
ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

Abgabedatum: 28th April 2022

Author:
Jürgen Mattheis

Gutachter:
Prof. Dr. Scholl

Betreuung:
M.Sc. Seufert

Eine Bachelorarbeit am Lehrstuhl für
Betriebssysteme

ERKLÄRUNG

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

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	11
1.1	RETI	11
1.2	PicoC	11
1.3	Aufgabenstellung	11
1.4	Eigenheiten der Sprache C	11
1.5	Richtlinien	11
2	Einführung	12
2.1	Compiler und Interpreter	12
2.1.1	T-Diagramme	15
2.2	Grammatiken	17
2.3	Grundlagen	17
2.3.1	Mehrdeutige Grammatiken	18
2.3.2	Präzidenz und Assoziativität	18
2.4	Lexikalische Analyse	19
2.5	Syntaktische Analyse	21
2.6	Code Generierung	27
2.7	Fehlermeldungen	27
2.7.1	Kategorien von Fehlermeldungen	27
3	Implementierung	28
3.1	Architektur	28
3.2	Lexikalische Analyse	29
3.2.1	Verwendung von Lark	29
3.2.2	Basic Parser	29
3.3	Syntaktische Analyse	29
3.3.1	Verwendung von Lark	29
3.3.2	Umsetzung von Präzidenz	31
3.3.3	Derivation Tree Generierung	32
3.3.4	Early Parser	32
3.3.5	Derivation Tree Vereinfachung	32
3.3.6	Abstrakt Syntax Tree Generierung	32
3.3.6.1	ASTNode	32
3.3.6.2	PicoC Nodes	32
3.3.6.3	RETI Nodes	32
3.4	Code Generierung	34
3.4.1	Passes	34
3.4.1.1	PicoC-Shrink Pass	34
3.4.1.2	PicoC-Blocks Pass	34
3.4.1.3	PicoC-Mon Pass	34
3.4.1.4	RETI-Blocks Pass	34
3.4.1.5	RETI-Patch Pass	34
3.4.1.6	RETI Pass	34
3.4.2	Umsetzung von Pointern	34
3.4.2.1	Referenzierung	34
3.4.2.2	Pointer Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen	36

3.4.3	Umsetzung von Arrays	38
3.4.3.1	Initialisierung von Arrays	38
3.4.3.2	Zugriff auf Arrayindex	40
3.4.3.3	Zuweisung an Arrayindex	42
3.4.4	Umsetzung von Structs	44
3.4.4.1	Deklaration von Structs	44
3.4.4.2	Initialisierung von Structs	46
3.4.4.3	Zugriff auf Structattribut	49
3.4.4.4	Zuweisung an Structattribut	52
3.4.5	Umsetzung der Derived Datatypes im Zusammenspiel	54
3.4.5.1	Einleitungsteil für Globale Statische Daten und Stackframe	54
3.4.5.2	Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes	57
3.4.5.3	Schlusssteil für die verschiedenen Derived Datatypes	60
3.4.6	Umsetzung von Funktionen	66
3.4.6.1	Funktionen auflösen zu RETI Code	66
3.4.6.1.1	Sprung zur Main Funktion	69
3.4.6.2	Funktionsdeklaration und -definition	71
3.4.6.3	Funktionsaufruf	72
3.4.6.3.1	Ohne Rückgabewert	72
3.4.6.3.2	Mit Rückgabewert	74
3.4.6.3.3	Umsetzung von Call by Sharing für Arrays	76
3.4.6.3.4	Umsetzung von Call by Value für Structs	79
3.4.7	Umsetzung kleinerer Details	81
3.5	Fehlermeldungen	81
3.5.1	Error Handler	81
3.5.2	Arten von Fehlermeldungen	81
3.5.2.1	Syntaxfehler	81
3.5.2.2	Laufzeitfehler	81
4	Ergebnisse und Ausblick	82
4.1	Compiler	82
4.2	Showmode	82
4.3	Qualitätssicherung	82
4.4	Kommentierter Kompilervorgang	82
4.5	Erweiterungsideen	82
A	Appendix	86
A.1	Konkrete und Abstrakte Syntax	86
A.2	Bedienungsanleitungen	86
A.2.1	PicoC-Compiler	86
A.2.2	Showmode	86
A.2.3	Entwicklertools	86

Abbildungsverzeichnis

2.1	Horizontale Übersetzungszwischenschritte zusammenfassen	17
2.2	Vertikale Interpretierungszwischenschritte zusammenfassen	17
2.3	Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse	21
2.4	Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse	26
3.1	Cross-Compiler Kompilervorgang ausgeschrieben	28
3.2	Cross-Compiler Kompilervorgang Kurzform	29
3.3	Architektur mit allen Passes ausgeschrieben	29
4.1	Cross-Compiler als Bootstrap Compiler	83
4.2	Iteratives Bootstrapping	85

Codeverzeichnis

3.1	PicoC Code für Pointer Referenzierung	34
3.2	Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung	35
3.3	Symboltabelle für Pointer Referenzierung	35
3.4	PicoC Mon Pass für Pointer Referenzierung	36
3.5	RETI Blocks Pass für Pointer Referenzierung	36
3.6	PicoC Code für Pointer Dereferenzierung	36
3.7	Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung	37
3.8	PicoC Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung	38
3.9	PicoC Code für Array Initialisierung	38
3.10	Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung	39
3.11	Symboltabelle für Array Initialisierung	39
3.12	PicoC Mon Pass für Array Initialisierung	39
3.13	RETI Blocks Pass für Array Initialisierung	40
3.14	PicoC Code für Zugriff auf Arrayindex	40
3.15	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Arrayindex	41
3.16	PicoC Mon Pass für Zugriff auf Arrayindex	41
3.17	RETI Blocks Pass für Zugriff auf Arrayindex	42
3.18	PicoC Code für Zuweisung an Arrayindex	42
3.19	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex	43
3.20	PicoC Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex	43
3.21	RETI Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex	44
3.22	PicoC Code für Deklaration von Structs	44
3.23	Symboltabelle für Deklaration von Structs	45
3.24	PicoC Code für Initialisierung von Structs	46
3.25	Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs	47
3.26	Symboltabelle für Initialisierung von Structs	48
3.27	PicoC Mon Pass für Initialisierung von Structs	49
3.28	RETI Blocks Pass für Initialisierung von Structs	49
3.29	PicoC Code für Zugriff auf Structattribut	49
3.30	Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut	50
3.31	PicoC Mon Pass für Zugriff auf Structattribut	51
3.32	RETI Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut	52
3.33	PicoC Code für Zuweisung an Structattribut	52
3.34	Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut	53
3.35	PicoC Mon Pass für Zuweisung an Structattribut	53
3.36	RETI Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut	54
3.37	PicoC Code für den Einleitungsteil	54
3.38	Abstract Syntax Tree für den Einleitungsteil	56
3.39	PicoC Mon Pass für den Einleitungsteil	56
3.40	RETI Blocks Pass für den Einleitungsteil	57
3.41	PicoC Code für den Mittelteil	57
3.42	Abstract Syntax Tree für den Mittelteil	58
3.43	PicoC Mon Pass für den Mittelteil	59
3.44	RETI Blocks Pass für den Mittelteil	60
3.45	PicoC Code für den Schlussteil	61
3.46	Abstract Syntax Tree für den Schlussteil	62
3.47	PicoC Mon Pass für den Schlussteil	64

3.48 RETI Blocks Pass für den Schlussteil	66
3.49 PicoC Code für 3 Funktionen	66
3.50 Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen	67
3.51 PicoC Blocks Pass für 3 Funktionen	68
3.52 PicoC Mon Pass für 3 Funktionen	68
3.53 RETI Blocks Pass für 3 Funktionen	69
3.54 PicoC Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	69
3.55 PicoC Mon Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	70
3.56 PicoC Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	70
3.57 PicoC Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist	71
3.58 PicoC Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	71
3.59 Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss	72
3.60 PicoC Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	72
3.61 PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	73
3.62 RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	74
3.63 RETI Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert	74
3.64 PicoC Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	74
3.65 PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	75
3.66 RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	76
3.67 RETI Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert	76
3.68 PicoC Code für Call by Sharing für Arrays	77
3.69 PicoC Mon Pass für Call by Sharing für Arrays	77
3.70 Symboltabelle für Call by Sharing für Arrays	78
3.71 RETI Block Pass für Call by Sharing für Arrays	79
3.72 PicoC Code für Call by Value für Structs	79
3.73 PicoC Mon Pass für Call by Value für Structs	80
3.74 RETI Block Pass für Call by Value für Structs	81

Tabellenverzeichnis

3.1 Präzidenzregeln von PicoC	31
---	----

Definitionsverzeichnis

1.1	Caller-save Register	11
1.2	Callee-save Register	11
1.3	Deklaration	11
1.4	Definition	11
1.5	Call by value	11
1.6	Call by reference	11
2.1	Interpreter	12
2.2	Compiler	12
2.3	Maschinensprache	13
2.4	Assemblersprache (bzw. engl. Assembly Language)	13
2.5	Assembler	14
2.6	Objectcode	14
2.7	Linker	14
2.8	Immediate	14
2.9	Transpiler (bzw. Source-to-source Compiler)	14
2.10	Cross-Compiler	15
2.11	T-Diagram Programm	15
2.12	T-Diagram Übersetzer (bzw. eng. Translator)	16
2.13	T-Diagram Interpreter	16
2.14	T-Diagram Maschine	16
2.15	Sprache	17
2.16	Chromsky Hierarchie	17
2.17	Grammatik	18
2.18	Reguläre Sprachen	18
2.19	Kontextfreie Sprachen	18
2.20	Ableitung	18
2.21	Links- und Rechtsableitung	18
2.22	Linksrekursive Grammatiken	18
2.23	Ableitungsbaum	18
2.24	Mehrdeutige Grammatik	18
2.25	Assoziativität	18
2.26	Präzidenz	18
2.27	Wortproblem	18
2.28	LL(k)-Grammatik	19
2.29	Pattern	19
2.30	Lexeme	19
2.31	Lexer (bzw. Scanner oder auch Tokenizer)	19
2.32	Bezeichner (bzw. Identifier)	20
2.33	Literal	21
2.34	Konkrete Syntax	22
2.35	Derivation Tree (bzw. Parse Tree)	22
2.36	Parser	22
2.37	Recognizer (bzw. Erkennen)	23
2.38	Transformer	24
2.39	Visitor	24
2.40	Abstrakte Syntax	25
2.41	Abstract Syntax Tree	25

2.42	Pass	27
2.43	Monadische Normalform	27
2.44	Fehlermeldung	27
3.1	Symboltabelle	34
4.1	Self-compiling Compiler	82
4.2	Minimaler Compiler	83
4.3	Bootstrap Compiler	84
4.4	Bootstrapping	84

Grammatikverzeichnis

3.2.1 Konkrete Syntax des Lexers	29
3.3.1 Konkrete Syntax des Parsers, Teil 1	30
3.3.2 Konkrete Syntax des Parsers, Teil 2	31
3.2.2 λ calculus syntax	33
3.2.3 Advanced capabilities of <code>grammar.sty</code>	33

1 Motivation

1.1 RETI

Definition 1.1: Caller-save Register

Definition 1.2: Callee-save Register

1.2 PicoC

1.3 Aufgabenstellung

1.4 Eigenheiten der Sprache C

Definition 1.3: Deklaration

Definition 1.4: Definition

Definition 1.5: Call by value

Definition 1.6: Call by reference

1.5 Richtlinien

2 Einführung

2.1 Compiler und Interpreter

Der wohl wichtigsten zu klärenden Begriffe, sind die eines **Compilers** (Definition 2.2) und eines **Interpreters** (Definition 2.1), da das Schreiben eines Compilers von der **PicoC-Sprache** 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 4.3).

Definition 2.1: Interpreter

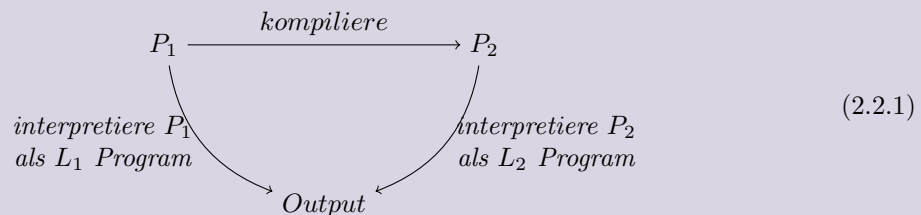
*Interpretiert die **Instructions** bzw. **Statements** eines Programmes P direkt.*

*Auf die Implementierung bezogen arbeitet ein Interpreter auf den compilerinternen **Sub-Bäumen** des **Abstract Syntax Tree** (Definition 2.41) und führt je nach Komposition der **Nodes** des Abstract Syntax Tree, auf die er während des Darüber-Iterierens stösst unterschiedliche Anweisungen aus.*

Definition 2.2: Compiler

***Kompiliert** ein Program P_1 , welches in einer Sprache L_1 geschrieben ist, in ein Program P_2 , welches in einer Sprache L_2 geschrieben ist.*

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



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 **Maschiene** 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

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

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 4.2) kann man das als C_{min} schreiben.

Üblicherweise kompiliert ein **Compiler** ein **Program**, dass in einer **Programmiersprache** geschrieben ist zu **Maschinenncode**, 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 **hardwarenahe 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*

^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.

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.*

^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.

Ein **Assembler** (Definition 2.5) ist in üblichen Compilern in einer bestimmten Form meist schon integriert sein, da Compiler üblicherweise direkt **Maschinenncode** 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 **Maschinenncode** 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 **Maschinentensprache** geschrieben ist.

