
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	9
2.2	Grammatiken	10
2.3	Grundlagen	10
2.3.1	Mehrdeutige Grammatiken	10
2.3.2	Präzidenz und Assoziativität	11
2.4	Lexikalische Analyse	11
2.5	Syntaktische Analyse	13
2.6	Code Generierung	19
2.7	Fehlermeldungen	19
3	Implementierung	20
3.1	Architektur	20
3.2	Lexikalische Analyse	20
3.2.1	Verwendung von Lark	20
3.2.2	Basic Parser	20
3.3	Syntaktische Analyse	20
3.3.1	Verwendung von Lark	20
3.3.2	Umsetzung von Präzidenz	20
3.3.3	Derivation Tree Generierung	21
3.3.4	Early Parser	21
3.3.5	Derivation Tree Vereinfachung	21
3.3.6	Abstrakt Syntax Tree Generierung	21
3.4	Code Generierung	21
3.4.1	Passes	21
3.4.2	Umsetzung von Pointern und Arrays	22
3.4.3	Umsetzung von Structs	22
3.4.4	Umsetzung von Funktionen	22
3.4.5	Umsetzung kleinerer Details	22
3.5	Fehlermeldungen	22
3.5.1	Error Handler	22
4	Ergebnisse und Ausblick	23
4.1	Funktionsumfang	23
4.2	Qualitätssicherung	23
4.3	Kommentierter Kompilervorgang	23
4.4	Erweiterungsideen	23
A	Appendix	24
A.1	Konkrete und Abstrakte Syntax	24

A.2	Bedienungsanleitungen	24
A.2.1	PicoC-Compiler	24
A.2.2	Showmode	24
A.2.3	Entwicklertools	24

Abbildungsverzeichnis

2.1 Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse	13
2.2 Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse	18

Tabellenverzeichnis

3.1 Präzidenzregeln von PicoC	21
---	----

Definitionen

2.1	Interpreter	8
2.2	Compiler	8
2.3	Transpiler (bzw. Source-to-source Compiler)	9
2.4	Cross-Compiler	9
2.5	Bootstrapping	9
2.6	T-Diagram	9
2.7	Sprache	10
2.8	Chromsky Hierarchie	10
2.9	Grammatik	10
2.10	Reguläre Sprachen	10
2.11	Ableitung	10
2.12	Links- und Rechtsableitung	10
2.13	Linksrekursive Grammatiken	10
2.14	Ableitungsbaum	10
2.15	Mehrdeutige Grammatik	10
2.16	Assoziativität	11
2.17	Präzidenz	11
2.18	Wortproblem	11
2.19	LL(k)-Grammatik	11
2.20	Kontextfreie Sprachen	11
2.21	Pattern	11
2.22	Lexeme	12
2.23	Lexer (bzw. Scanner)	12
2.24	Literal	13
2.25	Konkrete Syntax	14
2.26	Derivation Tree (bzw. Parse Tree)	14
2.27	Parser	14
2.28	Recognizer (bzw. Erkennen)	15
2.29	Transformer	16
2.30	Visitor	16
2.31	Abstrakte Syntax	16
2.32	Abstrakt Syntax Tree	17
2.33	Pass	19
2.34	Fehlermeldung	19
3.1	Symboltabelle	21

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

Der wohl wichtigsten zu klärenden Begriffe, sind die eines **Compilers** (Definition 2.2) und eines **Interpreters** (Definition 2.1), da das Schreiben eines Compilers von der **PicoC-Sprache** in die **RETI-Sprache** 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**¹ und von **Tests** die **Beziehungen** in 2.1 zu belegen (siehe Subkapitel 4.2).

