
ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

Abgabedatum: 28th April 2022

Author:
Jürgen Mattheis

Gutachter:
Prof. Dr. Scholl

Betreuung:
M.Sc. Seufert

Eine Bachelorarbeit am Lehrstuhl für
Betriebssysteme

ERKLÄRUNG

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

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | Motivation | 7 |
| 1.1 | PicoC und RETI | 7 |
| 1.2 | Aufgabenstellung | 7 |
| 1.3 | Eigenheiten der Sprache C | 7 |
| 1.4 | Richtlinien | 7 |
| 2 | Einführung | 8 |
| 2.1 | Compiler und Interpreter | 8 |
| 2.1.1 | T-Diagramme | 8 |
| 2.2 | Grammatiken | 8 |
| 2.3 | Grundlagen | 8 |
| 2.3.1 | Mehrdeutige Grammatiken | 9 |
| 2.3.2 | Präzidenz und Assoziativität | 9 |
| 2.4 | Lexikalische Analyse | 9 |
| 2.5 | Syntaktische Analyse | 11 |
| 2.6 | Code Generierung | 15 |
| 2.7 | Fehlermeldungen | 15 |
| 3 | Implementierung | 16 |
| 3.1 | Lexikalische Analyse | 16 |
| 3.1.1 | Verwendung von Lark | 16 |
| 3.1.2 | Basic Parser | 16 |
| 3.2 | Syntaktische Analyse | 16 |
| 3.2.1 | Verwendung von Lark | 16 |
| 3.2.2 | Umsetzung von Präzidenz | 16 |
| 3.2.3 | Derivation Tree Generierung | 17 |
| 3.2.4 | Early Parser | 17 |
| 3.2.5 | Derivation Tree Vereinfachung | 17 |
| 3.2.6 | Abstrakt Syntax Tree Generierung | 17 |
| 3.3 | Code Generierung | 17 |
| 3.3.1 | Passes | 17 |
| 3.3.2 | Umsetzung von Pointern und Arrays | 17 |
| 3.3.3 | Umsetzung von Structs | 17 |
| 3.3.4 | Umsetzung von Funktionen | 17 |
| 3.3.5 | Umsetzung kleinerer Details | 17 |
| 3.4 | Fehlermeldungen | 17 |
| 3.4.1 | Error Handler | 17 |
| 4 | Ergebnisse und Ausblick | 18 |
| 4.1 | Funktionsumfang | 18 |
| 4.2 | Qualitätskontrolle | 18 |
| 4.3 | Kommentierter Kompiliervorgang | 18 |
| 4.4 | Erweiterungsideen | 18 |
| A | Appendix | 19 |
| A.1 | Konkrete und Abstrakte Syntax | 19 |
| A.2 | Bedienungsanleitungen | 19 |

| | | |
|-------|---------------------------|----|
| A.2.1 | PicoC-Compiler | 19 |
| A.2.2 | Showmode | 19 |
| A.2.3 | Entwicklertools | 19 |

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| 3.1 Präzidenzregeln von PicoC | 16 |
|---|----|

Definitionen

| | | |
|----|-----------------------------------|----|
| 1 | Compiler | 8 |
| 2 | Interpreter | 8 |
| 3 | T-Diagram | 8 |
| 4 | Sprache | 8 |
| 5 | Chomsky Hierarchie | 8 |
| 6 | Grammatik | 8 |
| 7 | Reguläre Sprachen | 8 |
| 8 | Ableitung | 9 |
| 9 | Links- und Rechtsableitung | 9 |
| 10 | Kontextfreie Sprachen | 9 |
| 11 | Ableitungsbaum | 9 |
| 12 | Mehrdeutige Grammatik | 9 |
| 13 | Assoziativität | 9 |
| 14 | Präzedenz | 9 |
| 15 | Pattern | 9 |
| 16 | Lexeme | 10 |
| 17 | Lexer (bzw. Scanner) | 10 |
| 18 | Literal | 11 |
| 19 | Konkrete Syntax | 11 |
| 20 | Derivation Tree (bzw. Parse Tree) | 12 |
| 21 | Parser | 12 |
| 22 | Wortproblem | 12 |
| 23 | Recognizer (bzw. Erkennen) | 13 |
| 24 | Transformer | 14 |
| 25 | Visitor | 14 |
| 26 | Abstrakte Syntax | 14 |
| 27 | Abstrakte Syntax Tree | 14 |
| 28 | Pass | 15 |
| 29 | Fehlermeldung | 15 |
| 30 | Symboltabelle | 17 |

