wird in diesem Kapitel auf Basis der verschiedenen Kompositionen von PicoC-Knoten und RETI-Knoten im Abstrakten Syntaxbaum das gewünschte Endprodukt des PicoC-Compilers, der RETI-Code generiert.

Man steht nun dem Problem gegenüber einen Abstrakten Syntaxbaum der Sprache  $L_{PicoC}$ , der durch die Abstrakte Grammatik 2.2.10 spezifiziert ist in einen entsprechenden Abstrakten Syntaxbaum der Sprache  $L_{RETI}$  umzuformen. Das ganze lässt sich, wie in Unterkapitel 1.5 bereits beschrieben vereinfachen, indem man dieses Problem in mehrere Passes (Definition 1.45) herunterbricht.

Beim PicoC-Compiler handelt es sich um einen Cross-Compiler (Definiton 1.5). Damit RETI-Code erzeugt werden kann, der auf der RETI-Architektur läuft, muss erst, wie im T-Diagram (siehe Unterkapitel 1.1.1) in Abbildung 2.6 zu sehen ist, der Python-Code des PicoC-Compilers mittels eines Compilers, der z.B. auf einer X<sub>86\_64</sub>-Architektur laufen könnte zu Bytecode kompiliert werden. Dieser Bytecode wird dann von der Python-Virtual-Machine (PVM) interpretiert, welche wiederum auf einer X<sub>86\_64</sub>-Architektur laufen könnte. Und selbst dieses T-Diagram könnte noch ausführlicher ausgedrückt werden, indem nachgeforscht wird, in welcher Sprache eigentlich die Python-Virtual-Machine geschrieben war, bevor sie zu X<sub>86\_64</sub> kompiliert wurde usw.

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup>Spezielle Methode, die immer aufgerufen wird, wenn das Object, dass in Besitz dieser Methode ist als String mittels print() oder zur Repräsentation ausgegeben werden soll.

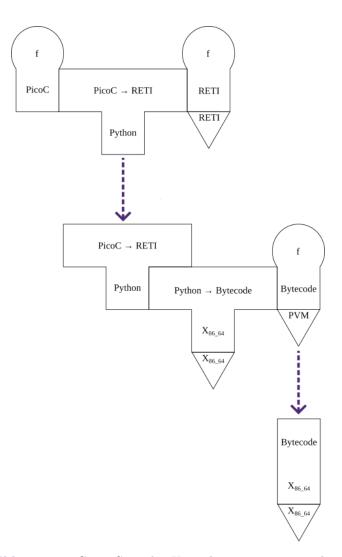


Abbildung 2.6: Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben.

Dieses längliche T-Diagram in Abbildung 2.6 lässt sich zusammenfassen, sodass man das T-Diagram in Abbildung 2.7 erhält, in welcher direkt angegeben ist, dass der PicoC-Compiler in  $X_{86.64}$ -Maschinensprache geschrieben ist.

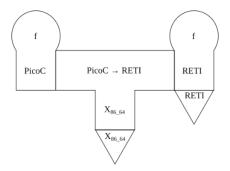


Abbildung 2.7: Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform.

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

der Kompilierprozess im Folgenden im horinzontalen, auf der Ebene der verschiedenen Passes genauer betrachtet. Die Abbildung 2.8 gibt einen guten Überblick über alle Passes und wie diese in der Pipe-Architektur (Definition 1.29) des PicoC-Compilers aufeinanderfolgen. In der Pipe-Architektur nutzt der jeweils nächste Pass den generierten Abstrakten Syntaxbaum des vorherigen Passes oder der Syntaktischen Analyse, um einen eigenen Abstrakten Syntaxbaum in seiner eigenen Sprache zu generieren.

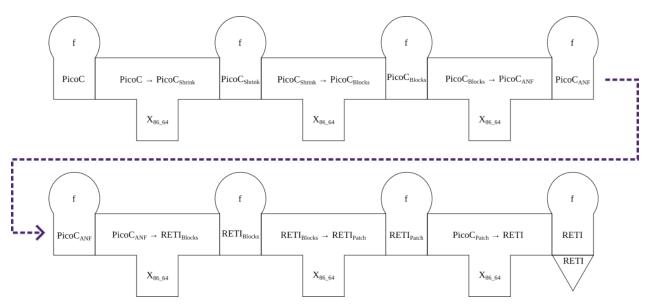


Abbildung 2.8: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben.

Im Unterkapitel 2.3.1 werden die unterschiedlichen Passes des PicoC-Compilers erklärt. In den darauffolgenden Unterkapiteln ??, ??, ?? und ?? zu Zeigern, Feldern, Verbunden und Funktionen werden einzelne Aspekte, die Thema dieser Bachelorarbeit sind genauer betrachtet und erklärt, die im Unterkapitel 2.3.1 nicht ausreichend vertieft wurden. Viele der verwendenten Ansätze zur Lösung dieser Probleme basieren auf der Vorlesung Scholl, "Betriebssysteme" und wurden in dieser Bachelorarbeit weiter ausgearbeitet, wo es nötig war, sodass diese mit dem PicoC-Compiler auch in der Praxis implementiert werden konnten.

#### 2.3.1 Passes

Im Folgenden werden die verschiedenen Passes des PicoC-Compilers für die Generierung von RETI-Code besprochen. Viele dieser Passes haben Aufgaben, die eher unter die Themenbereiche des Bachelorprojekts fallen. Allerdings ist das Verständnis der Passes auch für das Verständnis der veschiedenen Aspekte<sup>21</sup> der Bachelorarbeit wichtig.

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

#### 2.3.1.1 PicoC-Shrink Pass

#### 2.3.1.1.1 Aufgabe

Der Aufgabe des PicoC-Shrink Pass ist in Unterkapitel ?? ausführlich an einem Beispiel erklärt. Kurzgefasst hat der PicoC-Shrink Pass die Aufgabe, die Eigenheit auszunutzen, dass der Dereferenzierungoperator \*pntr und die damit einhergehende Zeigerarithmetik \*(pntr + i) sich in der Untermenge der Sprache  $L_C$ ,

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup>In kurz: Zeiger, Felder, Verbunde und Funktionen.

welche die Sprache  $L_{PicoC}$  darstellt genau gleich verhält, wie der Operator für den Zugriff auf den Index eines Feldes ar[i].