Definition 2.1: Interpreter

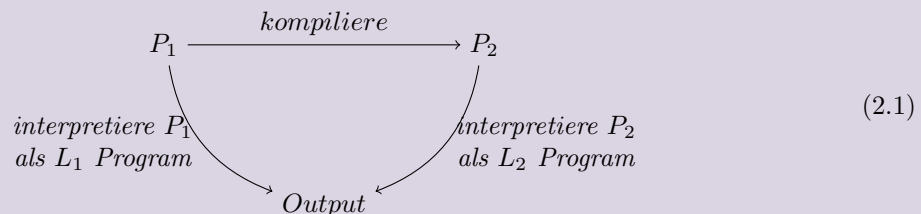
*Interpretiert die **Instructions** bzw. **Statements** eines Programmes P direkt.*

*Auf die Implementierung bezogen arbeitet ein Interpreter auf **Sub-Bäumen** des **Abstract Syntax Tree** und führt je nach Komposition der **Nodes** des Abstract Syntax Tree, auf die er während des Darüber-Iterierens stösst unterschiedliche Anweisungen aus.*

Definition 2.2: Compiler

***Kompiliert** ein 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 das Program P_1 in das Program P_2 übersetzt und bei beiden Programmen, wenn sie von **Interpreter** ihrer jeweiligen Sprachen L_1 und L_2 **interpretiert** werden, der gleiche **Output** rauskommt. Also beide Programme P_1 und P_2 die gleiche **Semantik** haben und sich nur **syntaktisch** durch die Sprachen L_1 und L_2 , in denen sie geschrieben stehen unterscheiden.*



Üblicherweise kompiliert ein **Compiler** von einer **komplexeren Sprache** zu **Maschinensprache**, aber es gibt z.B. auch **Transpiler** (Definition 2.3) oder **Cross-Compiler** (Definition 2.4).

¹Sammlung von Compilern für Linux bzw. GNU-Linux, steht für **GNU Compiler Collection**

Definition 2.3: Transpiler (bzw. Source-to-source Compiler)

*Kompiliert zwischen Sprachen, die ungefähr auf dem **gleichen** Level an **Abstraktion** arbeiten^a.*

^aDie im aktuellen Zeitgeist in Mode gekommene Sprache **TypeScript** will als Obermenge von JavaScript und wird daher zu **JavaScript** transpiliert.

Definition 2.4: Cross-Compiler

Kompiliert ein Program für eine Sprache, die auf dem eigenen System bzw. Rechner gar nicht läuft.^a

^aLego Mindstorms

Ein **Cross-Compiler** ist entweder notwendig, wenn es noch gar keinen Compiler der Wunschsprache für die **Maschiensprache** eines Zielrechners gibt und man nicht den kompletten Compiler der Wunschsprache für den Zielrechner in der **Maschiensprache** des Zielrechners schreiben will oder

Daher ist eine mögliche Vorgehensweise einen **minimalen Compiler** zu schreiben, der die **Wunschsprache** in die **Maschiensprache** des Zielrechners kompiliert und sich dafür die **Rechenleistung** einer anderen Maschine borgt und eine beliebige **höhere Sprache**, die auf dieser Maschine läuft, in der dieser Minimale Compiler geschrieben wird.

Hat man diesen **minimalen Compiler** kann man Programme in der Wunschsprache schreiben und mithilfe des **minimalen Compilers** kompilieren, sodass diese Programme auf dem Zielrechner laufen.

Nun kann man den **minimalen Compiler**, denn man gerade eben in einer **höheren Programmiersprache** implementiert hat, in der **Wunschsprache** selbst implementieren und dann mit dem **minimale Compiler** für ebendiese Wunschsprache selbst kompilieren. Was man als Output bekommt ist ein **minimaler Compiler**, der aber auf dem **Zielrechner** läuft und die **Wunschsprache** in die **Maschiensprache** des Zielrechners kompiliert.

Aufbauend auf diesem **minimalen Compiler**, der auf dem **Zielrechner** läuft, kann man nun auf dem Zielrechner selbst iterativ den **minimalen Compiler** schrittweise zu einem umfangreicheren Compiler, der mehr Funktionalitäten unterstützt weiterentwickeln und braucht den ursprünglichen Rechner, auf dem man die allererste Version des minimalen Compilers implementiert hat nicht mehr.

