
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

Abbildungsverzeichnis	I
Codeverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Definitionsverzeichnis	V
Grammatikverzeichnis	VI
1 Motivation	1
1.1 RETI-Architektur	2
1.2 Die Sprache PicoC	2
1.3 Eigenheiten der Sprache C	3
1.4 Gesetzte Schwerpunkte	4
1.5 Über diese Arbeit	4
1.5.1 Still der Schriftlichen Ausarbeitung	5
1.5.2 Aufbau der Schriftlichen Arbeit	6
2 Einführung	8
2.1 Compiler und Interpreter	8
2.1.1 T-Diagramme	11
2.2 Formale Sprachen	13
2.2.1 Ableitungen	16
2.2.2 Mehrdeutige Grammatiken	19
2.2.3 Präzedenz und Assoziativität	20
2.3 Lexikalische Analyse	21
2.4 Syntaktische Analyse	24
2.5 Code Generierung	30
2.5.1 Monadische Normalform	31
2.5.2 A-Normalform	32
2.5.3 Ausgabe des Maschinenencodes	34
2.6 Fehlermeldungen	35
2.6.1 Kategorien von Fehlermeldungen	35
3 Ergebnisse und Ausblick	36
3.1 Funktionsumfang	36
3.1.1 Kommandozeilenoptionen	36
3.1.2 Shell-Mode	39
3.1.3 Show-Mode	40
3.2 Qualitätssicherung	42
3.3 Erweiterungsideen	46
Appendix	A
Literatur	F

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schritte zum Ausführen eines Programmes mit dem GCC	1
1.2	Stark vereinfachte Schritte zum Ausführen eines Programmes	1
1.3	README.md im Github Repository der Bachelorarbeit	5
2.1	Horizontale Übersetzungszwischenschritte zusammenfassen	13
2.2	Vertikale Interpretierungszwischenschritte zusammenfassen	13
2.3	Veranschaulichung von Linksassoziativität und Rechtsassoziativität	20
2.4	Veranschaulichung von Präzidenz	21
2.5	Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse	24
2.6	Veranschaulichung des Unterschieds zwischen Ableitungsbaum und Abstraktem Syntaxbaum.	28
2.7	Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse	29
2.8	Codebeispiel für das Trennen von Ausdrücken mit und ohne Nebeneffekten	32
2.9	Codebeispiel für das Entfernen Komplexer Ausdrücke aus Operationen	34
3.1	Show-Mode in der Verwendung	42
3.2	Cross-Compiler als Bootstrap Compiler	C
3.3	Iteratives Bootstrapping	E

Codeverzeichnis

3.1	Shellaufruf und die Befehle <code>compile</code> und <code>quit</code>	39
3.2	Shell-Mode und der Befehl <code>most_used</code>	40
3.3	Typischer Test	44
3.4	Testdurchlauf	46
3.5	Beispiel für Tail Call	48

Tabellenverzeichnis

3.1	Kommandozeilenoptionen	38
3.2	Makefileoptionen	41
3.3	Testkategorien	43

Definitionsverzeichnis

1.1	Imperative Programmierung	3
1.2	Strukturierte Programmierung	3
1.3	Prozedurale Programmierung	3
2.1	Interpreter	8
2.2	Compiler	8
2.3	Maschinensprache	9
2.4	Assemblersprache (bzw. engl. Assembly Language)	9
2.5	Assembler	10
2.6	Objectcode	10
2.7	Linker	10
2.8	Immediate	10
2.9	Transpiler (bzw. Source-to-source Compiler)	11
2.10	Cross-Compiler	11
2.11	T-Diagram Programm	11
2.12	T-Diagram Übersetzer (bzw. eng. Translator)	12
2.13	T-Diagram Interpreter	12
2.14	T-Diagram Maschine	12
2.15	Symbol	13
2.16	Alphabet	14
2.17	Wort	14
2.18	Formale Sprache	14
2.19	Syntax	14
2.20	Semantik	14
2.21	Formale Grammatik	14
2.22	Chromsky Hierarchie	15
2.23	Reguläre Grammatik	16
2.24	Kontextfreie Grammatik	16
2.25	Wortproblem	16
2.26	1-Schritt-Ableitungsrelation	17
2.27	Ableitungsrelation	17
2.28	Links- und Rechtsableitungableitung	17
2.29	Linksrekursive Grammatiken	17
2.30	Formaler Ableitungsbaum	18
2.31	Mehrdeutige Grammatik	19
2.32	LL(k)-Grammatik	19
2.33	Assoziativität	20
2.34	Präzidenz	20
2.35	Pipe-Filter Architekturpattern	21
2.36	Pattern	21
2.37	Lexeme	21
2.38	Lexer (bzw. Scanner oder auch Tokenizer)	22
2.39	Bezeichner (bzw. Identifier)	22
2.40	Literal	23
2.41	Konkrete Syntax	24
2.42	Ableitungsbaum (bzw. Konkretter Syntaxbaum, engl. Derivation Tree)	24
2.43	Parser	24
2.44	Recognizer (bzw. Erkennen)	25

2.45	Rekursiver Abstieg	26
2.46	Transformer	27
2.47	Visitor	27
2.48	Abstrakte Syntax	27
2.49	Abstrakter Syntaxbaum (bzw. engl. Abstract Syntax Tree, kurz AST)	27
2.50	Pass	30
2.51	Reiner Ausdruck (bzw. engl. pure expression)	31
2.52	Unreiner Ausdruck	31
2.53	Monadische Normalform (bzw. engl. monadic normal form)	31
2.54	Location	32
2.55	Atomarer Ausdruck	33
2.56	Komplexer Ausdruck	33
2.57	A-Normalform (ANF)	33
2.58	Fehlermeldung	35
3.1	Liveness Analyse	A
3.2	Live Variable	A
3.3	Graph Coloring	A
3.4	Interference Graph	A
3.5	Kontrollflussgraph	A
3.6	Kontrollfluss	B
3.7	Kontrollflussanalyse	B
3.8	Self-compiling Compiler	B
3.9	Minimaler Compiler	C
3.10	Bootstrap Compiler	C
3.11	Bootstrapping	D

Grammatikverzeichnis

2.1	Produktionen des Ableitungsbaums	18
-----	--	----

1 Motivation

Als Programmierer kommt man nicht drumherum einen **Compiler** zu nutzen, er ist geradezu **essentiell** für den Beruf oder das Hobby des Programmierens. Selbst in der Programmiersprache L_{Python} , welche als **interpretierte** Sprache bekannt ist, wird das in der Programmiersprache L_{Python} geschriebene Programm vorher zu **Bytecode** kompiliert, bevor dieser von der **Python Virtual Machine (PVM)** interpretiert wird.

Compiler, wie der **GCC**¹ oder **Clang**² werden üblicherweise über eine **Commandline-Schnittstelle** verwendet, welche es für den Benutzer **unkompliziert** macht ein Programm, dass in der Programmiersprache geschrieben ist, die der Compiler kompiliert³ zu **Maschinencode** zu kompilieren.

Meist funktioniert das über schlichtes und einfaches **Angeben der Datei**, die das Programm enthält, welches kompiliert werden soll, z.B. im Fall des **GCC** über `> gcc program.c -o machine_code`⁴. Als Ergebnis erhält man im Fall des **GCC** die mit der Option `-o` selbst benannte Datei `machine_code`, welche dann zumindest unter **Unix** über `> ./machine_code` **ausgeführt** werden kann, wenn das **Ausführungsrecht** gesetzt ist. Das gesamte gerade erläuterte Vorgehen ist in Abbildung 1.1 veranschaulicht.

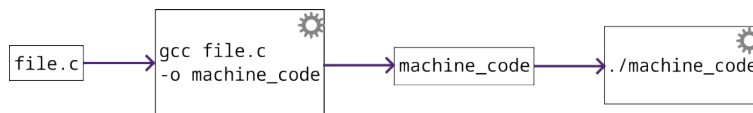


Abbildung 1.1: Schritte zum Ausführen eines Programmes mit dem GCC

Der ganze Kompilervorgang kann, wie er in Abbildung 1.2 dargestellt ist zu einer Box abstrahiert werden. Der Benutzer gibt ein **Programm** in der Sprache des Compilers rein und erhält **Maschinencode**, den er dann im besten Fall in eine andere Box hineingeben kann, welche die passende **Maschine** oder den passenden **Interpreter** in Form einer **Virtuellen Maschine** repräsentiert, der bzw. die den **Maschinencode** ausführen kann.

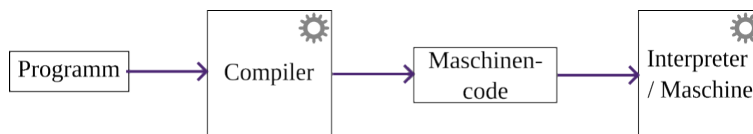


Abbildung 1.2: Stark vereinfachte Schritte zum Ausführen eines Programmes

¹GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project.

²clang: C++ Compiler.

³Im Fall des **GCC** und **Clang** ist es die Programmiersprache L_C .

⁴Bei **mehreren Dateien** ist das ganze allerdings etwas komplizierter, weil der **GCC** beim Angeben aller `.c`-Dateien nacheinander `gcc program_1.c ... program_n.c` nicht darauf achtet doppelten Code zu entfernen. Beim **GCC** muss am besten mittels einer **Makefile** dafür gesorgt werden, dass jede Datei einzeln zu **Objectcode** (Definition 2.6) kompiliert wird. Das Kompilieren zu **Objectcode** geht mittels des Befehls `gcc -c program_1.c ... program_n.c` und alle **Objectdateien** können am Ende mittels des **Linkers** mit dem Befehl `gcc -o machine_code program_1.o ... program_n.o` zusammen gelinkt werden.

Der Programmierer muss für das Vorgehen in Abbildung 1.2 **nichts** über die **Theoretischen Grundlagen des Compilerbau** wissen, noch wie der Compiler **intern** umgesetzt ist. In dieser Bachelorarbeit soll diese **Compilerbox** allerdings geöffnet werden und anhand eines eigenen im Vergleich zum **GCC** im Funktionsumfang **reduzierten Compilers** gezeigt werden, wie so ein Compiler **unter der Haube** stark vereinfacht funktionieren könnte.

Die konkrete **Aufgabe** besteht darin einen sogenannten **PicoC-Compiler** zu implementieren, der die **Programmiersprache** L_{PicoC} , welche eine Untermenge der Sprache L_C ist⁵ in eine zu **Lernzwecken** prädestinierte, **unkompliziert** gehaltene **Maschinensprache** L_{RETI} kompilieren kann. Im Unterkapitel 1.1 wird näher auf die **RETI-Architektur** eingegangen, die der Sprache L_{RETI} zu Grunde liegt und im Unterkapitel 1.2 wird näher auf die Sprache L_{PicoC} eingegangen, welche der **PicoC-Compiler** zur eben erwähnten Sprache L_{RETI} kompilieren soll.

1.1 RETI-Architektur

Die **RETI-Architektur** ist eine zu Lernzwecken für die Vorlesungen P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ und P. D. C. Scholl, „Technische Informatik“ entwickelte **32-Bit** Architektur, die sich vor allem durch ihre einfache Zugänglichkeit kennzeichnet und deren **Maschinensprache** L_{RETI} als Zielsprache des **PicoC-Compilers** hergenommen wurde. In der Vorlesung P. D. C. Scholl, „Technische Informatik“ wird die **grundlegende RETI-Architektur** erklärt und in der Vorlesung P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ wird diese Architektur erweitert, sodass diese mehr darauf angepasst ist, dass auch komplexere Konstrukte, wie ein **Betriebssystem**, **Interrupts**, **Funktionen** usw. auf nicht zu komplizierte Weise implementiert werden können.

In dieser **Bachelorarbeit** wird bei der **Maschinensprache** L_{RETI} immer von der Variante, welche durch die **RETI-Architektur** aus der Vorlesung P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ umgesetzt ist^a ausgegangen.

^aWelche unter anderem eine **Memory Map** von **EPROM**, **UART** und **SRAM** nutzt usw.

Der **Aufbau** der **Maschinensprache** L_{RETI} ist in Grammatik ?? und Grammatik ?? zusammengefasst dargestellt. Für die **Bedeutungen** der einzelnen **Register** und **Maschinenbefehle**, sowie **Implementierungsdetails** ist allerdings auf die Vorlesungen P. D. C. Scholl, „Technische Informatik“ und P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ zu verweisen.

Um den den **PicoC-Compiler** zu **testen** war es notwendig einen **RETI-Interpreter** zu implementieren, der genau die Variante der **RETI-Architektur** aus der Vorlesung P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ **simuliert**.

1.2 Die Sprache PicoC

Die Sprache L_{PicoC} ist eine Untermenge der Sprache L_C , welche

- **Einzeilige Kommentare** `//` und **Mehrzeilige Kommentare** `/*` und `*/`
- die **Primitiven Datentypen** `int`, `char` und `void`
- die **Abgeleiteten Datentypen Felder** (z.B. `int ar[3]`), **Verbunde** (z.B. `struct st {int attr1; attr2;}`) und **Zeiger** (z.B. `int *pntr`)

⁵Die der **GCC** kompilieren kann.

- `if(cond){ }- / else{ }-Statements`⁶
- `while(cond){ }-` und `do while(cond){ };-Statements`
- **Arihmetische Ausdrücke**, welche mithilfe der **binären Operatoren** `+`, `-`, `*`, `/`, `%`, `&`, `|`, `^` und **unären Operatoren** `-`, `~` umgesetzt sind
- **Logische Ausdrücke**, welche mithilfe der **Relationen** `==`, `!=`, `<`, `>`, `<=`, `>=` und **Logischer Verknüpfungen** `!`, `&&`, `||` umgesetzt sind
- **Zuweisungen**, die mit dem **Zuweisungsoperator** `=` umgesetzt sind
- **Funktionsdeklaration** (z.B. `int fun(int arg1[3], struct st arg2);`), **Funktionsdefinition** (z.B. `int fun(int arg1[3], struct st arg2){}`) und **Funktionsaufrufe** (z.B. `fun(ar, st_var)`)

beinhaltet. Die ausgegrauten • wurden bereits für das **Bachelorprojekt** umgesetzt und mussten für die **Bachelorarbeit** nur an die **neue Architektur** angepasst werden.

Der **Aufbau** der **Programmiersprache** L_C ist in Grammatik ?? und Grammatik ?? zusammengefasst beschrieben.

1.3 Eigenheiten der Sprache C

Definition 1.1: Imperative Programmierung

Wenn ein Programm aus einer **Folge von Befehlen** besteht, deren **Reihenfolge** auch bestimmt in welcher **Reihenfolge** diese **Befehle** auf einer **Maschine** ausgeführt werden.^a

^aThiemann, „Einführung in die Programmierung“.

Definition 1.2: Strukturierte Programmierung

Wenn ein Programm anstelle von z.B. `goto label-Statements` **Kontrollstrukturen**, wie z.B. `if(cond) { } else { }`, `while(cond) { }` usw. verwendet, welche dem Programmcode **mehr Struktur** geben, weil die **Auswahl** zwischen Statements und die **Wiederholung** von Statements eine **klare und eindeutige Struktur** hat, welche bei Umsetzung mit einem `goto label-Statement` **nicht so eindeutig erkennbar** wäre und auch **nicht** unbedingt immer **gleich aufgebaut** wäre.^a

^aThiemann, „Einführung in die Programmierung“.

Definition 1.3: Prozedurale Programmierung

Programme werden z.B. mittels **Funktionen** in **überschaubare Unterprogramme** bzw. **Prozeduren** aufgeteilt, die **aufzurufbar** sind. Dies **vermeidet** einerseits **redundanten Code**, indem Code **wiederverwendbar** gemacht wird und andererseits erlaubt es z.B. Codestücke nach ihren Aufgaben zu **abstrahieren**, den Codestücken wird eine **Aufgabe zugeteilt**, sie werden zu **Unterprogrammen** gemacht und fortan über einen **Bezeichner aufgerufen**, was den Code deutlich **überschaubarer** macht. da man die Aufgabe eines Codestücks nun nur noch mit seinem **Bezeichner assoziieren** muss.^a

^aThiemann, „Einführung in die Programmierung“.

⁶Was die Kombination von `if` und `else`, nämlich `else if(cond){ }` miteinschließt.

1.4 Gesetzte Schwerpunkte

Ein **Schwerpunkt** dieser Bachelorarbeit ist es in **erster Linie** bei der Kompilierung der Programmiersprache L_{PicoC} in die Maschinsprache L_{RETI} die **Syntax** und **Semantik** der Sprache L_C identisch nachzuahmen. Der **PicoC-Compiler** soll die Sprache L_{PicoC} im Vergleich zu z.B. dem **GCC**⁷ ohne merklichen Unterschied⁸ kompilieren können.

In **zweiter Linie** soll dabei möglichst immer so Vorgegangen werden, wie es die **RETI-Codeschnipsel** aus der Vorlesung P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ vorgeben. Allerdings sollten diese bei **Inkonsistenzen** bezüglich der durch sie selbst vorgegebenen **Paradigmen** und anderen **Umstimmigkeiten** angepasst werden, da der **erstere Schwerpunkt** überwiegt.

Des Weiteren ist die **Laufzeit** bei Compilern zwar vor allem in der Industrie **nicht unwichtig**, aber bei **Compilern**, verglichen mit **Interpretern** weniger zu gewichten, da ein Compiler bei einem fertig implementierten Programm nur **einmal** Maschinencode generieren muss und dieser Maschinencode danach fortan ausgeführt wird. Beim einem **Compiler** ist daher eher zu priorisieren, dass der kompilierte **Maschinencode** möglichst **effizient** ist.

1.5 Über diese Arbeit

Der Quellcode des **PicoC-Compilers** ist **öffentlich** unter **Link**⁹ zu finden. In der Datei **README.md** (siehe Abbildung 1.3) ist unter „Getting Started“ ein kleines **Einführungstutorial** verlinkt. Unter „Usage“ ist eine **Dokumentation** über die verschiedenen **Command-line Optionen** und verschiedene **Funktionalitäten der Shell** verlinkt. Daneben finden sich noch weitere Links zu möglicherweise interessanten Dokumenten. Der **letzte Commit** vor der Abgabe der **Bachelorarbeit** ist unter **Link**¹⁰ zu finden.

⁷Da die Sprache L_{PicoC} eine **Untermenge** von L_C ist, kann der **GCC** L_{PicoC} ebenfalls kompilieren, allerdings **nicht** in die gewünschte Maschinsprache L_{RETI} .

⁸Natürlich mit **Ausnahme** der sich unterscheidenden **Maschinsprachen** zu welchen kompiliert wird und der unterschiedlichen **Commandline-Optionen** und **Fehlermeldungen**.

⁹<https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler>.

¹⁰<https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/tree/bcafedffa9ff3075372554b14f1a1d369af68971>.



Abbildung 1.3: README.md im Github Repository der Bachelorarbeit

Die **Schriftliche Ausarbeitung** der Bachelorarbeit wurde ebenfalls **veröffentlicht**, falls Studenten, die den **PicoC-Compiler** in Zukunft nutzen sich in der Tiefe dafür interessieren, wie dieser unter der Haube funktioniert. Die **Schriftliche Ausarbeitung** dieser Bachelorarbeit ist als **PDF** unter [Link¹¹](#) zu finden. Die **PDF** der Schriftliche Ausarbeitung der Bachelorarbeit wird aus dem **Latexquellcode**, welcher unter [Link¹²](#) veröffentlicht ist automatisch mithilfe der **Github Action** Nemec, *copy_file_to_another_repo_action* und der **Makefile** Ueda, *Makefile for LaTeX* generiert.