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

#### 2.3.1.1.2 Abstrakte Grammatik

Die Abstrakte Grammatik 2.3.1 der Sprache  $L_{PicoC\_Shrink}$  ist fast identisch mit der Abstrakten Grammatik 2.2.10 der Sprache  $L_{PicoC}$ , nach welcher der erste Abstrakte Syntaxbaum in der Syntaktischen Analyse generiert wurde. Der einzige Unterschied liegt darin, dass es den Knoten Deref(exp, exp) in Abstrakten Grammatik 2.3.1 nicht mehr gibt. Das liegt daran, dass dieser Pass alle Vorkommnisse des Knoten Deref(exp, exp) durch den Knoten Subscr(exp, exp) auswechselt, der ebenfalls nach der Abstrakten Grammatik der Sprache  $L_{PicoC}$  definiert ist.

| stmt  | ::=  | $SingleLineComment(str, str) \mid RETIComment()$   | $L_{-}Comment$     |
|---|--|--|--------------------|
| un_op<br>bin_op<br>exp                                | ::=<br>::=<br>-<br>::=<br>-<br>-<br>-<br>::= | $\begin{array}{c cccc} Minus() &   & Not() \\ Add() &   & Sub() &   & Mul() &   & Div() &   & Mod() \\ Oplus() &   & And() &   & Or() \\ Name(str) &   & Num(str) &   & Char(str) \\ BinOp(\langle exp\rangle, \langle bin\_op\rangle, \langle exp\rangle) &   & Call(Name('input'), Empty()) \\ UnOp(\langle un\_op\rangle, \langle exp\rangle) &   & Call(Name('print'), \langle exp\rangle) \\ Exp(\langle exp\rangle) & \end{array}$ | $L\_Arith$         |
| un_op<br>rel<br>bin_op<br>exp                         | ::=<br>::=<br>::=                            | $\begin{array}{c cccc} LogicNot() & & & & \\ Eq() &   & NEq() &   & Lt() &   & LtE() &   & Gt() &   & GtE() \\ LogicAnd() &   & LogicOr() & & & \\ Atom(\langle exp \rangle, \langle rel \rangle, \langle exp \rangle) &   & ToBool(\langle exp \rangle) & & & \end{array}$  | $L\_Logic$         |
| type_qual<br>datatype<br>exp<br>stmt                  | ::=<br>::=<br>::=                            | $Const() \mid Writeable()$<br>$IntType() \mid CharType() \mid VoidType()$<br>$Alloc(\langle type\_qual \rangle, \langle datatype \rangle, Name(str))$<br>$Assign(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle)$  | $L\_Assign\_Alloc$ |
| $\begin{array}{c} datatype \\ exp \end{array}$        | ::=<br>::=                                   | $PntrDecl(Num(str), \langle datatype \rangle)$<br>$Deref(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle) \mid Ref(\langle exp \rangle)$  | $L\_Pntr$          |
| $\begin{array}{c} datatype \\ exp \end{array}$        | ::=  | $\begin{array}{ll} ArrayDecl(Num(str)+,\langle datatype\rangle) \\ Subscr(\langle exp\rangle,\langle exp\rangle) &   & Array(\langle exp\rangle+) \end{array}$   | $L\_Array$         |
| datatype<br>exp<br>decl_def                           | ::=<br>::=<br> <br>::=                       | $StructSpec(Name(str)) \\ Attr(\langle exp \rangle, Name(str)) \\ Struct(Assign(Name(str), \langle exp \rangle) +) \\ StructDecl(Name(str), \\ Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) +) \\$  | $L\_Struct$        |
| stmt  | ::=  | $If(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$ $IfElse(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *, \langle stmt \rangle *)$  | $L\_If\_Else$      |
| stmt  | ::=  | $While(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *) \\ DoWhile(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$   | $L\_Loop$          |
| $\begin{array}{c} exp\\ stmt\\ decl\_def \end{array}$ | ::= ::=                                      | $Call(Name(str), \langle exp \rangle *)$ $Return(\langle exp \rangle)$ $FunDecl(\langle datatype \rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) *)$ $FunDef(\langle datatype \rangle, Name(str),$ $Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) *, \langle stmt \rangle *)$  | $L\_Fun$           |
| file  | ::=  | $File(Name(str), \langle decl\_def \rangle *)$   | $L\_File$          |

Grammatik 2.3.1: Abstrakte Grammatik der Sprache  $L_{PiocC\_Shrink}$ 

# Anmerkung Q

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

#### 2.3.1.1.3 Codebeispiel

In den nächsten Unterkapiteln wird das Beispiel in Code 2.6 zur Anschauung der verschiedenen Passes

verwendet. Im Code 2.6 ist in der Funktion faculty ein iterativer Algorithmus implementiert, der die Fakultät eines übergebenen Arguments berechnet. Der Algorithmus basiert auf einem Beispielprogramm aus der Vorlesung Scholl, "Betriebssysteme", welcher in der Vorlesung allerdings rekursiv implementiert ist.

Dieser rekursive Algoirthmus ist allerdings kein gutes Anschaungsbeispiel, dass viele der Aufgaben der verschiedenen Passes bei der Kompilierung veranschaulicht hätte. Viele Aufgaben der Passes, wie z.B. bei der Kompilierung von if-, if-else-, while- und do-while-Statements wären im Beispiel aus der Vorlesung nicht enthalten gewesen. Daher wurde das Beispiel aus der Vorlesung zu einem iterativen Algorithmus 2.6 umgeschrieben, um if- und while-Statemtens zu enthalten.

Beide Varianten des Algorithmus wurden zum Testen des PicoC-Compilers verwendet und sind als Tests im Ordner /tests unter Link<sup>22</sup>, unter den Testbezeichnungen example\_faculty\_rec.picoc und example\_faculty\_it.picoc zu finden.

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

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

Code 2.6: PicoC Code für Codebespiel.

In Code 2.7 sieht man den Abstrakten Syntaxbaum, der in der Syntaktischen Analyse generiert wurde.

```
1 File
2  Name './example_faculty_it.ast',
3  [
4   FunDef
5   IntType 'int',
6   Name 'faculty',
7  [
```

 $<sup>^{22}</sup>$ https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/tree/new\_architecture/tests.

```
Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('n'))
 9
         ],
10
         Γ
11
           Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('res')), Num('1')),
12
           While
13
             Num '1',
14
             Γ
               Ιf
16
                 Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')),
17
18
                    Return(Name('res'))
19
20
               Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
21
               Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
22
23
         ],
24
       FunDef
25
         VoidType 'void',
26
         Name 'main',
27
         [],
28
         Γ
           Exp(Call(Name('print'), [Call(Name('faculty'), [Num('4')])))
29
30
31
     ]
```

Code 2.7: Abstrakter Syntaxbaum für Codebespiel.

Im PicoC-Shrink-Pass ändert sich nichts im Vergleich zum Abstrakten Syntaxbaum in Code 2.7, da das Codebeispiel keine Dereferenzierung enthält.

