
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	10
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 Kompilervorgang	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	Chromsky Hierarchie	8
6	Grammatik	8
7	Reguläre Sprachen	8
8	Ableitung	9
9	Links- und Rechtsableitung	9
10	Linksrekursive Grammatiken	9
11	Ableitungsbaum	9
12	Mehrdeutige Grammatik	9
13	Assoziativität	9
14	Präzidenz	9
15	Wortproblem	9
16	LL(k)-Grammatik	9
17	Kontextfreie Sprachen	9
18	Pattern	10
19	Lexeme	10
20	Lexer (bzw. Scanner)	10
21	Literal	11
22	Konkrete Syntax	12
23	Derivation Tree (bzw. Parse Tree)	12
24	Parser	12
25	Recognizer (bzw. Erkennen)	13
26	Transformer	14
27	Visitor	14
28	Abstrakte Syntax	14
29	Abstrakte Syntax Tree	14
30	Pass	15
31	Fehlermeldung	15
32	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: Linksrekursive Grammatiken****2.3.1 Mehrdeutige Grammatiken****Definition 11: Ableitungsbaum****Definition 12: Mehrdeutige Grammatik****2.3.2 Präzidenz und Assoziativität****Definition 13: Assoziativität****Definition 14: Präzidenz****Definition 15: Wortproblem****Definition 16: LL(k)-Grammatik**

Eine Grammatik ist **LL(k)** für $k \in \mathbb{N}$, falls jeder Ableitungsschritt eindeutig durch die nächsten k Symbole des **Eingabeworts** bzw. in Bezug zu Compilerbau **Token** des Inputstrings zu bestimmen ist^a. Dabei steht **LL** für *left-to-right* und *leftmost-derivation*, da das **Eingabewort** von *links nach rechts* geparsed und immer **Linksableitungen** genommen werden müssen^b, damit die obige Bedingung mit den **nächsten** k Symbolen gilt.

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

^bWobei sich das mit den **Linksableitungen** automatisch ergibt, wenn man das Eingabewort von **links-nach-rechts** parsed und jeder der nächsten k **Ableitungsschritte** eindeutig sein soll.

Definition 17: Kontextfreie Sprachen

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 18) matchen, die durch eine **reguläre Grammatik** spezifiziert sind.

Definition 18: 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 19) genannt.

Definition 19: 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 20). Die **Tokens** sind es, die letztendlich an die **Syntaktische Analyse** weitergegeben werden.

Definition 20: 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

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.

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 `99`². 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.

Um Verwirrung verzubäuen 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 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 21: 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 22) bezeichnet. In einem Zwischenschritt, dem **Parsen** wird aus diesem Inputstring mithilfe eines **Parsers** (Definition 24), ein **Derivation Tree** (Definition 23) generiert, der als Zwischenstufe hin zum einem **Abstrakt Syntax Tree** (Definition 29) 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**.

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

Definition 22: Konkrete Syntax

Syntax einer *Sprache*, die durch die *Grammatiken* G_{Lex} und G_{Parse} zusammengenommen 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 23: 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 24: Parser

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

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

^aEs gibt allerdings auch alternative Definitionen, denen nach ein Parser in Bezug auf Compilerbau ein Programm ist, das einen Inputstring von *Konkreter Syntax* in *Abstrakte Syntax* übersetzt. Im Folgenden wird allerdings die obige Definition 24.1 verwendet.

^bCompiler 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 24 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 24) 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 genauer gesagt ein erweiterter *Recognizer* (Definition 25), denn ein *Parser* löst das *Wortpro-*

blem (Definition 15) 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 25: 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 **Konkrete 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:** Der **Derivation Tree** wird von **oben-nach-unten** generiert, also von der **Wurzel** zu den **Blättern**. Dementsprechend fängt die Generierung des **Derivation Tree** mit dem Startsymbol der Grammatik an und wendet in jedem Schritt eine **Linksableitung** auf die **Nicht-Terminalsymbole** an, bis in den **Blättern** der gewünschte **Inputstring** abzulesen ist oder es sich herausstellt, dass dieser nicht generiert werden kann.

Der Grund, warum die **Linksableitung** verwendet wird und nicht z.B. die **Rechtsableitung** ist, weil der das **Eingabewert** bzw. der **Inputstring** 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**. Dabei wird jedem **Nicht-Terminalsymbol** eine **Prozedur** zugeordnet, welche die Produktionsregeln dieses **Nicht-Terminalsymbols** umsetzt. Prozeduren rufen sich dabei wechselseitig gegenseitig entsprechend der **Produktionsregeln** auf, falls eine entsprechende Produktionsregel eine **Rekursion** enthält.

Rekursiver Abstieg kann mit **Backtracking** verbunden werden, um auch Grammatiken parsen zu können, die nicht **LL(k)** (Definition 16) sind. Dabei werden meist nach dem **Depth-First-Search Prinzip** alle **Produktionen** für ein **Nicht-Terminalsymbol** solange durchgegangen bis der gewünschte Inputstring sich in den **Blättern** ablesen lässt oder alle **Alternativen** für einen Schritt abgesucht sind, bis man wieder beim ersten Schritt angekommen ist und da auch alle **Alternativen** abgesucht sind.^a

^b

- **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.^c

^aDiese Art von Parser 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 ersetzt wurde.

^bDiese Art von Parser ist im **RETI-Interpreter** implementiert, da die **RETI-Sprache** eine besonders simple **LL(1) Grammatik** besitzt.

^cUnter dieser Kategorie fällt der **Eargg**

Der **Abstrakt Syntax Tree** wird mithilfe von **Transformern** (Definition 26) und **Visitors** (Definition 27) 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 28).

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 26: 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 **Abstrak Syntax Tree** konstruiert.*

Definition 27: 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 28: 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 29: 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 Konten 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.

2.6 Code Generierung

Definition 30: Pass

2.7 Fehlermeldungen

Definition 31: Fehlermeldung

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

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 - cppreference.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 32: 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-Uni-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).