Alle verwendeten **Latex Bibliotheken** sind unter [Link¹³](#) zu finden¹⁴. Die Grafiken, die nicht mittels der Tikz Bibliothek in Latex erstellt wurden, wurden mithilfe des Vectorgraphikeditors **Inkscape**¹⁵ erstellt. Falls Interesse besteht **Grafiken** aus der Schriftlichen Ausarbeitung der Bachelorarbeit zu verwenden, so sind diese zusammen mit den .svg-Dateien von **Inkscape** im Ordner `/figures` zu finden.

Alle weitere **verwendete Software**, wie verwendete **Python Bibliotheken**, **Vim/Neovim Plugins**, **Tmux Plugins** usw. sind in der `README.md` unter „References“ bzw. direkt unter [Link¹⁶](#) zu finden.

1.5.1 Still der Schriftlichen Ausarbeitung

In dieser **Schriftliche Ausarbeitung der Bachelorarbeit** sind die manche **Wörter** für einen besseren Lesefluss **hervorgehoben**. Es ist so gedacht, dass die **Hervorgehobenen Wörter** beim Lesen sichtbare **Ankerpunkte** darstellen an denen sich **orientiert** werden kann, aber auch damit der **Inhalt** eines vorher gelesener **Paragraphs** nochmal durch Überfliegen der Hervorgehobenen Wörter in **Erinnerung gerufen** werden kann.

Bei den **Erklärungen** wurden darauf geachtet bei jeder der verwendeten **Methodiken** und jeder **Designentscheidung** die Frage zu klären, „**warum** etwas genau so gemacht wurde und nicht anders“, denn wie es im

¹¹https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit_out/blob/main/Main.pdf.

¹²<https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit>.

¹³https://github.com/matthejue/Bachelorarbeit/blob/master/content/Packete_und_Deklarationen.tex.

¹⁴Jede einzelne verwendete Latex **Bibliothek** einzeln anzugeben wäre allerdings etwas zu aufwendig.

¹⁵Developers, *Draw Freely* — **Inkscape**.

¹⁶https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/blob/new_architecture/doc/references.md.

Buch LeFever, *The Art of Explanation* auf eine deutlich ausführlichere Weise dargelegt wird, ist einer der **zentralen Fragen**, die ein Leser in erster Linie zum **wirklichen Verständnis** eines Themas beantwortet braucht¹⁷ die Frage des „**warum**“.

Zum **Verweis auf Quellen** an denen sich z.B. bei der Formulierung von **Definitionen** orientiert wurde, wurden um den **Lesefluss** nicht zu stören **Fußnoten**¹⁸ verwendet. Die meisten Definitionen wurden in **eigenen Worten** formuliert, damit die Definitionen selbst zueinander **konsistent** sind, wie auch das in Ihnen verwendete **Vokabular**. Wurde eine Definition **wörtlich** aus einer Quelle übernommen, so wurde die Definition oder der entsprechende Teil in „**Anführungszeichen**“ gesetzt. Beim Verweis auf Quellen **außerhalb** einer **Definitionsbox**, wurde allerdings meistens, sofern die **Quelle** wirklich **relevant** war auf das **Zitieren über Fußnoten** verzichtet.

1.5.2 Aufbau der Schriftlichen Arbeit

Die **Schriftliche Ausarbeitung** der Bachelorarbeit ist in 4 Kapitel unterteilt: **Motivation**, **Einführung**, ?? und **Ergebnisse und Ausblick**.

Im momentanen Kapitel **Motivation**, wurde ein kurzer **Einstieg** in das Thema **Compilerbau** gegeben und die **zentrale Aufgabenstellung** der Bachelorarbeit erläutert, sowie auf **Schwerpunkte** und kleinere **Teilprobleme**, die eines **besonderen Fokus** bedürfen eingegangen.

Im Kapitel **Einführung** werden die notwendigen **Theoretischen Grundlagen** eingeführt, die zum Verständnis des Kapitels **Implementierung** notwendig sind. Das Kapitel soll darüberhinaus aber auch einen **Überblick** über das Thema Compilerbau geben, sodass nicht nur ein Grundverständnis für das eine **spezifische Vorgehen**, welches zur Implementierung des **PicoC-Compiler** verwendet wurde vermittelt wird, sondern auch ein **Vergleich** zu **anderen Vorgehensweisen** möglich ist. Die **Theoretischen Grundlagen** umfassen die wichtigsten Definitionen in Bezug zu Compilern und den verschiedenen **Phasen der Kompilierung**, welche durch die Unterkapitel **Lexikalische Analyse**, **Syntaktische Analyse** und **Code Generierung** repräsentiert sind.

Des Weiteren wurden für **T-Diagramme** und **Formale Sprachen** eigene Unterkapitel erstellt. Für **T-Diagramme** wurde ein eigenes Unterkapitel erstellt, da sie häufig in der Schriftlichen Ausarbeitung verwendet werden und die **T-Diagramm Notation** nicht allgemein bekannt ist. Für **Formale Sprachen** wurde ein eigenes Unterkapitel erstellt, da für den Gutachter Prof. Dr. Scholl das Thema **Formale Sprachen** eher **fachfremd** ist, aber dieses Thema einige zentrale und wichtige Fachbegriffe besitzt, bei denen es wichtig ist die genaue **Definition** zu haben. Generell wurde im Kapitel **Einführung** versucht an Erklärungen nicht zu sparen, damit aufgrund dessen, dass das Thema eher fachfremd für Prof. Dr. Scholl ist für das Kapitel **Implementierung** keine wichtigen Aspekte unverständlich bleiben.

Im Kapitel ?? werden die einzelnen Aspekte der Implementierung des **PicoC-Compilers**, unterteilt in die verschiedenen **Phasen der Kompilierung** nach denen das Kapitel **Einführung** ebenfalls unterteilt ist erklärt. Dadurch, dass Kapitel **Implementierung** und Kapitel **Einführung** eine **ähnliche Kapiteileinteilung** haben, ist es besonders einfach zwischen beiden hin und her zu wechseln. Wenn z.B. eine Definition im Kapitel **Einführung** gesucht wird, die zum Verständnis eines Aspekts in Kapitel **Implementierung** notwendig ist, so kann aufgrund der ähnlichen **Kapiteileinteilung** die entsprechende Definition analog im Kapitel **Einleitung** gefunden werden.

Im Kapitel **Ergebnisse und Ausblick** wird ein **Überblick** über die **wichtigsten Funktionalitäten** des PicoC-Compilers gegeben, indem anhand **kleiner Anleitungen** gezeigt wird wie man diese verwendet. Des Weiteren wird darauf eingegangen, wie die **Qualitätsicherung** für den **PicoC-Compiler** umgesetzt wurde, also wie gewährleistet wird, dass der **PicoC-Compiler** funktioniert. Zum Schluss wird noch auf **weitere Erweiterungsideen** eingegangen, die auch interessant zu implementieren wären.

¹⁷Vor allem **Anfang**, wo der Leser **wenig** über das Thema **weiß**.

¹⁸Das ist ein **Beispiel** für eine **Fußnote**.

Im Kapitel **Appendix** wird im Unterkapitel 3.3 der Bogen von der **spezifischen** Implementierung des **PicoC-Compilers** wieder zum **allgemeinen Vorgehen** bei der Implementierung eines Compilers geschlagen und darauf eingegangen, wie man den **PicoC-Compiler** mittels **Bootstrapping** unabhängig von der Sprache L_{Python} und der **Maschine**, die das **cross-compilen** (Definition 2.10) übernimmt machen kann. Das Unterkapitel 3.3 ist bewusst dem Kapitel **Appendix** zugeordnet werden und in sich **abgeschlossen**, weshalb **keine Definitionen** ins **Kapitel Einführung** ausgelagert werden. **Bootstrapping** passt **nicht** ins Kapitel **Implementierung**, da Bootstrapping selbst **nicht** bei der Implementierung des **PicoC-Compilers** umgesetzt wurde und es sich bei diesem Unterkapitel eher um einen **interessanten Zusatz** unabhängig von den anderen Kapiteln handelt, der darauf eingeht, wie der **PicoC-Compiler** zum einem **richtigen Compiler** für die **RETI-CPU** gemacht werden könnte, der auf der RETI-CPU selbst läuft. Aus diesem Grund wurden ins Kapitel **Einführung** auch **keine** Definitionen ausgelagert, da dieses nur **Theoretische Grundlagen** erklärt, die für das Kapitel **Implementierung** wichtig sind.

Generell wurde in der Schriftlichen Ausarbeitung immer versucht **Parallelen** zu Implementierung **echter** Compiler zu ziehen. Der Zweck des **PicoC-Compilers** ist es primär ein **Lerntool** zu sein, weshalb Methoden, wie **Graph Coloring** usw., die in **echten** Compilern zur Anwendung kommen **nicht umgesetzt** wurden, da sich an die **vorgegebenen Paradigmen** aus der Vorlesung P. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“ gehalten werden sollte.

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** 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**¹ und von **Tests** die **Beziehungen** in 2.2.1 zu belegen (siehe Subkapitel 3.2).

Definition 2.1: Interpreter

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

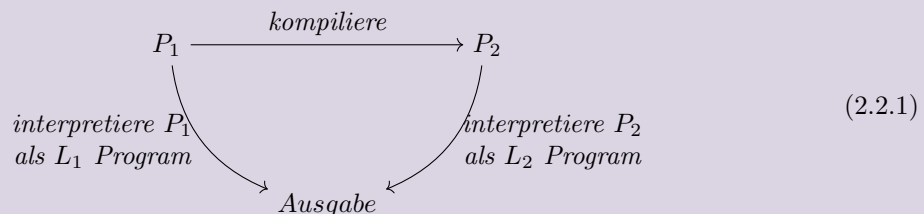
*Auf die Implementierung bezogen arbeitet ein Interpreter auf den compilerinternen **Sub-Bäumen** des **Abstrakter Syntaxbaum** (Definition 2.49) und führt je nach Komposition der **Nodes** des Abstrakter Syntaxbaum, auf die er während des Darüber-Iterierens stösst unterschiedliche Anweisungen aus.^a*

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 2.2: Compiler

***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 Program P_2 übersetzt wird, dass bei beiden Programmen, wenn sie von **Interpretern** ihrer jeweiligen Sprachen L_1 und L_2 **interpretiert** werden, die gleiche **Ausgabe** rauskommt, wie es in Diagramm 2.2.1 dargestellt ist. Also beide Programme P_1 und P_2 die gleiche **Semantik** (Definition 2.20) haben und sich nur **syntaktisch** (Definition 2.19) durch die Sprachen L_1 und L_2 , in denen sie geschrieben stehen unterscheiden.^a



^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

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

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. Fall 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 3.9) kann man das als C_{min} schreiben.

Üblicherweise kompiliert ein **Compiler** ein **Program**, dass in einer **Programmiersprache** geschrieben ist zu **Maschinenenncode**, der in **Maschinensprache** (Definition 2.3) geschrieben ist, aber es gibt z.B. auch **Transpiler** (Definition 2.9) oder **Cross-Compiler** (Definition 2.10). Des Weiteren sind **Maschinensprache** und **Assemblersprache** (Definition 2.4) voneinander zu unterscheiden.

Definition 2.3: 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**, genauer gesagt 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 designed, dass sie sich innerhalb bestimmter **Wortbreiten**, die 2er Potenzen sind codieren lassen. Im einfachsten Fall innerhalb einer **Speicherzelle** des **Hauptspeichers**.^{a,b}*

^aViele 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 2.8) haben.

^bP. D. C. Scholl, „Betriebssysteme“.

Definition 2.4: Assemblersprache (bzw. engl. Assembly Language)

*Eine sehr **hardwarenahe** Programmiersprache, deren **Instructions** eine starke Entsprechung zu bestimmten Maschinenbefehlen bzw. Folgen von Maschinenbefehlen^a haben. Viele **Instructions** haben eine ähnliche übliche Struktur **Operation** <Operanden>, mit einer **Operation**, die einem **Opcode** eines Maschinenbefehls bezeichnet und keinen oder mehreren **Operanden**, wie die späteren Maschinenbefehle, denen sie entsprechen. Allerdings gibt es oftmals noch viel „syntaktischen Zucker“ innerhalb^b der Instructions und drumherum^{c,d}.*

^aInstructions der Assemblersprache, die mehreren Maschinenbefehlen entsprechen werden auch als **Pseudo-Instructions** bezeichnet und entsprechen dem, was man im allgemeinen als Macro bezeichnet.

^bZ.B. erlaubt die Assemblersprache des **GCC** für die **X86_64-Architektur** für manche Operanden die Syntax **n(%r)**, die einen **Speicherzugriff** mit **Offset** n zur Adresse, die im **Register** **%r** steht durchführt, wobei z.B. die Klammern () usw. nur „syntaktischer Zucker“ sind und natürlich nicht mitcodiert werden.

^cZ.B. sind im X86_64 Assembler die Instructions in **Blöcken** untergebracht, die ein **Label** haben und zu denen mittels **jmp <label>** gesprungen werden kann. Ein solches Konstrukt, was vor allem auch noch relativ beliebig wählbare Bezeichner verwendet hat keine direkte Entsprechung in einem handelsüblichen Prozessor und Hauptspeicher.

^dP. D. P. Scholl, „Einführung in Embedded Systems“.

Ein **Assembler** (Definition 2.5) ist in üblichen Compilern in einer bestimmten Form meist schon integriert sein, da Compiler üblicherweise direkt **Maschinenenncode** bzw. **Objectcode** (Definition 2.6) erzeugen. Ein **Compiler** soll möglichst viel von seiner internen Funktionsweise und der damit verbundenen Theorie für den Benutzer abstrahieren und dem Benutzer daher standardmäßig einfach nur den Output liefern, den er in den allermeisten Fällen haben will, nämlich den **Maschinenenncode** bzw. **Objectcode**, der direkt ausführbar ist bzw. wenn er später mit dem **Linker** (Definition 2.7) zu Maschiendencode zusammengesetzt wird ausführbar

ist.

Definition 2.5: Assembler

Übersetzt im allgemeinen **Assemblercode**, der in **Assemblersprache** geschrieben ist zu **Maschinencode** bzw. **Objectcode** in **binärer Repräsentation**, der in **Maschiensprache** geschrieben ist.^a

^aP. D. P. Scholl, „Einführung in Embedded Systems“.

Definition 2.6: Objectcode

Bei Komplexeren Compilern, die es erlauben den Programmcode in **mehrere Dateien** aufzuteilen wird häufig **Objectcode** erzeugt, der neben der Folge von Maschinenbefehlen in **binärer Repräsentation** auch noch Informationen für den **Linker** enthält, die im späteren **Maschiencode** nicht mehr enthalten sind, sobald der **Linker** die Objektdateien zum Maschinencode zusammengesetzt hat.^a

^aP. D. P. Scholl, „Einführung in Embedded Systems“.

Definition 2.7: Linker

Programm, das **Objektcode** aus mehreren Objektdateien zu ausführbarem **Maschinencode** in eine ausführbare Datei oder Bibliotheksdatei **linkt**, sodass unter anderem kein vermeidbarer **doppelter Code** darin vorkommt.^a

^aP. D. P. Scholl, „Einführung in Embedded Systems“.

Der **Maschinencode**, denn 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 ausgeschriebenem RETI-Operationen, RETI-Registern und Immediates (Definition 2.8) enthält. Für den **RETI-Interpreter** ist es ebenfalls nicht notwendig, dass der Maschinencode, denn 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 Umsetzung².

Definition 2.8: Immediate

Konstanter Wert, der als **Teil** eines **Maschinenbefehls** gespeichert ist und dessen **Wertebereich** dementsprechend auch durch die die Anzahl an Bits, die ihm innerhalb dieses **Maschinenbefehls** zur Verfügung gestellt sind, **beschränkter** ist als bei sonstigen Werten innerhalb des Hauptspeichers, denen eine ganze Speicherzelle des Hauptspeichers zur Verfügung steht.^a

^aLjohhuh, *What is an immediate value?*

²Eine **RETI-CPU** zu bauen, die menschenlesbaren Maschinencode in z.B. **UTF-8 Codierung** ausführen kann, wäre dagegen unnötig kompliziert und aufwändig, da Hardware **binär** arbeitet und man dieser daher lieber direkt die binär codierten 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.

Definition 2.9: Transpiler (bzw. Source-to-source Compiler)

Kompiliert zwischen Sprachen, die ungefähr auf dem *gleichen* Level an *Abstraktion* arbeiten^{ab}

^aDie Programmiersprache **TypeScript** will als **Obermenge** von **JavaScript** die Sprachhe Javascript **erweitern** und gleichzeitig die **syntaktischen Mittel** von JavaScript unterstützen. Daher bietet es sich Typescript zu Javascript zu **transpilieren**.

^bThiemann, „Compilerbau“.

Definition 2.10: 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 **Maschinen Sprachen** B_1 und B_2 haben.^{ab}

^aBeim **PicoC-Compiler** handelt es sich um einen **Cross-Compiler** C_{PicoC}^{Python} .

^bEarley 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 **Maschinen Sprache** B_2 einer Zielmaschine M_2 läuft.³

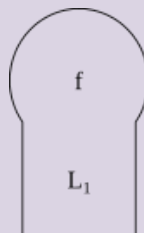
2.1.1 T-Diagramme

Um die Architektur von **Compilern** und **Interpretern** übersichtlich darzustellen eignen sich **T-Diagramme**, deren Spezifikation aus dem Paper 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 Programm (Definition 2.11), einen Übersetzer (Definition 2.12), einen Interpreter (Definition 2.13) und eine Maschine (Definition 2.14) zusammen.

Definition 2.11: T-Diagram Programm

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



^aEarley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

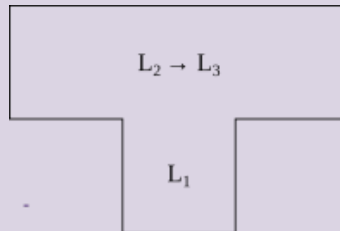
Es ist bei **T-Diagrammen** nicht notwendig beim entsprechenden **Platzhalter**, in den man die genutzte **Sprache** schreibt, den **Namen der Sprache** an ein L dranzuhängen, weil hier immer eine **Sprache** steht. Es würde in Definition 2.11 also reichen einfach eine 1 hinzuschreiben.

³Die an vielen Universitäten und Schulen eingesetzten programmierbaren Roboter von **Lego Mindstorms** nutzen z.B. einen **Cross-Compiler**, um für den programmierbaren Microcontroller eine **C-ähnliche Sprache** in die Maschinent Sprache des Microcontrollers zu kompilieren, da der Microcontroller selbst nicht genug Rechenleistung besitzt, um ein Programm selbst **zeitnah** zu kompilieren.

Definition 2.12: T-Diagramm 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**^a die **Beziehungen** in 2.2.1.^b

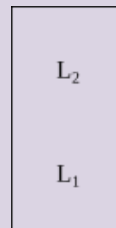


^aZwischen den Begriffen **Übersetzung** und **Kompilierung** gibt es einen kleinen Unterschied, **Übersetzung** ist **kleinschrittiger** als **Kompilierung** und ist auch zwischen **Passes** möglich, **Kompilierung** beinhaltet dagegen bereits alle **Passes** in einem Schritt. **Kompilieren** ist also auch **Übersetzen**, aber **Übersetzen** ist nicht immer auch **Kompilieren**.