Definition 2.5: Bootstrapping

asdf

2.1.1 T-Diagramme**Definition 2.6: T-Diagramm**

2.2 Grammatiken

2.3 Grundlagen

Definition 2.7: Sprache

Definition 2.8: Chomsky Hierarchie

Definition 2.9: Grammatik

Definition 2.10: Reguläre Sprachen

Definition 2.11: Ableitung

Definition 2.12: Links- und Rechtsableitung

Definition 2.13: Linksrekursive Grammatiken

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

2.3.1 Mehrdeutige Grammatiken

Definition 2.14: Ableitungsbaum

Definition 2.15: Mehrdeutige Grammatik

2.3.2 Präzidenz und Assoziativität

Definition 2.16: Assoziativität

Definition 2.17: Präzidenz

Definition 2.18: Wortproblem

Definition 2.19: 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 2.20: 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 2.21) matchen, die durch eine **reguläre Grammatik** spezifiziert sind.

Definition 2.21: 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 2.22) genannt.

Definition 2.22: 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 2.23). Die **Tokens** sind es, die letztendlich an die **Syntaktische Analyse** weitergegeben werden.

Definition 2.23: 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`² 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 99³. 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** vorausschaut⁴, 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 **Syntaktische Analyse** und der **Code**

²In 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.

³Die Programmiersprache Python erlaubt es z.B. diesem Wert auch mit den Literalen `0b1100011` und `0x63` darzustellen.

⁴Man nennt das auch einem **Lookahead** von 1

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 2.24: Literal

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

Um eine Gesamtübersicht über die **Lexikalische Analyse** zu geben, ist in Abbildung 2.1 die Lexikalische Analyse an einem Beispiel veranschaulicht.

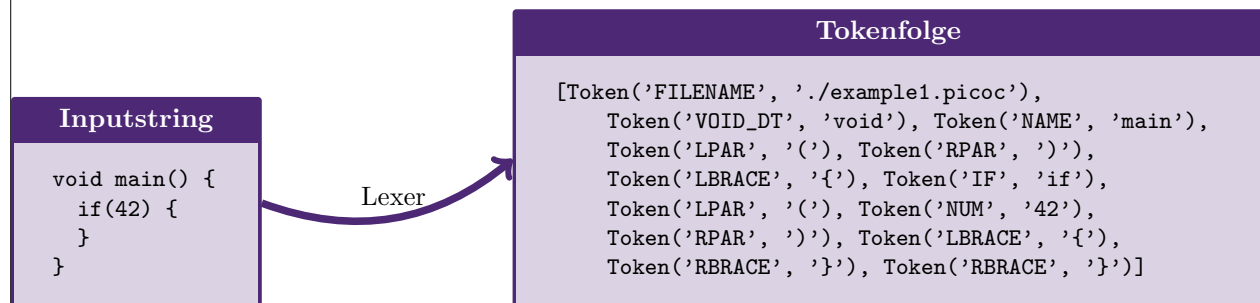


Abbildung 2.1: Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse

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 entsprechende schließende Klammer `')'` bzw. schließende geschweifte Klammer `'}'` geschlossen wurden.

Die **Syntax**, in welcher der **Inputstring** aufgeschrieben ist, wird auch als **Konkrete Syntax** (Definition 2.25) bezeichnet. In einem Zwischenschritt, dem **Parsen** wird aus diesem Inputstring mithilfe eines **Parsers** (Definition 2.27), ein **Derivation Tree** (Definition 2.26) generiert, der als Zwischenstufe hin zum einem **Abstrakt Syntax Tree** (Definition 2.32) 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 2.25: 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 2.26: 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 2.27: Parser

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

2.27.1: 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 2.27.1 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 2.27 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 2.27) 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 2.28), denn ein *Parser* löst das *Wortpro-*

blem (Definition 2.18) 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 2.28: 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 man **Terminalsymbole** hat und der gewünschte **Inputstring** abgeleitet wurde oder es sich herausstellt, dass dieser nicht abgeleitet werden kann.^a

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 2.19) sind. Dabei werden meist nach dem **Depth-First-Search Prinzip** alle **Produktionen** für ein **Nicht-Terminalsymbol** solange durchgegangen bis der gewünschte Inputstring 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. Mit dieser Methode ist das Parsen **Linksrekursiver Grammatiken** (Definition 2.13) allerdings nicht möglich, ohne die Grammatik vorher umgeformt zu haben und jegliche **Linksrekursion** aus der **Grammatik** entfernt zu haben, da diese zu **Unendlicher Rekursion** führt^b