1 Motivation

1.1 PicoC und RETI

1.2 Aufgabenstellung

1.3 Eigenheiten der Sprache C

1.4 Richtlinien

2 Einführung

2.1 Compiler und Interpreter

Definition 1: Compiler

Definition 2: Interpreter

2.1.1 T-Diagramme

Definition 3: T-Diagram

2.2 Grammatiken

2.3 Grundlagen

Definition 4: Sprache

Definition 5: Chomsky Hierarchie

Definition 6: Grammatik

Definition 7: Reguläre Sprachen

Definition 8: Ableitung**Definition 9: Links- und Rechtsableitung****Definition 10: Kontextfreie Sprachen****2.3.1 Mehrdeutige Grammatiken****Definition 11: Ableitungsbaum****Definition 12: Mehrdeutige Grammatik****2.3.2 Präzidenz und Assoziativität****Definition 13: Assoziativität****Definition 14: Präzidenz****2.4 Lexikalische Analyse**

Die **Lexikalische Analyse** bildet üblicherweise die erste Ebene innerhalb der **Pipe Architektur** bei der Implementierung von Compilern. Die Aufgabe der lexikalischen Analyse ist vereinfacht gesagt, in einem Inputstring, z.B. dem Inhalt einer Datei, welche in **UTF-8** codiert ist, Folgen endlicher Symbole (auch **Wörter** genannt) zu finden, die bestimmte **Pattern** (Definition 15) matchen, die durch eine **reguläre Grammatik** spezifiziert sind.

Definition 15: Pattern

Beschreibung aller möglichen **Lexeme** einer Menge \mathbb{P}_T , die 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.^b

^aAls Beschreibungswerkzeug können aber auch z.B. reguläre Ausdrücke hergenommen werden.

^bWhat is the difference between a token and a lexeme?

Diese Folgen endlicher Symbole werden auch **Lexeme** (Definition 16) genannt.

Definition 16: Lexeme

Ein **Lexeme** ist ein **Wort** aus dem Inputstring, welches das **Pattern** für eines der **Token** T einer Sprache L_{Lex} matched.^a

^aWhat is the difference between a token and a lexeme?

Diese **Lexeme** werden vom **Lexer** im **Inputstring** identifiziert und **Tokens** T zugeordnet (Definition 17). Die **Tokens** sind es, die letztendlich an die **Syntaktische Analyse** weitergegeben werden.

Definition 17: Lexer (bzw. Scanner)

Ein **Lexer** ist eine **partielle Funktion** $lex : \Sigma^* \rightarrow (N \times W)^*$, welche ein **Wort** aus Σ^* auf ein **Token** T mit einem **Tokennamen** N und einem **Tokenwert** W abbildet, falls diese Folge von Symbolen sich unter der **regulären Grammatik** G_{Lex} , der **regulären Sprache** L_{Lex} ableiten lässt.^a

^alecture-notes-2021.

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

Eine weitere Aufgabe der **Lexikalischen Analyse** ist es jegliche für die Weiterverarbeitung unwichtigen Symbole, wie Leerzeichen `␣`, Newline `\n`¹ und Tabs `\t` aus dem Inputstring herauszufiltern. Das geschieht mittels des **Lexers**, der allen für die **Syntaktische Analyse** unwichtigen Zeichen das leere Wort ϵ zuordnet. Das ist auch im Sinne der Definition, denn $\epsilon \in \Sigma^*$. Nur das, was für die **Syntaktische Analyse** wichtig ist, soll weiterverarbeitet werden, alles andere wird herausgefiltert.

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 Überbegriffe bzw. Tokennamen für beliebige Bezeichner von Variablen, Konstanten und Funktionen und beliebige Zahlen sind aber trotz allem z.B. **Zahl** und **Bezeichner**.

