

ALBERT LUDWIGS UNIVERSITÄT FREIBURG

TECHNISCHE FAKULTÄT

PicoC-Compiler

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

BACHELORARBEIT

Abgabedatum: 13. September 2022

Autor:

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.

Danksagungen

Bevor der Inhalt dieser Schriftlichen Ausarbeitung der Bachelorarbeit anfängt, will ich einigen Personen noch meinen Dank aussprechen.

Ich schreibe die folgenden Danksagungen nicht auf eine bestimmte Weise, wie es sich vielleicht etabliert haben sollte Danksagungen zu schreiben und verwende auch keine künstlichen Floskeln, wie „mein aufrichtigster Dank“ oder „aus tiefstem Herzen“, sondern drücke im Folgenden die Dinge nur so aus, wie ich sie auch wirklich meine.

Estmal, ich hatte selten im Studium das Gefühl irgendwo Kunde zu sein, aber bei dieser Bachelorarbeit und dem vorangegangenen Bachelorprojekt hatte ich genau diese Gefühl, obwohl die Verhältnisse eigentlich genau umgekehrt sein sollten. Die Umgang mit mir wahr echt unglaublich nett und unbürokratisch, was ich als keine Selbstverständlichkeit ansehe und sehr wertgeschätzt habe.

An erster Stelle will ich zu meinem Betreuer M.Sc. Tobias Seufert kommen, der netterweise auch bereits die Betreuung meines Bachelorprojektes übernommen hatte. Wie auch während des Bachelorprojektes, haben wir uns auch bei den Meetings während der Bachelorarbeit hervorragend verstanden. Dabei ging die Freundlichkeit und das Engagement seitens Tobias weit über das hinaus, was man bereits als eine gute Betreuung bezeichnen würde.

Es gibt verschiedene Typen von Menschen, es gibt Leute, die nur genauso viel tun, wie es die Anforderungen verlangen und nichts darüberhinaus tun, wenn es nicht einen eigenen Vorteil für sie hat und es gibt Personen, die sich für nichts zu Schade sind und dies aus einer Philanthropie oder Leidenschaft heraus tun, auch wenn es für sie keine Vorteile hat. Tobias¹ konnte ich während der langen Zeit, die er mein Bachelorprojekt und dann meine Bachelorarbeit betreut hat eindeutig als letzteren Typ Mensch einordnen.

Er war sich nie zu Schade für meine vielen Fragen während der Meetings, auch wenn ich meine Zeit ziemlich oft überzogen habe², er hat sich bei der Korrektur dieser Schriftlichen Ausarbeitung sogar die Mühe gemacht bei den einzelnen Problemstellen längere, wirklich hilfreiche Textkommentare zu verfassen und obendrauf auch noch Tippfehler usw. angemerkt und war sich nicht zu Schade die Rolle des Nachrichtenübermittlers zwischen mir und Prof. Dr. Scholl zu übernehmen. All dies war absolut keine Selbstverständlichkeit, vor allem wenn ich die Betreuung anderer Studenten, die ich kenne mit der vergleiche, die mir zu Teil wurde.

An den Kommentar zu meinem Betreuer Tobias will ich einen Kommentar zu meinem Gutachter Prof. Dr. Scholl anschließen. Wofür ich meinem Gutachter Prof. Dr. Scholl sehr dankbar bin, ist, dass er meine damals sehr ambitionierten Ideen für mögliche Funktionalitäten, die ich in den PicoC-Compiler für die Bachelorarbeit implementierten wollte runtergeschraubt hat. Man erlebt es äußerst selten im Studium, dass Studenten freiwillig weniger Arbeit gegeben wird.

Bei den für die Bachelorarbeit zu implementierenden Funktionalitäten gab es bei der Implementierung viele unerwartete kleine Details, die ich vorher garnicht bedacht hatte, die in ihrer Masse unerwartet viel Zeit zum Implementieren gebraucht haben. Mit den von Prof. Dr. Scholl festgelegten Funktionalitäten für die Bachelorarbeit ist der Zeitplan jedoch ziemlich perfekt aufgegangen. Mit meinen ambitionierten Plänen wäre es bei der Bachelorarbeit dagegeben wohl mit der Zeit äußerst kritisch geworden. Das Prof. Dr. Scholl mir zu

¹Wie auch Prof. Dr. Scholl. Hier geht es aber erstmal um Tobias.