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 **Maschinencode** nicht mehr enthalten sind, sobald der **Linker** die Objektdateien zum Maschinencode zusammengesetzt hat.

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.

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 ausgeschriebenen 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?*

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

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

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

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 2.10: 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 **Maschinensprachen** B_1 und B_2 haben.^a

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

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 **Maschinensprache** B_2 einer Zielmaschine M_2 läuft.³

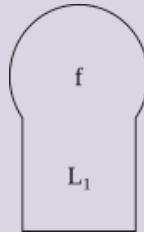
2.1.1 T-Diagramme

Um die Architektur von **Compilern** und **Interpretern** übersichtlich darzustellen eignen sich **T-Diagramme**⁴ 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 Program (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.



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.

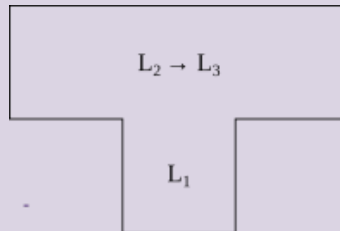
³Die an vielen Universitäten und Schulen eingesetzten programmierbaren Roboter von **Lego Mindstorms** nutzen z.B. einen **Cross-Compiler**, um für den programmierbaren Microcontroller eine **C-ähnliche Sprache** in die Maschinensprache des Microcontrollers zu kompilieren, da der Microcontroller selbst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

⁴Earley und Sturgis, „A formalism for translator interactions“.

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.

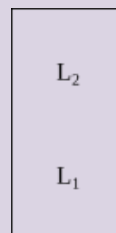
Für den **Übersetzer** gelten genauso, wie für einen **Compiler**^a die **Beziehungen** in 2.2.1.



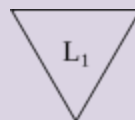
^aZwischen den Begriffen **Übersetzung** und **Kompilierung** gibt es einen kleinen Unterschied, **Übersetzung** ist **kleinschrittiger** als **Kompilierung** und ist auch zwischen **Passes** möglich, **Kompilierung** beinhaltet dagegen bereits alle **Passes** in einem Schritt. **Kompilieren** ist also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

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.

**Definition 2.14: T-Diagramm Maschine**

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



^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).

Aus den verschiedenen **Blöcken** lassen sich **Kompositionen** bilden, indem man sie **adjacent** 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.

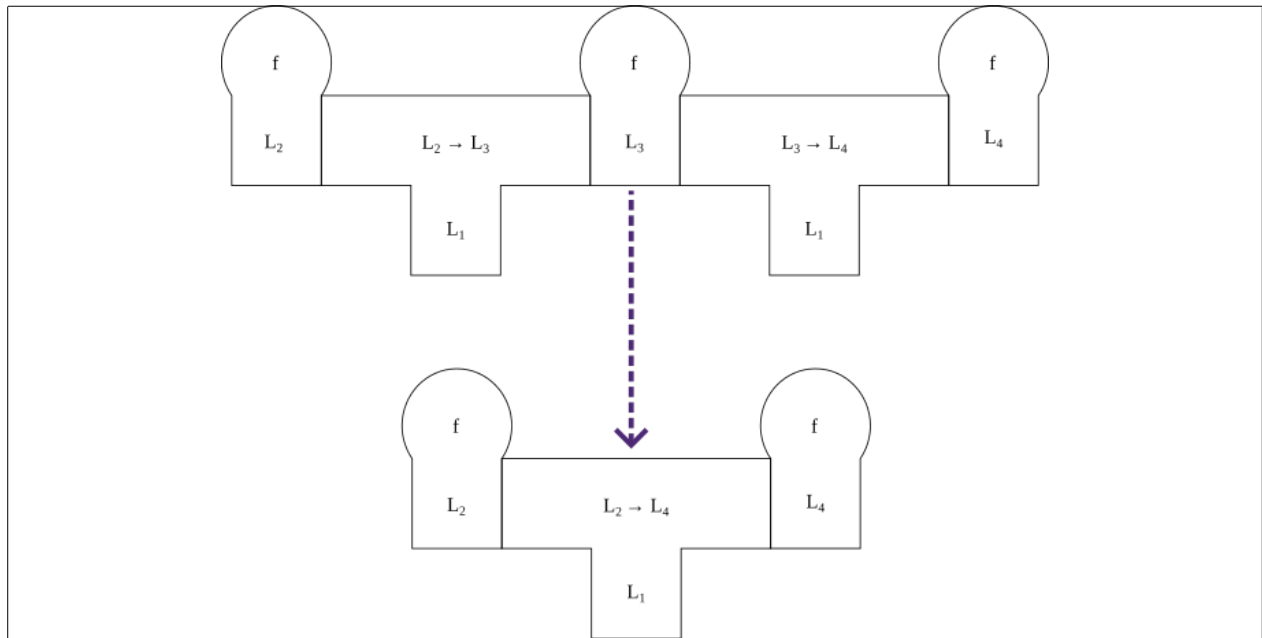


Abbildung 2.1: Horinzontale Übersetzungszwischenschritte zusammenfassen

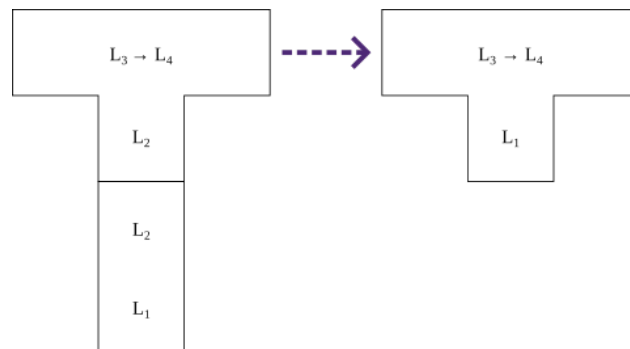


Abbildung 2.2: Vertikale Interpretierungszwischenschritte zusammenfassen

2.2 Grammatiken

2.3 Grundlagen

Definition 2.15: Sprache

Definition 2.16: Chomsky Hierarchie

Definition 2.17: Grammatik**Definition 2.18: Reguläre Sprachen****Definition 2.19: Kontextfreie Sprachen****Definition 2.20: Ableitung****Definition 2.21: Links- und Rechtsableitung****Definition 2.22: 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.

2.3.1 Mehrdeutige Grammatiken**Definition 2.23: Ableitungsbaum****Definition 2.24: Mehrdeutige Grammatik****2.3.2 Präzidenz und Assoziativität****Definition 2.25: Assoziativität****Definition 2.26: Präzidenz****Definition 2.27: Wortproblem**

Definition 2.28: LL(k)-Grammatik

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

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

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

2.4 Lexikalische Analyse

Die **Lexikalische Analyse** bildet üblicherweise die erste Ebene innerhalb der **Pipe Architektur** bei der Implementierung von Compilern. Die Aufgabe der lexikalischen Analyse ist vereinfacht gesagt, in einem Inputstring, z.B. dem Inhalt einer Datei, welche in **UTF-8** codiert ist, Folgen endlicher Symbole (auch **Wörter** genannt) zu finden, die bestimmte **Pattern** (Definition 2.29) matchen, die durch eine **reguläre Grammatik** spezifiziert sind.

Diese Folgen endlicher Symbole werden auch **Lexeme** (Definition 2.30) genannt.

Definition 2.29: 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.

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

Definition 2.30: Lexeme

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

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

Diese **Lexeme** werden vom **Lexer** (Definition 2.31) 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 2.31) sind es, die letztendlich an die **Syntaktische Analyse** weitergegeben werden.

Definition 2.31: 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

^alecture-notes-2021.

Ein **Lexer** ist im Allgemeinen eine **partielle Funktion**, da es Zeichenfolgen geben kann, die kein **Pattern**

eines **Tokens** der Sprache L_{Lex} matchen. In Bezug auf eine Implementierung, wird, wenn der Lexer Teil der Implementierung eines Compilers ist, in diesem Fall eine **Fehlermeldung** ausgegeben.

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 2.32) von **Variablen, Konstanten und Funktionen** die Symbole^a.

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

Definition 2.32: Bezeichner (bzw. Identifier)

***Tokenwert**, der eine Konstante, Variable, Funktion usw. **eindeutig** benennt.^a*

^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.

Eine weitere Aufgabe der **Lexikalischen Analyse** ist es jegliche für die Weiterverarbeitung unwichtigen Symbole, wie Leerzeichen `␣`, Newline `\n`⁵ 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 beliebige Bezeichner von Variablen, Konstanten und Funktionen und beliebige Zahlen sind aber trotz allem z.B. `NAME` und `NUM`⁶, 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 2.33) dargestellt werden, einmal als ASCII-Zeichen `'c'`, dass den entsprechenden Wert in der ASCII-Tabelle hat und des Weiteren auch in Dezimalschreibweise als 99⁷. 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

⁵In 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.

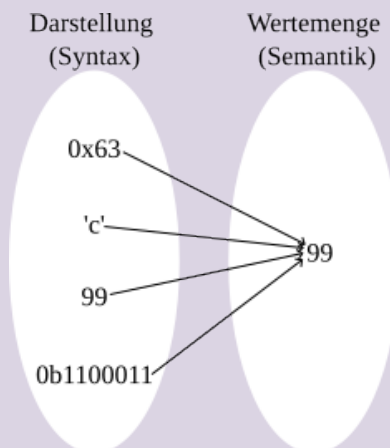
⁶Diese **Tokennamen** wurden im **PicoC-Compiler** verwendet, da man beim Programmieren möglichst **kurze** und **leicht verständliche** Bezeichner für seine Nodes haben will, damit unter anderem **mehr Code** in eine Zeile passt.

⁷Die Programmiersprache **Python** erlaubt es z.B. dieser Wert auch mit den Literalen `0b1100011` und `0x63` darzustellen.

regulär, da ein typischer **Lexer** immer nur **ein Symbol** vorausschaut⁸, sich nichts merken muss und unabhängig davon, was für Symbole davor aufgetaucht sind läuft. Die Grammatik 3.2.1 liefert den Beweis, dass die Sprache L_{PicoC_Lex} des **PicoC-Compilers** auf jeden Fall **regulär** ist, da sie fast die Definition 2.18 erfüllt. Einzig die Produktion $CHAR ::= ""ASCII_CHAR""$ sieht problematisch aus, kann allerdings auch als $\{CHAR ::= ""CHAR2, CHAR2 ::= ASCII_CHAR""\}$ **regulär** ausgedrückt werden⁹. Somit existiert eine **reguläre Grammatik**, welche die **Sprache** L_{PicoC_Lex} beschreibt und damit ist die **Sprache** L_{PicoC_Lex} **regulär**.

Definition 2.33: Literal

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



Um eine Gesamtübersicht über die **Lexikalische Analyse** zu geben, ist in Abbildung 2.3 die Lexikalische Analyse an einem Beispiel veranschaulicht.

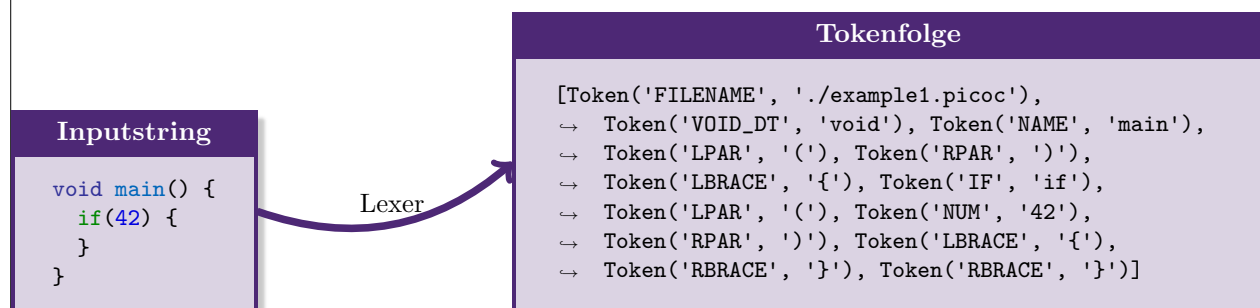


Abbildung 2.3: Veranschaulichung der Lexikalischen Analyse

2.5 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

⁸Man nennt das auch einem **Lookahead** von 1

⁹Eine derartige Regel würde nur Probleme bereiten, wenn sich aus `ASCII_CHAR` **beliebig breite** Wörter ableiten lassen.

eine entsprechende schließende runde Klammer ')' bzw. schließende geschweifte Klammer '}' geschlossen wurden.

Die **Syntax**, in welcher der **Inputstring** aufgeschrieben ist, wird auch als **Konkrete Syntax** (Definition 2.34) bezeichnet. In einem Zwischenschritt, dem **Parsen** wird aus diesem Inputstring mithilfe eines **Parsers** (Definition 2.36), ein **Derivation Tree** (Definition 2.35) generiert, der als Zwischenstufe hin zum einem **Abstract Syntax Tree** (Definition 2.41) dient. Beim Compilerbau ist es förderlich kleinschrittig vorzugehen, deshalb erst die Generierung des **Derivation Tree** und dann erst des **Abstract Syntax Tree**.

Definition 2.34: Konkrete Syntax

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

Ein Programm in seiner Textrepräsentation, wie es in einer Textdatei nach den Produktionen der Grammatiken G_{Lex} und G_{Parse} abgeleitet steht, bevor man es kompiliert, ist in Konkreter Syntax aufgeschrieben.^a

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

Definition 2.35: Derivation Tree (bzw. Parse Tree)

Compilerinterne Darstellung eines in Konkreter Syntax geschriebenen Inputstrings als Baumdatenstruktur, in der Nichtterminalsymbole die Inneren Knoten der Baumdatenstruktur und Terminalsymbole die Blätter der Baumdatenstruktur bilden. Jedes zum Ableiten des Inputstrings verwendete Nicht-Terminalsymbol einer Produktion der Grammatik G_{Parse} , die ein Teil der Konkrete Syntax ist, bildet einen eigenen Inneren Knoten.