Wenn man eine **LL(k)** Grammatik hat, kann man auf **Backtracking verzichten** und es reicht einfach nur immer **k Symbole** im **Eingabewort** bzw. in Bezug auf Compilerbau **Token** im **Inputstring** voranzuschauen. **Mehrdeutige Grammatiken** sind dadurch ausgeschlossen, weil **LL(k)** keine **Mehrdeutigkeit** zulässt.^c

- **Bottom-Up Parsing:** Es wird mit dem **Eingabewort** bzw. **Inputstring** gestartet und versucht **Rechtsableitungen**, entsprechend der **Produktionen** der **Konkreten Syntax** rückwärts anzuwenden bis man beim **Startsymbol** landet.^d

- **Chart Parser:** 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.^e

^aWhat is Top-Down Parsing?

^bDiese 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** (siehe *Lark - a parsing toolkit for Python*) ersetzt wurde.

^cDiese Art von Parser ist im **RETI-Interpreter** implementiert, da die **RETI-Sprache** eine besonders simple **LL(1) Grammatik** besitzt. Dieser **Parser** wird auch als **Predictive Parser** oder **LL(k) Recursive Descent Parser** bezeichnet, wobei **Recursive Descent** das englische Wort für **Rekursiven Abstieg** ist.

^dWhat is Bottom-up Parsing?

^eDer **Earley Parser**, den **Lark** und damit der **PicoC-Compiler** verwendet fällt unter diese Kategorie

Der **Abstrakt Syntax Tree** wird mithilfe von **Transformern** (Definition 2.29) und **Visitors** (Definition 2.30) 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 2.31).

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 2.29: 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 2.30: 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 2.31: 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 2.32: Abstrakt 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**⁵ 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.

Um eine Gesamtübersicht über die **Syntaktische Analyse** zu geben, ist in Abbildung 2.2 die Syntaktische mit dem Beispiel aus Subkapitel 2.4 fortgeführt.

⁵In der Informatik wachsen **Bäume** von **oben-nach-unten**. Die **Wurzel** ist also **oben**.