²Wofür ich mich auch nochmal Entschuldigen will.

seinem eigenen Nachteil^{3 4} weniger Arbeit aufgebrummt hat empfand ich als ich eine äußerst nette Geste, die ich sehr geschätzt habe.

Wie mein Betreuer M.Sc. Tobias Seufert und wahrscheinlich auch mein Gutachter Prof. Dr. Scholl im Verlauf dieser Bachelorarbeit und des vorangegangenen Bachelorprojektes gemerkt haben, kann ich schon manchmal ziemlich eigensinnigen sein, bei der Weise, wie ich bestimmte Dinge umsetzen will. Ich habe es sehr geschätzt, dass mir das durchgehen gelassen wurde. Es ist, wie ich die Universitätswelt als Student erlebe bei Arbeitsvorgaben keine Selbstverständlichkeit, dass dem Studenten überhaupt die Freiheit und das Vertrauen gegeben wird diese auf seine eigenen Weise umzusetzen.

Vor allem, da mein eigenes Vorgehen größtenteils Vorteile für mich hatte, da ich auf diese Weise am meisten über Compilerbau gelernt hab und eher Nachteile für Prof. Dr. Scholl, da mein eigenes Vorgehen entsprechend mehr Zeit brauchte und ich daher als Bachelorarbeit keinen dazu passenden RETI-Emulator mit Graphischer Anzeige implementieren konnte, da die restlichen Funktionalitäten des PicoC-Compilers noch implementiert werden mussten.

Glücklicherweise gibt es aber doch noch einen passenden RETI-Emulator, der den PicoC-Compiler über seine Kommandozeilenargumente aufruft, um ein PicoC-Programm visuell auf einer RETI-CPU auszuführen. Für dessen Implementierung hat sich Michel Giehl netterweise zur Verfügung gestellt. Daher Danke auch an Michel Giehl, dass er sich mit meinem PicoC-Compiler auseinandergesetzt hat und diesen in seinen RETI-Emulator integriert hat, sodass am Ende durch unsere beiden Arbeiten ein anschauliches Lerntool für die kommenden Studentengenerationen entstehen konnte. Vor allem da er auch mir darin vertrauen musste, dass ich mit meinem PicoC-Compiler nicht irgendeinen Mist baue. Der RETI-Emulator von Michel Giehl ist unter [Link](#)⁵ zu finden.

Mir hat die Implementierung des PicoC-Compilers tatsächlich ziemlich viel Spaß gemacht, da Compilerbau auch in mein persönliches Interessengebiet fällt⁶. Das Aufschreiben dieser Schriftlichen Ausarbeitung hat mir dagegen eher weniger Spaß gemacht⁷. Wobei ich allerdings sagen muss, dass ich eine große Erleichterung verspüre das ganze Wissen über Compilerbau mal aufgeschrieben zu haben, damit ich mir keine Sorgen machen muss dieses ziemlich nützliche Wissen irgendwann wieder zu vergessen. Es hilft einem auch als Programmierer ungemein weiter zu wissen, wie ein Compiler unter der Haube funktioniert, da man sich so viel besser merken, wie eine bestimmte Funktionalität einer Programmiersprache zu verwenden ist. Manch eine Funktionalität einer Programmiersprache kann in der Verwendung ziemlich willkürlich erscheinen, wenn man die technische Umsetzung dahinter im Compiler nicht kennt.

Ich wollte mich daher auch noch dafür Bedanken, dass mir ein so ergiebiges und interessantes Thema als Bachelorarbeit vorgeschlagen wurde und vor allem, dass auch das Vertrauen in mich gesteckt wurde, dass ich am Ende auch einen funktionsfähigen, sauber programmierten und gut durchdachten Compiler implementiere.

Zum Schluss nochmal ein abschließendes Danke an meinen Betreuer M.Sc Seufert und meinen Gutachter Prof. Dr. Scholl für die Betreuung und Bereitstellung dieser interessanten Bachelorarbeit und des vorangegangenen Bachelorprojektes und Michel Giehl für das Integrieren des PicoC-Compilers in seinen RETI-Emulator.

³Der PicoC-Compiler hätte schließlich mehr Funktionalitäten haben können.