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

Definition 2.36: Parser

Ein Parser ist ein Programm, dass aus einem Inputstring, der in Konkreter Syntax geschrieben ist, eine compilerinterne Darstellung, den Derivation Tree 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 2.36 verwendet.

^bCompiler Design - Phases of Compiler.

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 Insektenbegnungen 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 L_{PicoC} 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 2.6 wieder relevant.

Ein **Parser** ist genauergesagt ein erweiterter **Recognizer** (Definition 2.37), denn ein Parser löst das **Wortproblem** (Definition 2.27) für die **Sprache**, die durch die **Konkrete Syntax** beschrieben wird und konstruiert parallel dazu oder im Nachgang aus den Informationen, die während der Ausführung des Recognition Algorithmus gesichert wurden den **Derivation Tree**.

Definition 2.37: Recognizer (bzw. Erkenner)

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

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

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

- **Top-Down Parsing:** Der **Derivation Tree** wird von **oben-nach-unten** generiert, also von der **Wurzel** zu den **Blättern**. Dementsprechend fängt die Generierung des **Derivation Tree** mit dem **Startsymbol** der **Grammatik** an und wendet in jedem Schritt eine **Linksableitung** auf die **Nicht-Terminalsymbole** an, bis man **Terminalsymbole** hat, 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**. Dabei 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-Terminal** enthält.

Mit dieser Methode ist das Parsen **Linksrekursiver Grammatiken** (Definition 2.22) 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 2.28) 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.

Der **Abstract Syntax Tree** wird mithilfe von **Transformern** (Definition 2.38) und **Visitors** (Definition 2.39) generiert und ist das Endprodukt der **Syntaktischen Analyse**. Wenn man die gesamte **Syntaktische Analyse** betrachtet, so übersetzt diese einen Inputstring von der **Konkreten Syntax** in die **Abstrakte Syntax** (Definition 2.40).

Definition 2.38: Transformer

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

Definition 2.39: Visitor

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

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

Definition 2.40: Abstrakte Syntax

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

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

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

Definition 2.41: Abstract Syntax Tree

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

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

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

Die **Baumdatenstruktur** des **Derivation Tree** und **Abstract Syntax Tree** ermöglicht es die Operationen, die ein Compiler bzw. Interpreter bei der Weiterverarbeitung des Inputstrings 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 2.4 die Syntaktische mit dem Beispiel aus Subkapitel 2.4 fortgeführt.

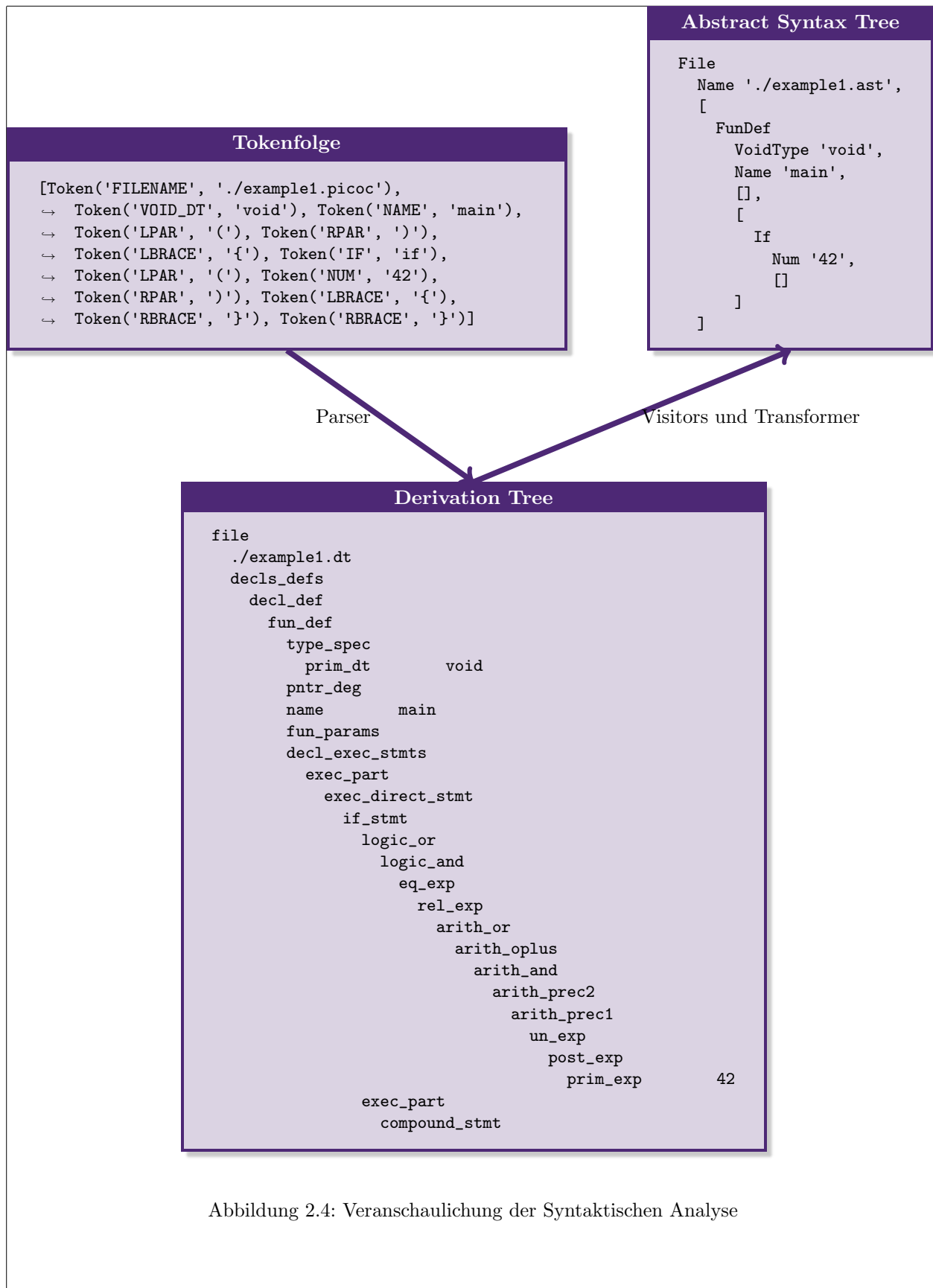


Abbildung 2.4: Veranschaulichung der Syntaktischen Analyse

2.6 Code Generierung

Definition 2.42: Pass

Definition 2.43: Monadische Normalform

Ein echter Compiler verwendet Graph Coloring ... Register ...