^bEarley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

Definition 2.13: T-Diagramm Interpreter

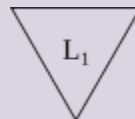
Repräsentiert einen **Interpreter**, der in der **Sprache** L_1 geschrieben ist und **Programme** in der **Sprache** L_2 interpretiert.^a



^aEarley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

Definition 2.14: T-Diagramm Maschine

Repräsentiert eine **Maschine**, welche ein **Programm** in **Maschinensprache** L_1 ausführt.^{a,b}



^aWenn 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).

^bEarley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

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

Sowohl **horizontale** als auch **vertikale Adjazents** lassen sich, wie man in den Abbildungen 2.1 und 2.2 erkennen kann zusammenfassen.

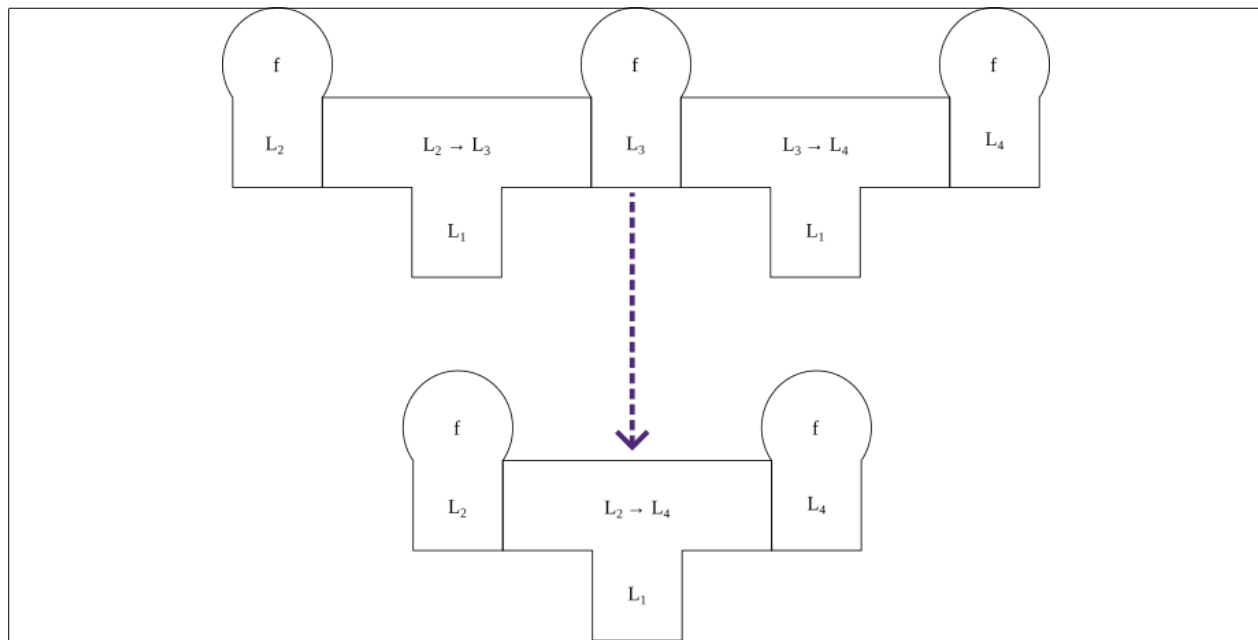


Abbildung 2.1: Horizontale Übersetzungszwischenschritte zusammenfassen

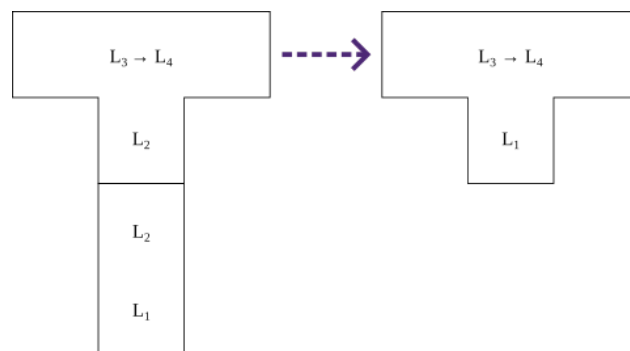


Abbildung 2.2: Vertikale Interpretierungszwischenschritte zusammenfassen

2.2 Formale Sprachen

Das **Kompilieren** eines Programmes hat viel mit dem Thema **Formaler Sprachen** (Definition 2.18) zu tun, 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 2.15), **Alphabet** (Definition 2.16), **Wort** (Definition 2.17) usw. beinhaltet vorher eingeführt zu haben.

Definition 2.15: Symbol

„Ein Symbol ist ein **Element** eines **Alphabets** Σ .“^a

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Definition 2.16: Alphabet

„Ein Alphabet ist eine **endliche, nicht-leere** Menge aus **Symbolen** (Definition 2.15).“^a

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Definition 2.17: Wort

„Ein Wort $w = a_1 \dots a_n \in \Sigma^*$ ist eine **endliche Folge** von **Symbolen** aus einem **Alphabet** Σ .“^a

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Definition 2.18: Formale Sprache

„Eine Formale Sprache ist eine Menge von **Wörtern** (Definition 2.17) über dem **Alphabet** Σ (Definition 2.16).“^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.

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Bei der Übersetzung eines Programmes von einer Sprache L_1 zur Sprache L_2 muss die **Semantik** (Definition 2.20) **gleich** bleiben. Beide Sprachen L_1 und L_2 haben eine **Grammatik** (Definition 2.21), welche diese beschreibt und können verschiedene **Syntaxen** (Definition 2.19) haben.

Definition 2.19: Syntax

Die Syntax bezeichnet alles was mit dem **Aufbau** von **Formalen Sprachen** zu tun hat. Die **Grammatik** einer Sprache, aber auch die in **Natürlicher Sprache** ausgedrückten Regeln, welche den Aufbau von Wörtern einer Formalen Sprache beschreiben werden als Syntax bezeichnet. Es kann auch mehrere **verschiedene Syntaxen** für die **gleiche Sprache** geben^{a, b}

^aZ.B. die **Konkrete** und **Abstrakte Syntax**, die später eingeführt werden.

^bThiemann, „Einführung in die Programmierung“.

Definition 2.20: Semantik

Die Semantik bezeichnet alles was mit der **Bedeutung** von **Formalen Sprachen** zu tun hat.^a

^aThiemann, „Einführung in die Programmierung“.

Definition 2.21: Formale Grammatik

„Eine Formale Grammatik beschreibt 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:

- $N \hat{=}$ **Nicht-Terminalsymbole**.

- $\Sigma \hat{=} \text{Terminalsymbole}$, wobei $N \cap \Sigma = \emptyset^{b,c}$.
- $P \hat{=} \text{Menge von Produktionsregeln } w \rightarrow v$, wobei $w, v \in (N \cup \Sigma)^* \wedge w \notin \Sigma^*$.^{d,e}
- $S \hat{=} \text{Startsymbol}$, wobei $S \in N$.

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

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

^bWeil mit ihnen **terminiert** wird.

^cKann auch als **Alphabet** bezeichnet werden.

^d w muss **mindestens** ein **Nicht-Terminalsymbol** enthalten.

^eBzw. $w, v \in V^* \wedge w \notin \Sigma^*$.

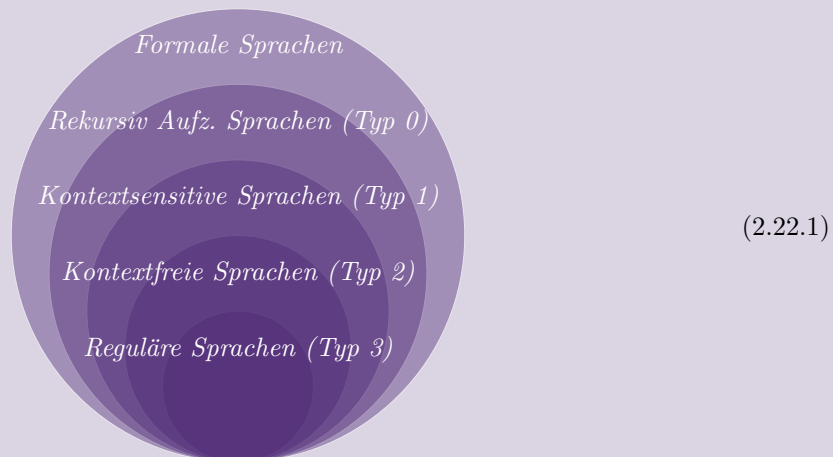
Die gerade definierten **Formale Sprachen** lassen sich des Weiteren in Klassen der **Chromsky Hierarchie** (Definition 2.22) einteilen.

Definition 2.22: 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 **Entscheidungsprobleme**, die in dieser Klasse **entscheidbar** bzw. **unentscheidbar** sind usw.

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

Zwischen den Sprachmengen **benachbarter Klassen** in Abbildung 2.22.1 besteht eine **echte Teilmen-genbeziehung**: $L_3 \subset L_2 \subset L_1 \subset L_0$. Jede **Reguläre Sprache** ist auch eine **Kontextfreie Sprache**, aber nicht jede **Kontextfreie Sprache** ist auch eine **Reguläre Sprache**.^a



^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Für diese Bachelorarbeit sind allerdings nur die **Spracheklassen** der **Chromsky-Hierarchie** relevant, die von **Regulären** (Definition 2.23) und **Kontextfreien Grammatiken** (Definition 2.24) beschrieben werden.

Definition 2.23: Reguläre Grammatik

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

$$A \rightarrow cB, \quad A \rightarrow c, \quad A \rightarrow \varepsilon \quad (2.23.1)$$

haben, wobei A, B **Nicht-Terminalsymbole** sind und c ein **Terminalsymbol** ist^{a,b}.“^c

^aDiese Definition einer **Regulären Grammatik** ist **rechtsregulär**, es ist auch möglich diese Definition **linksregulär** zu formulieren, aber diese Details sind für die Bachelorarbeit nicht relevant.

^bDadurch, dass die **linke** Seite immer nur ein **Nicht-Terminalsymbol** sein darf ist jede **Reguläre Grammatik** auch eine **Kontextfrei Grammatik**.

^cNebel, „Theoretische Informatik“.

Definition 2.24: Kontextfreie Grammatik

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

$$A \rightarrow v \quad (2.24.1)$$

haben, wobei A ein **Nicht-Terminalsymbol** ist und v ein beliebige Folge von **Grammatiksymbolen**^a ist.“^b

^aAlso eine beliebige Folge von **Nicht-Terminalsymbolen** und **Terminalsymbolen**.

^bNebel, „Theoretische Informatik“.

Ob sich ein Programm überhaupt kompilieren lässt entscheidet sich anhand des **Wortproblems** (Definition 2.25). 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.

Definition 2.25: Wortproblem

Ein Entscheidungsproblem, 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 $w \notin L$.^b

Das Wortproblem kann durch die folgende **Indikatorfunktion**^c zusammengefasst werden:

$$\mathbb{1}_L : \Sigma^* \rightarrow \{0, 1\} : w \mapsto \begin{cases} 1 & \text{falls } w \in L \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.25.1)$$

^aBzw. „ja“ oder „nein“ usw., es muss nicht umgedingt 1 oder 0 sein.

^bNebel, „Theoretische Informatik“.

^cAuch **Charakteristische Funktion** genannt.

2.2.1 Ableitungen

Um sicher zu wissen, ob ein Compiler ein **Programm**⁴ kompilieren kann, ist es möglich das Programm mithilfe der **Grammatik** der **Sprache** des Compilers **abzuleiten**. Hierbei wird zwischen der **1-Schritt-Ableitungsrelation** (Definition 2.26) und der normalen **Ableitungsrelation** (Definition 2.27) unterscheiden.

⁴Bzw. **Wort**.

Definition 2.26: 1-Schritt-Ableitungsrelation

„Eine **binäre Relation** \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 unterscheiden.

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

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Definition 2.27: 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** $u = w_1 \Rightarrow \dots \Rightarrow w_n = v$, wobei $n \geq 1$ und $w_1, \dots, w_n \in (N \cup \Sigma)^*$.“^a

^aNebel, „Theoretische Informatik“.

Beim Ableiten kann auf verschiedene Weisen vorgegangen werden, dasselbe **Programm**⁵ kann z.B. über eine **Linksableitung** als auch eine **Rechtsableitung** (Definition 2.28) abgeleitet werden. Das ist später bei den verschiedenen **Ansätzen** für das **Parsen** eines Programmes in Unterkapitel 2.4 relevant.

Definition 2.28: Links- und Rechtsableitung

„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** die **linke** Seite einer Produktion.

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

^aNebel, „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 2.29) ist⁶.

Definition 2.29: Linksrekursive Grammatiken

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 · Crafting Interpreters.

⁵Bzw. **Wort**.

⁶Für den im **PicoC-Compiler** verwendeten **Earley Parsers** stellt dies allerdings **kein** Problem dar.

Um herauszufinden, ob eine Grammatik **mehrdeutig** (siehe Unterkapitel 2.2.2) ist, werden **Ableitungen** als **Formale Ableitungsbäume** (Definition 2.30) dargestellt. **Formale Ableitungsbäume** werden im Unterkapitel 2.4 nochmal relevant, da in der **Syntaktischen Analyse** Ableitungsbäume (Definition 2.42) als eine **compilerinterne Datenstruktur** umgesetzt werden.

Definition 2.30: Formaler Ableitungsbaum

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

Das Adjektiv „**formal**“ kann dabei weggelassen werden, wenn der **Kontext** in dem 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 **Datenstruktur** zur einfachen Weiterverarbeitung umsetzt.

Den Knoten dieses Baumes sind **Grammatiksymbole** $V = N \cup \Sigma \cup \varepsilon$ (Definition 2.21) zugeordnet. Die **Inneren Knoten** des Baumes sind **Nicht-Terminalsymbole** N und die **Blätter** sind entweder **Terminalsymbole** Σ oder das **leere Wort** ε .^b

^aZ.B. **Programmcode**.

^bNebel, „Theoretische Informatik“.

In Abbildung 2.30.2 ist ein Beispiel für einen **Formalen Ableitungsbaum** zu sehen, der sich aus der **Ableitung** 2.30.1 nach den im **Dialekt der Erweiterter Backus-Naur-Form des Lark Parsing Toolkit** (Definition ??) angegebenen **Produktionen** 2.1 einer ansonsten nicht näher spezifizierten **Grammatik** $G = \langle N, \Sigma, P, add \rangle$ ergibt.

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		NUM							

Grammar 2.1: *Produktionen des Ableitungsbaums*

$$add \Rightarrow mul \Rightarrow mul \text{ "*" } NUM \Rightarrow NUM \text{ "*" } NUM \Rightarrow 4 \text{ "*" } NUM \Rightarrow 4 \text{ "*" } 2 \quad (2.30.1)$$

Bei Ableitungsbäumen gibt es **keine** einheitliche **Regelung**, wie damit umgegangen wird, wenn die **Alternativen** einer Produktion unterschiedliche viele **Nicht-Terminalsymbole** enthalten. Es gibt einmal die Möglichkeit, wie im Ableitungsbaum 2.30.2 von der **Maximalzahl** auszugehen und beim Nicht-Erreichen der Maximalzahl entsprechend der **Differenz zur Maximalzahl** viele **Blätter** mit dem **leeren Wort** ε hinzuzufügen.



Eine andere Möglichkeit ist, wie im Ableitungsbaum 2.30.3 nur die vorhandenen **Nicht-Terminalsymbole** als Kinder hinzuzufügen⁷.



2.2.2 Mehrdeutige Grammatiken

Für einen Compiler ist es notwendig, dass die **Grammatik**, welche die **Konkrete Syntax** beschreibt keine **Mehrdeutige Grammatik** (Definition 2.31) ist, denn sonst können unter anderem die **Präferenzregeln** der verschiedenen **Operatoren** nicht gewährleistet werden, wie später in Unterkapitel ?? an einem Beispiel demonstriert wird.

Definition 2.31: Mehrdeutige Grammatik

„Eine Grammatik ist **mehrdeutig**, wenn es ein Wort $w \in L(G)$ gibt, das mehrere **Ableitungsbäume** zulässt“.^{a,b}

^aAlternativ, wenn es für w **mehrere** unterschiedliche **Linksableitungen** gibt.

^bNebel, „Theoretische Informatik“.

Bei manchen **Ansätzen** für das **Parsen** eines Programmes, ist es notwendig eine **LL(k)-Grammatik** (Definition 2.32) vorliegen zu haben. Bei diesen Ansätzen, die meist die Methode des **Rekursiven Abstiegs** (Definition 2.45) verwenden lässt sich eine bessere minimale **Laufzeit** garantieren, da aufgrund der **LL(k)-Eigenschaft** ausgeschlossen werden kann, dass **Backtracking** notwendig ist⁸.

Definition 2.32: 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.^c

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

⁷Diese Option wurde beim **PicoC-Compiler** gewählt.

⁸Mehr **Erklärung** hierzu findet sich im Unterkapitel 2.4.

^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.

^cNebel, „Theoretische Informatik“.

2.2.3 Präzidenz und Assoziativität

Will man die **Operatoren** aus einer **Programmiersprache** in einer **Grammatik** für eine **Konkrete Syntax** ausdrücken, die **nicht mehrdeutig** ist, so lässt sich das nach einem klaren Schema machen, wenn die **Assoziativität** (Definition 2.33) und **Präzidenz** (Definition 2.34) dieser **Operatoren** festgelegt ist. Dieses Schema wird in Unterkapitel ?? genauer erklärt.

Definition 2.33: Assoziativität

„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.^a

^aParsing Expressions · Crafting Interpreters.

Bei **Assoziativität** ist z.B. der **Multiplikationsoperator** $*$ ein Beispiel für einen **linksassoziativen** Operator und ein **Zuweisungsoperator** $=$ ein Beispiel für einen **rechtsassoziativen** Operator. Dies ist in Abbildung 2.3 mithilfe von Klammern $()$ veranschaulicht.

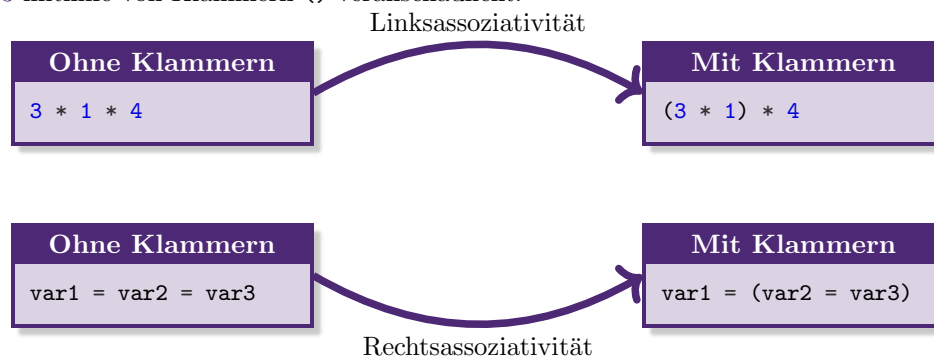


Abbildung 2.3: Veranschaulichung von Linksassoziativität und Rechtsassoziativität

Definition 2.34: Präzidenz

„Bestimmt, welcher Operator **zuerst** in einem Ausdruck, der eine Mischung **verschiedener** Operatoren enthält, ausgewertet wird. Operatoren mit einer **höheren Präzidenz**, werden **vor** Operatoren mit **niedrigerer Präzidenz** ausgewertet.“^a

^aParsing Expressions · Crafting Interpreters.