⁴Vielleicht finde ich ja noch im nächsten Semester während des Betriebssysteme Tutorats noch etwas Zeit einige weitere Features einzubauen oder möglicherweise im Rahmen eines Masterprojektes 🤔.

⁵<https://github.com/michel-giehl/Reti-Emulator>.

⁶Womit nicht alle Studenten so viel Glück haben.

⁷Dieses ständige überlegen, wo man möglicherweise eine Erklärücke hat, ob man nicht was wichtiges ausgelassen hat usw.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Codeverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Definitionsverzeichnis	IV
Grammatikverzeichnis	V
0.0.1 Umsetzung von Funktionen	1
0.0.1.1 Mehrere Funktionen	1
0.0.1.1.1 Sprung zur Main Funktion	6
0.0.1.2 Funktionsdeklaration und -definition und Umsetzung von Sichtbarkeitsbereichen	9
0.0.1.3 Funktionsaufruf	11
0.0.1.3.1 Rückgabewert	18
0.0.1.3.2 Umsetzung der Übergabe eines Feldes	22
0.0.1.3.3 Umsetzung einer Übergabe eines Verbundes	26
Literatur	A

Abbildungsverzeichnis

Codeverzeichnis

0.1	PicoC-Code für 3 Funktionen.	1
0.2	Abstrakter Syntaxbaum für 3 Funktionen.	2
0.3	PicoC-Blocks Pass für 3 Funktionen.	3
0.4	PicoC-ANF Pass für 3 Funktionen.	4
0.5	RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen.	6
0.6	PicoC-Code für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.	6
0.7	RETI-Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.	7
0.8	RETI-Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.	8
0.9	RETI Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.	8
0.10	PicoC-Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss.	9
0.11	Symboltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss.	11
0.12	PicoC-Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.	11
0.13	Abstrakter Syntaxbaum für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.	12
0.14	Symboltabelle für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.	14
0.15	PicoC-ANF Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.	15
0.16	RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.	16
0.17	RETI-Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.	18
0.18	PicoC-Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.	18
0.19	Abstrakter Syntaxbaum für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.	19
0.20	PicoC-ANF Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.	20
0.21	RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.	22
0.22	PicoC-Code für die Übergabe eines Feldes.	22
0.23	Symboltabelle für die Übergabe eines Feldes.	24
0.24	PicoC-ANF Pass für die Übergabe eines Feldes.	25
0.25	RETI-Block Pass für die Übergabe eines Feldes.	26
0.26	PicoC-Code für die Übergabe eines Verbundes.	27
0.27	PicoC-ANF Pass für die Übergabe eines Verbundes.	28
0.28	RETI-Block Pass für die Übergabe eines Verbundes.	29

Tabellenverzeichnis

1	Datensegment mit Stackframe.	13
---	--------------------------------------	----

Definitionsverzeichnis

0.1 Stackframe 12

Grammatikverzeichnis

0.0.1 Umsetzung von Funktionen

Um die **Umsetzung** von **Funktionen** zu verstehen, ist es erstmal wichtig zu verstehen, wie **Funktionen** später im **RETI-Code** aussehen (Unterkapitel 0.0.1.1), wie Funktionen **deklariert** (Definition ??) und **definiert** (Definition ??) werden können und hierbei **Sichtbarkeitsbereiche** (Definition ??) umgesetzt sind (Unterkapitel 0.0.1.2). Aufbauend darauf können dann die notwendigen Schritte zur Umsetzung eines **Funktionsaufrufes** erklärt werden (Unterkapitel 0.0.1.3). Beim Thema **Funktionsaufruf** wird im speziellen darauf eingegangen werden, wie **Rückgabewerte** (Unterkapitel 0.0.1.3.1) umgesetzt sind und die **Übergabe** von **Zusammengesetzten Datentypen**, die mehr als eine Speicherzelle belegen, wie **Verbunden** (Unterkapitel 0.0.1.3.3) und **Feldern** (Unterkapitel 0.0.1.3.2) umgesetzt ist.