Ein **Lexeme** ist damit aber nicht das gleiche, wie der **Tokenwert**, denn z.B. im Falle von PicoC kann z.B. der Wert 99 durch zwei verschiedene Literale dargestellt werden, einmal als ASCII-Zeichen `'c'` und des Weiteren auch in Dezimalschreibweise als 99². Der **Tokenwert** ist jedoch der letztendliche Wert an sich, unabhängig von der Darstellungsform.

Die **Grammatik** G_{Lex} , die zur Beschreibung der Token T einer regulären Sprache L_{Lex} verwendet wird, ist üblicherweise **regulär**, da ein typischer **Lexer** immer nur ein **Symbol** vorausschaut³, unabhängig davon, was für Symbole davor aufgetaucht sind. Die übliche Implementierung eines **Lexers** merkt sich nicht, was für Symbole davor aufgetaucht sind.

¹In 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 Programmiersprache, die man zur Implementierung des Lexers nutzt wegabstrahiert.

²Die Programmiersprache Python erlaubt es z.B. diesen Wert auch mit den Literalen `0b1100011` und `0x63` darzustellen.

³Man nennt das auch einem **Lookahead** von 1

Um Verwirrung verzubäuen ist es wichtig folgende Unterscheidung hervorzuheben: Wenn von **Symbolen** die Rede ist, so werden in der **Lexikalischen Analyse**, der **Syntaktische 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 von Variablen, Konstanten und Funktionen** die Symbole^a.

^aDas ist der Grund, warum die Tabelle, in der Informationen zu Identifiern gespeichert werden aus Kapitel 3 Symboltabelle genannt wird.

Definition 18: Literal

*Eine von möglicherweise vielen weiteren **Darstellungsformen** für ein und denselben **Wert**.*

2.5 Syntaktische Analyse

In der **Syntaktischen Analyse** ist für einige Sprachen eine **Kontextfreie Grammatik** G_{Parse} notwendig, um diese Sprache 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 Klammern '(' bzw. öffnende geschweifte Klammern '{' es momentan gibt, die noch nicht durch eine entstprechende schließende Klammer ')' bzw. schließende geschweifte Klammer '}' geschlossen wurden.

Die **Syntax**, in welcher der **Inputstring** aufgeschrieben ist, wird auch als **Konkrete Syntax** (Definition 19) bezeichnet. In einem Zwischenschritt, dem **Parsen** wird aus diesem Inputstring mithilfe eines **Parsers** (Definition 21), ein **Derivation Tree** (Definition 20) generiert, der als Zwischenstufe hin zum einem **Abstrakt Syntax Tree** (Definition 27) dient. Für einen ordentlichen Code ist es vor allem im Compilerbau förderlich kleinschrittig vorzugehen, deshalb erst die Generierung des **Derivation Tree** und dann der **Abstrakt Syntax Tree**.

Definition 19: Konkrete Syntax

***Syntax** einer **Sprache**, die durch die **Grammatiken** G_{Lex} und G_{Parse} zusammengekommen beschrieben wird.*

*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.^a*

^aCourse Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Definition 20: Derivation Tree (bzw. Parse Tree)

*Compilerinterne Darstellung eines in **Konkreter Syntax** geschriebenen Inputstrings als **Baumdatenstruktur**, in der **Nichtterminalsymbole** die **Inneren Knoten** des Baumes und **Terminalsymbole** die **Blätter** des Baumes bilden. Jede **Produktion** der **Grammatik** G_{Parse} , die ein Teil der **Konkrete Syntax** ist, wird zu einem eigenen **Knoten**.*

*Der **Derivation Tree** wird optimalerweise immer so konstruiert bzw. die **Konkrete Syntax** immer so definiert, dass sich möglichst einfach ein **Abstrakt Syntax Tree** daraus konstruieren lässt.*

Definition 21: Parser

*Ein Programm, dass eine **Eingabe** in eine für die **Weiterverarbeitung** taugliche Form bringt.*

21.1: *In Bezug auf Compilerbau ist ein **Parser** ein Programm, dass einen Inputstring von **Konkreter Syntax** in die compilerinterne Darstellung eines **Derivation Tree** übersetzt, was auch als **Parzen** bezeichnet wird^{a, b}.*

^aEs gibt allerdings auch alternative Definitionen, denen nach ein Parser in Bezug auf Compilerbau ein Programm ist, dass einen Inputstring von **Konkreter Syntax** in **Abstrakte Syntax** übersetzt. Im Folgenden wird allerdings die obige Definition 21.1 verwendet.