2.7 Fehlermeldungen

Definition 2.44: Fehlermeldung

2.7.1 Kategorien von Fehlermeldungen

3 Implementierung

3.1 Architektur

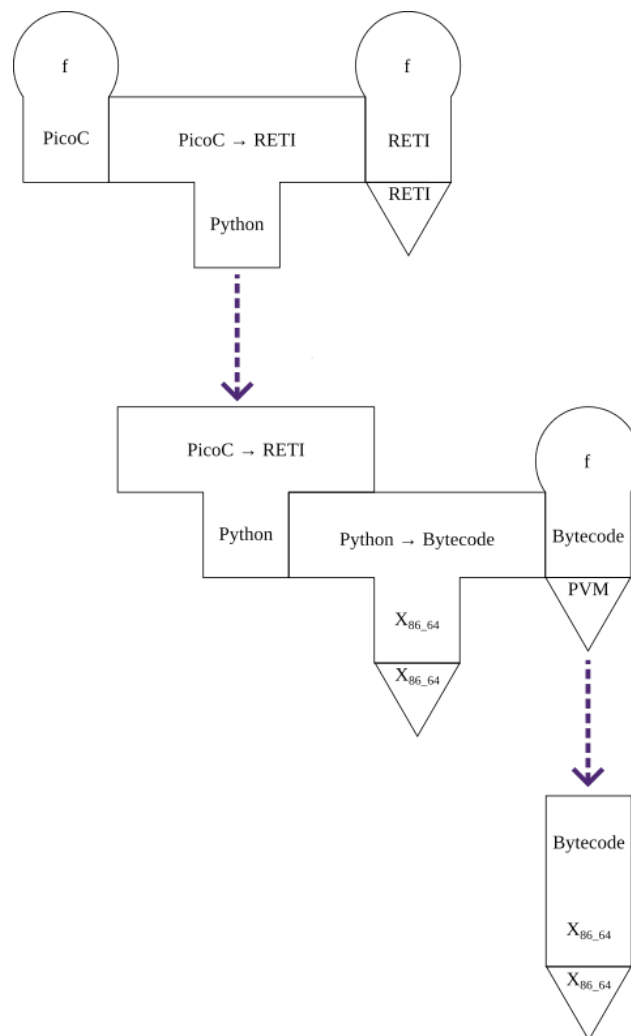


Abbildung 3.1: Cross-Compiler Kompiliervorgang ausgeschrieben

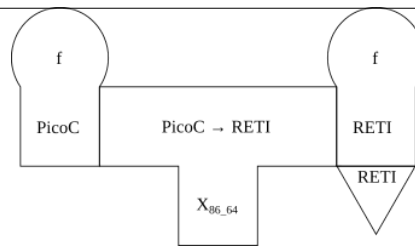


Abbildung 3.2: Cross-Compiler Kompiliervorgang Kurzform

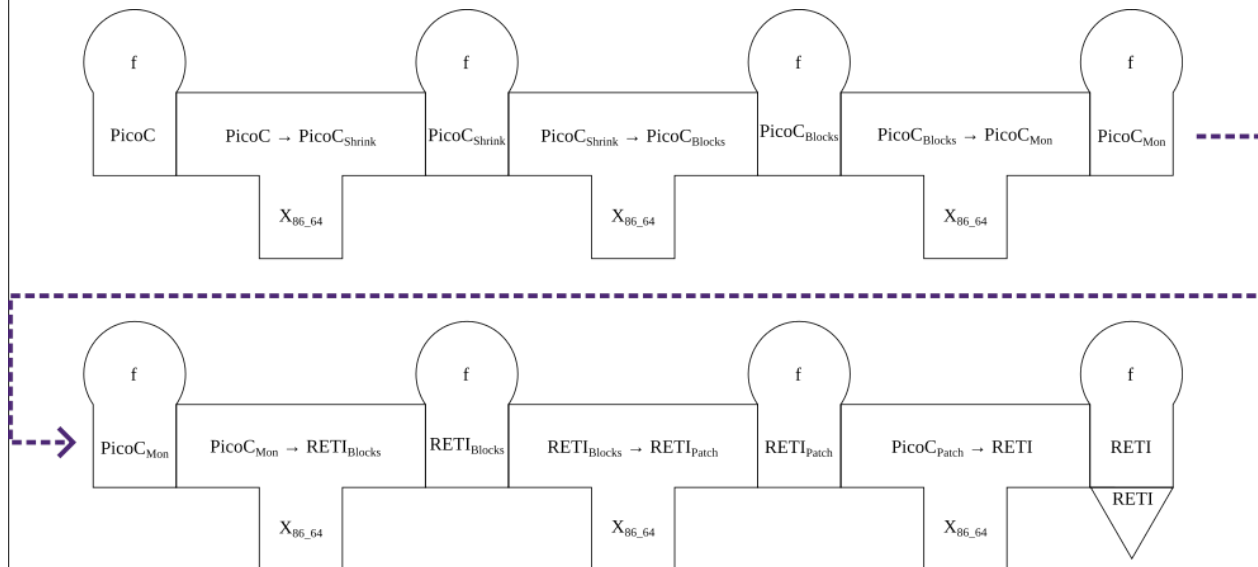


Abbildung 3.3: Architektur mit allen Passes ausgeschrieben

3.2 Lexikalische Analyse

3.2.1 Verwendung von Lark

Grammar 3.2.1: Konkrete Syntax des Lexers

3.2.2 Basic Parser

3.3 Syntaktische Analyse

3.3.1 Verwendung von Lark

In 3.3.1

<i>prim_exp</i>	::=	<i>name</i> <i>NUM</i> <i>CHAR</i> "(" <i>logic_or</i> ")"	<i>L_Arith</i> +
<i>post_exp</i>	::=	<i>array_subscr</i> <i>struct_attr</i> <i>fun_call</i>	<i>L_Array</i> +
		<i>input_exp</i> <i>print_exp</i> <i>prim_exp</i>	<i>L_Pntr</i> +
<i>un_exp</i>	::=	<i>un_opun_exp</i> <i>post_exp</i>	<i>L_Struct</i> + <i>L_Fun</i>
<i>input_exp</i>	::=	"input" "(" ")"	<i>L_Arith</i>
<i>print_exp</i>	::=	"print" "(" <i>logic_or</i> ")"	
<i>arith_prec1</i>	::=	<i>arith_prec1</i> <i>prec1_op</i> <i>un_exp</i> <i>un_exp</i>	
<i>arith_prec2</i>	::=	<i>arith_prec2</i> <i>prec2_op</i> <i>arith_prec1</i> <i>arith_prec1</i>	
<i>arith_and</i>	::=	<i>arith_and</i> "&" <i>arith_prec2</i> <i>arith_prec2</i>	
<i>arith_oplus</i>	::=	<i>arith_oplus</i> "^" <i>arith_and</i> <i>arith_and</i>	
<i>arith_or</i>	::=	<i>arith_or</i> " " <i>arith_oplus</i> <i>arith_oplus</i>	
<i>rel_exp</i>	::=	<i>rel_exp</i> <i>rel_op</i> <i>arith_or</i> <i>arith_or</i>	<i>L_Logic</i>
<i>eq_exp</i>	::=	<i>eq_exp</i> <i>eq_oprel_exp</i> <i>rel_exp</i>	
<i>logic_and</i>	::=	<i>logic_and</i> "&&" <i>eq_exp</i> <i>eq_exp</i>	
<i>logic_or</i>	::=	<i>logic_or</i> " " <i>logic_and</i> <i>logic_and</i>	
<i>type_spec</i>	::=	<i>prim_dt</i> <i>struct_spec</i>	<i>L_Assign_Alloc</i>
<i>alloc</i>	::=	<i>type_spec</i> <i>pntr_decl</i>	
<i>assign_stmt</i>	::=	<i>un_exp</i> "=" <i>logic_or</i> ";"	
<i>initializer</i>	::=	<i>logic_or</i> <i>array_init</i> <i>struct_init</i>	
<i>init_stmt</i>	::=	<i>alloc</i> "=" <i>initializer</i> ";"	
<i>const_init_stmt</i>	::=	"const" <i>type_spec</i> <i>name</i> "=" <i>NUM</i> ";"	
<i>pntr_deg</i>	::=	"*" *	<i>L_Pntr</i>
<i>pntr_decl</i>	::=	<i>pntr_deg</i> <i>array_decl</i> <i>array_decl</i>	
<i>array_dims</i>	::=	("[" <i>NUM</i> "]") *	<i>L_Array</i>
<i>array_decl</i>	::=	<i>name</i> <i>array_dims</i> "(" <i>pntr_decl</i> ")" <i>array_dims</i>	
<i>array_init</i>	::=	"{" <i>initializer</i> ("," <i>initializer</i>) * "}"	
<i>array_subscr</i>	::=	<i>post_exp</i> "[" <i>logic_or</i> "]"	
<i>struct_spec</i>	::=	"struct" <i>name</i>	<i>L_Struct</i>
<i>struct_params</i>	::=	(<i>alloc</i> ";") +	
<i>struct_decl</i>	::=	"struct" <i>name</i> "{" <i>struct_params</i> "}"	
<i>struct_init</i>	::=	"{" " ." <i>name</i> "=" <i>initializer</i> ("," " ." <i>name</i> "=" <i>initializer</i>) * "}"	
<i>struct_attr</i>	::=	<i>post_exp</i> " ." <i>name</i>	
<i>if_stmt</i>	::=	"if" "(" <i>logic_or</i> ")" <i>exec_part</i>	<i>L_If_Else</i>
<i>if_else_stmt</i>	::=	"if" "(" <i>logic_or</i> ")" <i>exec_part</i> "else" <i>exec_part</i>	
<i>while_stmt</i>	::=	"while" "(" <i>logic_or</i> ")" <i>exec_part</i>	<i>L_Loop</i>
<i>do_while_stmt</i>	::=	"do" <i>exec_part</i> "while" "(" <i>logic_or</i> ")" ";"	

Grammar 3.3.1: Konkrete Syntax des Parsers, Teil 1

<i>decl_exp_stmt</i>	::=	<i>alloc</i> ";"	<i>L_Smt</i>
<i>decl_direct_stmt</i>	::=	<i>assign_stmt</i> <i>init_stmt</i> <i>const_init_stmt</i>	
<i>decl_part</i>	::=	<i>decl_exp_stmt</i> <i>decl_direct_stmt</i> <i>RETI_COMMENT</i>	
<i>compound_stmt</i>	::=	"{" <i>exec_part</i> * "}"	
<i>exec_exp_stmt</i>	::=	<i>logic_or</i> ";"	
<i>exec_direct_stmt</i>	::=	<i>if_stmt</i> <i>if_else_stmt</i> <i>while_stmt</i> <i>do_while_stmt</i> <i>assign_stmt</i> <i>fun_return_stmt</i>	
<i>exec_part</i>	::=	<i>compound_stmt</i> <i>exec_exp_stmt</i> <i>exec_direct_stmt</i> <i>RETI_COMMENT</i>	
<i>decl_exec_stmts</i>	::=	<i>decl_part</i> * <i>exec_part</i> *	
<i>fun_args</i>	::=	[<i>logic_or</i> ("," <i>logic_or</i>)*]	<i>L_Fun</i>
<i>fun_call</i>	::=	<i>name</i> (" " <i>fun_args</i> ")"	
<i>fun_return_stmt</i>	::=	"return" [<i>logic_or</i>];"	
<i>fun_params</i>	::=	[<i>alloc</i> ("," <i>alloc</i>)*]	
<i>fun_decl</i>	::=	<i>type_spec</i> <i>pntr_deg</i> <i>name</i> (" " <i>fun_params</i> ")"	
<i>fun_def</i>	::=	<i>type_spec</i> <i>pntr_deg</i> <i>name</i> (" " <i>fun_params</i> ")" " {" <i>decl_exec_stmts</i> "}"	
<i>decl_def</i>	::=	(<i>struct_decl</i> <i>fun_decl</i>);" <i>fun_def</i>	<i>L_File</i>
<i>decls_defs</i>	::=	<i>decl_def</i> *	
<i>file</i>	::=	<i>FILENAME</i> <i>decls_defs</i>	

Grammar 3.3.2: Konkrete Syntax des Parsers, Teil 2

3.3.2 Umsetzung von Präzidenz

Die **PicoC Sprache** hat dieselben **Präzidenzregeln** implementiert, wie die **Sprache C¹**. Die **Präzidenzregeln** von **PicoC** sind in Tabelle 3.1 aufgelistet.

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

Tabelle 3.1: Präzidenzregeln von PicoC

¹*C Operator Precedence - cppreference.com.*

3.3.3 Derivation Tree Generierung

3.3.4 Early Parser

3.3.5 Derivation Tree Vereinfachung

3.3.6 Abstrakt Syntax Tree Generierung

3.3.6.1 ASTNode

3.3.6.2 PicoC Nodes

3.3.6.3 RETI Nodes

$$\begin{array}{lll}
 T & ::= & \mathcal{V} \quad \textit{Variable} \\
 & | & (\mathcal{T} \mathcal{T}) \quad \textit{Application} \\
 & | & \lambda \mathcal{V} \cdot \mathcal{T} \quad \textit{Abstraction} \\
 V & ::= & x, y, \dots \quad \textit{Variables}
 \end{array}$$
Grammar 3.2.2: λ calculus syntax
$$\begin{array}{lll}
 A & ::= & \mathcal{T} \mid \mathcal{V} \quad \textit{Multiple option on a single line} \\
 & | & \mathcal{A} \quad \textit{Highlighted form} \\
 & | & \mathcal{B} \mid \mathcal{C} \quad \textit{Downplayed form} \\
 & | & \textcolor{red}{A} \mid \mathcal{B} \quad \textit{Emphasize part of the line}
 \end{array}$$
Grammar 3.2.3: Advanced capabilities of `grammar.sty`

3.4 Code Generierung

3.4.1 Passes

3.4.1.1 PicoC-Shrink Pass

3.4.1.2 PicoC-Blocks Pass

3.4.1.3 PicoC-Mon Pass

Definition 3.1: Symboltabelle

3.4.1.4 RETI-Blocks Pass

3.4.1.5 RETI-Patch Pass

3.4.1.6 RETI Pass

3.4.2 Umsetzung von Pointern

3.4.2.1 Referenzierung

```
1 void main() {  
2     int var = 42;  
3     int *pntr = &var;  
4 }
```

Code 3.1: PicoC Code für Pointer Referenzierung

```
1 File  
2   Name './example_pntr_ref.ast',  
3   [  
4     FunDef  
5       VoidType 'void',  
6       Name 'main',  
7       [],  
8       [  
9         Assign  
10        Alloc  
11          Writeable,  
12          IntType 'int',  
13          Name 'var',  
14          Num '42',  
15        Assign  
16        Alloc  
17          Writeable,  
18          PtrDecl  
19            Num '1',  
20            IntType 'int',  
21            Name 'pntr',
```

```

22     Ref
23     Name 'var'
24 ]
25 ]

```

Code 3.2: Abstract Syntax Tree für Pointer Referenzierung

```

1 SymbolTable
2 [
3   Symbol(
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
7       name:                Name('main')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('5'))
10      size:                 Empty()
11    },
12   Symbol(
13     {
14       type qualifier:      Writeable()
15       datatype:            IntType('int')
16       name:                Name('var@main')
17       value or address:    Num('0')
18       position:            Pos(Num('2'), Num('6'))
19       size:                 Num('1')
20    },
21   Symbol(
22     {
23       type qualifier:      Writeable()
24       datatype:            PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))
25       name:                Name('pntr@main')
26       value or address:    Num('1')
27       position:            Pos(Num('3'), Num('7'))
28       size:                 Num('1')
29    }
30 ]

```

Code 3.3: Symboltabelle für Pointer Referenzierung

```

1 File
2   Name './example_pntr_ref.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '42',
9         Assign
10          GlobalWrite
11          Num '0',

```

```

12     Tmp
13     Num '1',
14     Ref
15     GlobalRead
16     Num '0',
17     Assign
18     GlobalWrite
19     Num '1',
20     Tmp
21     Num '1',
22     Return
23     Empty
24 ]
25 ]

```

Code 3.4: PicoC Mon Pass für Pointer Referenzierung

```

1 File
2   Name './example_pntr_ref.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 42,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      LOADIN SP ACC 1,
11      STOREIN DS ACC 0,
12      ADDI SP 1,
13      SUBI SP 1,
14      LOADI IN1 0,
15      ADD IN1 DS,
16      STOREIN SP IN1 1,
17      LOADIN SP ACC 1,
18      STOREIN DS ACC 1,
19      ADDI SP 1,
20      LOADIN BAF PC -1
21    ]
22  ]

```

Code 3.5: RETI Blocks Pass für Pointer Referenzierung

3.4.2.2 Pointer Dereferenzierung durch Zugriff auf Arrayindex ersetzen

```

1 void main() {
2   int var = 42;
3   int *pntr = &var;
4   *pntr;
5 }

```

Code 3.6: PicoC Code für Pointer Dereferenzierung

```
1 File
2   Name './example_pntr_deref.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11            Writeable,
12            IntType 'int',
13            Name 'var',
14            Num '42',
15          Assign
16            Alloc
17              Writeable,
18              PntrDecl
19                Num '1',
20                IntType 'int',
21                Name 'pntr',
22              Ref
23                Name 'var',
24            Exp
25              Deref
26                Name 'pntr',
27                Num '0'
28          ]
29   ]
```

Code 3.7: Abstract Syntax Tree für Pointer Dereferenzierung

```
1 File
2   Name './example_pntr_deref.picoc_shrink',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10          Alloc
11            Writeable,
12            IntType 'int',
13            Name 'var',
14            Num '42',
15          Assign
16            Alloc
17              Writeable,
18              PntrDecl
19                Num '1',
20                IntType 'int',
21                Name 'pntr',
```

```

22     Ref
23     Name 'var',
24   Exp
25     Subscr
26     Name 'pntr',
27     Num '0'
28   ]
29 ]

```

Code 3.8: PicoC Shrink Pass für Pointer Dereferenzierung

3.4.3 Umsetzung von Arrays

3.4.3.1 Initialisierung von Arrays

```

1 void main() {
2   int ar[2][1] = {{4}, {2}};
3 }

```

Code 3.9: PicoC Code für Array Initialisierung

```

1 File
2   Name './example_array_init.ast',
3   [
4     FunDef
5     VoidType 'void',
6     Name 'main',
7     [],
8     [
9       Assign
10      Alloc
11      Writeable,
12      ArrayDecl
13      [
14        Num '2',
15        Num '1'
16      ],
17      IntType 'int',
18      Name 'ar',
19      Array
20      [
21        Array
22        [
23          Num '4'
24        ],
25        Array
26        [
27          Num '2'
28        ]
29      ]
30    ]

```

31]

Code 3.10: Abstract Syntax Tree für Array Initialisierung

```

1 SymbolTable
2 [
3     Symbol(
4         {
5             type qualifier:      Empty()
6             datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
7             name:                 Name('main')
8             value or address:     Empty()
9             position:             Pos(Num('1'), Num('5'))
10            size:                 Empty()
11        },
12     Symbol(
13         {
14             type qualifier:      Writeable()
15             datatype:            ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int'))
16             name:                 Name('ar@main')
17             value or address:     Num('0')
18             position:             Pos(Num('2'), Num('6'))
19             size:                 Num('2')
20        }
21 ]

```

Code 3.11: Symboltabelle für Array Initialisierung

```

1 File
2 Name './example_array_init.picoc_mon',
3 [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7         Exp
8         Num '4',
9         Exp
10        Num '2',
11        Assign
12        GlobalWrite
13        Num '0',
14        Tmp
15        Num '2',
16        Return
17        Empty
18    ]
19 ]

```

Code 3.12: PicoC Mon Pass für Array Initialisierung


```

1 File
2   Name './example_array_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 4,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        SUBI SP 1,
11        LOADI ACC 2,
12        STOREIN SP ACC 1,
13        LOADIN SP ACC 1,
14        STOREIN DS ACC 1,
15        LOADIN SP ACC 2,
16        STOREIN DS ACC 0,
17        ADDI SP 2,
18        LOADIN BAF PC -1
19      ]
20    ]