0.0.1.1 Mehrere Funktionen

Die Umsetzung **mehrerer Funktionen** wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.1 erklärt. Dieses Beispiel soll nur zeigen, wie Funktionen in verschiedenen, für die Kompilierung von Funktionen relevanten **Passes** übersetzt werden. Das Beispiel ist so gewählt, dass es möglichst **isoliert** von weiterem möglicherweise störendem Code ist.

```

1 void main() {
2     return;
3 }
4
5 void fun1() {
6     int var = 41;
7     if(1) {
8         var = 42;
9     }
10 }
11
12 int fun2() {
13     return 1;
14 }
```

Code 0.1: PicoC-Code für 3 Funktionen.

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.2 werden die 3 **Funktionen** durch entsprechende Knoten dargestellt. Am Beispiel der **Funktion** `void fun2() {return 1;}` wäre der hierzu passende **Knoten** `FunDef(VoidType(), Name('fun2'), [], [Return(Num('1'))])`. Die einzelnen **Attribute** dieses `FunDef(datatype, name, allocs, stmts_blocks)`-Knoten sind in Tabelle ?? erklärt.

```

1 File
2   Name './verbose_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         Assign
18         Alloc
19         Writeable,
20         IntType 'int',
21         Name 'var',
22         Num '41',
23     If
24         Num '1',
25         [
26             Assign
27             Name 'var',
28             Num '42'
29         ]
30     ],
31     FunDef
32     IntType 'int',
33     Name 'fun2',
34     [],
35     [
36         Return
37         Num '1'
38     ]
39 ]

```

Code 0.2: Abstrakter Syntaxbaum für 3 Funktionen.

Im **PicoC-Blocks Pass** in Code 0.3 werden die **Anweisungen** der Funktion in **Blöcke** `Block(name, stmts_instrs)` aufgeteilt. Hierbei bekommt ein Block `Block(name, stmts_instrs)`, der die Anweisungen der Funktion vom **Anfang** bis zum **Ende** oder bis zum Auftauchen eines `If(exp, stmts)`, `IfExists(exp, stmts1, stmts2)`, `While(exp, stmts)` oder `DoWhile(exp, stmts)`⁸ beinhaltet den **Bezeichner** bzw. den `Name(str)`-Knoten der Funktion an sein **Label** bzw. an sein `name`-Attribut zugewiesen. Dem **Bezeichner** wird vor der Zuweisung allerdings noch eine **Nummer** `<number>` angehängt `<name>.<number>`^{9,10}.

Es werden parallel dazu neue Zuordnungen im **Assoziativen Feld** `fun_name_to_block_name` hinzugefügt. Das **Assoziative Feld** `fun_name_to_block_name` ordnet einem **Funktionsnamen** den **Blocknamen** des Blockes, der die erste **Anweisung** der Funktion enthält zu. Der **Bezeichner** des Blockes `<name>.<number>` ist dabei bis auf die angehängte **Nummer** `<number>` identisch zu dem der Funktion. Diese Zuordnung ist nötig, da **Blöcke** eine **Nummer** an ihren Bezeichner `<name>.<number>` angehängt haben, die auf anderem Wege **nicht** ohne großen Aufwand herausgefunden werden kann.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs.picoc_blocks',
3   [
4       FunDef
5       VoidType 'void',

```

⁸Eine **Erklärung** dazu ist in Unterkapitel ?? zu finden.

⁹Der **Grund** dafür kann im Unterkapitel ?? nachgelesen werden.

¹⁰Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel ??, ?? und ?? erläutert.