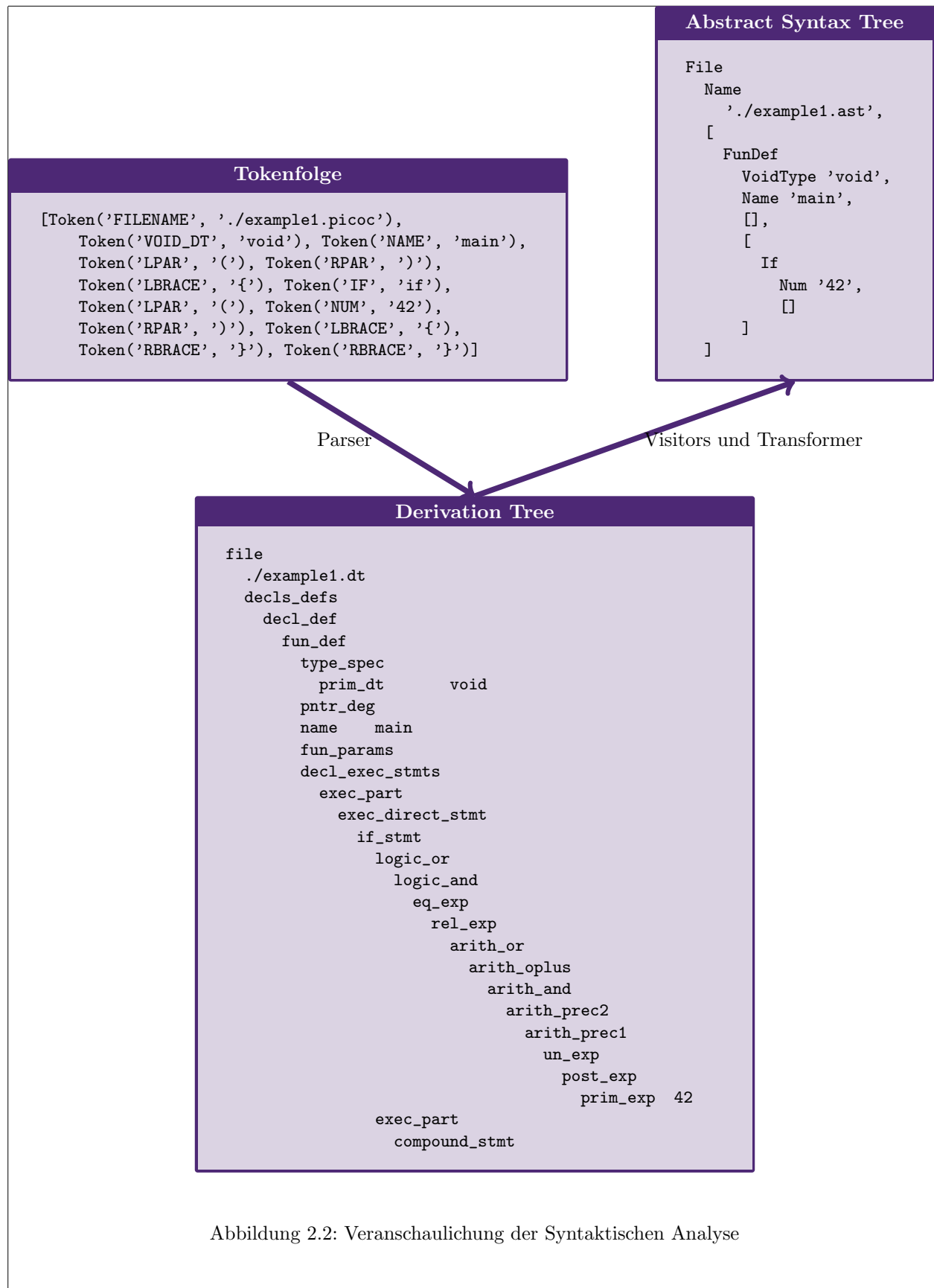


Abbildung 2.2: Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse

2.6 Code Generierung

Definition 2.33: Pass

2.7 Fehlermeldungen

Definition 2.34: Fehlermeldung

3 Implementierung

3.1 Architektur

3.2 Lexikalische Analyse

3.2.1 Verwendung von Lark

3.2.2 Basic Parser

3.3 Syntaktische Analyse

3.3.1 Verwendung von Lark

3.3.2 Umsetzung von Präzidenz

Die **PicoC Sprache** hat dieselben **Präzidenzregeln** implementiert, wie die **Sprache C¹**. Die **Präzidenzregeln** von **PicoC** sind in Tabelle 3.3.2 aufgelistet.

¹*C Operator Precedence - cppreference.com.*

Präzedenz	Operator	Beschreibung	Assoziativität
1	a() a[] a.b	Funktionsaufruf Indexzugriff 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

3.3.3 Derivation Tree Generierung

3.3.4 Early Parser

3.3.5 Derivation Tree Vereinfachung

3.3.6 Abstrakt Syntax Tree Generierung

ASTNode

PicoC Nodes

RETI Nodes

3.4 Code Generierung

3.4.1 Passes

PicoC-Shrink Pass

PicoC-Blocks Pass

PicoC-Mon Pass

Definition 3.1: Symboltabelle

RETI-Blocks Pass

RETI-Patch Pass

RETI Pass

3.4.2 Umsetzung von Pointern und Arrays

3.4.3 Umsetzung von Structs

3.4.4 Umsetzung von Funktionen

3.4.5 Umsetzung kleinerer Details

3.5 Fehlermeldungen

3.5.1 Error Handler

4 Ergebnisse und Ausblick

4.1 Funktionsumfang

4.2 Qualitätssicherung

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 Bottom-up Parsing?* URL: <https://www.tutorialspoint.com/what-is-bottom-up-parsing> (besucht am 22.06.2022).
- *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).
- *What is Top-Down Parsing?* URL: <https://www.tutorialspoint.com/what-is-top-down-parsing> (besucht am 22.06.2022).