#### 2.3.1.2 PicoC-Blocks Pass

#### 2.3.1.2.1 Aufgabe

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

#### 2.3.1.2.2 Abstrakte Grammatik

Zur Umsetzung dieses Passes ist es notwendig die Abstrakte Grammatik 2.3.1 der Sprache  $L_{PicoC\_Shrink}$  um die Knoten zu erweitern, die im Unterkapitel 2.3.1.2.1 erwähnt wurden. Die Knoten If(exp, stmts), While(exp, stmts) und DoWhile(exp, stmts) gibt es nicht mehr, da sie durch Block(name, stmts\_instrs-, GoTo(lable)-und IfElse(exp, stmts1, stmts2)-Knoten ersetzt wurden. Die Funktionsdefinition FunDef( $\langle datatype \rangle$ , Name(str), Alloc(Writeable(),  $\langle datatype \rangle$ , Name(str))\*,  $\langle block \rangle$ \*) ist nun ein Container für Blöcke Block(Name(str),  $\langle stmt \rangle$ \*) und keine Statements stmt mehr. Das resultiert in der Abstrakten Grammatik 2.3.2 der Sprache  $L_{PicoC\_Blocks}$ .

| stmt            | ::= | $SingleLineComment(str, str) \mid RETIComment()$  | $L\_Comment$       |
|-----------------|-----|---|--------------------|
| un_op           | ::= | $Minus() \mid Not()$  | $L\_Arith$         |
| $bin\_op$       | ::= | $Add() \mid Sub() \mid Mul() \mid Div() \mid Mod()$<br>$Oplus() \mid And() \mid Or()$   |                    |
| exp             | ::= | $Name(str) \mid Num(str) \mid Char(str)$  |                    |
|                 |     | $BinOp(\langle exp \rangle, \langle bin\_op \rangle, \langle exp \rangle)$  |                    |
|                 |     | $UnOp(\langle un\_op \rangle, \langle exp \rangle) \mid Call(Name('input'), Empty())$<br>$Call(Name('print'), \langle exp \rangle)$ |                    |
| stmt            | ::= | $Exp(\langle exp \rangle)$  |                    |
| un_op           | ::= | LogicNot()  | $L\_Logic$         |
| rel             | ::= | $Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt() \mid GtE()$   |                    |
| $bin\_op$       | ::= | $LogicAnd() \mid LogicOr()$   |                    |
| exp             | ::= | $Atom(\langle exp \rangle, \langle rel \rangle, \langle exp \rangle) \mid ToBool(\langle exp \rangle)$                              |                    |
| type_qual       | ::= | Const()   Writeable()   | $L\_Assign\_Alloc$ |
| datatype        | ::= | $IntType() \mid CharType() \mid VoidType()$   |                    |
| exp $stmt$      | ::= | $Alloc(\langle type\_qual \rangle, \langle datatype \rangle, Name(str))$<br>$Assign(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle)$      |                    |
|                 |     |   | T. D. (            |
| datatype        | ::= | $PntrDecl(Num(str), \langle datatype \rangle)$  | $L\_Pntr$          |
| exp             | ::= | $Ref(\langle exp \rangle)$  |                    |
| datatype        | ::= | $ArrayDecl(Num(str)+,\langle datatype\rangle)$  | $L\_Array$         |
| exp             | ::= | $Subscr(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle) \mid Array(\langle exp \rangle +)$  |                    |
| datatype        | ::= | StructSpec(Name(str))   | $L\_Struct$        |
| exp             | ::= | $Attr(\langle exp \rangle, Name(str))$  |                    |
| $decl\_def$     | ::= | $Struct(Assign(Name(str), \langle exp \rangle) +)$<br>StructDecl(Name(str),   |                    |
| acci_acj        | ••- | $Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str))+)$   |                    |
| stmt            | ::= | $If(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$   | L_If_Else          |
|                 |     | $IfElse(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *, \langle stmt \rangle *)$   | •                  |
| stmt            | ::= | $While(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$  | $L\_Loop$          |
|                 |     | $DoWhile(\langle exp \rangle, \langle stmt \rangle *)$  |                    |
| exp             | ::= | $Call(Name(str), \langle exp \rangle *)$  | L_Fun              |
| stmt            | ::= | $Return(\langle exp \rangle)$   |                    |
| $decl\_def$     | ::= | $FunDecl(\langle datatype \rangle, Name(str),$  |                    |
|                 | 1   | $Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str))*)$   |                    |
|                 |     | $FunDef(\langle datatype \rangle, Name(str), \\ Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str))*, \langle block \rangle*)$  |                    |
| 11 1            |     |   | T D1 1             |
| $block \\ stmt$ | ::= | $Block(Name(str), \langle stmt \rangle *)$<br>GoTo(Name(str))   | $L\_Blocks$        |
|                 | ::= | (   | T 700              |
| file            | ::= | $File(Name(str), \langle decl\_def \rangle *)$  | $L_{-}File$        |

Grammatik 2.3.2: Abstrakte Grammatik der Sprache  $L_{PiocC\_Blocks}$ 

# Anmerkung Q

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

Die Abstrakte Grammatik soll im Gegensatz zur Konkreten Grammatik meist nur vom Programmierer verstanden werden, der den Compiler implementiert und sollte daher vor allem einfach verständlich sein und stellt daher eine Obermenge aller tatsächlich möglichen Kompositionen von Knoten dar<sup>a</sup>.

<sup>a</sup>D.h. auch wenn dort **exp** als **Attribut** steht, kann dort nicht jeder Knoten, der sich aus der **Produktion exp** ergibt auch wirklich eingesetzt werden.

#### 2.3.1.2.3 Codebeispiel

In Code 2.8 sieht man den Abstrakten Syntaxbaum des PiocC-Blocks Passes für das aus Unterkapitel 2.6 weitergeführte Beispiel, indem nun eigene Blöcke für die Funktion faculty und die main-Funktion erstellt werden, in denen die ersten Statements der jeweiligen Funktionen bis zum letzten Statement oder bis zum ersten Auftauchen eines If(exp, stmts)-, IfElse(exp, stmts1, stmts2)-, While(exp, stmts)-Knoten stehen. Je nachdem, ob ein If(exp, stmts)-, IfElse(exp, stmts1, stmts2)-, While(exp, stmts)- oder DoWhile(exp, stmts)- Knoten auftaucht, werden für die Bedingung und mögliche Branches eigene Blöcke erstellt.

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

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

Code 2.8: PicoC-Blocks Pass für Codebespiel.

#### 2.3.1.3 PicoC-ANF Pass

#### 2.3.1.3.1 Aufgabe

Die Aufgabe des PicoC-ANF Passes ist es den Abstrakten Syntaxbaum der Sprache  $L_{PicoC\_Blocks}$  in die Abstrakte Grammatik der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}$  umzuformen, welche in A-Normalform (Definition 1.52) und damit auch in Monadischer Normalform (Definition 1.48) ist. Um Wiederholung zu vermeiden wird zur Erklärung der A-Normalform auf Unterkapitel 1.5.2 verwiesen.

Zudem wird eine Symboltabelle (Definition 2.8) eingeführt. In der Symboltabelle wird beim Anlegen eines neuen Eintrags für eine Variable zunächst eine Adresse zugewiesen, die dem Wert einer von zwei Countern rel\_global\_addr und rel\_stack\_addr entspricht. Der Counter rel\_global\_addr ist für Variablen in den Globalen Statischen Daten und der Counter rel\_stack\_addr ist für Variablen auf dem Stackframe. Einer der beiden Counter wird entsprechend der Größe der angelegten Variable hochgezählt.