Bei **Präzidenz** ist die Mischung der Operatoren für **Subtraktion** $-$ und für **Multiplikation** $*$ ein Beispiel für den Einfluss von Präzidenz. Dies ist in Abbildung 2.4 mithilfe der Klammern $()$ veranschaulicht. Im Beispiel in Abbildung 2.4 ist bei den beiden **Subtraktionsoperatoren** $-$ nacheinander und dem darauffolgenden **Multiplikationsoperator** $*$ sowohl **Assoziativität** als auch **Präzidenz** im Spiel.



Abbildung 2.4: Veranschaulichung von Präzedenz

2.3 Lexikalische Analyse

Die **Lexikalische Analyse** bildet üblicherweise den ersten Filter innerhalb des **Pipe-Filter Architektur-patterns** (Definition 2.35) 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 2.36) matchen, die durch eine **reguläre Grammatik** spezifiziert sind.

Definition 2.35: Pipe-Filter Architekturpattern

Ist ein **Architekturpattern**, 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.^{a,b}



^aDas 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 Anlehnung 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.

^bWestphal, „Softwaretechnik“.

Diese Folgen endlicher Symbole werden auch **Lexeme** (Definition 2.37) genannt.

Definition 2.36: 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.^b

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

^bThiemann, „Compilerbau“.

Definition 2.37: Lexeme

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

^aThiemann, „Compilerbau“.

Diese **Lexeme** werden vom **Lexer** (Definition 2.38) im **Inputstring** identifiziert 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 2.38) sind es, die letztendlich an die **Syntaktische Analyse** weitergegeben werden.

Definition 2.38: Lexer (bzw. Scanner oder auch Tokenizer)

*Ein **Lexer** ist eine partielle Funktion $lex : \Sigma^* \rightarrow (N \times W)^*$, welche ein **Wort** bzw. **Lexeme** aus Σ^* 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} ableiten lässt bzw. einem der **Pattern** der Sprache L_{Lex} entspricht.^a*

^aThieman, „Compilerbau“.

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.

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** (Definition 2.39) von **Variablen, Konstanten und Funktionen** die Symbole^a.

^aDas ist der Grund, warum die **Tabelle**, in der Informationen zu **Bezeichnern** gespeichert werden, in Kapitel ?? **Symboltabelle** genannt wird.

Definition 2.39: Bezeichner (bzw. Identifier)

***Tokenwert**, der eine Konstante, Variable, Funktion usw. innerhalb ihres **Scopes** eindeutig benennt.^{a,b}*

^aAußer wenn z.B. bei Funktionen die Programmiersprache das **Überladen** erlaubt usw. In diesem Fall wird die **Signatur** der Funktion als weiteres Unterscheidungsmerkmal hinzugenommen, damit es eindeutig ist.

^bThieman, „Einführung in die Programmierung“.

Eine weitere Aufgabe der **Lexikalischen Analyse** ist es jegliche für die Weiterverarbeitung unwichtigen Symbole, wie Leerzeichen `␣`, Newline `\n`⁹ 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 $\epsilon \in (N \times W)^*$ ist immer der Fall beim **Kleene Stern Operator** $*$. 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

⁹In 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.

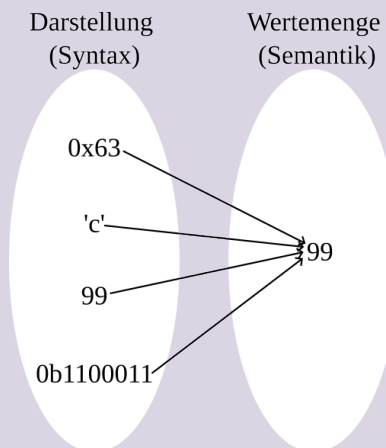
beliebige Bezeichner von Variablen, Konstanten und Funktionen und beliebige Zahlen sind aber trotz allem z.B. NAME und NUM¹⁰, bzw. wenn man sich nicht Kurzformen sucht IDENTIFIER und NUMBER. Für **Lexeme**, wie if oder } sind die **Tokennamen** bzw. Überbegriffe genau die Bezeichnungen, die man diesen Zeichenfolgen geben würde, nämlich IF und RBRACE.

Ein **Lexeme** ist damit aber nicht immer das gleiche, wie der **Tokenwert**, denn z.B. im Falle von PicoC kann der Wert 99 durch zwei verschiedene **Literale** (Definition 2.40) dargestellt werden, einmal als ASCII-Zeichen 'c', dass den entsprechenden Wert in der ASCII-Tabelle hat und des Weiteren auch in Dezimalschreibweise als 99¹¹. Der **Tokenwert** ist jedoch der letztendlich verwendete Wert an sich, unabhängig von der Darstellungsform.

Die **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** vorausschaut¹², sich nichts merken muss und unabhängig davon, was für Symbole davor aufgetaucht sind läuft. Die Grammatik ?? liefert den Beweis, dass die Sprache L_{PicoC_Lex} des **PicoC-Compilers** auf jeden Fall **regulär** ist, da sie fast die Definition 2.23 erfüllt. Einzig die Produktion $CHAR ::= \text{"\"ASCII_CHAR\""}'$ sieht problematisch aus, kann allerdings auch als $\{CHAR ::= \text{"\"CHAR2\""}, CHAR2 ::= ASCII_CHAR\}$ **regulär** ausgedrückt werden¹³. Somit existiert eine **reguläre Grammatik**, welche die **Sprache** L_{PicoC_Lex} beschreibt und damit ist die **Sprache** L_{PicoC_Lex} **regulär**.

Definition 2.40: Literal

Eine von möglicherweise vielen weiteren **Darstellungsformen** (als **Zeichenkette**) für ein und denselben **Wert** eines **Datentyps**.^a



^aThiemann, „Einführung in die Programmierung“.

Um eine Gesamtübersicht über die **Lexikalische Analyse** zu geben, ist in Abbildung 2.5 die Lexikalische Analyse an einem Beispiel veranschaulicht.

¹⁰Diese **Tokennamen** wurden im **PicoC-Compiler** verwendet, da man beim Programmieren möglichst **kurze** und **leicht verständliche** Bezeichner für seine Nodes haben will, damit unter anderem **mehr Code** in eine Zeile passt.

¹¹Die Programmiersprache **Python** erlaubt es z.B. dieser Wert auch mit den Literalen **0b1100011** und **0x63** darzustellen.

¹²Man nennt das auch einem **Lookahead** von 1

¹³Eine derartige Regel würde nur Probleme bereiten, wenn sich aus **ASCII_CHAR** **beliebig breite** Wörter ableiten lassen.

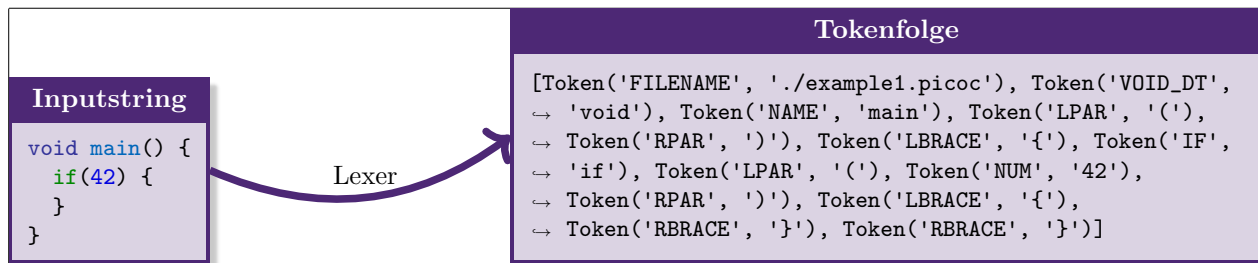


Abbildung 2.5: Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse

2.4 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.

Die **Syntax**, in welcher ein **Programm** aufgeschrieben ist, wird auch als **Konkrete Syntax** (Definition 2.41) bezeichnet. In einem Zwischenschritt, dem **Parsen** wird aus diesem Programm mithilfe eines **Parsers** (Definition 2.43), ein **Ableitungsbaum** (Definition 2.42) generiert, der als Zwischenstufe hin zum einem **Abstrakter Syntaxbaum** (Definition 2.49) dient. Beim Compilerbau ist es förderlich kleinschrittig vorzugehen, deshalb erst die Generierung des **Ableitungsbaums** und dann erst des **Abstrakten Syntaxbaumes**.

Definition 2.41: Konkrete Syntax

Steht für alles, was mit dem **Aufbau von Ableitungsbäumen** zu tun hat, also z.B. was für **Ableitungen** mit den **Grammatiken** G_{Lex} und G_{Parse} zusammengenommen möglich sind.

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

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 2.42: Ableitungsbaum (bzw. Konkretter Syntaxbaum, engl. Derivation Tree)

Compilerinterne Datenstruktur für den **Formalen Ableitungsbaum** (Definition 2.30) eines in **Konkreter Syntax** geschriebenen Programmes.

Die **Konkrete Syntax** nach der sich der **Ableitungsbaum** richtet wird optimalerweise immer so definiert, dass sich möglichst einfach ein **Abstrakter Syntaxbaum** daraus konstruieren lässt.^a

^aJSON parser - Tutorial — Lark documentation.

Definition 2.43: Parser

Ein **Parser** ist ein Programm, dass aus einem **Inputstring**, der in **Konkreter Syntax** geschrieben ist, eine compilerinterne Darstellung, den **Ableitungsbaum** generiert, 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, dass einen Inputstring von **Konkreter Syntax** in **Abstrakte Syntax** übersetzt. Im Folgenden wird allerdings die Definition 2.43 verwendet.

^b*JSON parser - Tutorial — Lark documentation.*

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

In Bezug auf Compilerbau ist ein **Lexer** ein Teil eines **Parsers**. Der **Lexer** ist ausschließlich für die **Lexikalische Analyse** verantwortlich und entspricht z.B., wenn man bei einem Wanderausflug verschiedenen 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^a.

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 Insektenbeugnungen in einer für die **Weiterverarbeitung tauglichen Form**^b.

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

^aDas würde z.B. der Rolle eines **Semikolon** ; in der Sprache *LPicoC* entsprechen.

^bZ.B. gibt es bestimmte **Wechselbeziehungen** zwischen Insekten, Insekten beeinflussen sich gegenseitig.

Die vom **Lexer** im Inputstring 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 2.5 wieder relevant.

Ein **Parser** ist genauer gesagt ein erweiterter **Recognizer** (Definition 2.44), denn ein Parser löst das **Wortproblem** (Definition 2.25) 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 **Ableitungsbaum**.

Definition 2.44: 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, b}*

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

^bThiemann, „Compilerbau“.

Für das **Parsen** gibt es grundsätzlich **zwei** 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 **Derivation Tree** mit dem **Startsymbol** der **Grammatik** an und wendet in jedem Schritt eine **Linksableitung** auf die **Nicht-Terminalsymbole** an, bis man **Terminalsymbole** hat, die sich zum gewünschten **Inputstring** abgeleitet haben oder 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 **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** (Definition 2.45).

Mit dieser Methode ist das Parsen **Linksrekursiver Grammatiken** (Definition 2.29) 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.

Rekursiver Abstieg kann mit **Backtracking** verbunden werden, um auch Grammatiken parsen zu können, die nicht **LL(k)** (Definition 2.32) 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, was dann bedeutet, dass der **Inputstring** sich **nicht** mit der verwendeten Grammatik ableiten lässt.^b

Wenn man eine **LL(k)** Grammatik hat, kann man auf **Backtracking verzichten** und es reicht einfach nur immer **k Token** im Inputstring **vorauszuschauen**. **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 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 *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. 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.

^dWhat is Bottom-up Parsing?

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

Definition 2.45: Rekursiver Abstieg

Es wird jedem **Nicht-Terminalsymbol** eine **Prozedur** zugeordnet, welche die **Produktionen** dieses **Nicht-Terminalsymbols** umsetzt. **Prozeduren** rufen sich dabei wechselseitig gegenseitig entsprechend der **Produktionsregeln** auf, falls eine **Produktionsregel** ein entsprechendes **Nicht-Terminalsymbol** enthält.

Der **Abstrakter Syntaxbaum** wird mithilfe von **Transformern** (Definition 2.46) und **Visitors** (Definition 2.47) 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 2.48).

Definition 2.46: Transformer

Ein Programm, dass von **unten-nach-oben**, nach dem **Breadth First Search** Prinzip alle Knoten des **Ableitungsbaum** besucht und beim Antreffen eines bestimmten Knoten des **Derivation Tree** einen entsprechenden Knoten des **Abstrakter Syntaxbaum** erzeugt und diesen anstelle des Knotens des **Derivation Tree** setzt und so Stück für Stück den **Abstrakter Syntaxbaum** konstruiert.^a

^aTransformers & Visitors — Lark documentation.

Definition 2.47: Visitor

Ein Programm, dass von **unten-nach-oben**, nach dem **Breadth First Search** Prinzip alle Knoten des **Ableitungsbaum** 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.^{a,b}

^aKann theoretisch auch zur Konstruktion eines **Abstrakter Syntaxbaum** verwendet werden, wenn z.B. eine externe Klasse verwendet wird, welches für die Konstruktion des **Abstrakter Syntaxbaum** verantwortlich ist. Aber dafür ist ein **Transformer** besser geeignet.

^bTransformers & Visitors — Lark documentation.

Definition 2.48: Abstrakte Syntax

Steht für alles, was mit dem **Aufbau** von **Abstrakten Syntaxbäumen** zu tun hat, also z.B. was für Arten von **Kompositionen** mit den **Knoten** eines **Abstrakten Syntaxbaums** möglich sind.

Ein **Abstract Syntax Tree**, der zur Kompilierung eines Wortes^a generiert wurde, ist nach einer **Abstrakter Syntax** konstruiert.

Jene Produktionen, die in der **Konkreten Syntax** für die Umsetzung von **Präzidenz** notwendig waren, sind in der **Abstrakten Syntax** abgeflacht. Dadurch sind die **Kompositionen**, welche die Knoten im **Abstract Syntax Tree** bilden können **syntaktisch** meist näher zur Syntax von **Maschinenbefehlen**.^b

^aZ.B. **Programmcode**.

^bG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 2.49: 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.

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

Die **Abstrakte Syntax** nach der sich der **Abstrakte Syntaxbaum** richtet wird optimalerweise immer so definiert, dass der **Abstrakte Syntaxbaum** in den darauffolgenden Verarbeitungsschritten^a möglichst **einfach weiterverarbeitet** werden kann.

^aDie verschiedenen **Passes**.

In Abbildung 2.6 wird das Beispiel aus Unterkapitel 2.2.1 fortgeführt, welches den **Arithmetischen Ausdruck** $4 * 2$ in Bezug auf die Grammatik 2.1, welche die **höhere Präzidenz** der **Multiplikation** $*$ berücksichtigt in einem **Ableitungsbaum** darstellt. In Abbildung 2.6 wird der Ableitungsbaum zu einem Abstrakten Syntaxbaum **abstrahiert**. Das geschieht bezogen auf das Beispiel aus Unterkapitel 2.2.1, indem jegliche Knoten, die im **Ableitungsbaum** nur existieren, weil die Grammatik so umgesetzt ist, dass es nur **einen** einzigen möglichen **Ableitungsbaum** geben kann **wegabstrahiert** werden.



Abbildung 2.6: 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 2.7 die Syntaktische mit dem Beispiel aus Subkapitel 2.3 fortgeführt.

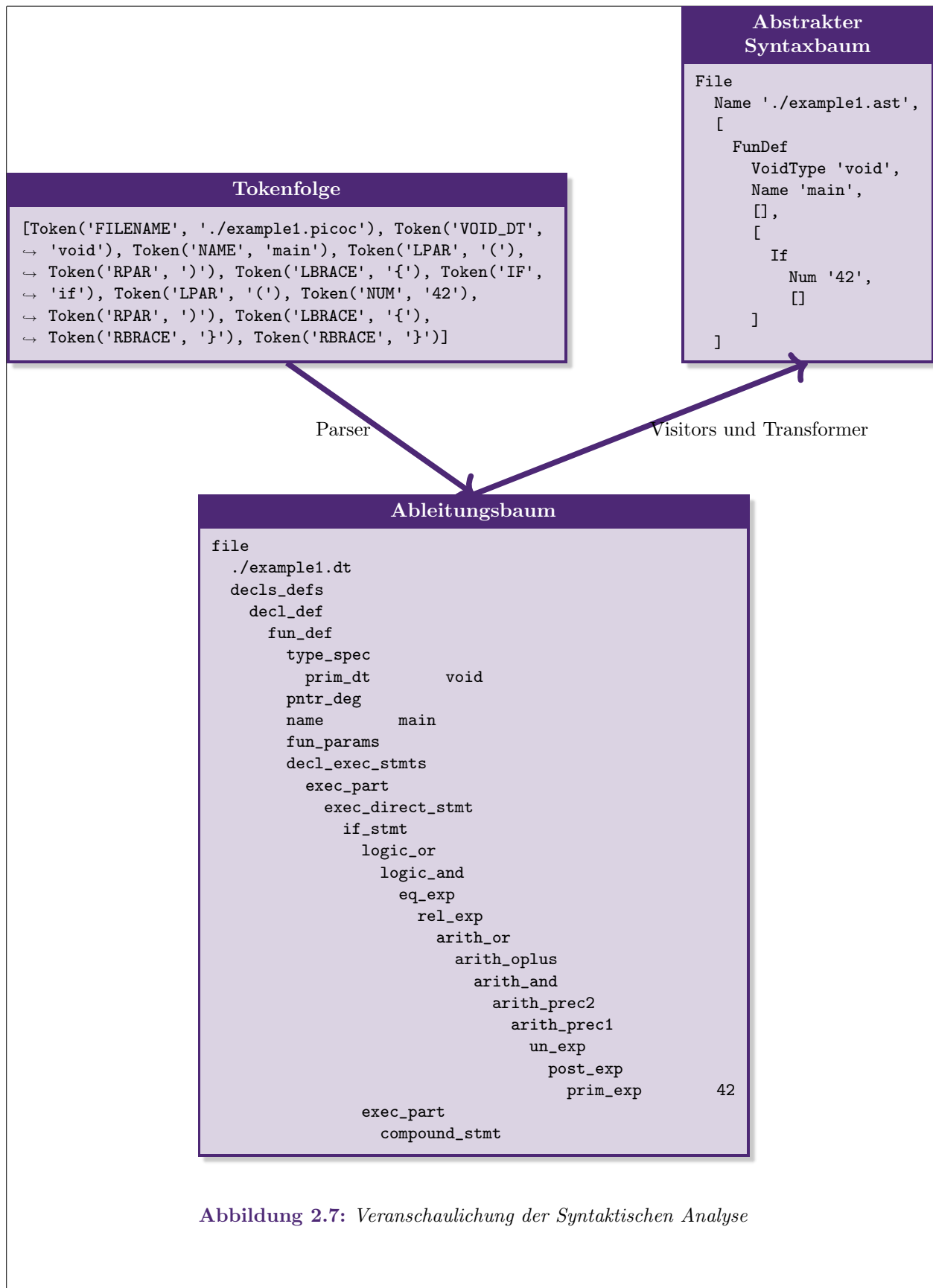


Abbildung 2.7: Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse

2.5 Code Generierung

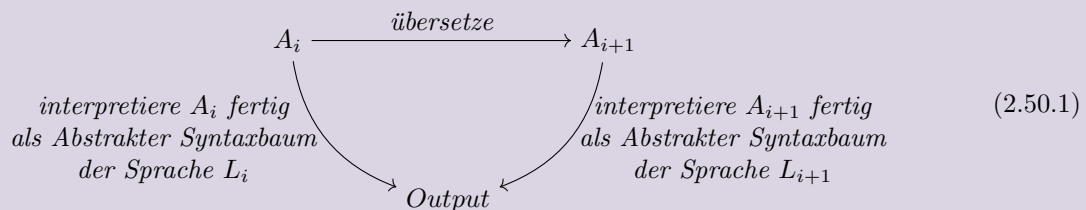
In der **Code Generierung** steht man nun dem Problem gegenüber einen **Abstrakter Syntaxbaum** einer Sprache L_1 in den **Abstrakter Syntaxbaum** einer Sprache L_2 umformen zu müssen. Dieses Problem lässt sich vereinfachen, indem man das Problem in mehrere Schritte unterteilt, die man **Passes** (Definition 2.50) nennt. So wie es auch schon mit dem **Derivation Tree** in der Syntaktischen Analyse gemacht wurde, den man als Zwischenstufe zum **Abstrakter Syntaxbaum** konstruiert hatte. Aus dem Derivation konnte, dann unkompliziert und einfach mit **Transformern** und **Visitors** ein **Abstrakter Syntaxbaum** generiert werden.