```

Code 3.13: RETI Blocks Pass für Array Initialisierung

3.4.3.2 Zugriff auf Arrayindex

Der Zugriff auf einen bestimmten Index eines Arrays ist wie folgt umgesetzt:

```

1 void main() {
2   int ar[2] = {1, 2};
3   ar[2];
4 }

```

Code 3.14: PicoC Code für Zugriff auf Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_access.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign
10        Alloc
11        Writeable,
12        ArrayDecl
13        [
14          Num '2'
15        ],
16        IntType 'int',
17        Name 'ar',

```

```

18     Array
19     [
20         Num '1',
21         Num '2'
22     ],
23     Exp
24     Subscr
25     Name 'ar',
26     Num '2'
27 ]
28 ]

```

Code 3.15: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       Exp
8       Num '1',
9       Exp
10      Num '2',
11      Assign
12      GlobalWrite
13      Num '0',
14      Tmp
15      Num '2',
16      Ref
17      GlobalRead
18      Num '0',
19      Exp
20      Num '2',
21      Ref
22      Subscr
23      Tmp
24      Num '2',
25      Tmp
26      Num '1',
27      Exp
28      Subscr
29      Tmp
30      Num '1',
31      Num '0',
32      Return
33      Empty
34    ]
35  ]

```

Code 3.16: PicoC Mon Pass für Zugriff auf Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 1,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        SUBI SP 1,
11        LOADI ACC 2,
12        STOREIN SP ACC 1,
13        LOADIN SP ACC 1,
14        STOREIN DS ACC 1,
15        LOADIN SP ACC 2,
16        STOREIN DS ACC 0,
17        ADDI SP 2,
18        SUBI SP 1,
19        LOADI IN1 0,
20        ADD IN1 DS,
21        STOREIN SP IN1 1,
22        SUBI SP 1,
23        LOADI ACC 2,
24        STOREIN SP ACC 1,
25        LOADIN SP IN1 2,
26        LOADIN SP IN2 1,
27        MULTI IN2 1,
28        ADD IN1 IN2,
29        ADDI SP 1,
30        STOREIN SP IN1 1,
31        LOADIN SP IN1 1,
32        LOADIN IN1 ACC 0,
33        STOREIN SP ACC 1,
34        LOADIN BAF PC -1
35      ]
36    ]

```

Code 3.17: RETI Blocks Pass für Zugriff auf Arrayindex

3.4.3.3 Zuweisung an Arrayindex

```

1 void main() {
2   int ar[2];
3   ar[2] = 42;
4 }

```

Code 3.18: PicoC Code für Zuweisung an Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.ast',
3   [
4     FunDef

```

```

5      VoidType 'void',
6      Name 'main',
7      [],
8      [
9          Exp
10         Alloc
11         Writeable,
12         ArrayDecl
13         [
14             Num '2'
15         ],
16         IntType 'int',
17         Name 'ar',
18     Assign
19     Subscr
20     Name 'ar',
21     Num '2',
22     Num '42'
23 ]
24 ]

```

Code 3.19: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.picoc_mon',
3   [
4       Block
5       Name 'main.0',
6       [
7           Exp
8           Num '42',
9           Ref
10          GlobalRead
11          Num '0',
12          Exp
13          Num '2',
14          Ref
15          Subscr
16          Tmp
17          Num '2',
18          Tmp
19          Num '1',
20          Assign
21          Subscr
22          Tmp
23          Num '1',
24          Num '0',
25          Tmp
26          Num '2',
27          Return
28          Empty
29      ]
30 ]

```

Code 3.20: PicoC Mon Pass für Zuweisung an Arrayindex

```

1 File
2   Name './example_array_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 42,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      SUBI SP 1,
11      LOADI IN1 0,
12      ADD IN1 DS,
13      STOREIN SP IN1 1,
14      SUBI SP 1,
15      LOADI ACC 2,
16      STOREIN SP ACC 1,
17      LOADIN SP IN1 2,
18      LOADIN SP IN2 1,
19      MULTI IN2 1,
20      ADD IN1 IN2,
21      ADDI SP 1,
22      STOREIN SP IN1 1,
23      LOADIN SP IN1 1,
24      LOADIN SP ACC 2,
25      ADDI SP 2,
26      STOREIN IN1 ACC 0,
27      LOADIN BAF PC -1
28    ]
29  ]

```

Code 3.21: RETI Blocks Pass für Zuweisung an Arrayindex

3.4.4 Umsetzung von Structs

3.4.4.1 Deklaration von Structs

```

1 struct st1 {int *ar[3];};
2
3 struct st2 {struct st1 st;};
4
5 void main() {
6 }

```

Code 3.22: PicoC Code für Deklaration von Structs

```

1 SymbolTable
2 [

```

```

3  Symbol(
4  {
5      type qualifier:      Empty()
6      datatype:            ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))
7      name:                Name('ar@st1')
8      value or address:    Empty()
9      position:            Pos(Num('1'), Num('17'))
10     size:                Num('3')
11 },
12 Symbol(
13 {
14     type qualifier:      Empty()
15     datatype:            StructDecl(Name('st1'), [Alloc(Writeable(),
16 ↪   ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))), Name('ar'))])
17     name:                Name('st1')
18     value or address:    [Name('ar@st1')]
19     position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
20     size:                Num('3')
21 },
22 Symbol(
23 {
24     type qualifier:      Empty()
25     datatype:            StructSpec(Name('st1'))
26     name:                Name('st@st2')
27     value or address:    Empty()
28     position:            Pos(Num('3'), Num('23'))
29     size:                Num('3')
30 },
31 Symbol(
32 {
33     type qualifier:      Empty()
34     datatype:            StructDecl(Name('st2'), [Alloc(Writeable(),
35 ↪   StructSpec(Name('st1')), Name('st'))])
36     name:                Name('st2')
37     value or address:    [Name('st@st2')]
38     position:            Pos(Num('3'), Num('7'))
39     size:                Num('3')
40 },
41 Symbol(
42 {
43     type qualifier:      Empty()
44     datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
45     name:                Name('main')
46     value or address:    Empty()
47     position:            Pos(Num('5'), Num('5'))
48     size:                Empty()
49 }
50 ]

```

Code 3.23: Symboltabelle für Deklaration von Structs

3.4.4.2 Initialisierung von Structs

```
1 struct st1 {int *pntr[1];};
2
3 struct st2 {struct st1 st;};
4
5 void main() {
6     int var = 42;
7     struct st1 st = {.st={.pntr={{&var}}}};
8 }
```

Code 3.24: PicoC Code für Initialisierung von Structs

```
1 File
2   Name './example_struct_init.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st1',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           ArrayDecl
10            [
11              Num '1'
12            ],
13            PtrDecl
14              Num '1',
15              IntType 'int',
16              Name 'pntr'
17        ],
18      StructDecl
19        Name 'st2',
20        [
21          Alloc
22            Writeable,
23            StructSpec
24              Name 'st1',
25              Name 'st'
26        ],
27      FunDef
28        VoidType 'void',
29        Name 'main',
30        [],
31        [
32          Assign
33            Alloc
34              Writeable,
35              IntType 'int',
36              Name 'var',
37              Num '42',
38          Assign
39            Alloc
40              Writeable,
41              StructSpec
```

```

42      Name 'st1',
43      Name 'st',
44      Struct
45      [
46          Assign
47          Name 'st',
48          Struct
49          [
50              Assign
51              Name 'pntr',
52              Array
53              [
54                  Array
55                  [
56                      Ref
57                      Name 'var'
58                  ]
59              ]
60          ]
61      ]
62  ]
63 ]

```

Code 3.25: Abstract Syntax Tree für Initialisierung von Structs

```

1 SymbolTable
2 [
3     Symbol(
4     {
5         type qualifier:      Empty()
6         datatype:            ArrayDecl([Num('1')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int')))
7         name:                Name('pntr@st1')
8         value or address:    Empty()
9         position:            Pos(Num('1'), Num('17'))
10        size:                Num('1')
11    },
12    Symbol(
13    {
14        type qualifier:      Empty()
15        datatype:            StructDecl(Name('st1'), [Alloc(Writable(),
16        ↪ ArrayDecl([Num('1')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))), Name('pntr'))])
17        name:                Name('st1')
18        value or address:    [Name('pntr@st1')]
19        position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
20        size:                Num('1')
21    },
22    Symbol(
23    {
24        type qualifier:      Empty()
25        datatype:            StructSpec(Name('st1'))
26        name:                Name('st@st2')
27        value or address:    Empty()
28        position:            Pos(Num('3'), Num('23'))
29        size:                Num('1')

```



```

29     },
30     Symbol(
31     {
32         type qualifier:      Empty()
33         datatype:            StructDecl(Name('st2'), [Alloc(Writeable(),
34                               ↳ StructSpec(Name('st1')), Name('st'))])
35         name:                Name('st2')
36         value or address:    [Name('st@st2')]
37         position:            Pos(Num('3'), Num('7'))
38         size:                Num('1')
39     },
40     Symbol(
41     {
42         type qualifier:      Empty()
43         datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
44         name:                Name('main')
45         value or address:    Empty()
46         position:            Pos(Num('5'), Num('5'))
47         size:                Empty()
48     },
49     Symbol(
50     {
51         type qualifier:      Writeable()
52         datatype:            IntType('int')
53         name:                Name('var@main')
54         value or address:    Num('0')
55         position:            Pos(Num('6'), Num('6'))
56         size:                Num('1')
57     },
58     Symbol(
59     {
60         type qualifier:      Writeable()
61         datatype:            StructSpec(Name('st1'))
62         name:                Name('st@main')
63         value or address:    Num('1')
64         position:            Pos(Num('7'), Num('13'))
65         size:                Num('1')
66     }
67 ]

```

Code 3.26: Symboltabelle für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.picoc_mon',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       Exp
8       Num '42',
9       Assign
10      GlobalWrite
11      Num '0',
12      Tmp

```

```

13     Num '1',
14   Ref
15     GlobalRead
16     Num '0',
17   Assign
18     GlobalWrite
19     Num '1',
20   Tmp
21     Num '1',
22   Return
23     Empty
24 ]
25 ]

```

Code 3.27: PicoC Mon Pass für Initialisierung von Structs

```

1 File
2   Name './example_struct_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 42,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        LOADIN SP ACC 1,
11        STOREIN DS ACC 0,
12        ADDI SP 1,
13        SUBI SP 1,
14        LOADI IN1 0,
15        ADD IN1 DS,
16        STOREIN SP IN1 1,
17        LOADIN SP ACC 1,
18        STOREIN DS ACC 1,
19        ADDI SP 1,
20        LOADIN BAF PC -1
21      ]
22    ]

```

Code 3.28: RETI Blocks Pass für Initialisierung von Structs

3.4.4.3 Zugriff auf Structattribut

```

1 struct pos {int x; int y;};
2
3 void main() {
4   struct pos st = {.x=4, .y=2};
5   st.y;
6 }

```

Code 3.29: PicoC Code für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'x',
11        Alloc
12          Writeable,
13          IntType 'int',
14          Name 'y'
15      ],
16    FunDef
17      VoidType 'void',
18      Name 'main',
19      [],
20      [
21        Assign
22          Alloc
23            Writeable,
24            StructSpec
25              Name 'pos',
26              Name 'st',
27            Struct
28              [
29                Assign
30                  Name 'x',
31                  Num '4',
32                Assign
33                  Name 'y',
34                  Num '2'
35              ],
36            Exp
37              Attr
38                Name 'st',
39                Name 'y'
40          ]
41      ]

```

Code 3.30: Abstract Syntax Tree für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '4',
9         Exp

```

```

10     Num '2',
11     Assign
12     GlobalWrite
13     Num '0',
14     Tmp
15     Num '2',
16     Ref
17     GlobalRead
18     Num '0',
19     Ref
20     Attr
21     Tmp
22     Num '1',
23     Name 'y',
24     Exp
25     Subscr
26     Tmp
27     Num '1',
28     Num '0',
29     Return
30     Empty
31 ]
32 ]

```

Code 3.31: PicoC Mon Pass für Zugriff auf Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 4,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      SUBI SP 1,
11      LOADI ACC 2,
12      STOREIN SP ACC 1,
13      LOADIN SP ACC 1,
14      STOREIN DS ACC 1,
15      LOADIN SP ACC 2,
16      STOREIN DS ACC 0,
17      ADDI SP 2,
18      SUBI SP 1,
19      LOADI IN1 0,
20      ADD IN1 DS,
21      STOREIN SP IN1 1,
22      LOADIN SP IN1 1,
23      ADDI IN1 1,
24      STOREIN SP IN1 1,
25      LOADIN SP IN1 1,
26      LOADIN IN1 ACC 0,
27      STOREIN SP ACC 1,
28      LOADIN BAF PC -1

```

```
29     ]
30 ]
```

Code 3.32: RETI Blocks Pass für Zugriff auf Structattribut

3.4.4.4 Zuweisung an Structattribut

```
1 struct pos {int x; int y;};
2
3 void main() {
4     struct pos st = {.x=4, .y=2};
5     st.y = 42;
6 }
```

Code 3.33: PicoC Code für Zuweisung an Structattribut

```
1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'x',
11        Alloc
12          Writeable,
13          IntType 'int',
14          Name 'y'
15      ],
16    FunDef
17      VoidType 'void',
18      Name 'main',
19      [],
20      [
21        Assign
22          Alloc
23            Writeable,
24            StructSpec
25              Name 'pos',
26              Name 'st',
27            Struct
28              [
29                Assign
30                  Name 'x',
31                  Num '4',
32                Assign
33                  Name 'y',
34                  Num '2'
35              ],
36            Assign
```