Kommt im Programmcode an einer späteren Stelle diese Variable Name('symbol') vor, so wird mit dem Symbol<sup>23</sup> als Schlüssel in der Symboltabelle nachgeschlagen und anstelle des Name(str)-Knotens die in

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup>Bzw. der Bezeichner

der Symboltabelle nachgeschlagene Adresse in einem Global(Num('addr'))- bzw. Stackframe(Num('addr'))- Knoten eingesetzt eingefügt. Ob der Global(Num('addr'))- oder der Stackframe(Num('addr'))-Knoten zum Einsatz kommt, entscheidet sich anhand des Sichtbarkeitsbereichs (z.B. @scope), der in der Symboltabelle an den Bezeichner drangehängt ist (z.B. identifier@scope).<sup>24</sup>

#### Definition 2.8: Symboltabelle

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

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

<sup>a</sup>In einer Symboltabelle werden Bezeichner als Symbole bezeichnet.

#### 2.3.1.3.2 Abstrakte Grammatik

Zur Umsetzung dieses Passes ist es notwendig die Abstrakte Grammatik 2.3.2 der Sprache  $L_{PicoC\_Blocks}$  in die A-Normalform zu bringen. Darunter fällt es unter anderem, dafür zu sorgen, dass Komplexe Knoten, wie z.B. BinOp(exp, bin\_op, exp) nur Atomare Knoten, wie z.B. Stack(Num(str)) enthalten können. Des Weiteren werden auch Funktionen und Funktionsaufrufe aufgelöst, sodass u.a. die Blöcke Block(Name(str), stmt\*) nun direkt im File(Name(str), block\*)-Knoten liegen usw., was in Unterkapitel ?? genauer erklärt wird. Die Symboltabelle ist ebenfalls als Abstrakter Syntaxbaum umgesetzt, wofür in der Abstrakten Grammatik 2.3.3 der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}$  der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}$  neue Knoten eingeführt werden.

Das ganze resultiert in der Abstrakten Grammatik 2.3.3 der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}$ .

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup>Die Umsetzung von Sichtbarkeitsbereichen wird in Unterkapitel?? genauer beschrieben.

```
RETIComment()
                                                                                                               L_{-}Comment
stmt
                        SingleLineComment(str, str)
                 ::=
                                                                                                               L_Arith
un\_op
                 ::=
                        Minus()
                                        Not()
bin\_op
                 ::=
                        Add()
                                  Sub()
                                                 Mul() \mid Div() \mid
                                                                           Mod()
                                                 Or()
                        Oplus()
                                   And()
                        Name(str) \mid Num(str) \mid Char(str) \mid Global(Num(str))
exp
                        Stackframe(Num(str)) \mid Stack(Num(str))
                        BinOp(Stack(Num(str)), \langle bin\_op \rangle, Stack(Num(str)))
                        UnOp(\langle un\_op \rangle, Stack(Num(str))) \mid Call(Name('input'), Empty())
                        Call(Name('print'), \langle exp \rangle)
                        Exp(\langle exp \rangle)
                        LogicNot()
                                                                                                               L\_Logic
un\_op
                 ::=
                        Eq() \mid NEq() \mid Lt() \mid LtE() \mid Gt()
rel
                                                                                    GtE()
                 ::=
                        LogicAnd()
                                           LogicOr()
bin\_op
                 ::=
                        Atom(Stack(Num(str)), \langle rel \rangle, Stack(Num(str)))
exp
                 ::=
                        ToBool(Stack(Num(str)))
type\_qual
                        Const()
                                       Writeable()
                                                                                                               L\_Assign\_Alloc
                 ::=
                        IntType() \mid CharType() \mid VoidType()
datatype
                 ::=
exp
                        Alloc(\langle type\_qual \rangle, \langle datatype \rangle, Name(str))
                  ::=
                        Assign(Global(Num(str)), Stack(Num(str)))
stmt
                  ::=
                        Assign(Stackframe(Num(str)), Stack(Num(str)))
                        Assign(Stack(Num(str)), Global(Num(str)))
                        Assign(Stack(Num(str)), Stackframe(Num(str)))
                        PntrDecl(Num(str), \langle datatype \rangle)
                                                                                                               L_{-}Pntr
datatype
                 ::=
                        Ref(Global(str)) \mid Ref(Stackframe(str))
                                                       |Ref(Attr(\langle exp \rangle, Name(str)))|
                        Ref(Subscr(\langle exp \rangle, \langle exp \rangle))
                        ArrayDecl(Num(str)+, \langle datatype \rangle)
                                                                                                               L_-Array
datatupe
                 ::=
                        Subscr(\langle exp \rangle, Stack(Num(str)))
                                                                    Array(\langle exp \rangle +)
exp
                 ::=
datatype
                        StructSpec(Name(str))
                                                                                                               L_-Struct
                 ::=
                        Attr(\langle exp \rangle, Name(str))
exp
                  ::=
                        Struct(Assign(Name(str), \langle exp \rangle) +)
decl\_def
                        StructDecl(Name(str),
                  ::=
                              Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str)) +)
                        IfElse(Stack(Num(str)), \langle stmt \rangle *, \langle stmt \rangle *)
                                                                                                               L_If_Else
stmt
                 ::=
                        Call(Name(str), \langle exp \rangle *)
                                                                                                               L_{-}Fun
exp
                 ::=
                        StackMalloc(Num(str)) \mid NewStackframe(Name(str), GoTo(str))
stmt
                 ::=
                        Exp(GoTo(Name(str))) \mid RemoveStackframe()
                        Return(Empty()) \mid Return(\langle exp \rangle)
decl\_def
                        FunDecl(\langle datatype \rangle, Name(str))
                 ::=
                              Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str))*)
                        FunDef(\langle datatype \rangle, Name(str),
                              Alloc(Writeable(), \langle datatype \rangle, Name(str))*, \langle block \rangle*)
block
                        Block(Name(str), \langle stmt \rangle *)
                                                                                                               L\_Blocks
                 ::=
stmt
                        GoTo(Name(str))
                  ::=
                                                                                                               L_File
file
                        File(Name(str), \langle block \rangle *)
symbol\_table
                        SymbolTable(\langle symbol \rangle *)
                                                                                                               L\_Symbol\_Table
                 ::=
                        Symbol(\langle type\_qual \rangle, \langle datatype \rangle, \langle name \rangle, \langle val \rangle, \langle pos \rangle, \langle size \rangle)
symbol
                 ::=
                        Empty()
type\_qual
                 ::=
datatype
                 ::=
                        BuiltIn()
                                         SelfDefined()
                        Name(str)
name
                  ::=
val
                        Num(str)
                                          Empty()
                 ::=
                        Pos(Num(str), Num(str))
                                                          \perp Empty()
pos
                  ::=
                        Num(str)
                                         Empty()
size
                                                                                                                                71
```

#### 2.3.1.3.3 Codebeispiel

In Code 2.9 sieht man den Abstrakten Syntaxbaum des PiocC-ANF Passes für das aus Unterkapitel 2.6 weitergeführte Beispiel, indem alls Statements und Ausdrücke in A-Normalform sind. Die IfElse(exp, stmts, stmts)-Knoten sind hier in A-Normalform gebracht worden, indem ihre Komplexe Bedingung vorgezogen wurde und das Ergebnis der Komplexen Bedingung einer Location zugewiesen ist und sie selbst das Ergebnis über den Atomaren Ausdruck Stack(Num(str)) vom Stack lesen: IfElse(Stack(Num(str)), stmts, stmts). Funktionen sind nur noch über die Labels von Blöcken zu erkennen, die den gleichen Bezeichner haben, wie die ursprüngliche Funktion und es lässt sich nur durch das Nachverfolgen der GoTo(Name('label'))-Knoten nachvollziehen, was ursprünglich zur Funktion gehörte.