```

6      Name 'main',
7      [],
8      [
9          Block
10         Name 'main.4',
11         [
12             Return(Empty())
13         ]
14     ],
15     FunDef
16     VoidType 'void',
17     Name 'fun1',
18     [],
19     [
20         Block
21         Name 'fun1.3',
22         [
23             Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('41'))
24             // If(Num('1'), []),
25             IfElse
26             Num '1',
27             [
28                 GoTo
29                 Name 'if.2'
30             ],
31             [
32                 GoTo
33                 Name 'if_else_after.1'
34             ]
35         ],
36         Block
37         Name 'if.2',
38         [
39             Assign(Name('var'), Num('42'))
40             GoTo(Name('if_else_after.1'))
41         ],
42         Block
43         Name 'if_else_after.1',
44         []
45     ],
46     FunDef
47     IntType 'int',
48     Name 'fun2',
49     [],
50     [
51         Block
52         Name 'fun2.0',
53         [
54             Return(Num('1'))
55         ]
56     ]
57 ]

```

Code 0.3: *PicoC-Blocks Pass für 3 Funktionen.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.4 werden die FunDef(datatype, name, allocs, stmts)-Knoten komplett

aufgelöst, sodass sich im `File(name, decls_defs_blocks)`-Knoten nur noch Blöcke befinden.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.4',
6       [
7         Return(Empty())
8       ],
9     Block
10      Name 'fun1.3',
11      [
12        // Assign(Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var')), Num('41'))
13        // Assign(Name('var'), Num('41'))
14        Exp(Num('41'))
15        Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
16        // If(Num('1'), [])
17        // IfElse(Num('1'), [], [])
18        Exp(Num('1')),
19        IfElse
20          Stack
21            Num '1',
22            [
23              GoTo
24                Name 'if.2'
25            ],
26            [
27              GoTo
28                Name 'if_else_after.1'
29            ]
30        ],
31      Block
32        Name 'if.2',
33        [
34          // Assign(Name('var'), Num('42'))
35          Exp(Num('42'))
36          Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
37          Exp(GoTo(Name('if_else_after.1')))
38        ],
39      Block
40        Name 'if_else_after.1',
41        [
42          Return(Empty())
43        ],
44      Block
45        Name 'fun2.0',
46        [
47          // Return(Num('1'))
48          Exp(Num('1'))
49          Return(Stack(Num('1')))
50        ]
51  ]

```

Code 0.4: *PicoC-ANF Pass für 3 Funktionen.*

Nach dem **RETI Pass** in Code 0.5 gibt es nur noch **RETI-Befehle**, die Blöcke wurden entfernt. Die **RETI-Befehle** in diesen Blöcken wurden genauso zusammengefügt, wie die Blöcke angeordnet waren. Ohne die **Kommentare** könnte man die RETI-Befehle nicht mehr direkt Funktionen zuordnen. Die **Kommentare** enthalten die **Bezeichner** <name>.<number> der Blöcke, die in diesem Beispiel immer zugleich bis auf die Nummer, dem **Namen** der jeweiligen **Funktion** entsprechen.

Da es in der main-Funktion keinen **Funktionsaufruf** gab, wird der Code, der nach dem **Befehl** in der **markierten Zeile** kommt nicht mehr betreten. Funktionen sind im **RETI-Code** nur dadurch existent, dass im RETI-Code **Sprünge** (z.B. JUMP<rel> <im>) zu den jeweils richtigen **Adressen** gemacht werden. Die Sprünge werden zu den Adressen gemacht, wo die **RETI-Befehle** anfangen, die aus den **Anweisungen** einer **Funktion** kompiliert wurden.

```

1 # // Block(Name('start.5'), [])
2 # // Exp(GoTo(Name('main.4'))))
3 # // not included Exp(GoTo(Name('main.4'))))
4 # // Block(Name('main.4'), [])
5 # Return(Empty())
6 LOADIN BAF PC -1;
7 # // Block(Name('fun1.3'), [])
8 # // Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('41'))
9 # // Assign(Name('var'), Num('41'))
10 # Exp(Num('41'))
11 SUBI SP 1;
12 LOADI ACC 41;
13 STOREIN SP ACC 1;
14 # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1'))))
15 LOADIN SP ACC 1;
16 STOREIN BAF ACC -2;
17 ADDI SP 1;
18 # // If(Num('1'), [])
19 # // IfElse(Num('1'), [], [])
20 # Exp(Num('1'))
21 SUBI SP 1;
22 LOADI ACC 1;
23 STOREIN SP ACC 1;
24 # IfElse(Stack(Num('1')), [], [])
25 LOADIN SP ACC 1;
26 ADDI SP 1;
27 # JUMP== GoTo(Name('if_else_after.1'));
28 JUMP== 7;
29 # GoTo(Name('if.2'))
30 # // not included Exp(GoTo(Name('if.2'))))
31 # // Block(Name('if.2'), [])
32 # // Assign(Name('var'), Num('42'))
33 # Exp(Num('42'))
34 SUBI SP 1;
35 LOADI ACC 42;
36 STOREIN SP ACC 1;
37 # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1'))))
38 LOADIN SP ACC 1;
39 STOREIN BAF ACC -2;
40 ADDI SP 1;
41 # Exp(GoTo(Name('if_else_after.1'))))
42 # // not included Exp(GoTo(Name('if_else_after.1'))))
43 # // Block(Name('if_else_after.1'), [])
44 # Return(Empty())