^b*Compiler Design - Phases of Compiler.*

An dieser Stelle könnte möglicherweise eine Begriffsverwirrung entstehen, ob ein **Lexer** nach der obigen Definition nicht auch ein **Parser** ist.

In Bezug auf Compilerbau ist ein **Lexer** ein Teil eines Parsers. Der Parser vereinigt sowohl die **Lexikalische Analyse**, als auch einen Teil der **Syntaktischen Analyse** in sich. Aber für sich isoliert, ohne Bezug zu Compilerbau betrachtet, ist ein Lexer nach Definition 21 ebenfalls ein Parser. Aber im Compilerbau hat **Parser** eine spezifischere Definition und hier überwiegt beim **Lexer** seine Funktionalität, dass er den Inputstring lexikalisch weiterverarbeitet, um ihn als Lexer zu bezeichnen, der Teil eines Parsers ist.

Die vom **Lexer** im Inputstring identifizierten **Token** werden in der **Syntaktischen Analyse** vom **Parser** (Definition 21) 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 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 2.6 relevant.

Ein **Parser** ist genauergesagt ein erweiterter **Recognizer** (Definition 23), denn ein Parser löst das **Wortproblem** (Definition 22) für die **Sprache**, die durch die **Konkrete Syntax** beschrieben wird und konstruiert parallel dazu oder im Nachgang aus den Informationen, die während der Ausführung des Recognition Algorithmus gesichert wurden den **Derivation Tree**.

Definition 22: Wortproblem

Definition 23: Recognizer (bzw. Erkenner)

Entspricht dem Maschinenmodell eines **Automaten**. Im Bezug auf Compilerbau entspricht der **Recognizer** einem **Kellerautomaten**, in dem **Wörter** bestimmter **Kontextfreier Sprachen** erkannt werden. Der **Recognizer** erkennt, ob ein Inputstring bzw. **Wort** sich mit den Produktionen der **Konkreten Syntax** ableiten lässt, also ob er bzw. es Teil der Sprache ist, die von der **Konkreten Syntax** beschrieben wird oder nicht^a.

^aDas vom **Recognizer** gelöste Problem ist auch als **Wortproblem** bekannt.

Für das **Parsen** gibt es grundsätzlich **zwei** verschiedene Ansätze:

- **Top-Down Parsing:** Es wird versucht durch Expansion der Produktionen der **Konkreten Syntax** bis zu den Blättern, **Linksableitungen** zu finden, sodass die **Terminalsymbole** der Blätter mit dem **Inputstring** matchen^a. Hierunter fallen:
 - **Recursive-Descent Parser:** : Die Struktur dieser **Parser** ist sehr nah an der **Konkreten Syntax**, dessen Sprache sie erkennen sollen. Die richtigen **Linksableitungen** für die **Non-Terminals** der **Konkreten Syntax**, welche oftmals nach den Regeln der Konkreten Syntax **Nicht-deterministisch** mehrere Möglichkeiten der Expansion haben, werden entweder durch **Backtracking** oder **Vorausschauen**, um eine konstante Zahl k von Tokens^b gefunden.
 - Parser, die die erstere Strategie implementieren, werden auch als **Backtracking Parser** bezeichnet^c. Backtracking Parser... TODO.
 - Parser, die die letztere Strategie implementieren, werden auch als **LL(k) Recursive-Descent Parser** bezeichnet^d. Diese Parser erkennen **LL(k) Grammatiken**, wobei eine Grammatik **LL(k)** ist, wenn ein **LL(k) Parser** dafür konstruiert werden kann. Wobei **LL** für **left-to-right** und **leftmost-derivation** steht, .
- **Bottom-Up Parsing:** Es wird mit dem Inputstring gestartet und versucht, die **Folge von Ableitungen**, die zu seiner Entstehung führt durch Rückwärtsanwenden der **Produktionen** der **Konkreten Syntax** bis zum **Startsymbol** zurückzuverfolgen.
 - **Earlay Parser:** :
 - **LR Parsing:** :

^a**Rechtsableitungen** wären auch möglich, aber es gibt keinen guten Grund, warum man immer das rechte **Non-Terminal** zuerst expandieren sollte, da für **Kontextfreie Grammatiken** sowohl mit Links- auch Rechtsableitungen alle Wörter der Sprache, die die Kontextfreie Grammatik beschreibt ableitbar sind.