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

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

Code 2.9: Pico C-ANF Pass für Codebespiel.

#### 2.3.1.4 RETI-Blocks Pass

#### 2.3.1.4.1 Aufgabe

Die Aufgabe des RETI-Blocks Passes ist es die Statements in den Blöcken, die durch PicoC-Knoten im Abstrakten Syntaxbaum der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}$  dargestellt sind durch ihren entsprechenden RETI-Knoten zu ersetzen.

#### 2.3.1.4.2 Abstrakte Grammatik

Die Abstrakte Grammatik 2.3.4 der Sprache  $L_{RETI\_Blocks}$  ist verglichen mit der Abstrakten Grammatik 2.3.3 der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}$  stark verändert, denn der Großteil der PicoC-Knoten wird in diesem Pass durch entsprechende RETI-Knoten ersetzt. Die einzigen verbleibenden PicoC-Knoten sind Exp(GoTo(str)),

Block(Name(str), (instr)\*) und File(Name(str), (block)\*), da das gesamte Konzept mit den Blöcken erst im RETI-Pass in Unterkapitel 2.3.8 aufgelöst wird.

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

Grammatik 2.3.4: Abstrakte Grammatik der Sprache  $L_{RETI\_Blocks}$ 

#### 2.3.1.4.3 Codebeispiel

In Code 2.10 sieht man den Abstrakten Syntaxbaum des RETI-Blocks Passes für das aus Unterkapitel 2.6 weitergeführte Beispiel, indem die Statements, die durch entsprechende PicoC-Knoten im Abstrakten Syntaxbaum der Sprache  $L_{PicoC\_ANF}^{25}$  repräsentiert waren nun durch ihre entsprechennden RETI-Knoten ersetzt werden.

```
File
 2
    Name './example_faculty_it.reti_blocks',
     Γ
       Block
         Name 'faculty.6',
 6
7
8
9
           # // Assign(Name('res'), Num('1'))
           # Exp(Num('1'))
           SUBI SP 1;
10
           LOADI ACC 1;
11
           STOREIN SP ACC 1;
12
           # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
13
           LOADIN SP ACC 1;
14
           STOREIN BAF ACC -3;
15
           ADDI SP 1:
16
           # // While(Num('1'), [])
17
           # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
18
           Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
19
         ],
20
       Block
21
         Name 'condition_check.5',
         [
```

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup>Beschrieben durch die Grammatik 2.3.3.

```
# // IfElse(Num('1'), [], [])
24
           # Exp(Num('1'))
25
           SUBI SP 1;
26
           LOADI ACC 1;
27
           STOREIN SP ACC 1;
28
           # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
29
           LOADIN SP ACC 1;
30
           ADDI SP 1;
31
           JUMP== GoTo(Name('while_after.1'));
32
           Exp(GoTo(Name('while_branch.4')))
33
         ],
34
       Block
         Name 'while_branch.4',
36
         Γ
37
           # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
38
           # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
39
           # Exp(Stackframe(Num('0')))
40
           SUBI SP 1;
41
           LOADIN BAF ACC -2;
           STOREIN SP ACC 1;
42
43
           # Exp(Num('1'))
44
           SUBI SP 1;
45
           LOADI ACC 1;
46
           STOREIN SP ACC 1;
47
           LOADIN SP ACC 2;
48
           LOADIN SP IN2 1;
49
           SUB ACC IN2;
50
           JUMP== 3;
51
           LOADI ACC 0;
52
           JUMP 2;
53
           LOADI ACC 1;
54
           STOREIN SP ACC 2;
55
           ADDI SP 1;
56
           # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
57
           LOADIN SP ACC 1;
58
           ADDI SP 1;
59
           JUMP== GoTo(Name('if_else_after.2'));
60
           Exp(GoTo(Name('if.3')))
61
         ],
62
       Block
63
         Name 'if.3',
64
         Ε
65
           # // Return(Name('res'))
66
           # Exp(Stackframe(Num('1')))
67
           SUBI SP 1;
68
           LOADIN BAF ACC -3;
69
           STOREIN SP ACC 1;
70
           # Return(Stack(Num('1')))
71
           LOADIN SP ACC 1;
72
           ADDI SP 1;
73
           LOADIN BAF PC -1;
74
        ],
75
       Block
76
         Name 'if_else_after.2',
           # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
           # Exp(Stackframe(Num('0')))
```

```
SUBI SP 1;
81
           LOADIN BAF ACC -2;
82
           STOREIN SP ACC 1;
83
           # Exp(Stackframe(Num('1')))
           SUBI SP 1;
85
           LOADIN BAF ACC -3;
86
           STOREIN SP ACC 1;
87
           # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
88
           LOADIN SP ACC 2;
89
           LOADIN SP IN2 1;
90
           MULT ACC IN2;
91
           STOREIN SP ACC 2;
92
           ADDI SP 1;
93
           # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
94
           LOADIN SP ACC 1;
95
           STOREIN BAF ACC -3;
96
           ADDI SP 1;
97
           # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
98
           # Exp(Stackframe(Num('0')))
99
           SUBI SP 1;
00
           LOADIN BAF ACC -2;
L01
           STOREIN SP ACC 1;
102
           # Exp(Num('1'))
103
           SUBI SP 1;
104
           LOADI ACC 1;
105
           STOREIN SP ACC 1;
106
           # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
107
           LOADIN SP ACC 2;
108
           LOADIN SP IN2 1;
109
           SUB ACC IN2;
110
           STOREIN SP ACC 2;
111
           ADDI SP 1;
           # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
113
           LOADIN SP ACC 1;
           STOREIN BAF ACC -2;
114
115
           ADDI SP 1;
116
           # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
117
           Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
118
         ],
119
       Block
120
         Name 'while_after.1',
L21
         Ε
           # Return(Empty())
123
           LOADIN BAF PC -1;
124
         ],
L25
       Block
126
         Name 'main.0',
L27
128
           # StackMalloc(Num('2'))
129
           SUBI SP 2;
130
           # Exp(Num('4'))
131
           SUBI SP 1;
132
           LOADI ACC 4;
133
           STOREIN SP ACC 1;
134
           # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
           MOVE BAF ACC;
           ADDI SP 3;
```

```
MOVE SP BAF;
           SUBI SP 4;
.39
           STOREIN BAF ACC 0;
           LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
           ADD ACC CS;
           STOREIN BAF ACC -1;
43
           # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
L44
           Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
L45
           # RemoveStackframe()
146
           MOVE BAF IN1;
L47
           LOADIN IN1 BAF 0;
48
           MOVE IN1 SP;
49
           # Exp(ACC)
150
           SUBI SP 1;
151
           STOREIN SP ACC 1;
152
           LOADIN SP ACC 1;
153
           ADDI SP 1;
154
           CALL PRINT ACC;
L55
            # Return(Empty())
156
           LOADIN BAF PC -1;
L57
158
```

Code 2.10: RETI-Blocks Pass für Codebespiel.