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 Syntax**, 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 **Abstrakt Syntax Tree** überhaupt konstruiert wird. Für die tatsächliche Sprache, die durch die **Abstrakt Syntax** beschrieben wird, interessiert man sich nie wirklich explizit. Diese **Redeart** wurde aus der **Quelle** G. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)* übernommen.

Definition 2.50: Pass

*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.^{ab}*

*Für jeden **Pass** und für einen beliebigen **Abstrakten Syntaxbaum** A_i gilt ähnlich, wie bei einem **vollständigen Compiler** in 2.50.1, 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}*

^aEin **Pass** kann mit einem **Transpiler 2.9** (Definition 2.9) 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 ausschließlich auf **Abstrakten Syntaxbäumen**, ohne Parsing usw.

^bDer Begriff kommt aus dem **Englischen** von „passing over“, da der gesamte **Abstrakte Syntaxbaum** in einem **Pass** durchlaufen wird.

^c**Interpretieren** geht immer von einem Programm in **Konkreter Syntax** aus, wobei der **Abstrakte Syntaxbaum** ein **Zwischenschritt** bei der **Interpretierung** ist.

^dG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

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

2.5.1 Monadische Normalform

Hat man es mit einer Sprache zu tun, welche **Unreine Ausdrücke** (Definition 2.52) besitzt, so ist es sinnvoll einen **Pass** einzuführen, der **Reine** (Definition 2.51) 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 2.51: 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.^{a,b}*

^aSondern z.B. **intern** etwas am **Kompilierprozess** ändert.

^bG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 2.52: Unreiner Ausdruck

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

Auf diese Weise sind alle **Statements** und **Ausdrücke** in **Monadischer Normalform** (Definition 2.53).

Definition 2.53: Monadische Normalform (bzw. engl. monadic normal form)

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

*Eine **Konkrete Syntax** ist in **Monadischer Normalform**, wenn sie **reine Ausdrücke** und **unreine Ausdrücke nicht** miteinander **mischt**, sondern voneinander **trennt**.^a*

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

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Ein **Beispiel** für dieses Vorgehen ist in Abbildung 2.8 zu sehen, wo der Einfachheit halber auf die Darstellung in **Abstrakter Syntax** verzichtet wurde und die Codebeispiele in der entsprechenden **Konkreten Syntax**¹⁴ aufgeschrieben wurden.

In der Abbildung 2.8 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.

¹⁴Für deren Kompilierung die **Abstrakte Syntax** überhaupt definiert wurde.

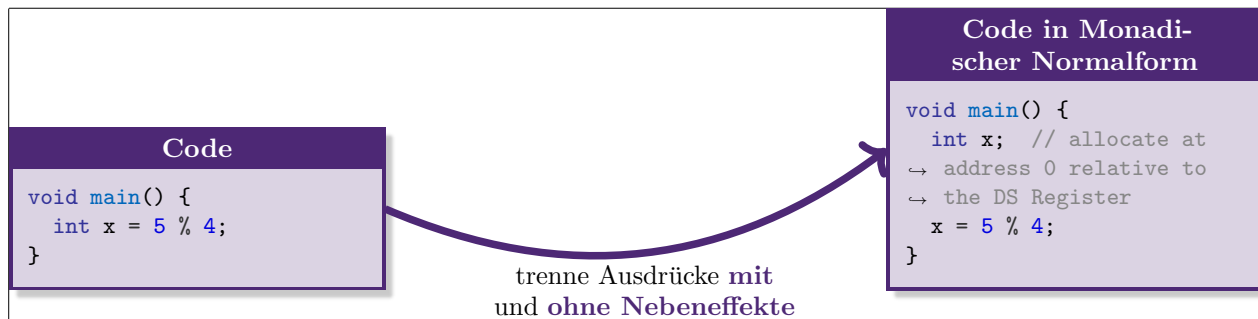


Abbildung 2.8: Codebeispiel für das Trennen von Ausdrücken mit und ohne Nebeneffekten

Die Aufgabe eines solchen **Passes** ist es, den **Abstrakter Syntaxbaum** der **Syntax** von **Maschinenbefehlen** anzunähern, 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.

2.5.2 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 2.56) 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 2.54) und dann anstelle des **Komplexen Ausdrucks** auf die jeweilige **temporäre Location** zugegriffen wird.

Sollte in dem **Statement**, 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 2.55) 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 2.54: 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 tun** hat und irgendwo **gespeichert** ist oder als **Speicherort** dient.^a*

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Auf diese Weise sind alle **Statements** und **Ausdrücke** in **A-Normalform** (Definition 2.57). Wenn eine **Konkrete Syntax** in **A-Normalform** ist, ist diese auch automatisch in **Monadischer Normalform** (Definition 2.57), genauso, wie ein **Atomarer Ausdruck** auch ein **Reiner Ausdruck** ist (nach Definition 2.55).

Definition 2.55: 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)`.^a

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 2.56: Komplexer Ausdruck

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

^a`int var` ist eine **Allokation**.

^bG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 2.57: A-Normalform (ANF)

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

Eine **Konkrete Syntax** 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 Syntax** ist in **A-Normalform**, wenn die **Konkrete Syntax** für welche sie definiert wurde in **A-Normalform** ist.^{abc}

^aA-Normalization: *Why and How (with code)*.

^bBolingbroke und Peyton Jones, „Types are calling conventions“.

^cG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Ein **Beispiel** für dieses Vorgehen ist in Abbildung 2.9 zu sehen, wo der Einfachheit halber auf die Darstellung in **Abstrakter Syntax** verzichtet wurde und die Codebeispiele in der entsprechenden **Konkreten Syntax**¹⁵ aufgeschrieben wurden.

Der **PicoC-Compiler** nutzt, anders als es geläufig ist keine **Register** und **Graph Coloring** (Definition 3.3) inklusive **Liveness Analysis** (Definition 3.1) usw., um Werte von Variablen, temporäre Zwischenergebnisse usw. abzuspeichern, sondern immer nur den **Hauptspeicher**, wobei **temporäre Zwischenergebnisse** auf den **Stack** gespeichert werden.¹⁶

Aus diesem Grund verwendet das Beispiel in Abbildung 2.9 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 **Abstrakter 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 Ausdruck** 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-**

¹⁵Für deren Kompilierung die **Abstrakte Syntax** überhaupt definiert wurde.

¹⁶Die 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.

befehlssatz es erlaubt **zwei Register** miteinander zu verrechnen¹⁷, ist es möglich **Ausdrücke** für **Zahl** 4, **Variable** *var* und **ASCII-Zeichen** 'c' als **atomar** zu definieren, da sie mit einem **Maschinenbefehl** verarbeitet werden können¹⁸. 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 verrechnet 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.

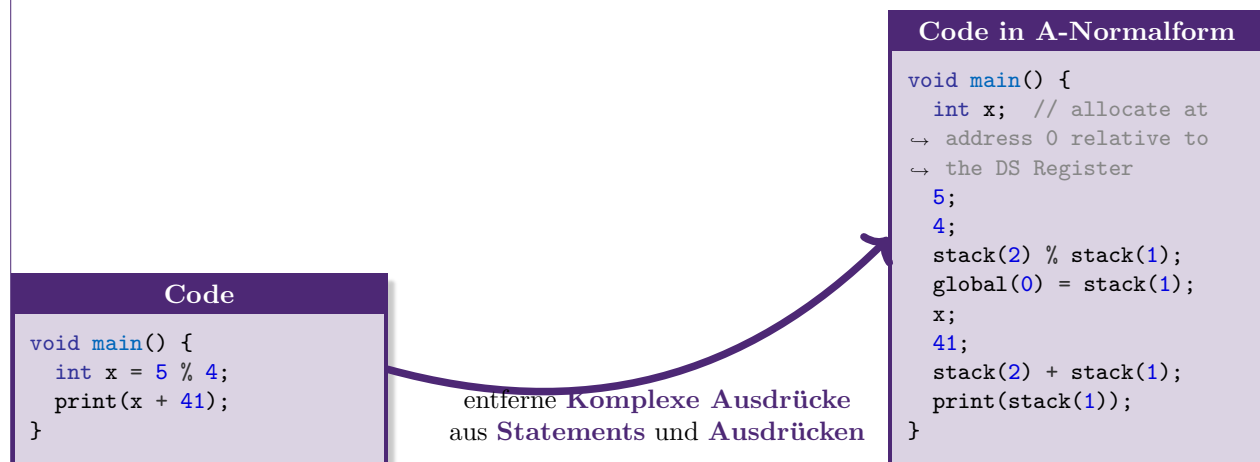


Abbildung 2.9: Codebeispiel für das Entfernen Komplexer Ausdrücke aus Operationen

Ein solcher **Pass** hat vor allem in erster Linie die Aufgabe den **Abstrakt Syntax Tree** der **Syntax** von **Maschinenbefehlen** besonders dadurch anzunähern, dass er auf der Ebene der Konkreten Syntax 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 ?? definiert.

2.5.3 Ausgabe des Maschinencodes

Nachdem alle **Passes** durchgearbeitet wurden, ist es notwendig aus dem finalen **Abstrakter Syntaxbaum** den eigentlichen **Maschinencode** in **Konkreter Syntax** zu generieren. In üblichen Compilern wird hier für den **Maschinencode** eine **binäre Repräsentation** gewählt¹⁹. Der Weg von **Abstrakter Syntax** zu **Konkreter Syntax** ist allerdings wesentlich einfacher, als der Weg von der **Konkreten Syntax**

¹⁷Z.B. **Addieren** oder **Subtraktion** von zwei **Registerinhalten**.

¹⁸Mit dem **RETI-Befehlssatz** wäre das durchaus möglich, durch z.B. **MULT ACC IN2**.

¹⁹Da der **PicoC-Compiler** vor allem zu **Lernzwecken** konzipiert ist, wird bei diesem der **Maschinencode** allerdings in einer **menschenlesbaren Repräsentation** ausgegeben.

zur **Abstrakten Syntax**, für die eine gesamte **Syntaktische Analyse**, die eine **Lexikalische Analyse** beinhaltet durchlaufen werden musste.

Jeder **Knoten** des **Abstrakter Syntaxbaums** 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 **Depth-First-Search** Schema der gesamte **Abstract Sybtax Tree** 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 **zurückgeben**.

2.6 Fehlermeldungen

Definition 2.58: Fehlermeldung

Benachrichtigung beliebiger Form, die darüber informiert, dass:

1. Ein Program beim **Kompilieren** von der **Konkreten Syntax** abweicht, also der **Inputstring** sich nicht mit der Konrekten Syntax **ableiten** lässt oder auf etwas **zugegriffen** werden soll, was noch **nicht** deklariert oder definiert wurde.
2. Beim Ausführen eine **verbotene** Operation ausgeführt wurde.^a

^aErrors in C/C++ - GeeksforGeeks.

2.6.1 Kategorien von Fehlermeldungen

3 Ergebnisse und Ausblick

Zum Schluss soll ein **Überblick** über das gegeben werden, was im Kapitel ?? implementiert wurde. Im Unterkapitel 3.1 wird darauf eingegangen ob die **versprochenen Funktionalitäten** des **PicoC-Compilers** aus Kapitel **Motivation** alle implementiert werden konnten und daraufhin mithilfe **kurzer Anleitungen** ein grober Einblick gegeben, wie auf diese Funktionalitäten Zugriffen werden kann, aber auch auf Funktionalitäten **anderer mitimplementierter Tools**. Im Unterkapitel 3.2 wird aufgezeigt, was zur **Qualitätssicherung** implementiert wurde, um zu gewährleisten, dass der **PicoC-Compiler** die Kompilierung der **Programmiersprache** L_{PicoC} in **Syntax** und **Semantik identisch** zur entsprechenden **Untermenge** der Programmiersprache L_C umsetzt. Als allerletztes wird im Unterkapitel 3.3 ein Ausblick gegeben, wie der PicoC-Compiler **erweitert** werden könnte.

3.1 Funktionsumfang

In Kapitel ?? konnten **alle** Funktionalitäten, die in Kapitel **Motivation** erläutert wurden implementiert werden. Während der **Funktionsumfang** des **PicoC-Compiler** zum Stand des **Bachelorprojektes** noch sehr beschränkt war und einzig eine **Strukturierte Programmierung** mit `if(cond) { } else { }, while(cond) { }` usw. erlaubte und komplexere Programme nur mit **viel Aufwand** und **unübersichtlichen Spaghetticode** implementierbar waren, erlaubt es der **PicoC-Compiler** nachdem er in der **Bachelorarbeit** um **Felder**, **Zeiger**, **Verbunde** und **Funktionen** erweitert wurde mittels der **Funktionen** eine **Prozedurale Programmierung** umzusetzen. **Prozedurale Programmierung** zusammen mit der Möglichkeit **Felder**, **Zeiger** und **Verbunde** zu verwenden trägt zu einem **geordneteren, intuitiv verständlicheren** und **übersichtlicheren** Code bei.

Bei der Implementierung des **PicoC-Compilers** wurden verschiedene **Kommandozeilenoptionen** und **Modes** implementiert. Diese werden in den folgenden Kapiteln 3.1.1, 3.1.2 und 3.1.3 mithilfe **kurzer Anleitungen** erklärt.

Die kurzen **Anleitungen** in dieser **Schriftlichen Ausarbeitung** der Bachelorarbeit sollen nur zu einem **schnellen, grundlegenden Verständnis** der Verwendung des **PicoC-Compilers** und seiner **Kommandozeilenoptionen** und **Befehle** beihelfen, sowie zum Verständnis der **weiteren implementierten Tools**. Alle weiteren **Kommandozeilenoptionen** und **Befehle** sind für die Verwendung des PicoC-Compilers **unwichtig** und erweisen sich nur in **speziellen Situationen** als nützlich, weshalb für diese auf die **ausführlichere Dokumentation** unter [Link](#)¹ verwiesen wird.

3.1.1 Kommandozeilenoptionen

Will man einfach nur ein **Programm** `program.picoc` kompilieren ist das mit dem **PicoC-Compiler** genauso **unkompliziert** wie mit dem **GCC** durch einfaches **Angaben der Datei**, die kompiliert werden soll: `> picoc_compiler program.picoc`. Als Ergebnis des Kompiliervorgangs wird eine Datei `program.reti` mit dem entsprechenden **RETI-Code** erstellt, wobei für die **Benennung der Datei** einfach nur der

¹https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/blob/new_architecture/doc/help-page.txt

Basisname der Datei `program` an eine neue **Dateiendung** `.reti` angehängt wird².

Daneben gibt es allerdings auch die Möglichkeit **Kommandozeilenoptionen** `<cli-options>` in der Form `> picoc_compiler <cli-options> program.picoc` mitanzugeben, von denen die **wichtigsten** in Tabelle 3.1 erklärt sind. Alle weiteren **Kommandozeilenoptionen** können in der **Dokumentation** unter [Link](#) nachgelesen werden.

²Beim **GCC** wird bei **Nicht-Angabe** eines **Dateinamen** mit der `-o` Option dagegen eine Datei mit der festen Namen `a.out` erstellt.

Kommandozeilenoption	Beschreibung	Standardwert
<code>-i, --intermediate_stages</code>	Gibt Zwischenschritte der Kompilierung in Form der verschiedenen Tokens , Ableitungsbäume , Abstrakten Syntaxbäume der verschiedenen Passes in Dateien mit entsprechenden Dateieindungen aber gleichem Basinamen aus. Im Shell-Mode erfolgt keine Ausgabe in Dateien, sondern nur im Terminal .	false , most_used: true
<code>-p, --print</code>	Gibt alle Dateiausgaben auch im Terminal aus. Diese Option ist im Shell-Mode dauerhaft aktiviert.	false (true im Shell-Mode und für den most_used- Befehl)
<code>-v, --verbose</code>	Fügt den verschiedenen Zwischenschritten der Kompilierung , unter anderem auch dem finalen RETI-Code Kommentare hinzu, welche ein Statement oder Befehl aus einem vorherigen Pass beinhalten, der durch die darunterliegenden Statements oder Befehle ersetzt wurde. Wenn die <code>--run</code> -Option aktiviert ist, wird der Zustand der virtuellen RETI-CPU vor und nach jedem Befehl angezeigt.	false
<code>-vv, --double_verbose</code>	Hat dieselben Effekte , wie die <code>--verbose</code> -Option, aber bewirkt zusätzlich weitere Effekte . PicoC-Knoten erhalten bei der Ausgabe in den Abstrakten Syntaxbäumen zusätzliche runde Klammern , sodass direkter abgelesen werden kann, wo ein Knoten anfängt und wo einer aufhört. In Fehlermeldungen werden mehr Tokens angezeigt, die an der Stelle der Fehlermeldung erwartet worden wären. Bei Aktivierung der <code>--intermediate_stages</code> -Option werden in den dadurch ausgegebenen Abstrakten Syntaxbäumen ebenfalls versteckte Attribute , die Informationen zu Datentypen und für Fehlermeldungen beinhalten angezeigt.	false
<code>-h, --help</code>	Zeigt die Dokumentation , welche ebenfalls unter Link gefunden werden kann im Terminal an. Mit der <code>--color</code> -Option kann die Dokumentation mit farblicher Hervorhebung im Terminal angezeigt werden.	false
<code>-R, --run</code>	Führt die RETI-Befehle , die das Ergebnis der Kompilierung sind mit einer virtuellen RETI-CPU aus. Wenn die <code>--intermediate_stages</code> -Option aktiviert ist, wird eine Datei <code><basename>.reti_states</code> erstellt, welche den Zustand der RETI-CPU nach dem letzten ausgeführten RETI-Befehl enthält. Wenn die <code>--verbose</code> - oder <code>--double_verbose</code> -Option aktiviert ist, wird der Zustand der RETI-CPU vor und nach jedem Befehl auch noch zusätzlich in die Datei <code><basename>.reti_states</code> ausgegeben.	false , most_used: true
<code>-B, --process_begin</code>	Setzt die relative Adresse , wo der Prozess bzw. das Codesegment für das ausgeführte Programm beginnt.	3
<code>-D, --datasegment_size</code>	Setzt die Größe des Datensegments . Diese Option muss mit Vorsicht gesetzt werden, denn wenn der Wert zu niedrig gesetzt wird, dann können die Globalen Statischen Daten und der Stack miteinander kollidieren.	32

Tabelle 3.1: Kommandozeilenoptionen

Alle **kleingeschriebenen** Kommandozeilenoptionen, wie `-i`, `-p`, `-v` usw. betreffen dabei den **PicoC-Compiler** und alle **großgeschriebenen** Kommandozeilenoptionen, wie `-R`, `-B`, `-D` usw. betreffen den **RETI-Interpreter**.