```

37     Attr
38         Name 'st',
39         Name 'y',
40         Num '42'
41     ]
42 ]

```

Code 3.34: Abstract Syntax Tree für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '4',
9         Exp
10          Num '2',
11        Assign
12          GlobalWrite
13            Num '0',
14          Tmp
15            Num '2',
16        Exp
17          Num '42',
18        Ref
19          GlobalRead
20            Num '0',
21        Ref
22          Attr
23            Tmp
24              Num '1',
25            Name 'y',
26        Assign
27          Subscr
28            Tmp
29              Num '1',
30            Num '0',
31          Tmp
32            Num '2',
33        Return
34          Empty
35      ]
36  ]

```

Code 3.35: PicoC Mon Pass für Zuweisung an Structattribut

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.reti_blocks',
3   [

```

```

4   Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 4,
9       STOREIN SP ACC 1,
10      SUBI SP 1,
11      LOADI ACC 2,
12      STOREIN SP ACC 1,
13      LOADIN SP ACC 1,
14      STOREIN DS ACC 1,
15      LOADIN SP ACC 2,
16      STOREIN DS ACC 0,
17      ADDI SP 2,
18      SUBI SP 1,
19      LOADI ACC 42,
20      STOREIN SP ACC 1,
21      SUBI SP 1,
22      LOADI IN1 0,
23      ADD IN1 DS,
24      STOREIN SP IN1 1,
25      LOADIN SP IN1 1,
26      ADDI IN1 1,
27      STOREIN SP IN1 1,
28      LOADIN SP IN1 1,
29      LOADIN SP ACC 2,
30      ADDI SP 2,
31      STOREIN IN1 ACC 0,
32      LOADIN BAF PC -1
33    ]
34  ]

```

Code 3.36: RETI Blocks Pass für Zuweisung an Structattribut

3.4.5 Umsetzung der Derived Datatypes im Zusammenspiel

3.4.5.1 Einleitungsteil für Globale Statische Daten und Stackframe

```

1  struct ar_with_len {int len; int ar[2];};
2
3  void main() {
4    struct ar_with_len st_ar[3];
5    int (*pntr2)[3];
6    pntr2;
7  }
8
9  void fun() {
10   struct ar_with_len st_ar[3];
11   int (*pntr1)[3];
12   pntr1;
13 }

```

Code 3.37: PicoC Code für den Einleitungsteil

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'ar_with_len',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           IntType 'int',
10          Name 'len',
11        Alloc
12          Writeable,
13          ArrayDecl
14            [
15              Num '2'
16            ],
17          IntType 'int',
18          Name 'ar'
19        ],
20      FunDef
21        VoidType 'void',
22        Name 'main',
23        [],
24        [
25          Exp
26            Alloc
27              Writeable,
28              ArrayDecl
29                [
30                  Num '3'
31                ],
32              StructSpec
33                Name 'ar_with_len',
34                Name 'st_ar',
35            Exp
36              Alloc
37                Writeable,
38                PtrDecl
39                  Num '1',
40                  ArrayDecl
41                    [
42                      Num '3'
43                    ],
44                  PtrDecl
45                    Num '1',
46                    IntType 'int',
47                  Name 'ptr2',
48            Exp
49              Name 'ptr2'
50          ],
51        FunDef
52          VoidType 'void',
53          Name 'fun',
54          [],
55          [
56            Exp
```



```

57     Alloc
58     Writeable,
59     ArrayDecl
60     [
61         Num '3'
62     ],
63     StructSpec
64     Name 'ar_with_len',
65     Name 'st_ar',
66     Exp
67     Alloc
68     Writeable,
69     PtrDecl
70     Num '1',
71     ArrayDecl
72     [
73         Num '3'
74     ],
75     IntType 'int',
76     Name 'pntr1',
77     Exp
78     Name 'pntr1'
79 ]
80 ]

```

Code 3.38: Abstract Syntax Tree für den Einleitungsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5     Name 'main.1',
6     [
7       Exp
8       GlobalRead
9       Num '9',
10      Return
11      Empty
12    ],
13    Block
14    Name 'fun.0',
15    [
16      Exp
17      StackRead
18      Num '9',
19      Return
20      Empty
21    ]
22  ]

```

Code 3.39: PicoC Mon Pass für den Einleitungsteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADIN DS ACC 9,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        LOADIN BAF PC -1
11      ],
12     Block
13       Name 'fun.0',
14       [
15         SUBI SP 1,
16         LOADIN BAF ACC -11,
17         STOREIN SP ACC 1,
18         LOADIN BAF PC -1
19      ]
20   ]

```

Code 3.40: RETI Blocks Pass für den Einleitungsteil

3.4.5.2 Mittelteil für die verschiedenen Derived Datatypes

```

1 struct st1 {int (*ar)[1];};
2
3 void main() {
4   int var[1] = {42};
5   struct st1 st_first = {.ar=&var};
6   (*st_first.ar)[0];
7 }

```

Code 3.41: PicoC Code für den Mittelteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st1',
6       [
7         Alloc
8         Writeable,
9         PntrDecl
10        Num '1',
11        ArrayDecl
12        [
13          Num '1'
14        ],
15        IntType 'int',
16        Name 'ar'
17      ],

```

```

18  FunDef
19      VoidType 'void',
20      Name 'main',
21      [],
22      [
23          Assign
24              Alloc
25                  Writeable,
26                  ArrayDecl
27                      [
28                          Num '1'
29                      ],
30                  IntType 'int',
31                  Name 'var',
32          Array
33              [
34                  Num '42'
35              ],
36          Assign
37              Alloc
38                  Writeable,
39                  StructSpec
40                      Name 'st1',
41                      Name 'st_first',
42          Struct
43              [
44                  Assign
45                      Name 'ar',
46                      Ref
47                          Name 'var'
48              ],
49          Exp
50              Subscr
51                  Deref
52                      Attr
53                          Name 'st_first',
54                          Name 'ar',
55                          Num '0',
56                          Num '0'
57      ]
58 ]

```

Code 3.42: Abstract Syntax Tree für den Mittelteil

```

1  File
2      Name './example_derived_dts_main_part.picoc_mon',
3      [
4          Block
5              Name 'main.0',
6              [
7                  Exp
8                      Num '42',
9                  Assign
10                     GlobalWrite

```

```

11     Num '0',
12     Tmp
13     Num '1',
14   Ref
15     GlobalRead
16     Num '0',
17   Assign
18     GlobalWrite
19     Num '1',
20     Tmp
21     Num '1',
22   Ref
23     GlobalRead
24     Num '1',
25   Ref
26     Attr
27     Tmp
28     Num '1',
29     Name 'ar',
30   Exp
31     Num '0',
32   Ref
33     Subscr
34     Tmp
35     Num '2',
36     Tmp
37     Num '1',
38   Exp
39     Num '0',
40   Ref
41     Subscr
42     Tmp
43     Num '2',
44     Tmp
45     Num '1',
46   Exp
47     Subscr
48     Tmp
49     Num '1',
50     Num '0',
51   Return
52     Empty
53 ]
54 ]

```

Code 3.43: PicoC Mon Pass für den Mittelteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         SUBI SP 1,

```

```

8      LOADI ACC 42,
9      STOREIN SP ACC 1,
10     LOADIN SP ACC 1,
11     STOREIN DS ACC 0,
12     ADDI SP 1,
13     SUBI SP 1,
14     LOADI IN1 0,
15     ADD IN1 DS,
16     STOREIN SP IN1 1,
17     LOADIN SP ACC 1,
18     STOREIN DS ACC 1,
19     ADDI SP 1,
20     SUBI SP 1,
21     LOADI IN1 1,
22     ADD IN1 DS,
23     STOREIN SP IN1 1,
24     LOADIN SP IN1 1,
25     ADDI IN1 0,
26     STOREIN SP IN1 1,
27     SUBI SP 1,
28     LOADI ACC 0,
29     STOREIN SP ACC 1,
30     LOADIN SP IN2 2,
31     LOADIN IN2 IN1 0,
32     LOADIN SP IN2 1,
33     MULTI IN2 1,
34     ADD IN1 IN2,
35     ADDI SP 1,
36     STOREIN SP IN1 1,
37     SUBI SP 1,
38     LOADI ACC 0,
39     STOREIN SP ACC 1,
40     LOADIN SP IN1 2,
41     LOADIN SP IN2 1,
42     MULTI IN2 1,
43     ADD IN1 IN2,
44     ADDI SP 1,
45     STOREIN SP IN1 1,
46     LOADIN SP IN1 1,
47     LOADIN IN1 ACC 0,
48     STOREIN SP ACC 1,
49     LOADIN BAF PC -1
50 ]
51 ]

```

Code 3.44: RETI Blocks Pass für den Mittelteil

3.4.5.3 Schlussteil für die verschiedenen Derived Datatypes

```

1 struct st {int attr[2];};
2
3 void main() {
4     int ar1[1][2] = {{42, 314}};
5     struct st ar2[1] = {.attr={42, 314}};
6     int var = 42;

```

```
7  int *pntr1 = &var;
8  int **pntr2 = &pntr1;
9
10 ar1[0];
11 ar2[0];
12 *pntr2;
13 }
```

Code 3.45: PicoC Code für den Schlussteil

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc
8           Writeable,
9           ArrayDecl
10            [
11              Num '2'
12            ],
13            IntType 'int',
14            Name 'attr'
15          ],
16      FunDef
17        VoidType 'void',
18        Name 'main',
19        [],
20        [
21          Assign
22            Alloc
23              Writeable,
24              ArrayDecl
25                [
26                  Num '1',
27                  Num '2'
28                ],
29                IntType 'int',
30                Name 'ar1',
31          Array
32            [
33              Array
34                [
35                  Num '42',
36                  Num '314'
37                ]
38            ],
39          Assign
40            Alloc
41              Writeable,
42              ArrayDecl
43                [
44                  Num '1'
```

```
45         ],
46         StructSpec
47           Name 'st',
48         Name 'ar2',
49       Struct
50       [
51         Assign
52           Name 'attr',
53         Array
54           [
55             Num '42',
56             Num '314'
57           ]
58       ],
59     Assign
60       Alloc
61         Writeable,
62         IntType 'int',
63         Name 'var',
64         Num '42',
65     Assign
66       Alloc
67         Writeable,
68         PtrDecl
69           Num '1',
70           IntType 'int',
71         Name 'ptr1',
72       Ref
73         Name 'var',
74     Assign
75       Alloc
76         Writeable,
77         PtrDecl
78           Num '2',
79           IntType 'int',
80         Name 'ptr2',
81       Ref
82         Name 'ptr1',
83     Exp
84       Subscr
85         Name 'ar1',
86         Num '0',
87     Exp
88       Subscr
89         Name 'ar2',
90         Num '0',
91     Exp
92       Deref
93         Name 'ptr2',
94         Num '0'
95   ]
96 ]
```

Code 3.46: Abstract Syntax Tree für den Schlussteil

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         Exp
8           Num '42',
9         Exp
10          Num '314',
11        Assign
12          GlobalWrite
13            Num '0',
14          Tmp
15            Num '2',
16        Exp
17          Num '42',
18        Exp
19          Num '314',
20        Assign
21          GlobalWrite
22            Num '2',
23          Tmp
24            Num '2',
25        Exp
26          Num '42',
27        Assign
28          GlobalWrite
29            Num '4',
30          Tmp
31            Num '1',
32        Ref
33          GlobalRead
34            Num '4',
35        Assign
36          GlobalWrite
37            Num '5',
38          Tmp
39            Num '1',
40        Ref
41          GlobalRead
42            Num '5',
43        Assign
44          GlobalWrite
45            Num '6',
46          Tmp
47            Num '1',
48        Ref
49          GlobalRead
50            Num '0',
51        Exp
52          Num '0',
53        Ref
54          Subscr
55            Tmp
56              Num '2',
57            Tmp
```



```

58         Num '1',
59     Exp
60     Subscr
61     Tmp
62     Num '1',
63     Num '0',
64     Ref
65     GlobalRead
66     Num '2',
67     Exp
68     Num '0',
69     Ref
70     Subscr
71     Tmp
72     Num '2',
73     Tmp
74     Num '1',
75     Exp
76     Subscr
77     Tmp
78     Num '1',
79     Num '0',
80     Ref
81     GlobalRead
82     Num '6',
83     Exp
84     Num '0',
85     Ref
86     Subscr
87     Tmp
88     Num '2',
89     Tmp
90     Num '1',
91     Exp
92     Subscr
93     Tmp
94     Num '1',
95     Num '0',
96     Return
97     Empty
98 ]
99 ]

```

Code 3.47: PicoC Mon Pass für den Schlussteil

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.0',
6     [
7       SUBI SP 1,
8       LOADI ACC 42,
9       STOREIN SP ACC 1,

```