# Anmerkung 9

Wenn der Abstrakte Syntaxbaum ausgegeben wird, ist die Darstellung nicht auschließlich in Abstrakter Syntax, da die RETI-Knoten aus bereits im Unterkapitel 2.2.5.6 vermitteltem Grund in Konkreter Syntax ausgeben werden.

#### 2.3.1.5 RETI-Patch Pass

#### 2.3.1.5.1 Aufgabe

Die Aufgabe des RETI-Patch Passes ist das Ausbessern (engl. to patch) des Abstrakten Syntaxbaumes, durch:

- das Einfügen eines start.<nummer>-Blockes, welcher ein GoTo(Name('main')) zur main-Funktion enthält, wenn in manchen Fällen die main-Funktion nicht die erste Funktion ist und daher am Anfang zur main-Funktion gesprungen werden muss.
- das Entfernen von GoTo()'s, deren Sprung nur eine Adresse weiterspringen würde.
- das Voranstellen von RETI-Knoten, die vor jeder Division Instr(Div(), args) prüfen, ob, nicht durch 0 geteilt wird.<sup>26</sup>
- das Überprüfen darauf, ob bestimmte Immediates Im(str) in Befehlen, wie z.B. Jump(rel, Im(str)), Instr(Loadin(), [reg, reg, Im(str)]), Instr(Loadi(), [reg, Im(str)]) usw. kleiner -2<sup>21</sup> oder größer 2<sup>21</sup> 1 sind. Im Fall dessen, dass es so ist, muss der gewünschte Zahlenwert durch Bitshiften und Anwenden von bitweise Oder berechnet werden. Im Fall, dessen, dass der Immediate allerdings kleiner -(2<sup>31</sup>) oder größer 2<sup>31</sup> 1 ist, wird eine Fehlermeldung TooLargeLiteral ausgegeben.

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup>Das fällt unter die Themenbereiche des Bachelorprojekts und wird daher nicht genauer erläutert.

#### 2.3.1.5.2 Abstrakte Grammatik

Die Abstrakte Grammatik 2.3.5 der Sprache  $L_{RETI\_Patch}$  ist im Vergleich zur Abstrakten Grammatik 2.3.4 der Sprache  $L_{RETI\_Blocks}$  kaum verändert. Es muss nur ein Knoten Exit() hinzugefügt werden, der im Falle einer Division durch 0 die Ausführung des Programs beendet.

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

Grammatik 2.3.5: Abstrakte Grammatik der Sprache L<sub>RETI\_Patch</sub>

#### 2.3.1.5.3 Codebeispiel

In Code 2.11 sieht man den Abstrakten Syntaxbaum des PiocC-Patch Passes für das aus Unterkapitel 2.6 weitergeführte Beispiel. Durch den RETI-Patch Pass wurde hier ein start. <nummer>-Block<sup>27</sup> eingesetzt, da die main-Funktion nicht die erste Funktion ist. Des Weiteren wurden durch diesen Pass einzelne GoTo(Name(str))-Statements entfernt<sup>28</sup>, die nur einen Sprung um eine Position entsprochen hätten.

```
File
    Name './example_faculty_it.reti_patch',
     Γ
       Block
         Name 'start.7',
 7
8
9
           # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
           Exp(GoTo(Name('main.0')))
         ],
10
       Block
11
         Name 'faculty.6',
12
13
           # // Assign(Name('res'), Num('1'))
           # Exp(Num('1'))
15
           SUBI SP 1;
16
           LOADI ACC 1:
           STOREIN SP ACC 1;
17
18
           # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
```

 $<sup>^{27}\</sup>mathrm{Dieser}$ Block wurde im Code 2.8 markiert.

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup>Diese entfernten GoTo(Name(str))'s' wurden ebenfalls im Code 2.8 markiert.

```
LOADIN SP ACC 1;
20
           STOREIN BAF ACC -3;
21
           ADDI SP 1;
           # // While(Num('1'), [])
           # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
24
           # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
25
         ],
26
       Block
27
         Name 'condition_check.5',
28
29
           # // IfElse(Num('1'), [], [])
30
           # Exp(Num('1'))
           SUBI SP 1;
32
           LOADI ACC 1;
33
           STOREIN SP ACC 1;
34
           # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
35
           LOADIN SP ACC 1;
36
           ADDI SP 1;
37
           JUMP== GoTo(Name('while_after.1'));
38
           # // not included Exp(GoTo(Name('while_branch.4')))
39
         ],
40
       Block
41
         Name 'while_branch.4',
42
43
           # // If(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [])
44
           # // IfElse(Atom(Name('n'), Eq('=='), Num('1')), [], [])
45
           # Exp(Stackframe(Num('0')))
46
           SUBI SP 1;
47
           LOADIN BAF ACC -2;
48
           STOREIN SP ACC 1;
           # Exp(Num('1'))
50
           SUBI SP 1;
51
           LOADI ACC 1;
52
           STOREIN SP ACC 1;
53
           LOADIN SP ACC 2;
54
           LOADIN SP IN2 1;
55
           SUB ACC IN2;
56
           JUMP== 3;
57
           LOADI ACC 0;
58
           JUMP 2;
59
           LOADI ACC 1;
60
           STOREIN SP ACC 2;
61
           ADDI SP 1;
62
           # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
63
           LOADIN SP ACC 1;
64
           ADDI SP 1;
65
           JUMP== GoTo(Name('if_else_after.2'));
66
           # // not included Exp(GoTo(Name('if.3')))
67
         ],
68
       Block
69
         Name 'if.3',
70
71
           # // Return(Name('res'))
           # Exp(Stackframe(Num('1')))
           SUBI SP 1;
           LOADIN BAF ACC -3;
           STOREIN SP ACC 1;
```

```
76
           # Return(Stack(Num('1')))
77
           LOADIN SP ACC 1;
78
           ADDI SP 1;
79
           LOADIN BAF PC -1;
80
         ],
81
       Block
82
         Name 'if_else_after.2',
83
84
           # // Assign(Name('res'), BinOp(Name('n'), Mul('*'), Name('res')))
85
           # Exp(Stackframe(Num('0')))
86
           SUBI SP 1;
87
           LOADIN BAF ACC -2;
88
           STOREIN SP ACC 1;
89
           # Exp(Stackframe(Num('1')))
90
           SUBI SP 1;
91
           LOADIN BAF ACC -3;
92
           STOREIN SP ACC 1;
93
           # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
94
           LOADIN SP ACC 2:
95
           LOADIN SP IN2 1;
96
           MULT ACC IN2;
97
           STOREIN SP ACC 2;
98
           ADDI SP 1;
99
           # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
100
           LOADIN SP ACC 1;
01
           STOREIN BAF ACC -3:
           ADDI SP 1:
102
103
           # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
104
           # Exp(Stackframe(Num('0')))
           SUBI SP 1;
106
           LOADIN BAF ACC -2;
L07
           STOREIN SP ACC 1;
108
           # Exp(Num('1'))
109
           SUBI SP 1;
L10
           LOADI ACC 1;
111
           STOREIN SP ACC 1;
112
           # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
113
           LOADIN SP ACC 2;
114
           LOADIN SP IN2 1;
115
           SUB ACC IN2;
           STOREIN SP ACC 2;
116
17
           ADDI SP 1;
18
           # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
L19
           LOADIN SP ACC 1;
120
           STOREIN BAF ACC -2;
l21
           ADDI SP 1;
122
           # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
123
           Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
124
         ],
L25
       Block
L26
         Name 'while_after.1',
L27
128
           # Return(Empty())
L29
           LOADIN BAF PC -1;
130
         ],
l31
       Block
132
         Name 'main.0',
```

```
Γ
            # StackMalloc(Num('2'))
            SUBI SP 2;
            # Exp(Num('4'))
            SUBI SP 1;
137
138
            LOADI ACC 4;
139
            STOREIN SP ACC 1;
L40
            # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
L41
            MOVE BAF ACC;
142
            ADDI SP 3;
143
           MOVE SP BAF;
44
            SUBI SP 4;
45
            STOREIN BAF ACC 0;
146
           LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
47
            ADD ACC CS;
148
            STOREIN BAF ACC -1;
149
            # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
150
            Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
L51
            # RemoveStackframe()
            MOVE BAF IN1;
152
153
           LOADIN IN1 BAF O;
154
            MOVE IN1 SP;
155
            # Exp(ACC)
156
            SUBI SP 1;
157
            STOREIN SP ACC 1;
158
            LOADIN SP ACC 1;
            ADDI SP 1;
159
160
            CALL PRINT ACC;
161
            # Return(Empty())
62
            LOADIN BAF PC -1;
163
         ]
164
     ]
```