3.1.2 Shell-Mode

Will man z.B. eine **Folge von Statements** in der Programmiersprache L_{PicoC} **schnell** kompilieren ohne eine Datei erstellen zu müssen, so kann der **PicoC-Compiler** im sogenannten **Shell-Mode** aufgerufen werden. Hierzu wird der PicoC-Compiler **ohne Argumente** `> picoc_compiler` aufgerufen, wie es in Code 3.1 zu sehen ist. Die angegebene **Folge von Statements** `<seq-of-stmts>` wird dabei automatisch in eine `main`-Funktion eingefügt: `void main(){<seq-of-stmts>}`.

Mit dem `> compile <cli-options> <filename>`-Befehl (oder der **Abkürzung** `cpl`) kann **PicoC-Code** zu **RETI-Code** kompiliert werden. Die Kommandozeilenoptionen `<cli-options>` sind dieselben, wie wenn der Compiler **direkt** mit Kommandozeilenoptionen aufgerufen wird. Die **wichtigsten** dieser **Kommandozeilenoptionen** sind in Tabelle 3.1 angegeben.

Mit dem Befehl `> quit` kann der **Shell-Mode** wieder **verlassen** werden.

```
> picoc_compiler
PicoC Shell. Enter `help` (shortcut `?`) to see the manual.
PicoC> cpl "6 * 7;";
----- RETI -----
SUBI SP 1;
LOADI ACC 6;
STOREIN SP ACC 1;
SUBI SP 1;
LOADI ACC 7;
STOREIN SP ACC 1;
LOADIN SP ACC 2;
LOADIN SP IN2 1;
MULT ACC IN2;
STOREIN SP ACC 2;
ADDI SP 1;
LOADIN BAF PC -1;

Compilation successfull

PicoC> quit
```

Code 3.1: Shellaufruf und die Befehle *compile* und *quit*

Wenn man möglichst alle nützlichen **Kommandozeilenoptionen** direkt aktiviert haben will, bei denen es **keinen** Grund gibt, sie nicht mitanzugeben, kann der Befehl `> most_used <cli-options> <filename>` (oder seine **Abkürzung** `mu`) genutzt werden, um diese Kommandozeilenoptionen mit dem `compile`-Befehl **nicht** jedes mal **selbst** Angeben zu müssen. In der Tabelle 3.1 sind in grau die Werte der einzelnen **Kommandozeilenoptionen** angegeben, die bei dem Befehl `most_used` gesetzt werden. In Code 3.2 ist der `most_used`-Befehl in seiner Verwendung zu sehen.






Dadurch, dass die `--intermediate_stages`- und die `--run`-Option beim `most_used`-Befehl aktiviert sind, werden die verschiedenen **Zwischenstufen** der Kompilierung, wie **Tokens**, **Derivation Tree** usw., sowie der **Zustand der RETI-CPU** nach der Ausführung des **letzten** Befehls angezeigt. Aus **Platzgründen** ist das meiste allerdings mit `'...'` ausgelassen.



```

PicoC> mu "int var = 42;";
----- Code -----
// stdin.picoc:
void main() {int var = 42;}
----- Tokens -----
...
----- Derivation Tree -----
...
----- Derivation Tree Simple -----
...
----- Abstract Syntax Tree -----
...
----- PicoC Shrink -----
...
----- PicoC Blocks -----
...
----- PicoC Mon -----
...
----- Symbol Table -----
...
----- RETI Blocks -----
...
----- RETI Patch -----
...
----- RETI -----
SUBI SP 1;
LOADI ACC 42;
STOREIN SP ACC 1;
LOADIN SP ACC 1;
STOREIN DS ACC 0;
ADDI SP 1;
LOADIN BAF PC -1;
----- RETI Run -----
...
Compilation successfull

```

Code 3.2: Shell-Mode und der Befehl *most_used*

Im **Shell-Mode** kann der **Cursor** mit den  und  Pfeiltasten bewegt werden. In der **Befehlshistorie** kann sich mit den  und  Pfeiltasten **rückwärts** und **vorwärts** bewegt werden. Mit  kann ein Befehl **automatisch vervollständigt** werden.

Es gibt für den **Shell-Mode** noch **weitere Befehle**, wie `color_toggle`, `history` etc. und **kleinere Funktionalitäten** für die Shell, die sich in der ein oder anderen Situation als **nützlich** erweisen können. Für die **Erklärung** dieser wird allerdings auf die **Dokumentation** unter [Link](#) verwiesen, welche auch über den Befehl  angezeigt werden kann.

3.1.3 Show-Mode

Der **Show-Mode** ist ein Nebenprodukt der Implementierung des **PicoC-Compilers**. Dieser **Mode** wurde eigentlich nur implementiert, um beim **Testen** des PicoC-Compilers **Bugs** bei der Generierung des **RETI-Code** zu finden, indem im Terminal eine **virtuelle RETI-CPU** angezeigt wird, welches den **kompletten**

Zustand einer virtuell ausgeführten RETI mit allen **Registern**, **SRAM**, **UART**, **EPROM** und einigen **weiteren Informationen** anzeigt.

Allerdings bringt die Möglichkeit des **Show-Mode**, die **RETI-Befehle** des übersetzten Programmes in **Ausführung zu sehen** auch einen großen **Lerneffekt** mit sich, weshalb der **Show-Mode** noch **weiterentwickelt** wurde, sodass auch **Studenten** ihn auf unkomplizierte Weise nutzen können.

Der **Show-Mode** kann auf die **einfachste Weise** mittels der `/Makefile` des **PicoC-Compilers** mit dem Befehl `make show FILEPATH=<path-to-file> <more-options>` gestartet werden. Alle **einstellbaren Optionen**, die z.B. unter `<more-options>` noch für die **Makefile** gesetzt werden können sind in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Kommandozeilenoption	Beschreibung	Standardwert
FILEPATH	Pfad zur Datei, die im Show-Mode angezeigt werden soll	<code>()</code>
TESTNAME	Name des Tests. Alles andere als der Basisname , wie die Dateiendung wird abgeschnitten	<code>()</code>
EXTENSION	Dateiendung , die an TESTNAME angehängt werden soll zu <code>./tests/TESTNAME.EXTENSION</code>	<code>reti_states</code>
NUM_WINDOWS	Anzahl Fenster auf die ein Dateiinhalte verteilt werden soll	<code>5</code>
VERBOSE	Möglichkeit die Kommandozeilenoption <code>-v</code> oder <code>-vv</code> zu aktivieren für eine ausführlichere Ausgabe	<code>()</code>
DEBUG	Möglichkeit die Kommandozeilenoption <code>-d</code> zu aktivieren, um bei <code>make test-show TESTNAME=<testname></code> den Debugger für den entsprechenden Test <code><testname></code> zu starten	<code>()</code>

Tabelle 3.2: Makefileoptionen

Alternativ kann der **Show-Mode** mit dem Befehl `make test-show TESTNAME=<testname> <more-options>` auch für einen der geschriebenen **Tests** im Ordner `/tests` gestartet werden. Der **Test** wird bei diesem Befehl **erst ausgeführt** und dann der **Show-Mode** gestartet.

Der **Show-Mode** nutzt den Terminal Texteditor **Neovim**³ um einen **Dateiinhalte** über mehrere **Fenster** verteilt anzuzeigen, so wie es in Abbildung 3.1 zu sehen ist. Für den **Show-Mode** wird eine eigene **Konfiguration für Neovim** verwendet, welche in der **Konfigurationsdatei** `/interpr_showcase.vim` spezifiziert ist.

Gedacht ist der **Show-Mode** vor allem dafür etwas ähnliches wie ein **RETI-Debugger** zu sein und wird daher standardmäßig bei **Nicht-Angabe** einer **EXTENSION** auf die Datei `<program>.reti_states` angewandt. Der **Show-Mode** kann aber auch dazu genutzt werden **andere Dateien**, welche verschiedene Zwischenschritte der Kompilierung darstellen anzuzeigen, indem **EXTENSION** auf eine andere **Dateiendung** gesetzt wird.

Im **Show-Mode** wird ein Trick angewendet, indem die verschiedenen **Zustände der RETI-CPU nicht zur Laufzeit** des **Show-Mode** berechnet werden, sondern schon berechnet wurden und nacheinander in die Datei `<program>.reti_states` ausgegeben wurden. Der **Show-Mode** macht nichts anderes, als immer an die Stelle zu springen, an welcher der nächste Zustand anfängt. Durch Drücken von `Tab` und `↑ -Tab` können auf diese Weise die **verschiedenen Zuständen der RETI-CPU vor** und **nach** der Ausführung eines Befehls **angezeigt** werden.

³Home - Neovim.

index: 43	00019 ADDI SP 1;	00057 LOADIN DS ACC 0;	00095 STOREIN SP ACC 2;	00133 0
instruction: ADDI SP 1;	00020 LOADIN SP ACC 1;	00058 STOREIN SP ACC 1;	00096 ADDI SP 1;	00134 0
ACC: 1	00021 STOREIN DS ACC 0;	00059 LOADIN SP ACC 1;	00097 LOADIN SP ACC 1;	00135 0
ACC_SIMPLE: 1	00022 ADDI SP 1;	00060 ADDI SP 1;	00098 STOREIN DS ACC 0;	00136 0
IN1: 0	00023 SUBI SP 1;	00061 CALL PRINT ACC;	00099 ADDI SP 1;	00137 0
IN1_SIMPLE: 0	00024 LOADIN DS ACC 0;	00062 SUBI SP 1;	00100 JUMP -32;	00138 0
IN2: 4	00025 STOREIN SP ACC 1;	00063 LOADI ACC 0;	00101 SUBI SP 1;	00139 0
IN2_SIMPLE: 4	00026 SUBI SP 1;	00064 STOREIN SP ACC 1;	00102 LOADIN DS ACC 0;	00140 0
PC: 2147483686	00027 LOADI ACC 4;	00065 LOADIN SP ACC 1;	00103 STOREIN SP ACC 1;	00141 0
PC_SIMPLE: 38	00028 STOREIN SP ACC 1;	00066 STOREIN DS ACC 0;	00104 LOADIN SP ACC 1;	00142 0
SP: 2147483792	00029 LOADIN SP ACC 2;	00067 ADDI SP 1;	00105 ADDI SP 1;	00143 0
SP_SIMPLE: 144	00030 STOREIN SP IN2 1;	00068 SUBI SP 1;	00106 JUMP== 7;	00144 4 <- SP
BAF: 2147483650	00031 SUB ACC IN2;	00069 LOADIN DS ACC 0;	00107 SUBI SP 1;	00145 1
BAF_SIMPLE: 2	00032 JUMP< 3;	00070 STOREIN SP ACC 1;	00108 LOADIN DS ACC 0;	UART:
CS: 2147483651	00033 LOADI ACC 0;	00071 SUBI SP 1;	00109 STOREIN SP ACC 1;	00000 0
CS_SIMPLE: 3	00034 JUMP 2;	00072 LOADI ACC 2;	00110 LOADIN SP ACC 1;	00001 0
DS: 2147483762	00035 LOADI ACC 1;	00073 STOREIN SP ACC 1;	00111 ADDI SP 1;	00002 0
DS_SIMPLE: 114	00036 STOREIN SP ACC 2;	00074 LOADIN SP ACC 2;	00112 CALL PRINT ACC;	00003 0
SRAM:	00037 ADDI SP 1;	00075 LOADIN SP IN2 1;	00113 LOADIN BAF PC -1;	EPROM:
00000 JUMP 0;	00038 LOADIN SP ACC 1; <- PC	00076 SUB ACC IN2;	00114 3 <- DS	00000 LOADI DS -2097152; <- IN1
00001 2147483648	00039 ADDI SP 1;	00077 JUMP< 3;	00115 0	00001 MULTI DS 1024; <- ACC
00002 0 <- BAF	00040 JUMP== 2;	00078 LOADI ACC 0;	00116 0	00002 MOVE DS SP;
00003 CALL INPUT ACC; <- CS	00041 JUMP -32;	00079 JUMP 2;	00117 0	00003 MOVE DS BAF;
00004 SUBI SP 1;	00042 SUBI SP 1;	00080 LOADI ACC 1;	00118 0	00004 MOVE DS CS; <- IN2
00005 STOREIN SP ACC 1;	00043 LOADIN DS ACC 0;	00081 STOREIN SP ACC 2;	00119 0	00005 ADDI SP 145;
00006 LOADIN SP ACC 1;	00044 STOREIN SP ACC 1;	00082 ADDI SP 1;	00120 0	00006 ADDI BAF 2;
00007 STOREIN DS ACC 0;	00045 SUBI SP 1;	00083 LOADIN SP ACC 1;	00121 0	00007 ADDI CS 3;
00008 ADDI SP 1;	00046 LOADI ACC 2;	00084 ADDI SP 1;	00122 0	00008 ADDI DS 114;
00009 SUBI SP 1;	00047 STOREIN SP ACC 1;	00085 JUMP== 16;	00123 0	00009 MOVE CS PC;
00010 LOADIN DS ACC 0;	00048 LOADIN SP ACC 2;	00086 SUBI SP 1;	00124 0	
00011 STOREIN SP ACC 1;	00049 LOADIN SP IN2 1;	00087 LOADIN DS ACC 0;	00125 0	
00012 SUBI SP 1;	00050 SUB ACC IN2;	00088 STOREIN SP ACC 1;	00126 0	index: 44
00013 LOADI ACC 1;	00051 STOREIN SP ACC 2;	00089 SUBI SP 1;	00127 0	instruction: LOADIN SP ACC 1;
00014 STOREIN SP ACC 1;	00052 ADDI SP 1;	00090 LOADI ACC 1;	00128 0	ACC: 1
00015 LOADIN SP ACC 2;	00053 LOADIN SP ACC 1;	00091 STOREIN SP ACC 1;	00129 0	ACC_SIMPLE: 1
00016 LOADIN SP IN2 1;	00054 ADDI SP 1;	00092 LOADIN SP ACC 2;	00130 0	IN1: 0
00017 ADD ACC IN2;	00055 JUMP== 13;	00093 LOADIN SP IN2 1;	00131 0	IN1_SIMPLE: 0
00018 STOREIN SP ACC 2;	00056 SUBI SP 1;	00094 ADD ACC IN2;	00132 0	IN2: 4
00019 ADDI SP 1;	00057 LOADIN DS ACC 0;	00095 STOREIN SP ACC 2;	00133 0	IN2_SIMPLE: 4
				PC: 2147483687

Abbildung 3.1: Show-Mode in der Verwendung

Zur **besseren Orientierung** wird für alle Register ebenfalls ein mit der Registerbezeichnung beschrifteter **Zeiger** <- REG an Adressen im **EPROM**, **UART** und **SRAM** angezeigt, je nachdem, ob der **Wert im Register** nach der **Memory Map** dem **Adressbereich** von **EPROM**, **UART** oder **SRAM** entspricht.

Durch Drücken von **Esc** oder **q** kann der **Show-Mode** wieder verlassen werden. Es gibt für den **Show-Mode** noch viele weitere **Tastenkürzel**, die sich in der ein oder anderen Situation als **nützlich** erweisen können. Für die **Erklärung** dieser wieder allerdings auf die **Dokumentation** unter [Link](#) verwiesen. Des Weiteren stehen durch die Nutzung des Terminal Texteditors **Neovim** auch alle **Funktionalitäten** dieses mächtigen Terminal Texteditors zur Verfügung, welche mittels der Eingabe von **:help** **nachgelesen** werden können oder mittels der Eingabe von **:Tutor** mithilfe einer kurzen **Einführungsanleitung** **erlernt** werden können.

3.2 Qualitätssicherung

Um verifizieren zu können, dass der **PicoC-Compiler** sich genauso verhält, wie er soll, müssen die **Beziehungen** aus Diagramm 2.2.1 in Unterkapitel 2.1 genauso für den **PicoC-Compiler** gelten. Für den **PicoC-Compiler** lässt sich ein ebensolches Diagramm 3.0.1 definieren. Ein **beliebiges** Testprogramm P_{PicoC} in der Sprache L_{PicoC} muss die **gleiche Semantik** haben, wie das entsprechend **kompilierte** Programm P_{RETI} in der Sprache L_{RETI} , trotz der **unterschiedlichen Syntax**.

Die **Tests** für den **PicoC-Compiler** sind hierbei im Verzeichnis **/tests** bzw. unter [Link](#)⁴ zu finden. **Eingeteilt** sind die Tests in die folgenden **Kategorien** in Tabelle 3.3.

⁴https://github.com/matthejue/PicoC-Compiler/tree/new_architecture/tests.

Testkategorie	Beschreibung
basic	Einfache Tests, welche die grundlegenden Funktionalitäten des Compilers testen
advanced	Tests, die Spezialfälle und Kombinationen verschiedener Funktionalitäten des Compilers testen
hard	Tests, die längere, komplexe Programme testen, für welche die Funktionalitäten des Compilers in perfekter Harmonie miteinander funktionieren müssen
example	Tests, die bekannte Algorithmen darstellen und daher als gutes, repräsentatives Beispiel für die Funktionsfähigkeit des PicoC-Compilers dienen
error	Tests, die Fehlermeldungen testen. Für diese Tests wird keine Verifikation ausgeführt
exclude	Tests, für welche aufgrund vielfältiger Gründe keine Verifikation ausgeführt werden soll

Tabelle 3.3: Testkategorien

Dass die Programme in beiden Sprachen die **gleiche Semantik** haben, lässt sich mit einer **hohen Wahrscheinlichkeit** gewährleisten, wenn beide die **gleiche Ausgabe** haben und es sehr **unwahrscheinlich** ist zufällig bei der gewählten Eingabe die spezifische Ausgabe zu erhalten. Wenn **immer mehr Tests**, die alle einen unterschiedlichen Teil der Semantik der Sprache L_{PicoC} abdecken vorliegen, bei denen die jeweiligen Programme P_{PicoC} und P_{RETI} interpretiert die gleiche **Ausgabe** haben, dann kann mit **immer höherer Wahrscheinlichkeit** von einem **funktionierenden** Compiler ausgegangen werden.

Die Kante vom Testprogramm P_{PicoC} zur Ausgabe aus Diagramm 3.0.1 drückt aus, dass jeder Test im `/tests`-Verzeichnis eine `// expected:<space_seperated_output>`-Zeile hat, in welcher der **Schreiber des Tests** die Rolle des entsprechenden **Interpreters**⁵ aus Diagramm 2.2.1 übernimmt und die **erwartete Ausgabe** seiner eigenen Interpretation des **PicoC-Codes** anstelle von `<space_seperated_output>` hineinschreibt.