^bDas wird auch als **Lookahead** von k bezeichnet.

^cDieser Art von Parser wurde für den **PicoC-Compiler** implementiert, als dieser noch auf dem Stand des **Bachelorprojektes** war, bevor er durch den nicht selbst implementierten **Earlay Parser** von Lark ersetzt wurde.

^dDiese Art von Parser ist im **RETI-Interpreter** implementiert, da dieser eine besonders simple **LL(1)** Grammatik besitzt

Der **Abstrakt Syntax Tree** wird mithilfe von **Transformern** (Definition 24) und **Visitors** (Definition 25) generiert und ist das Endprodukt der **Syntaktischen Analyse**. Wenn man die gesamte **Syntaktische Analyse** betrachtet, so übersetzt diese einen Inputstring von der **Konkreten Syntax** in die **Abstrakte Syntax** (Definition 26).

Die **Baumdatenstruktur** des **Derivation Tree** und **Abstrakt Syntax Tree** ermöglicht es die Operationen, die der Compiler bei der Weiterverarbeitung des Inputstrings ausführen muss möglichst **effizient** auszuführen.

Definition 24: Transformer

Ein Programm, dass von **unten-nach-oben**, nach dem **Breadth First Search** Prinzip alle Knoten des **Derivation Tree** besucht und in Bezug zu Compilerbau, beim Antreffen eines bestimmten Knoten des **Derivation Tree** einen entsprechenden Knoten des **Abstrakt Syntax Tree** erzeugt und diesen anstelle des Knotens des **Derivation Tree** setzt und so Stück für Stück den **Abstrakt Syntax Tree** konstruiert.

Definition 25: Visitor

Ein Programm, dass von **unten-nach-oben**, nach dem **Breadth First Search** Prinzip alle Knoten des **Derivation Tree** besucht und in Bezug zu Compilerbau, beim Antreffen eines bestimmten **Knoten** des **Derivation Tree**, diesen **in-place** mit anderen Knoten **tauscht** oder **manipuliert**, um den **Derivation Tree** für die weitere Verarbeitung durch z.B. einen **Transformer** zu vereinfachen.

Kann theoretisch auch zur Konstruktion eines **Abstrakt Syntax Tree** verwendet werden, wenn z.B. eine externe Klasse verwendet wird, welches für die Konstruktion des **Abstrakt Syntax Tree** verantwortlich ist, aber dafür ist ein **Transformer** besser geeignet.

Definition 26: Abstrakte Syntax

Syntax, die beschreibt, was für Arten von **Komposition** bei den **Knoten** eines **Abstrakt Syntax Trees** möglich sind.^a

Jene Produktionen, die in der **Konkreten Syntax** für die Umsetzung von **Präzidenz** notwendig waren, sind in der **Abstrakten Syntax** abgeflacht.

^aCourse Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Definition 27: Abstrakte Syntax Tree

Compilerinterne Darstellung eines Programs, in welcher sich anhand der Knoten auf dem Pfad von der Wurzel zu einem **Blatt** nicht mehr direkt nachvollziehen lässt, durch welche **Produktionen** dieses Blatt abgeleitet wurde.

Der **Abstrakt Syntax Tree** hat einmal den Zweck, dass die Kompositionen, die die Knoten bilden können **semantisch** näher an den **Instructions eines Assemblers** dran sind und, dass man mit ihm bei der Betrachtung eines **Knoten**, der für einen Teil des Programms steht, möglichst schnell die Frage beantworten kann, welche **Funktionalität** der Sprache dieser umsetzt, welche **Bestandteile** er hat und welche Funktionalität der Sprache diese Bestandteile umsetzen usw.^a

^aCourse Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513).