Code 2.11: RETI-Patch Pass für Codebespiel.

#### 2.3.1.6 RETI Pass

#### 2.3.1.6.1 Aufgabe

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

#### 2.3.1.6.2 Konkrete und Abstrakte Grammatik

Die Abstrakte Grammatik 2.3.8 der Sprache  $L_{RETI}$  hat im Vergleich zur Abstrakten Grammatik 2.3.5 der Sprache  $L_{RETI\_Patch}$  nur noch auschließlich **RETI-Knoten**. Alle **RETI-Knoten** stehen nun in einem Program(Name(str), instr)-Knoten.

Ausgegeben wird der finale Maschinencode allerdings in Konkreter Syntax, die durch die Konkreten Grammatiken 2.3.6 und 2.3.7 für jeweils die Lexikalische und Syntaktische Analyse beschrieben wird. Der Grund, warum die Konkrete Grammatik der Sprache  $L_{RETI}$  auch nochmal in einen Teil für die Lexikalische und Syntaktische Analyse unterteilt ist, hat den Grund, dass für die Bachelorarbeit zum

Testen des PicoC-Compilers ein RETI-Interpreter implementiert wurde, der den RETI-Code lexen und parsen muss, um ihn später interpretieren zu können.

```
"6"
dig\_no\_0
                                                                       L_Program
                 "7"
                          "8"
                                  "<sub>9"</sub>
                 "0"
dig_with_0
            ::=
                          dig\_no\_0
                 "0"
                         dig\_no\_0 dig\_with\_0* | "-"dig\_no\_0*
num
            ::=
                 "a"..."Z"
letter
            ::=
                 letter(letter \mid dig\_with\_0 \mid \_)*
name
                 "ACC"
                             "IN1" | "IN2"
                                                |"PC""|"SP"
reg
            ::=
                             "CS" | "DS"
                 "BAF"
arg
            ::=
                 reg
                         num
                            "!=" | "<" | "<=" | ">"
rel
            ::=
                  ">="
                            "\_NOP"
```

Grammatik 2.3.6: Konkrete Grammatik der Sprache L<sub>RETI</sub> für die Lexikalische Analyse in EBNF

```
"ADDI" reg num |
                                               "SUB" \ reg \ arg
             "ADD" reg arg
                                                                     L_Program
instr
        ::=
             "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
             name (instr";")*
program
        ::=
```

Grammatik 2.3.7: Konkrete Grammatik der Sprache L<sub>BETI</sub> für die Syntaktische Analyse in EBNF

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

Grammatik 2.3.8: Abstrakte Grammatik der Sprache  $L_{RETI}$ 

#### 2.3.1.6.3 Codebeispiel

Nach dem RETI-Pass ist das Programm komplett in RETI-Knoten übersetzt, die allerdings in ihrer Konkreten Syntax ausgegeben werden, wie in Code 2.12 zu sehen ist. Es gibt keine Blöcke mehr und die RETI-Befehle in diesen Blöcken wurden zusammengesetzt, wie sie in den Blöcken angeordnet waren. Die letzten Nicht-RETI-Befehle oder RETI-Befehle, die nicht auschließlich aus RETI-Ausdrücken bestehen<sup>29</sup>, die sich in den Blöcken befunden haben, wurden durch RETI-Befehle ersetzt.

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

```
# // Exp(GoTo(Name('main.0')))
 2 JUMP 67;
 3 # // Assign(Name('res'), Num('1'))
 4 # Exp(Num('1'))
 5 SUBI SP 1;
 6 LOADI ACC 1;
 7 STOREIN SP ACC 1;
 8 # Assign(Stackframe(Num('1')), Stack(Num('1')))
 9 LOADIN SP ACC 1;
10 STOREIN BAF ACC -3;
11 ADDI SP 1;
12 # // While(Num('1'), [])
13 # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
14 # // not included Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
15 # // IfElse(Num('1'), [], [])
16 # Exp(Num('1'))
17 SUBI SP 1;
18 LOADI ACC 1;
```

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup>Wie z.B. LOADI ACC GoTo(Name('addr@next\_instr')), Exp(GoTo(Name('main.0'))) und JUMP== GoTo(Name('if\_else\_after.2')).