```
10      SUBI SP 1,  
11      LOADI ACC 314,  
12      STOREIN SP ACC 1,  
13      LOADIN SP ACC 1,  
14      STOREIN DS ACC 1,  
15      LOADIN SP ACC 2,  
16      STOREIN DS ACC 0,  
17      ADDI SP 2,  
18      SUBI SP 1,  
19      LOADI ACC 42,  
20      STOREIN SP ACC 1,  
21      SUBI SP 1,  
22      LOADI ACC 314,  
23      STOREIN SP ACC 1,  
24      LOADIN SP ACC 1,  
25      STOREIN DS ACC 3,  
26      LOADIN SP ACC 2,  
27      STOREIN DS ACC 2,  
28      ADDI SP 2,  
29      SUBI SP 1,  
30      LOADI ACC 42,  
31      STOREIN SP ACC 1,  
32      LOADIN SP ACC 1,  
33      STOREIN DS ACC 4,  
34      ADDI SP 1,  
35      SUBI SP 1,  
36      LOADI IN1 4,  
37      ADD IN1 DS,  
38      STOREIN SP IN1 1,  
39      LOADIN SP ACC 1,  
40      STOREIN DS ACC 5,  
41      ADDI SP 1,  
42      SUBI SP 1,  
43      LOADI IN1 5,  
44      ADD IN1 DS,  
45      STOREIN SP IN1 1,  
46      LOADIN SP ACC 1,  
47      STOREIN DS ACC 6,  
48      ADDI SP 1,  
49      SUBI SP 1,  
50      LOADI IN1 0,  
51      ADD IN1 DS,  
52      STOREIN SP IN1 1,  
53      SUBI SP 1,  
54      LOADI ACC 0,  
55      STOREIN SP ACC 1,  
56      LOADIN SP IN1 2,  
57      LOADIN SP IN2 1,  
58      MULTI IN2 2,  
59      ADD IN1 IN2,  
60      ADDI SP 1,  
61      STOREIN SP IN1 1,  
62      SUBI SP 1,  
63      LOADI IN1 2,  
64      ADD IN1 DS,  
65      STOREIN SP IN1 1,  
66      SUBI SP 1,
```

```

67     LOADI ACC 0,
68     STOREIN SP ACC 1,
69     LOADIN SP IN1 2,
70     LOADIN SP IN2 1,
71     MULTI IN2 2,
72     ADD IN1 IN2,
73     ADDI SP 1,
74     STOREIN SP IN1 1,
75     LOADIN SP IN1 1,
76     LOADIN IN1 ACC 0,
77     STOREIN SP ACC 1,
78     SUBI SP 1,
79     LOADI IN1 6,
80     ADD IN1 DS,
81     STOREIN SP IN1 1,
82     SUBI SP 1,
83     LOADI ACC 0,
84     STOREIN SP ACC 1,
85     LOADIN SP IN2 2,
86     LOADIN IN2 IN1 0,
87     LOADIN SP IN2 1,
88     MULTI IN2 1,
89     ADD IN1 IN2,
90     ADDI SP 1,
91     STOREIN SP IN1 1,
92     LOADIN BAF PC -1
93 ]
94 ]

```

Code 3.48: RETI Blocks Pass für den Schlussteil

3.4.6 Umsetzung von Funktionen

3.4.6.1 Funktionen auflösen zu RETI Code

```

1 void main() {
2     return;
3 }
4
5 void fun1() {
6 }
7
8 int fun2() {
9     return 1;
10 }

```

Code 3.49: PicoC Code für 3 Funktionen

```

1 File
2     Name './example_3_funs.ast',
3     [

```

```

4   FunDef
5     VoidType 'void',
6     Name 'main',
7     [],
8     [
9       Return
10      Empty
11    ],
12  FunDef
13    VoidType 'void',
14    Name 'fun1',
15    [],
16    [],
17  FunDef
18    IntType 'int',
19    Name 'fun2',
20    [],
21    [
22      Return
23      Num '1'
24    ]
25 ]

```

Code 3.50: Abstract Syntax Tree für 3 Funktionen

```

1 File
2   Name './example_3_funs.picoc_blocks',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Block
10          Name 'main.2',
11          [
12            Return
13            Empty
14          ]
15        ],
16      FunDef
17        VoidType 'void',
18        Name 'fun1',
19        [],
20        [
21          Block
22          Name 'fun1.1',
23          []
24        ],
25      FunDef
26        IntType 'int',
27        Name 'fun2',
28        [],
29        [

```

```
30     Block
31     Name 'fun2.0',
32     [
33         Return
34         Num '1'
35     ]
36 ]
37 ]
```

Code 3.51: PicoC Blocks Pass für 3 Funktionen

```
1 File
2 Name './example_3_funs.picoc_mon',
3 [
4     Block
5     Name 'main.2',
6     [
7         Return
8         Empty
9     ],
10    Block
11    Name 'fun1.1',
12    [
13        Return
14        Empty
15    ],
16    Block
17    Name 'fun2.0',
18    [
19        Exp
20        Num '1',
21        Return
22        Tmp
23        Num '1'
24    ]
25 ]
```

Code 3.52: PicoC Mon Pass für 3 Funktionen

```
1 File
2 Name './example_3_funs.reti_blocks',
3 [
4     Block
5     Name 'main.2',
6     [
7         LOADIN BAF PC -1
8     ],
9     Block
10    Name 'fun1.1',
11    [
12        LOADIN BAF PC -1
```

```

13     ],
14     Block
15     Name 'fun2.0',
16     [
17         SUBI SP 1,
18         LOADI ACC 1,
19         STOREIN SP ACC 1,
20         LOADIN SP ACC 1,
21         ADDI SP 1,
22         LOADIN BAF PC -1
23     ]
24 ]

```

Code 3.53: RETI Blocks Pass für 3 Funktionen

3.4.6.1.1 Sprung zur Main Funktion

```

1 void fun1() {
2 }
3
4 int fun2() {
5     return 1;
6 }
7
8 void main() {
9     return;
10 }

```

Code 3.54: PicoC Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```

1 File
2     Name './example_3_funs_main.picoc_mon',
3     [
4         Block
5             Name 'fun1.2',
6             [
7                 Return
8                 Empty
9             ],
10        Block
11            Name 'fun2.1',
12            [
13                Exp
14                Num '1',
15                Return
16                Tmp
17                Num '1'
18            ],
19        Block
20            Name 'main.0',
21            [

```

```

22     Return
23     Empty
24 ]
25 ]

```

Code 3.55: PicoC Mon Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```

1 File
2   Name './example_3_funs_main.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'fun1.2',
6       [
7         LOADIN BAF PC -1
8       ],
9     Block
10      Name 'fun2.1',
11      [
12        SUBI SP 1,
13        LOADI ACC 1,
14        STOREIN SP ACC 1,
15        LOADIN SP ACC 1,
16        ADDI SP 1,
17        LOADIN BAF PC -1
18      ],
19    Block
20      Name 'main.0',
21      [
22        LOADIN BAF PC -1
23      ]
24 ]

```

Code 3.56: PicoC Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

```

1 File
2   Name './example_3_funs_main.reti_patch',
3   [
4     Block
5       Name 'start.3',
6       [
7         Exp
8         GoTo
9           Name 'main.0'
10        ],
11    Block
12      Name 'fun1.2',
13      [
14        LOADIN BAF PC -1
15      ],
16    Block
17      Name 'fun2.1',

```

```

18      [
19          SUBI SP 1,
20          LOADI ACC 1,
21          STOREIN SP ACC 1,
22          LOADIN SP ACC 1,
23          ADDI SP 1,
24          LOADIN BAF PC -1
25      ],
26      Block
27      Name 'main.0',
28      [
29          LOADIN BAF PC -1
30      ]
31  ]

```

Code 3.57: PicoC Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist

3.4.6.2 Funktionsdeklaration und -definition

```

1 int fun2(int var);
2
3 void fun1() {
4 }
5
6 void main() {
7     int var = fun2(42);
8     return;
9 }
10
11 int fun2(int var) {
12     return var;
13 }

```

Code 3.58: PicoC Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss

```

1 SymbolTable
2 [
3     Symbol(
4         {
5             type qualifier:      Empty()
6             datatype:            FunDecl(IntType('int'), Name('fun2'), [Alloc(Writable()),
7                                     ↪ IntType('int'), Name('var')]))
8             name:                Name('fun2')
9             value or address:     Empty()
10            position:             Pos(Num('1'), Num('4'))
11            size:                 Empty()
12        },
13        Symbol(
14            {
15                type qualifier:      Empty()
16                datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('fun1'), [])
17                name:                Name('fun1')
18            }
19        )
20    ]

```



```

17     value or address:    Empty()
18     position:           Pos(Num('3'), Num('5'))
19     size:                Empty()
20 },
21 Symbol(
22 {
23     type qualifier:      Empty()
24     datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
25     name:                 Name('main')
26     value or address:    Empty()
27     position:            Pos(Num('6'), Num('5'))
28     size:                 Empty()
29 },
30 Symbol(
31 {
32     type qualifier:      Writeable()
33     datatype:            IntType('int')
34     name:                 Name('var@main')
35     value or address:    Num('0')
36     position:            Pos(Num('7'), Num('6'))
37     size:                 Num('1')
38 },
39 Symbol(
40 {
41     type qualifier:      Writeable()
42     datatype:            IntType('int')
43     name:                 Name('var@fun2')
44     value or address:    Num('0')
45     position:            Pos(Num('11'), Num('13'))
46     size:                 Num('1')
47 }
48 ]

```

Code 3.59: Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss

3.4.6.3 Funktionsaufruf

3.4.6.3.1 Ohne Rückgabewert

```

1 struct st {int attr1; int attr2[2];};
2
3 void stack_fun(struct st param[2][3]);
4
5 void main() {
6     struct st local_var[2][3];
7     stack_fun(local_var);
8     return;
9 }
10
11 void stack_fun(struct st param[2][3]) {
12     int local_var;
13 }

```

Code 3.60: PicoC Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_fun_call_no_return_value.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         StackMalloc
8           Num '2',
9         Ref
10          GlobalRead
11            Num '0',
12          NewStackframe
13            Name 'stack_fun',
14            GoTo
15              Name 'addr@next_instr',
16          Exp
17            GoTo
18              Name 'stack_fun.0',
19          RemoveStackframe,
20          Return
21            Empty
22        ],
23      Block
24        Name 'stack_fun.0',
25        [
26          Return
27            Empty
28        ]
29    ]

```

Code 3.61: PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_fun_call_no_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         SUBI SP 2,
8         SUBI SP 1,
9         LOADI IN1 0,
10        ADD IN1 DS,
11        STOREIN SP IN1 1,
12        MOVE BAF ACC,
13        ADDI SP 3,
14        MOVE SP BAF,
15        SUBI SP 4,
16        STOREIN BAF ACC 0,
17        LOADI ACC GoTo
18          Name 'addr@next_instr',
19        ADD ACC CS,
20        STOREIN BAF ACC -1,
21        Exp

```

```

22         GoTo
23         Name 'stack_fun.0',
24         MOVE BAF IN1,
25         LOADIN IN1 BAF 0,
26         MOVE IN1 SP,
27         LOADIN BAF PC -1
28     ],
29     Block
30     Name 'stack_fun.0',
31     [
32         LOADIN BAF PC -1
33     ]
34 ]

```

Code 3.62: RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

```

1 SUBI SP 2;
2 SUBI SP 1;
3 LOADI IN1 0;
4 ADD IN1 DS;
5 STOREIN SP IN1 1;
6 MOVE BAF ACC;
7 ADDI SP 3;
8 MOVE SP BAF;
9 SUBI SP 4;
10 STOREIN BAF ACC 0;
11 LOADI ACC 14;
12 ADD ACC CS;
13 STOREIN BAF ACC -1;
14 JUMP 5;
15 MOVE BAF IN1;
16 LOADIN IN1 BAF 0;
17 MOVE IN1 SP;
18 LOADIN BAF PC -1;
19 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 3.63: RETI Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert

3.4.6.3.2 Mit Rückgabewert

```

1 void stack_fun() {
2     return 42;
3 }
4
5 void main() {
6     int var = stack_fun();
7 }

```

Code 3.64: PicoC Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_fun_call_with_return_value.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         Exp
8           Num '42',
9         Return
10        Tmp
11          Num '1'
12      ],
13    Block
14      Name 'main.0',
15      [
16        StackMalloc
17          Num '2',
18        NewStackframe
19          Name 'stack_fun',
20        GoTo
21          Name 'addr@next_instr',
22        Exp
23          GoTo
24            Name 'stack_fun.1',
25        RemoveStackframe,
26        Assign
27          GlobalWrite
28            Num '0',
29          Tmp
30            Num '1',
31        Return
32          Empty
33      ]
34  ]

```

Code 3.65: PicoC Mon Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 File
2   Name './example_fun_call_with_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         SUBI SP 1,
8         LOADI ACC 42,
9         STOREIN SP ACC 1,
10        LOADIN SP ACC 1,
11        ADDI SP 1,
12        LOADIN BAF PC -1
13      ],
14    Block
15      Name 'main.0',
16      [
17        SUBI SP 2,

```

```

18     MOVE BAF ACC,
19     ADDI SP 2,
20     MOVE SP BAF,
21     SUBI SP 2,
22     STOREIN BAF ACC 0,
23     LOADI ACC GoTo
24         Name 'addr@next_instr',
25     ADD ACC CS,
26     STOREIN BAF ACC -1,
27     Exp
28     GoTo
29     Name 'stack_fun.1',
30     MOVE BAF IN1,
31     LOADIN IN1 BAF 0,
32     MOVE IN1 SP,
33     LOADIN SP ACC 1,
34     STOREIN DS ACC 0,
35     ADDI SP 1,
36     LOADIN BAF PC -1
37 ]
38 ]

```

Code 3.66: RETI Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

```

1 JUMP 7;
2 SUBI SP 1;
3 LOADI ACC 42;
4 STOREIN SP ACC 1;
5 LOADIN SP ACC 1;
6 ADDI SP 1;
7 LOADIN BAF PC -1;
8 SUBI SP 2;
9 MOVE BAF ACC;
10 ADDI SP 2;
11 MOVE SP BAF;
12 SUBI SP 2;
13 STOREIN BAF ACC 0;
14 LOADI ACC 17;
15 ADD ACC CS;
16 STOREIN BAF ACC -1;
17 JUMP -15;
18 MOVE BAF IN1;
19 LOADIN IN1 BAF 0;
20 MOVE IN1 SP;
21 LOADIN SP ACC 1;
22 STOREIN DS ACC 0;
23 ADDI SP 1;
24 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 3.67: RETI Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert

3.4.6.3.3 Umsetzung von Call by Sharing für Arrays