Ein Beispiel für einen **Test** ist in Code 3.3 zu sehen. Sobald die Tests mithilfe der `/Makefile` mit dem Befehl `> make test` ausgeführt werden, wird als erstes für **jeden** Test das Bashscript `/extract_input_and_expected.sh` ausgeführt, welches die Zeilen `// in:<space_seperated_input>`, `// expected:<space_seperated_output>` und `// datasegment:<datasegment_size>` extrahiert⁶ und die entsprechenden Werte in **neu** erstellte Dateien `<program>.in`, `<program>.out_expected` und `<program>.datasegment_size` schreibt.

Die Datei `<program>.in` enthält **Eingaben**, welche durch `input()`-Funktionsaufrufe eingelesen werden, die Datei `<program>.out_expected` enthält zu **erwartende Ausgaben** der `print(<exp>)`-Funktionsaufrufe, die später eingeführte Datei `<program>.out` enthält die **tatsächlichen Ausgaben** der `print(<exp>)`-Funktionsaufrufe bei der **Ausführung des Tests** und die Datei `<program>.datasegment_size` enthält die **Größe des Datensegments** für die Ausführung des entsprechenden Tests.

⁵Der die **Semantik** des Tests umsetzt.

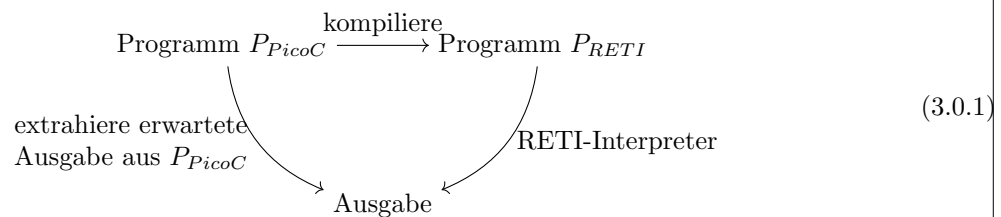
⁶Falls vorhanden.

```
// in:21 2 6 7
// expected:42 42
// datasegment:4

void main() {
    print(input() * input());
    print(input() * input());
}
```

Code 3.3: Typischer Test

Die Kante vom Programm P_{RETI} zur Ausgabe aus Abbildung 3.0.1 ist dadurch erfüllt, dass das Programm P_{RETI} vom **RETI-Interpreter** interpretiert wird und jedes mal beim Antreffen des **RETI-Befehls** CALL PRINT ACC der entsprechende **Inhalt** des ACC-Registers in die Datei `<program>.out` ausgegeben wird. Ein Test kann mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit die **Korrektheit** des **Teils der Semantik** der Sprache L_{PicoC} , die er abdeckt **verifizieren**, wenn der Inhalt von `<program>.out_expected` und `<program>.out` **identisch** ist.

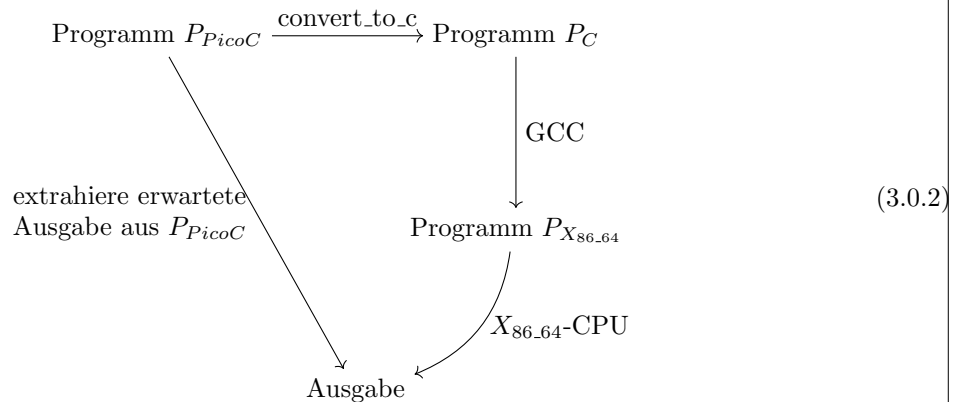


Allerdings gibt es bei dem Testverfahren, welches in Diagramm 3.0.1 dargestellt ist ein **Problem**, denn der **Schreiber** der Tests ist in diesem Fall die **gleiche Person**, die auch den **Compiler implementiert**. Wenn der **Schreiber** der Tests ein **falsches Verständnis** davon hat, wie das Ergebnis eines Ausdrucks berechnet wird, so wird dieser sowohl im **Test** als auch in seiner **Implementierung** etwas als Ergebnis erwarten bzw. etwas implementieren, was nicht der eigentlichen **Semantik** von L_{PicoC} entspricht⁷.

Aus diesem Grund muss hier eine **weitere Maßnahme**, welche in Diagramm 3.0.2 dargestellt ist eingeführt werden, die gewährleistet, dass die **Ausgabe** in Diagramm 3.0.1 sich auf jeden Fall aus der **Semantik** der Sprache L_{PicoC} ⁸ ergibt. Das wird erreicht, indem wie in Diagramm 3.0.2 dargestellt ist, überprüft wird, ob die **Ausgabe** des Pfades von P_{PicoC} zur Ausgabe mit der **Ausgabe** des Pfades von P_C über $P_{X_{86-64}}$ **identisch** ist.

⁷Welche ja identisch zu der von L_C sein sollte.

⁸Die eine **Untermenge** von L_C ist.



Das Programm P_C ergibt sich dabei aus dem Testprogramm P_{PicoC} durch **Ausführen** des Pythonscripts `/convert_to_c.py`, welches **später näher erläutert** wird. Mithilfe der `/Makefile` und dem Befehl `> make convert` lässt sich dieses Pythonscript auf **alle** Tests anwenden.

Der **Trick** liegt hierbei in der Verwendung des **GCC** für die Kante von P_C zu P_{X86_64} . Beim **GCC** handelt es sich um einen Compiler der Sprache L_C , der somit auch mit Ausnahme der `print()` und `input()`-Funktionen auch die Sprache L_{PicoC} kompilieren kann. Der **GCC** setzt aufgrund seiner bekanntermaßen **vielfachen Verwendung** auf der Welt und seinem **sehr langem Bestehen** seit 1987⁹ ¹⁰ die **Semantik** der Sprache L_C , vor allem für die kleine Untermenge, welche L_{PicoC} darstellt mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit **korrekt** um.

Durch das **Abgleichen** mit dem **GCC** in Diagramm 3.0.2 kann nun **sichergestellt** werden, dass die Tests **nicht** nur die Interpretation, die der Schreiber der Tests und Implementierer des **PicoC-Compilers** von der Semantik der Sprache L_{PicoC} hat **bestätigen**, sondern die tatsächliche **Einhaltung der Semantik** der Sprache L_{PicoC} testen.

Dazu durchläuft jeder Test, wie in Diagramm 3.0.2 dargestellt ist eine **Verifikation**, in der **verifiziert** wird, ob bei der Kompilierung des Testprogramms P_C mit dem **GCC** und Ausführung des hieraus generierten X_{86_64} -Maschinencodes die Ausgabe **identisch** zur erwarteten Ausgabe `// expected:<space_seperated_output>` des Testschreibers ist. Erst dann ist ein Test **verifiziert**, d.h. man kann, wenn der Test **vernünftig definiert** ist mit **hoher Wahrscheinlichkeit** sagen¹¹, dass wenn dieser Test für den **PicoC-Compiler** durchläuft, der **Teil der Semantik** der Sprache L_{PicoC} , den dieser Test testet vom PicoC-Compiler **korrekt umgesetzt** ist.

Für diese **Verifikation** ist das Bashscript `/verify_tests.sh` verantwortlich, welches mithilfe der `/Makefile` mit dem Befehl `> make verify` ausgeführt wird. Beim Befehl `> make test` wird dieses Bashscript **vor** dem eigentlichen Testen¹² durchgeführt. In Code 3.4 ist ein Testdurchlauf mit `> make test` zu sehen. Wobei **Verified: 50/50** anzeigt, wieviele der Tests **verifizierbar** sind¹³, also beim **GCC** ohne Fehlermeldung durchlaufen, **Not verified:** die **nicht verifizierbaren** Tests angibt, **Running through: 88 / 88** anzeigt wieviele Tests mit dem **PicoC-Compiler** durchlaufen, **Not running through:** die **nicht** durchlaufenden Tests angibt, **Passed: 88 / 88** zeigt bei wievielen Tests die Ausgabe mit der erwarteten Ausgabe **identisch** ist, **Not passed:** die Tests anzeigt, bei denen das **nicht** der Fall ist.

⁹History - GCC Wiki.

¹⁰In der langen **Bestehenszeit** und bei der **vielen Verwendung** wurden die **allermeisten kritischen Bugs** wahrscheinlich schon gefunden.

¹¹Es besteht allerdings immer eine **Chance**, dass die Ausgabe für den Test nur **zufällig** übereinstimmt. Diese Chance kann allerdings durch **vernünftige Definition** des Tests sehr **gering** gehalten werden.

¹²Prüfen, ob der interpretierte RETI-Code des PicoC-Compilers die **gleiche Ausgabe** hat, wie der Schreiber des Tests **erwartet**.

¹³Also **alle** Tests aus den **Kategorien basic, advanced, hard** und **example**.

```

> make test
=====
= ./tests/basic_array_init.picoc =
=====
...
=====
=          Verification          =
=====
./tests/basic_array_init.c
...
=====
=          Results              =
=====
Verified: 50 / 50
Not verified:
Running through: 88 / 88
Not running through:
Passed: 88 / 88
Not passed:

```

Code 3.4: Testdurchlauf

Der Befehl `make test <more-options>` lässt sich ebenfalls mit den **Makefileoptionen** `<more-options>` `TESTNAME`, `VERBOSE` und `DEBUG` aus Tabelle 3.2 kombinieren.

Das Pythonscript `/convert_to_c.py` ist notwendig, da L_{PicoC} sich bei den Funktionen `print()` und `input()` von der **Syntax** der Sprache L_C unterscheidet, bei der z.B. `printf("%d", 12)` anstelle von `print(12)` geschrieben werden muss. Für die Sprache L_{PicoC} erfüllen die Funktionen `print()` und `input()` allerdings nur den **Zweck**, dass sie zum **Testen des Compilers** gebraucht werden, um über die Funktion `input()` für eine bestimmte **Eingabe** die **Ausgabe** über die Funktion `print()` testen zu können. Aus diesem Grund ist es notwendig die **Syntax** dieser Funktionen in L_C zu übersetzen.

Die Funktion `print(<exp>)` wird vom Pythonscript `convert_to_c.py` zu `printf("%d", <exp>)` übersetzt. Zuvor muss über `#include<stdio.h>` die **Standard-Input-Output Bibliothek** `<stdio.h>` eingebunden werden. Bei der Funktion `input()` wurde **nicht** der aufwändige **Umweg** genommen die Funktion `input()` durch ihre entsprechende Funktion in der Sprache L_C zu ersetzen. Es geht viel direkter, indem **nacheinander** die `input()`-Funktionen durch entsprechende Eingaben aus der Datei `<program>.in` ersetzt werden. Man schreibt einfach **direkt** den Wert hin, den die `input()`-Funktionen normalerweise einlesen sollten.

3.3 Erweiterungsideen

Mit dem **Funktionsumfang** des **PicoC-Compilers**, der in Unterkapitel 3.2 erläutert wurde muss allerdings das Ende der Fahnenstange noch **nicht** erreicht sein. Weitere Ideen, die im **PicoC-Compiler**¹⁴ implementiert werden könnten, wären:

- **Register Allokation:** Variablen werden nicht nur **Adressen** im **Hauptspeicher** zugewiesen, sondern an erster Stelle **Registern** und erst wenn alle Register **voll** sind werden Variablen an Adressen auf dem **Hauptspeicher** gespeichert. Da hat den Grund, dass der **Zugriff auf Register** deutlich **schneller** ist, als der **Zugriff auf den Hauptspeicher**. Um die Variablen möglichst optimal **Locations** (Definition 2.54) zuzuweisen wird mithilfe einer **Liveness Analyse** (Definition 3.1) ein **Interferenzgraph**

¹⁴Möglicherweise ja im Rahmen eines **Masterprojektes** 😊.

(Definition 3.4) aufgebaut. Auf den **Interferenzgraph** wird ein **Graph Coloring** Algorithmus (Definition 3.3) angewandt, der den **Locations** Zahlen zuordnet. Die **ersten** Zahlen entsprechen **Registern**, aber ab einem bestimmten Zahlenwert, wenn alle Register zugeordnet sind, entsprechen die Zahlen **Adressen auf dem Hauptspeicher**. Des Weiteren muss die **Liveness Analyse** nach Ansätzen der **Kontrollflussanalyse** (Definition 3.7) **iterativ** unter Verwendung eines **Kontrollflussgraphen** (Definition 3.5) auf die verschiedenen **Blöcke** angewendet werden, bis sich an den Live Variablen **nichts** mehr **ändert**.¹⁵

- **Tail Call:** Wenn ein Funktionsaufruf das **letzte** Statement in einem Funktionsblock ist, wird der Stackframe dieser aufrufenden Funktion **nicht** mehr **gebraucht**, da **nicht** mehr in diese Funktion zurückgekehrt werden muss¹⁶. Daher kann der **Stackframe** der aufrufenden Funktion **entfernt** werden, **bevor** der **Funktionsaufruf** getätigt wird. Der **Vorteil** ist, dass eine rekursive Funktion, die nur Tail Calls ausführt nur eine **konstante Menge** an **Speicherplatz** auf dem Stack verbraucht. In Code 3.5 sind **zwei Tail Calls** markiert.
- **Partielle Evaluation:** Bei Ausdrücken wie `4 + input() - 2`, `input() * 1` oder `0 + input() * 2` können **Teilausdrücke** bereits **während** des **Kompilierens** zu `2 + input()`, `input()` und `input() * 2` **partiell** berechnet werden. Die kann durch einen neuen **PicoC-Eval Pass** umgesetzt werden, der **vor** oder **nach** dem **PicoC-Shrink Pass** den Abstrakten Syntaxbaum in eine neue Abstrakte Syntax der Sprache *LPicoC-Eval* umformt. In der Abstrakten Syntax der Sprache *LPicoC-Eval* sind **binäre Operationen** zwischen zwei **Num(str)**-PicoC-Knoten **nicht möglich**. Diese **partielle Vorberechnung** kann auch auf **Konstanten** und **Variablen** ausgeweitet werden. Der **Vorteil** ist, dass hierdurch weniger **RETI-Code** produziert wird und weniger **RETI-Code** bedeutet wiederum eine **schnellere Programmausführung**.
- **Lazy Evaluation:** Bei Ausdrücken wie `var1 && 42 / 0` oder `var2 || 42 / 0`, wobei `var1 = 0` und `var2 = 1` müssen diese Ausdrücke nur **soweit** berechnet werden, wie es **benötigt** wird. Sobald bei einer Aneinanderreihung von **&&**-Operationen einmal eine 0 auftaucht, muss der Rest des Ausdrucks **nicht** mehr berechnet werden, da mit dem Auftauchen der 0 bereits klar ist, dass dieser Ausdruck sich zu 0 auswertet. Genauso für eine Aneinanderreihung von **||**-Operationen und dem Auftauchen einer 1. Daher kommt es aufgrund der Division durch 0 nicht zu einer **DivisionByZero**-Fehlermeldung, da die Ausdrücke garnicht so weit ausgewertet werden. Im Unterschied zur **Partiellen Evaluation** läuft **Lazy Evaluation**¹⁷ während der **Laufzeit** ab.
- **Objektorientierung:** Wie in der Programmiersprache *LC++* müssen **Klassen** und **new**-, **new[]**-, **delete**-, **delete[]**- und **::**-Operatoren eingeführt werden. Die Speicherung eines **Objekts** ist ähnlich wie bei **Verbunden**.
- **Mehrere Dateien:** **Funktionen** werden zusammen mit **Attributen** in **mehrere Dateien** aufgeteilt, welche **seperat** programmiert und kompiliert werden können. Für die **Deklaration** von **Funktionen** und **Attributen** werden **.h-Headerdateien** verwendet, für die Definition sind **.c-Quellcodedateien** da. Hierbei ist der **Basisname** einer **.h-Headerdatei identisch** zur entsprechenden **.c-Quellcodedatei** mit den entsprechenden Definitionen. Dateien werden über `#include "file"` eingebunden, was einem **direkten einfügen** des entsprechenden Codes der eingebundenen Datei entspricht. Über einen **Linker** können die **kompilierten .o-Objektdaten** zusammengefügt werden, wobei der Linker darauf achtet **keinen doppelten Code** zuzulassen.
- **malloc und free:** Die Funktionen **malloc** und **free** aus der Bibliothek **stdlib**, die mittels **text**¹⁸

¹⁵Die in diesem **Unterpunkt** 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.

¹⁶Was der Grund ist, warum ein **Stackframe** überhaupt angelegt wird, damit später beim **Rücksprung** aus der **aufgerufenen Funktion** die Ausführung mit allen Variablen, wie **vor der Ausführung** fortgesetzt werden kann.

¹⁷Es gibt hierfür leider keinen **deutschen Begriff**, der geläufig ist.

¹⁸Auch engl. **General Purpose Standard Library** genannt.

- **Feld mit Länge:** Man könnte in einer **Bibliothek** einen eigenen **Felddatentyp**, wie in der Programmiersprache L_{C++} mit dem Datentyp `std::vector` über eine **Klasse** implementieren, der seine **Anzahl Elemente** an den **Anfang** des Felds speichert, sodass über eine **Methode** `size` die **Anzahl Elemente** direkt über die **Variable des Felds** selbst ausgelesen werden kann (z.B. `vec_var.size`) und **nicht** in einer **seperaten Variable** gespeichert werden muss.
- **Richtiger Compiler in binärer Repräsentation 1010101:** asdf
- **Garbage Collector:**
- **PicoPython:** Da das **Lark Parsing Toolkit** verwendet wurde, welches das **Parsen** über eine selbst angegebene **Grammatik** übernimmt, könnte mit **relativ geringem Aufwand** ein Grammatik definiert werden, die eine zur Programmiersprache L_{Python} **ähnliche Syntax** beschreibt. Die **Syntax** einer Programmiersprache lässt sich durch Austauschen der Grammatik **sehr einfach** ändern, nur die **Semanatik** zu ändern kann **deutlich aufwändiger** sein. Viele der **PicoC-Knoten** könnten für die Programmiersprache $L_{PicoPython}$ **wiederverwendet** werden und viele **Passes** müssten nur erweitert werden.
- **Call by Reference:** Über das **Überladen** des `&`-Operators für **Parameter** bei **Funktiondeklaration** und **Funktionsdefinition**, wie es in der Vorlesung P. D. P. Scholl, „Einführung in Embedded Systems“ erklärt wurde.
- **PicoC-Debugger:** Es wird eine neue **Kommandozeilenoption**, z.B. `-g` eingeführt durch welche spezielle **Informationen** in den RETI-Code geschrieben werden, die einem **Debugger** unter anderem mitteilen, wo die **RETI-Befehle** für ein Statement **beginnen** und wo sie **aufhören** usw., damit der **Debugger** weiß, bis wohin er die **RETI-Befehle** ausführen soll, damit er ein Statement abgearbeitet hat.

```

1 // in:42
2 // expected:0
3
4 int ret0() {
5     return 0;
6 }
7
8 int ret1() {
9     return 1;
10 }
11
12 int tail_call_fun(int bool_val) {
13     if (bool_val) {
14         return ret0();
15     }
16     return ret1();
17 }
18
19 void main() {
20     print(tail_call_fun(input()));
21 }

```

Code 3.5: Beispiel für Tail Call

Partielle Evaluation und **Lazy Evaluation** wurden im PicoC-Compiler **nicht** implementiert, da dieser als **Lerntool** gedacht ist und diese Funktionalitäten den **RETI-Code** für Studenten **schwerer verständlich** machen könnten, da die **Codeschnipsel** und damit verbundene **Paradigmen** aus der Vorlesung **nicht** mehr so einfach **nachvollzogen** werden können und das **schwerere Ausmachen** können von **Orientierungspunkten** und **Fehlen erwarteter Codeschnipsel** leichter zur **Verwirrung** bei den Studenten führen könnte.