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

```
76 ADDI SP 1;
77 # // Assign(Name('n'), BinOp(Name('n'), Sub('-'), Num('1')))
78 # Exp(Stackframe(Num('0')))
79 SUBI SP 1;
80 LOADIN BAF ACC -2;
81 STOREIN SP ACC 1;
82 # Exp(Num('1'))
83 SUBI SP 1;
84 LOADI ACC 1;
85 STOREIN SP ACC 1;
86 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
87 LOADIN SP ACC 2;
88 LOADIN SP IN2 1;
89 SUB ACC IN2;
90 STOREIN SP ACC 2;
91 ADDI SP 1;
92 # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
93 LOADIN SP ACC 1;
94 STOREIN BAF ACC -2;
95 ADDI SP 1;
96 # Exp(GoTo(Name('condition_check.5')))
97 JUMP -58;
98 # Return(Empty())
99 LOADIN BAF PC -1;
00 # StackMalloc(Num('2'))
01 SUBI SP 2;
102 # Exp(Num('4'))
103 SUBI SP 1;
104 LOADI ACC 4;
05 STOREIN SP ACC 1;
06 # NewStackframe(Name('faculty'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
107 MOVE BAF ACC;
08 ADDI SP 3;
109 MOVE SP BAF;
110 SUBI SP 4;
11 STOREIN BAF ACC 0;
12 LOADI ACC 80;
13 ADD ACC CS;
14 STOREIN BAF ACC -1;
115 # Exp(GoTo(Name('faculty.6')))
116 JUMP -78;
17 # RemoveStackframe()
18 MOVE BAF IN1;
19 LOADIN IN1 BAF 0;
20 MOVE IN1 SP;
21 # Exp(ACC)
22 SUBI SP 1;
23 STOREIN SP ACC 1;
24 LOADIN SP ACC 1;
125 ADDI SP 1;
26 CALL PRINT ACC;
27 # Return(Empty())
128 LOADIN BAF PC -1;
```

Code 2.12: RETI Pass für Codebespiel.

# Literatur

### Online

- A-Normalization: Why and How (with code). URL: https://matt.might.net/articles/a-normalization/(besucht am 23.07.2022).
- ANSI C grammar (Lex). URL: https://www.quut.com/c/ANSI-C-grammar-1-2011.html (besucht am 15.08.2022).
- ANSI C grammar (Lex) old. URL: https://www.lysator.liu.se/c/ANSI-C-grammar-l.html (besucht am 15.08.2022).
- ANSI C grammar (Yacc). URL: https://www.quut.com/c/ANSI-C-grammar-y.html (besucht am 15.08.2022).
- ANSI C grammar (Yacc) old. URL: https://www.lysator.liu.se/c/ANSI-C-grammar-y.html (besucht am 15.08.2022).
- ANTLR. URL: https://www.antlr.org/ (besucht am 31.07.2022).
- C Operator Precedence cppreference.com. URL: https://en.cppreference.com/w/c/language/operator\_precedence (besucht am 27.04.2022).
- clang: C++ Compiler. URL: http://clang.org/ (besucht am 29.07.2022).
- Clockwise/Spiral Rule. URL: https://c-faq.com/decl/spiral.anderson.html (besucht am 29.07.2022).
- Errors in C/C++ GeeksforGeeks. URL: https://www.geeksforgeeks.org/errors-in-cc/ (besucht am 10.05.2022).
- GCC, the GNU Compiler Collection GNU Project. URL: https://gcc.gnu.org/ (besucht am 13.07.2022).
- Grammar Reference Lark documentation. URL: https://lark-parser.readthedocs.io/en/latest/grammar.html (besucht am 31.07.2022).
- Grammar: The language of languages (BNF, EBNF, ABNF and more). URL: https://matt.might.net/articles/grammars-bnf-ebnf/ (besucht am 30.07.2022).
- JSON parser Tutorial Lark documentation. URL: https://lark-parser.readthedocs.io/en/latest/json\_tutorial.html (besucht am 09.07.2022).
- Ljohhuh. What is an immediate value? 4. Apr. 2018. URL: https://reverseengineering.stackexchange.com/q/17671 (besucht am 13.04.2022).
- Parsing Expressions · Crafting Interpreters. URL: https://www.craftinginterpreters.com/parsing-expressions.html (besucht am 09.07.2022).

- Transformers & Visitors Lark documentation. URL: https://lark-parser.readthedocs.io/en/latest/visitors.html (besucht am 09.07.2022).
- Welcome to Lark's documentation! Lark documentation. URL: https://lark-parser.readthedocs.io/en/latest/ (besucht am 31.07.2022).
- What is Bottom-up Parsing? URL: https://www.tutorialspoint.com/what-is-bottom-up-parsing (besucht am 22.06.2022).
- What is Top-Down Parsing? URL: https://www.tutorialspoint.com/what-is-top-down-parsing (besucht am 22.06.2022).

# Bücher

• G. Siek, Jeremy. Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513). 28. Jan. 2022. URL: https://iucompilercourse.github.io/IU-Fall-2021/ (besucht am 28.01.2022).

### Artikel

- Earley, J. und Howard E. Sturgis. "A formalism for translator interactions". In: *CACM* (1970). DOI: 10.1145/355598.362740.
- Earley, Jay. "An efficient context-free parsing". In: 13 (1968). URL: https://web.archive.org/web/20040708052627/http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs.cmu.edu/project/cmt-55/lti/Courses/711/Class-notes/p94-earley.pdf (besucht am 10.08.2022).

# Vorlesungen

- Nebel, Prof. Dr. Bernhard. "Theoretische Informatik". Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2020. URL: http://gki.informatik.uni-freiburg.de/teaching/ss20/info3/index\_de.html (besucht am 09.07.2022).
- Scholl, Prof. Dr. Christoph. "Betriebssysteme". Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2020. URL: https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach\_main.php?id=157 (besucht am 09.07.2022).
- Thiemann, Prof. Dr. Peter. "Compilerbau". Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2021. URL: http://proglang.informatik.uni-freiburg.de/teaching/compilerbau/2021ws/ (besucht am 09.07.2022).
- — "Einführung in die Programmierung". Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2018. URL: http://proglang.informatik.uni-freiburg.de/teaching/info1/2018/ (besucht am 09.07.2022).
- Westphal, Dr. Bernd. "Softwaretechnik". Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2021. URL: https://swt.informatik.uni-freiburg.de/teaching/SS2021/swtvl (besucht am 19.07.2022).

# Sonstige Quellen

- Bolingbroke, Maximilian C. und Simon L. Peyton Jones. "Types are calling conventions". In: *Proceedings of the 2nd ACM SIGPLAN symposium on Haskell Haskell '09*. the 2nd ACM SIGPLAN symposium. Edinburgh, Scotland: ACM Press, 2009, S. 1. ISBN: 978-1-60558-508-6. DOI: 10.1145/1596638.1596640. URL: http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1596638.1596640 (besucht am 23.07.2022).
- Lark a parsing toolkit for Python. 26. Apr. 2022. URL: https://github.com/lark-parser/lark (besucht am 28.04.2022).
- Naming convention (programming). In: Wikipedia. Page Version ID: 1100066005. 24. Juli 2022. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Naming\_convention\_(programming)&oldid=1100066005 (besucht am 30.07.2022).
- Shinan, Erez. lark: a modern parsing library. Version 1.1.2. URL: https://github.com/lark-parser/lark (besucht am 31.07.2022).