
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	Problemstellung	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	12
2.7	Fehlermeldungen	13
3	Implementierung	14
3.1	Lexikalische Analyse	14
3.1.1	Verwendung von Lark	14
3.1.2	Basic Parser	14
3.2	Syntaktische Analyse	14
3.2.1	Verwendung von Lark	14
3.2.2	Umsetzung von Präzidenz	14
3.2.3	Derivation Tree Generierung	15
3.2.4	Early Parser	15
3.2.5	Derivation Tree Vereinfachung	15
3.2.6	Abstrakt Syntax Tree Generierung	15
3.3	Code Generierung	15
3.3.1	Passes	15
3.3.2	Umsetzung von Pointern und Arrays	15
3.3.3	Umsetzung von Structs	15
3.3.4	Umsetzung von Funktionen	15
3.3.5	Umsetzung kleinerer Details	15
3.4	Fehlermeldungen	15
3.4.1	Error Handler	15
4	Ergebnisse und Ausblick	16
4.1	Funktionsumfang	16
4.2	Qualitätskontrolle	16
4.3	Kommentierter Kompiliervorgang	16
4.4	Erweiterungsideen	16
A	Appendix	17
A.1	Konkrete und Abstrakte Syntax	17
A.2	Bedienungsanleitungen	17

A.2.1	PicoC-Compiler	17
A.2.2	Showmode	17
A.2.3	Entwicklertools	17

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

3.1 Präzidenzregeln von PicoC	14
---	----

Definitionen

2.1	Compiler	8
2.2	Interpreter	8
2.3	T-Diagram	8
2.4	Sprache	8
2.5	Chromsky Hierarchie	8
2.6	Grammatik	8
2.7	Reguläre Sprachen	8
2.8	Kontextfreie Sprachen	9
2.9	Ableitungsbaum	9
2.10	Mehrdeutige Grammatik	9
2.11	Assoziativität	9
2.12	Präzidenz	9
2.13	Pattern	9
2.14	Lexeme	9
2.15	Lexer (bzw. Scanner)	10
2.16	Literal	11
2.17	Konkrete Syntax	11
2.18	Parser	11
2.19	Recognizer	12
2.20	Derivation Tree (bzw. Parse Tree)	12
2.21	Abstrakte Syntax	12
2.22	Abstrakte Syntax Tree	12
2.23	Transformer	12
2.24	Visitor	12
2.25	Pass	12
2.26	Fehlermeldung	13
3.1	Symboltabelle	15

1 Motivation

1.1 PicoC und RETI

1.2 Problemstellung

1.3 Eigenheiten der Sprache C

1.4 Richtlinien

2 Einführung

2.1 Compiler und Interpreter

Definition 2.1: Compiler

Definition 2.2: Interpreter

2.1.1 T-Diagramme

Definition 2.3: T-Diagram

2.2 Grammatiken

2.3 Grundlagen

Definition 2.4: Sprache

Definition 2.5: Chomsky Hierarchie

Definition 2.6: Grammatik

Definition 2.7: Reguläre Sprachen

Definition 2.8: Kontextfreie Sprachen**2.3.1 Mehrdeutige Grammatiken****Definition 2.9: Ableitungsbaum****Definition 2.10: Mehrdeutige Grammatik****2.3.2 Präzidenz und Assoziativität****Definition 2.11: Assoziativität****Definition 2.12: 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 2.13) matchen, die durch eine **reguläre Grammatik** spezifiziert sind.

Definition 2.13: 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 Regeln 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 2.14) genannt.

Definition 2.14: 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 2.15). Die **Tokens** sind es, die letztendlich an die **Syntaktische Analyse** weitergegeben werden.

Definition 2.15: 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.

Falls der Inputstring, den der **Lexer** erhält noch Leerzeichen $_$ oder andere für die **Syntaktische Analyse** unwichtige Zeichen enthält ist das auch im Sinne der Definition. Dann wird diesen das **leere Wort** ϵ zugeordnet, denn $\epsilon \in \Sigma^*$.

In den G_{Lex} Grammatiken einiger Programmiersprachen sind allerdings alle möglichen Zeichenfolgen allein dadurch schon möglich, weil diese Programmiersprachen das Konzept eines **Identifiers** o.ä. umsetzen, der alle möglichen Zeichenfolgen abfängt¹. Wodurch der Lexer wiederum doch eine linkstotale partielle Funktion ist, die man im Allgemeinen einfach als **Funktion** bezeichnet: $lex : \Sigma^* \rightarrow (N \times W)^*$.

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.

¹Bei der Grammatik von C und auch PicoC ist das allerdings nicht der Fall, weil Identifier dort nicht mit einer Zahl anfangen dürfen.

²Die Programmiersprache Python erlaubt es z.B. diesem 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 2.16: Literal

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

Eine weitere Aufgabe der **Lexikalischen Analyse** ist es jegliche für die Weiterverarbeitung unwichtigen Symbole, wie Leerzeichen `␣`, Newline `\n`⁴ und Tabs `\t` aus dem Inputstring herauszufiltern, entweder vom Lexer oder schon bevor der Inputstring an den Lexer übergeben wird. Nur das, was für die **Syntaktische Analyse** wichtig ist, soll weiterverarbeitet werden, alles andere wird herausgefiltert.

2.5 Syntaktische Analyse

In der **Syntaktischen Analyse** ist für einige Sprachen eine **Kontextfreie Grammatik** G_{Parse} notwendig, um die 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.

Definition 2.17: Konkrete Syntax

*Syntax, die verwendet wird. Ein **Programm** in seiner **Textrepräsentation**, wie man es in einer Textdatei schreibt, ist in konkreter Syntax aufgeschrieben.*

Die vom **Lexer** im Inputstring identifizierten **Token** werden in der **Syntaktischen Analyse** vom **Parser** (Definition 2.18) als **Wegweiser** verwendet, da je nachdem, in welcher Reihenfolge die **Token** auftauchen, dies einer anderen Ableitung nach 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 dieser **Zahl** hat.

Definition 2.18: Parser

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

⁴In 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.

In Bezug auf einen Compilerbau hat ein Parser meist die Aufgabe aus einem **Inputstring** einen **Derivation Tree** (Definition 2.20) zu generieren.

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 und der Parser vereinigt sowohl die **Lexikalische Analyse**, als auch einen Teil der **Syntaktischen Analyse** in sich, aber für sich isoliert betrachtet ist ein Lexer nach Definition 2.18 ebenfalls ein Parser. Aber im Compilerbau überwiegt seine Funktionalität, dass er den Inputstring lexikalisch weiterverarbeitet, um ihn als Lexer zu bezeichnen, der Teil eines Parsers ist.

Ein **Parser** ist aber auch ein erweiterter **Recognizer**, denn einmal hat der **Parser** die Aufgabe eines **Recognizers** (Definition 2.19), nämlich zu überprüfen, ob ein Inputstring sich den Regeln der Grammatik G_{Parse} ableiten lässt und ein **Wort** der Sprache L_{Parse} ist.

Definition 2.19: Recognizer

Definition 2.20: Derivation Tree (bzw. Parse Tree)

Definition 2.21: Abstrakte Syntax

Definition 2.22: Abstrakte Syntax Tree

Definition 2.23: Transformer

Definition 2.24: Visitor

2.6 Code Generierung

Definition 2.25: Pass

2.7 Fehlermeldungen

Definition 2.26: 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 - 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 3.1: 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).
- *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).