Appendix

Sonstige Definitionen

Im Folgenden sind einige Definitionen aufgelistet, die zur **Erklärung** der Vorgehensweise zur Implementierung eines **üblichen Compilers** referenziert werden, aber **nichts** mit dem Vorgehen zur Implementierung des **PicoC-Compilers** zu tun haben.

Definition 3.1: Liveness Analyse

*Findet heraus, welche **Variablen** in welchen **Regionen** eines Programmes **verwendet** werden.*^a

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 3.2: Live Variable

*Eine Location, deren momentaner Wert **später** im Programmablauf noch **verwendet** wird. Man sagt auch die Location ist **live**.*^{a,b}

^aEs gibt leider **kein** allgemein verwendetes **deutsches** Wort für **Live Variable**.

^bG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 3.3: Graph Coloring

*Problem bei dem den **Knoten** eines Graphen^a **Zahlen**^b zugewiesen werden sollen, sodass **keine** zwei **adjazente Knoten** die **gleiche Zahl** haben und **möglichst wenige** unterschiedliche Zahlen gebraucht werden.*^{c,d}

^aIn Bezug zu Compilerbau ein **Ungerichteter Graph**.

^bBzw. **Farben**.

^cEs gibt leider **kein** allgemein verwendetes **deutsches** Wort für **Graph Coloring**.

^dG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 3.4: Interference Graph

*Ein **ungerichteter Graph** mit **Locations** als **Knoten**, der eine **Kante** zwischen zwei Locations hat, wenn es sich bei beiden Locations zu dem Zeitpunkt um **Live Locations** handelt. In Bezug auf **Graph Coloring** bedeutet eine **Kante**, dass diese zwei Locations **nicht** die **gleiche Zahl**^a zugewiesen bekommen dürfen.*^b

^aBzw. **Farbe**.

^bG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 3.5: Kontrollflussgraph

***Gerichteter Graph**, der den **Kontrollfluss** eines Programmes beschreibt.*^a

^aG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Definition 3.6: Kontrollfluss

Die **Reihenfolge** in der z.B. **Statements**, **Funktionsaufrufe** usw. eines Programmes ausgewertet werden^a.

^aMan geht hier von einem **imperativen** Programm aus.

Definition 3.7: Kontrollflussanalyse

Analyse des Kontrollflusses (Definition 3.6) eines **Programmes**, um herauszufinden zwischen welchen Teilen des Programms **Daten ausgetauscht** werden und welche **Abhängigkeiten** sich daraus ergeben.

Der **simpleste Ansatz** ist es in einen Kontrollflussgraph **iterativ** einen Algorithmus^a anzuwenden, bis sich an den Werten der Knoten **nichts mehr ändert**^{b, c}.

^aIm Bezug zu Compilerbau die **Linveness Analyse**.

^bBis diese sich **stabilisiert** haben

^cG. Siek, *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*.

Bootstrapping

Wenn eines Tages eine **RETI-CPU** auf einem **FPGA** implementiert werden sollte, sodass ein **provisorisches Betriebssystem** darauf laufen könnte, dann wäre der nächste Schritt einen **Self-Compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$ (Definition 3.8) zu schreiben. Dadurch kann die **Unabhängigkeit** von der Programmiersprache L_{Python} , in der der momentane Compiler C_{PicoC} für L_{PicoC} implementiert ist und die Unabhängigkeit von einer **anderen Maschine**, die bisher immer für das Cross-Compiling notwendig war erreicht werden.

Definition 3.8: Self-compiling Compiler

Compiler C_w^w , der in der Sprache L_w **geschrieben** ist, die er **selbst** kompiliert. Also ein Compiler, der sich **selbst** kompilieren kann.^a

^aEarley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

Will man nun für eine Maschine M_{RETI} , auf der bisher keine anderen Programmiersprachen mittels **Bootstrapping** (Definition 3.11) zum laufen gebracht wurden, den gerade beschriebenen **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$ implementieren und hat bereits den gesamten **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$ in der Sprache L_{PicoC} geschrieben, so stösst man auf ein Problem, dass auf das **Henne-Ei-Problem**¹⁹ reduziert werden kann. Man bräuchte, um den **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$ auf der **Maschine** M_{RETI} zu kompilieren bereits einen kompilierten **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$, der mit der Maschinensprache B_{RETI} läuft. Es liegt eine **zirkulare Abhängigkeit** vor, die man nur auflösen kann, indem eine **externe Entität** zur Hilfe nimmt.

Da man den gesamten **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$ nicht selbst komplett in der Maschinensprache B_{RETI} schreiben will, wäre eine Möglichkeit, dass man den **Cross-Compiler** C_{PicoC}^{Python} , den man bereits in der Programmiersprache L_{Python} implementiert hat, der in diesem Fall einen **Bootstrapping Compiler** (Definition 3.10) darstellt, auf einer anderen Maschine M_{other} dafür nutzt, damit dieser den **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$ für die Maschine M_{RETI} kompiliert bzw. **bootstraped** und man den kompilierten

¹⁹Beschreibt die Situation, wenn ein System sich selbst als **Abhängigkeit** hat, damit es überhaupt einen **Anfang** für dieses System geben kann. Dafür steht das Problem mit der **Henne** und dem **Ei** sinnbildlich, da hier die Frage ist, wie das ganze seinen Anfang genommen hat, da beides **zirkular** voneinander abhängt.

RETI-Maschiendencode dann einfach von der Maschine M_{other} auf die Maschine M_{RETI} kopiert.²⁰

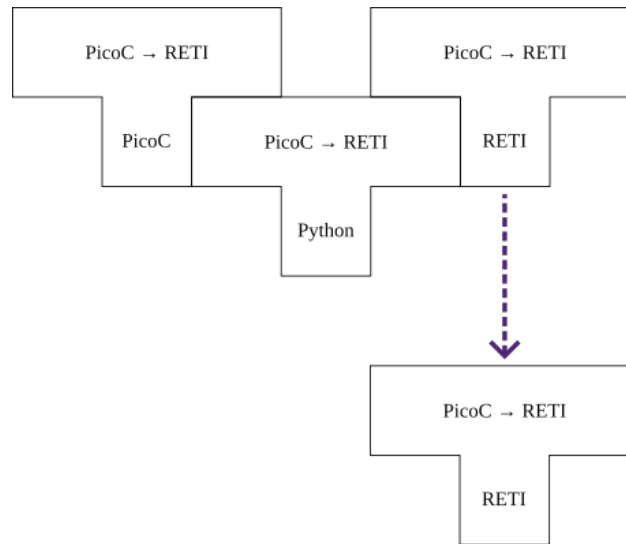


Abbildung 3.2: Cross-Compiler als Bootstrap Compiler

Einen ersten **minimalen Compiler** $C_{2-w.min}$ für eine Maschine M_2 und Wunschsprache L_w kann man entweder mittels eines **externen Bootstrap Compilers** C_w^o kompilieren^a oder man schreibt ihn direkt in der **Maschinensprache** B_2 bzw. wenn ein **Assembler** vorhanden ist, in der **Assemblesprache** A_2 .

Die letzte Option wäre allerdings nur beim allerersten Compiler C_{first} für eine allererste **abstraktere Programmiersprache** L_{first} mit Schleifen, Verzweigungen usw. notwendig gewesen. Ansonsten hätte man immer eine Kette, die beim allerersten Compiler C_{first} anfängt fortführen können, in der ein Compiler einen anderen Compiler kompiliert bzw. einen ersten minimalen Compiler kompiliert und dieser minimale Compiler dann eine umfangreichere Version von sich kompiliert usw.

^aIn diesem Fall, dem **Cross-Compiler** C_{PicoC}^{Python} .

Definition 3.9: Minimaler Compiler

Compiler $C_{w.min}$, der nur die **notwendigsten Funktionalitäten** einer Wunschsprache L_w , wie **Schleifen, Verzweigungen** kompiliert, die für die Implementierung eines **Self-compiling Compilers** C_w^w oder einer **ersten Version** $C_{w_i}^{w_i}$ des Self-compiling Compilers C_w^w wichtig sind.^{a,b}

^aDen **PicoC-Compiler** könnte man auch als einen **minimalen Compiler** ansehen.

^bThiemann, „Compilerbau“.

Definition 3.10: Bootstrap Compiler

Compiler C_w^o , der es ermöglicht einen **Self-compiling Compiler** C_w^w zu **bootstrappen**, indem der Self-compiling Compiler C_w^w mit dem **Bootstrap Compiler** C_w^o **kompiliert** wird^a. Der Bootstrapping Compiler stellt die **externe Entität** dar, die es ermöglicht die **zirkulare Abhängigkeit**, dass initial

²⁰Im Fall, dass auf der Maschine M_{RETI} die Programmiersprache L_{Python} bereits mittels **Bootstrapping** zum Laufen gebracht wurde, könnte der **Self-compiling Compiler** $C_{RETI-PicoC}^{PicoC}$ auch mithilfe des **Cross-Compilers** C_{PicoC}^{Python} als **externe Entität** und der Programmiersprache L_{Python} auf der Maschine M_{RETI} selbst kompiliert werden.

ein **Self-compiling Compiler** C_w^w bereits kompiliert vorliegen müsste, um sich selbst kompilieren zu können, zu brechen.^b

^aDabei kann es sich um einen **lokal** auf der Maschine selbst laufenden Compiler oder auch um einen **Cross-Compiler** handeln.

^bThiemann, „Compilerbau“.

Aufbauend auf dem **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$, der einen **minimalen Compiler** (Definition 3.9) für eine Teilmenge der **Programmiersprache** C bzw. L_C darstellt, könnte man auch noch weitere Teile der Programmiersprache C bzw. L_C für die Maschine M_{RETI} mittels **Bootstrapping** implementieren.²¹

Das bewerkstelligt man, indem man **iterativ** auf der Zielmaschine M_{RETI} selbst, aufbauend auf diesem **minimalen Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$, wie in Subdefinition 3.11.1 den minimalen Compiler schrittweise zu einem immer vollständigeren **C-Compiler** C_C weiterentwickelt.

Definition 3.11: Bootstrapping

Wenn man einen **Self-compiling Compiler** C_w^w einer Wunschsprache L_w auf einer **Zielmaschine** M zum laufen bringt^{a,b,c,d}. Dabei ist die Art von **Bootstrapping** in 3.11.1 nochmal gesondert hervorzuheben:

3.11.1: Wenn man die **aktuelle Version** eines **Self-compiling Compilers** $C_{w_i}^{w_i}$ der Wunschsprache L_{w_i} mithilfe von **früheren Versionen** seiner selbst kompiliert. Man schreibt also z.B. die aktuelle Version des Self-compiling Compilers in der Sprache $L_{w_{i-1}}$, welche von der früheren Version des Compilers, dem Self-compiling Compiler $C_{w_{i-1}}^{w_{i-1}}$ kompiliert wird und schafft es so **iterativ** immer umfangreichere Compiler zu bauen.^{e,f,g}

^aZ.B. mithilfe eines **Bootstrap Compilers**.

^bDer Begriff hat seinen Ursprung in der englischen **Redewendung** „pulling yourself up by your own bootstraps“, was im deutschen ungefähr der aus den **Lügendgeschichten des Freiherrn von Münchhausen** bekannten Redewendung „sich am eigenen Schopf aus dem Sumpf ziehen“ entspricht.

^cHat man einmal einen solchen **Self-compiling Compiler** C_w^w auf der Maschine M zum laufen gebracht, so kann man den Compiler auf der Maschine M weiterentwickeln, ohne von externen Entitäten, wie einer bestimmten Sprache L_o , in der der Compiler oder eine frühere Version des Compilers ursprünglich geschrieben war abhängig zu sein.

^dEinen Compiler in der Sprache zu schreiben, die er selbst kompiliert und diesen Compiler dann sich selbst kompilieren zu lassen, kann eine gute **Probe aufs Exempel** darstellen, dass der Compiler auch wirklich funktioniert.

^eEs ist hierbei theoretisch nicht notwendig den **letzten** Self-compiling Compiler $C_{w_{i-1}}^{w_{i-1}}$ für das Kompilieren des **neuen** Self-compiling Compilers $C_{w_i}^{w_i}$ zu verwenden, wenn z.B. der **Self-compiling Compiler** $C_{w_{i-3}}^{w_{i-3}}$ auch bereits alle Funktionalitäten, die beim Schreiben des **Self-compiling Compilers** C_w^w verwendet werden kompilieren kann.

^fDer Begriff ist sinnverwandt mit dem **Booten** eines Computers, wo die wichtigste Software, der **Kernel** zuerst in den Speicher geladen wird und darauf aufbauend von diesem dann das Betriebssysteme, welches bei Bedarf dann **Systemsoftware**, Software, die das Ausführen von Anwendungssoftware ermöglicht oder unterstützt, wie z.B. Treiber. und **Anwendungssoftware**, Software, deren Anwendung darin besteht, dass sie dem Benutzer unmittelbar eine Dienstleistung zur Verfügung stellt, lädt.

^gEarley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

²¹Natürlich könnte man aber auch einfach den **Cross-Compiler** C_{PicoC}^{Python} um weitere Funktionalitäten von L_C erweitern, hat dann aber weiterhin eine **Abhängigkeit** von der Programmiersprache L_{Python} .

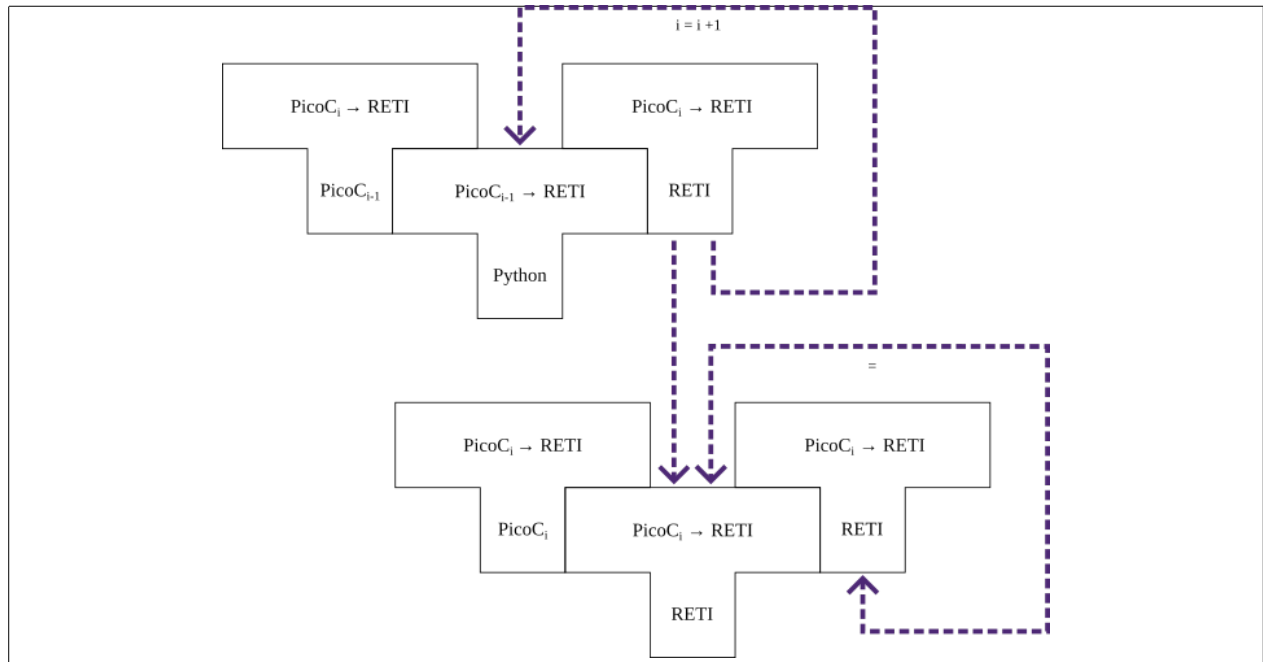


Abbildung 3.3: Iteratives Bootstrapping

Auch wenn ein **Self-compiling Compiler** $C_{w_i}^{w_i}$ in der Subdefinition 3.11.1 selbst in einer früheren Version $L_{w_{i-1}}$ der Programmiersprache L_{w_i} geschrieben wird, wird dieser nicht mit $C_{w_i}^{w_{i-1}}$ bezeichnet, sondern mit $C_{w_i}^{w_i}$, da es bei **Self-compiling Compilern** darum geht, dass diese zwar in der Subdefinition 3.11.1 eine frühere Version $C_{w_{i-1}}^{w_{i-1}}$ nutzen, um sich selbst kompilieren zu lassen, aber sie auch in der Lage sind sich selber zu kompilieren.

Literatur

Online

- *A-Normalization: Why and How (with code)*. URL: <https://matt.might.net/articles/a-normalization/> (besucht am 23.07.2022).
- *clang: C++ Compiler*. URL: <http://clang.org/> (besucht am 29.07.2022).
- Developers, Inkscape Website. *Draw Freely — Inkscape*. URL: <https://inkscape.org/> (besucht am 03.08.2022).
- *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).
- *History - GCC Wiki*. URL: <https://gcc.gnu.org/wiki/History> (besucht am 06.08.2022).
- *Home - Neovim*. URL: <http://neovim.io/> (besucht am 04.08.2022).
- *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).
- *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).
- LeFever, Lee. *The Art of Explanation: Making your Ideas, Products, and Services Easier to Understand*. 1. Aufl. Wiley, 20. Nov. 2012.

Artikel

- Earley, J. und Howard E. Sturgis. „A formalism for translator interactions“. In: *CACM* (1970). DOI: [10.1145/355598.362740](https://doi.org/10.1145/355598.362740).

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).
- — „Technische Informatik“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 3. Aug. 2022. (Besucht am 03.08.2022).
- Scholl, Prof. Dr. Philipp. „Einführung in Embedded Systems“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2021. URL: <https://earth.informatik.uni-freiburg.de/uploads/es-2122/> (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/swtv1> (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](https://doi.org/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).
 - Nemec, Devin. *copy_file_to_another_repo_action*. original-date: 2020-08-24T19:25:58Z. 27. Juli 2022. URL: https://github.com/dmnemec/copy_file_to_another_repo_action (besucht am 03.08.2022).
 - Ueda, Takahiro. *Makefile for LaTeX*. original-date: 2018-07-06T15:01:24Z. 10. Mai 2022. URL: <https://github.com/tueda/makefile4latex> (besucht am 03.08.2022).
-