Je weiter **unten**⁴ und **links** ein Knoten im **Abstrakt Syntax Tree** liegt, desto eher wird dieser Knoten komplett abgearbeitet sein, da in der **Code Generierung** die Knoten nach dem **Depth First Search Prinzip** abgearbeitet werden.

⁴In der Informatik wachsen Bäume von oben-nach-unten. Die Wurzel ist also oben.

2.6 Code Generierung

Definition 28: Pass

2.7 Fehlermeldungen

Definition 29: Fehlermeldung

3 Implementierung

3.1 Lexikalische Analyse

3.1.1 Verwendung von Lark

3.1.2 Basic Parser

3.2 Syntaktische Analyse

3.2.1 Verwendung von Lark

3.2.2 Umsetzung von Präzidenz

Die PicoC Sprache hat dieselben Präzidenzregeln implementiert, wie die Sprache C¹. Die Präzidenzregeln von PicoC sind in Tabelle 3.2.2 aufgelistet.

| Präzidenz | Operator | Beschreibung | Assoziativität |
|-----------|----------------------|---|----------------------|
| 1 | a() a[] a.b | Funktionsaufruf Indezzugriff Attributzugriff | Links, dann rechts → |
| 2 | -a !a ~a *a &a | Unäres Minus Logisches NOT und Bitweise NOT Dereferenz und Referenz, auch Adresse-von | Rechts, dann links ← |
| 3 | a*b a/b a%b | Multiplikation, Division und Modulo | Links, dann rechts → |
| 4 | a+b a-b | Addition und Subtraktion | |
| 5 | a<b a<=b a>b a>=b | Kleiner, Kleiner Gleich, Größer, Größer gleich | |
| 6 | a==b a!=b | Gleichheit und Ungleichheit | |
| 7 | a&b | Bitweise UND | |
| 8 | a^b | Bitweise XOR (exclusive or) | |
| 9 | a b | Bitweise ODER (inclusive or) | |
| 10 | a&& b | Logisches UND | |
| 11 | a b | Logisches ODER | |
| 12 | a=b | Zuweisung | Rechts, dann links ← |
| 13 | a,b | Komma | Links, dann rechts → |

Tabelle 3.1: Präzidenzregeln von PicoC

¹ C Operator Precedence - cpreference.com.

3.2.3 Derivation Tree Generierung

3.2.4 Early Parser

3.2.5 Derivation Tree Vereinfachung

3.2.6 Abstrakt Syntax Tree Generierung

ASTNode

PicoC Nodes

RETI Nodes

3.3 Code Generierung

3.3.1 Passes

PicoC-Shrink Pass

PicoC-Blocks Pass

PicoC-Mon Pass

Definition 30: Symboltabelle

RETI-Blocks Pass

RETI-Patch Pass

RETI Pass

3.3.2 Umsetzung von Pointern und Arrays

3.3.3 Umsetzung von Structs

3.3.4 Umsetzung von Funktionen

3.3.5 Umsetzung kleinerer Details

3.4 Fehlermeldungen

3.4.1 Error Handler

4 Ergebnisse und Ausblick

4.1 Funktionsumfang

4.2 Qualitätskontrolle

4.3 Kommentierter Kompiliervorgang

4.4 Erweiterungsideen

A Appendix

A.1 Konkrete und Abstrakte Syntax

A.2 Bedienungsanleitungen

A.2.1 PicoC-Compiler

A.2.2 Showmode

A.2.3 Entwicklertools

Literatur

Online

- *C Operator Precedence* - *cppreference.com*. URL: https://en.cppreference.com/w/c/language/operator_precedence (besucht am 27.04.2022).
- *Compiler Design - Phases of Compiler*. URL: https://www.tutorialspoint.com/compiler_design/compiler_design_phases_of_compiler.htm (besucht am 19.06.2022).
- *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).
- *lecture-notes-2021*. 20. Jan. 2022. URL: <https://github.com/Compiler-Construction-University-Freiburg/lecture-notes-2021/blob/56300e6649e32f0594bbbd046a2e19351c57dd0c/material/lexical-analysis.pdf> (besucht am 28.04.2022).
- *What is the difference between a token and a lexeme?* NewbeDEV. URL: <http://newbedev.com/what-is-the-difference-between-a-token-and-a-lexeme> (besucht am 17.06.2022).