```

1 void stack_fun(int (*param1)[3], int param2[2][3]) {
2 }
3
4 void main() {
5     int local_var1[2][3];
6     int local_var2[2][3];
7     stack_fun(local_var1, local_var2);
8 }

```

Code 3.68: PicoC Code für Call by Sharing für Arrays

```

1 File
2   Name './example_fun_call_by_sharing_array.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         Return
8         Empty
9       ],
10    Block
11      Name 'main.0',
12      [
13        StackMalloc
14        Num '2',
15        Ref
16        GlobalRead
17        Num '0',
18        Ref
19        GlobalRead
20        Num '6',
21        NewStackframe
22        Name 'stack_fun',
23        GoTo
24        Name 'addr@next_instr',
25        Exp
26        GoTo
27        Name 'stack_fun.1',
28        RemoveStackframe,
29        Return
30        Empty
31      ]
32    ]

```

Code 3.69: PicoC Mon Pass für Call by Sharing für Arrays

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol(
4       {
5         type qualifier:      Empty()

```

```

6      datatype:      FunDecl(VoidType('void'), Name('stack_fun'),
   ↪   [Alloc(Writable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
   ↪   Name('param1')), Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')),
   ↪   Name('param2'))])
7      name:          Name('stack_fun')
8      value or address: Empty()
9      position:      Pos(Num('1'), Num('5'))
10     size:          Empty()
11 },
12 Symbol(
13 {
14     type qualifier:  Writable()
15     datatype:        PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
16     name:            Name('param1@stack_fun')
17     value or address: Num('0')
18     position:        Pos(Num('1'), Num('21'))
19     size:            Num('1')
20 },
21 Symbol(
22 {
23     type qualifier:  Writable()
24     datatype:        PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
25     name:            Name('param2@stack_fun')
26     value or address: Num('1')
27     position:        Pos(Num('1'), Num('37'))
28     size:            Num('1')
29 },
30 Symbol(
31 {
32     type qualifier:  Empty()
33     datatype:        FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
34     name:            Name('main')
35     value or address: Empty()
36     position:        Pos(Num('4'), Num('5'))
37     size:            Empty()
38 },
39 Symbol(
40 {
41     type qualifier:  Writable()
42     datatype:        ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))
43     name:            Name('local_var1@main')
44     value or address: Num('0')
45     position:        Pos(Num('5'), Num('6'))
46     size:            Num('6')
47 },
48 Symbol(
49 {
50     type qualifier:  Writable()
51     datatype:        ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))
52     name:            Name('local_var2@main')
53     value or address: Num('6')
54     position:        Pos(Num('6'), Num('6'))
55     size:            Num('6')
56 }
57 ]

```

Code 3.70: Symboltabelle für Call by Sharing für Arrays

```

1 File
2   Name './example_fun_call_by_sharing_array.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         LOADIN BAF PC -1
8       ],
9     Block
10      Name 'main.0',
11      [
12        SUBI SP 2,
13        SUBI SP 1,
14        LOADI IN1 0,
15        ADD IN1 DS,
16        STOREIN SP IN1 1,
17        SUBI SP 1,
18        LOADI IN1 6,
19        ADD IN1 DS,
20        STOREIN SP IN1 1,
21        MOVE BAF ACC,
22        ADDI SP 4,
23        MOVE SP BAF,
24        SUBI SP 4,
25        STOREIN BAF ACC 0,
26        LOADI ACC GoTo
27          Name 'addr@next_instr',
28        ADD ACC CS,
29        STOREIN BAF ACC -1,
30        Exp
31          GoTo
32            Name 'stack_fun.1',
33        MOVE BAF IN1,
34        LOADIN IN1 BAF 0,
35        MOVE IN1 SP,
36        LOADIN BAF PC -1
37      ]
38    ]

```

Code 3.71: RETI Block Pass für Call by Sharing für Arrays

3.4.6.3.4 Umsetzung von Call by Value für Structs

```

1 struct st {int attr1; int attr2[2];};
2
3 void stack_fun(struct st param) {
4 }
5
6 void main() {
7   struct st local_var;
8   stack_fun(local_var);
9 }

```


Code 3.72: PicoC Code für Call by Value für Structs

```

1 File
2   Name './example_fun_call_by_value_struct.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         Return
8         Empty
9       ],
10    Block
11      Name 'main.0',
12      [
13        StackMalloc
14        Num '2',
15        Assign
16        Tmp
17        Num '3',
18        GlobalRead
19        Num '0',
20        NewStackframe
21        Name 'stack_fun',
22        GoTo
23        Name 'addr@next_instr',
24        Exp
25        GoTo
26        Name 'stack_fun.1',
27        RemoveStackframe,
28        Return
29        Empty
30      ]
31  ]

```

Code 3.73: PicoC Mon Pass für Call by Value für Structs

```

1 File
2   Name './example_fun_call_by_value_struct.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'stack_fun.1',
6       [
7         LOADIN BAF PC -1
8       ],
9     Block
10      Name 'main.0',
11      [
12        SUBI SP 2,
13        SUBI SP 3,
14        LOADIN DS ACC 0,
15        STOREIN SP ACC 1,
16        LOADIN DS ACC 1,
17        STOREIN SP ACC 2,

```

```
18     LOADIN DS ACC 2,  
19     STOREIN SP ACC 3,  
20     MOVE BAF ACC,  
21     ADDI SP 5,  
22     MOVE SP BAF,  
23     SUBI SP 5,  
24     STOREIN BAF ACC 0,  
25     LOADI ACC GoTo  
26         Name 'addr@next_instr',  
27     ADD ACC CS,  
28     STOREIN BAF ACC -1,  
29     Exp  
30     GoTo  
31     Name 'stack_fun.1',  
32     MOVE BAF IN1,  
33     LOADIN IN1 BAF 0,  
34     MOVE IN1 SP,  
35     LOADIN BAF PC -1  
36 ]  
37 ]
```

Code 3.74: RETI Block Pass für Call by Value für Structs

3.4.7 Umsetzung kleinerer Details

3.5 Fehlermeldungen

3.5.1 Error Handler

3.5.2 Arten von Fehlermeldungen

3.5.2.1 Syntaxfehler

3.5.2.2 Laufzeitfehler

4 Ergebnisse und Ausblick

4.1 Compiler

4.2 Showmode

4.3 Qualitätssicherung

4.4 Kommentierter Kompiliervorgang

4.5 Erweiterungsideen

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 4.1) 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 4.1: 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.

Will man nun für eine Maschine M_{RETI} , auf der bisher keine anderen Programmiersprachen mittels **Bootstrapping** (Definition 4.4) 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**¹ 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 4.3) 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

¹Beschreibt 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.²

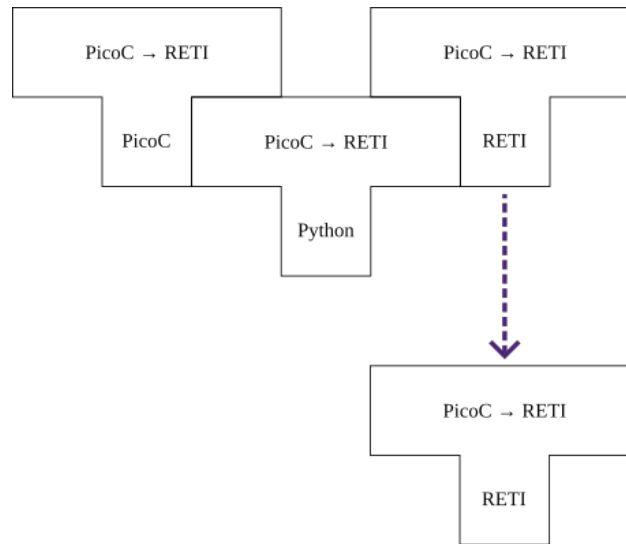


Abbildung 4.1: Cross-Compiler als Bootstrap Compiler

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 4.2: 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^o oder einer **ersten Version** $C_{w_i}^{w_i}$ des Self-compiling Compilers C_w^w wichtig sind.^a

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

²Im 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.

Definition 4.3: 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 **zirkuläre Abhängigkeit**, dass initial ein **Self-compiling Compiler** C_w^w bereits kompiliert vorliegen müsste, um sich selbst kompilieren zu können, zu brechen.

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

Aufbauend auf dem **Self-compiling Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$, der einen **minimalen Compiler** (Definition 4.2) 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.³

Das bewerkstelligt man, indem man **iterativ** auf der Zielmaschine M_{RETI} selbst, aufbauend auf diesem **minimalen Compiler** $C_{RETI_PicoC}^{PicoC}$, wie in Subdefinition 4.4.1 den minimalen Compiler schrittweise zu einem immer vollständigeren **C-Compiler** C_C weiterentwickelt.

Definition 4.4: 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 4.4.1 nochmal gesondert hervorzuheben:

4.4.1: 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“.

³Natürlich 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} .

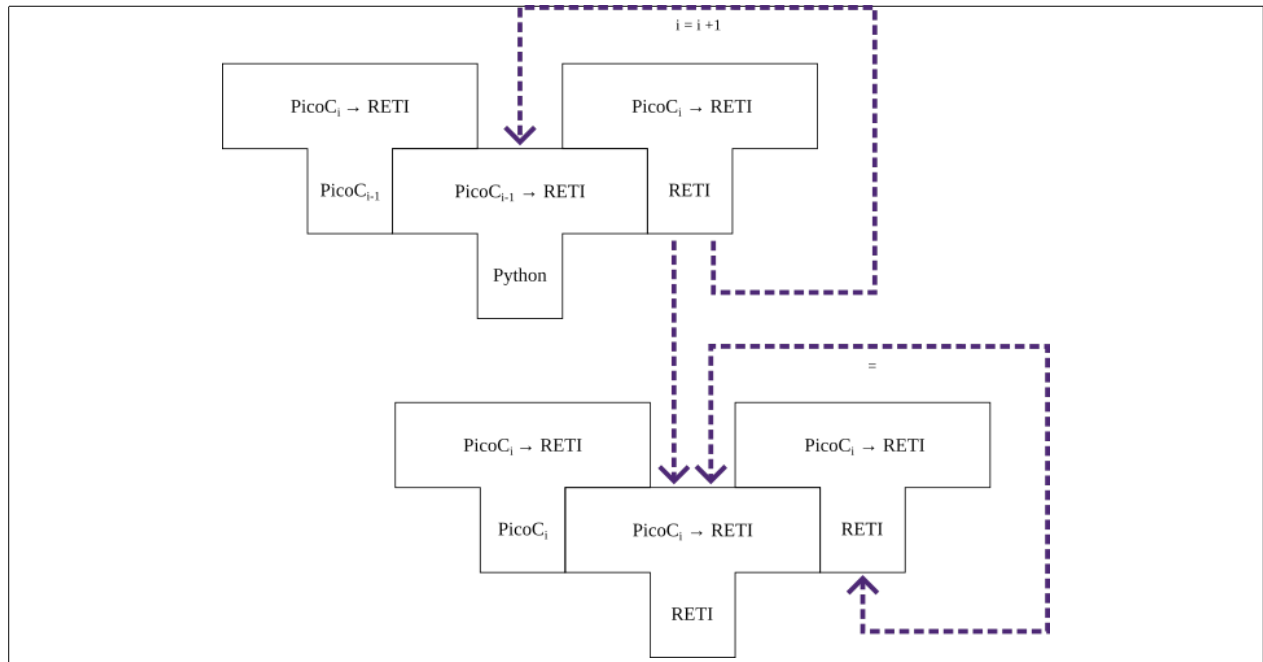


Abbildung 4.2: Iteratives Bootstrapping

Auch wenn ein **Self-compiling Compiler** $C_{w_i}^{w_i}$ in der Subdefinition 4.4.1 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 4.4.1 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.

A Appendix

A.1 Konkrete und Abstrakte Syntax

A.2 Bedienungsanleitungen

A.2.1 PicoC-Compiler

A.2.2 Showmode

A.2.3 Entwicklertools

Literatur

Online

- *C Operator Precedence* - *cppreference.com*. URL: https://en.cppreference.com/w/c/language/operator_precedence (besucht am 27.04.2022).
- *Compiler Design - Phases of Compiler*. URL: https://www.tutorialspoint.com/compiler_design/compiler_design_phases_of_compiler.htm (besucht am 19.06.2022).
- *Course Webpage for Compilers (P423, P523, E313, and E513)*. 28. Jan. 2022. URL: <https://iucompilercourse.github.io/IU-Fall-2021/> (besucht am 28.01.2022).
- *lecture-notes-2021*. 20. Jan. 2022. URL: <https://github.com/Compiler-Construction-University-Freiburg/lecture-notes-2021/blob/56300e6649e32f0594bbbd046a2e19351c57dd0c/material/lexical-analysis.pdf> (besucht am 28.04.2022).
- Ljohhuh. *What is an immediate value?* 4. Apr. 2018. URL: <https://reverseengineering.stackexchange.com/q/17671> (besucht am 13.04.2022).
- *What is Bottom-up Parsing?* URL: <https://www.tutorialspoint.com/what-is-bottom-up-parsing> (besucht am 22.06.2022).
- *What is the difference between a token and a lexeme?* NewbeDEV. URL: <http://newbedev.com/what-is-the-difference-between-a-token-and-a-lexeme> (besucht am 17.06.2022).
- *What is Top-Down Parsing?* URL: <https://www.tutorialspoint.com/what-is-top-down-parsing> (besucht am 22.06.2022).