```

```

45 LOADIN BAF PC -1;
46 # // Block(Name('fun2.0'), [])
47 # // Return(Num('1'))
48 # Exp(Num('1'))
49 SUBI SP 1;
50 LOADI ACC 1;
51 STOREIN SP ACC 1;
52 # Return(Stack(Num('1'))))
53 LOADIN SP ACC 1;
54 ADDI SP 1;
55 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 0.5: RETI-Blocks Pass für 3 Funktionen.

0.0.1.1.1 Sprung zur Main Funktion

Im vorherigen Beispiel in Code 0.1 war die `main`-Funktion die **erste** Funktion, die im Code vorkam. Dadurch konnte die `main`-Funktion direkt betreten werden, da die **Ausführung** eines Programmes immer ganz vorne im **RETI-Code** beginnt. Man musste sich daher keine Gedanken darum machen, wie man die **Ausführung**, die von der `main`-Funktion ausgeht überhaupt startet.

Im Beispiel in Code 0.6 ist die `main`-Funktion allerdings **nicht** die **erste** Funktion. Daher muss dafür gesorgt werden, dass die `main`-Funktion die erste Funktion ist, die ausgeführt wird.

```

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

```

Code 0.6: PicoC-Code für Funktionen, wobei die `main` Funktion nicht die erste Funktion ist.

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.7 sind die **Funktionen** nur noch durch **Blöcke** umgesetzt.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs_main.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'fun1.2',
6       [
7         # Return(Empty())
8         LOADIN BAF PC -1;
9       ],
10    Block
11      Name 'fun2.1',

```



```

12      [
13          # // Return(Num('1'))
14          # Exp(Num('1'))
15          SUBI SP 1;
16          LOADI ACC 1;
17          STOREIN SP ACC 1;
18          # Return(Stack(Num('1')))
19          LOADIN SP ACC 1;
20          ADDI SP 1;
21          LOADIN BAF PC -1;
22      ],
23      Block
24          Name 'main.0',
25          [
26              # Return(Empty())
27              LOADIN BAF PC -1;
28          ]
29  ]

```

Code 0.7: RETI-Blocks Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.

Eine simple Möglichkeit die Ausführung durch die main-Funktion zu starten, ist es, die main-Funktion einfach nach **vorne** zu schieben, damit diese als **erstes** ausgeführt wird. Im `File(name, decls_defs)`-Knoten muss dazu im `decls_defs`-Attribut, welches eine **Liste von Funktionen** ist, die main-Funktion an den ersten Index 0 geschoben werden.

Die Möglichkeit für die sich in der **Implementierung** des **PicoC-Compilers** allerdings entschieden wurde, ist es, wenn die main-Funktion nicht die erste auftauchende Funktion ist, einen `start.<number>`-Block als ersten Block einzufügen. Dieser `start.<number>`-Block enthält einen `GoTo(Name('main.<number>'))`-Knoten, der im **RETI Pass 0.9** in einen Sprung zur main-Funktion übersetzt wird.¹¹

In der Implementierung des **PicoC-Compilers** wurde sich für diese Möglichkeit entschieden, da es für Verwender¹² des **PicoC-Compilers** vermutlich am **intuitivsten** ist, wenn der **RETI-Code** für die Funktionen an denselben Stellen relativ zueinander verortet ist, wie die Funktionsdefinitionen im **PicoC-Code**.

Das **Einsetzen** des `start.<number>`-Blockes erfolgt im **RETI-Patch Pass** in Code 0.8. Der **RETI-Patch** Pass ist der Pass, der für das **Ausbessern**¹³ von Befehlen und Anweisungen zuständig ist, wenn z.B. in manchen Fällen die main-Funktion nicht die erste Funktion ist.

```

1 File
2   Name './verbose_3_funs_main.reti_patch',
3   [
4       Block
5         Name 'start.3',
6         [
7             # // Exp(GoTo(Name('main.0')))
8             Exp(GoTo(Name('main.0')))
9         ],
10      Block

```

¹¹Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel ??, ?? und ?? erläutert.

¹²Also die kommenden **Studentengenerationen**.

¹³In engl. to patch.

```

11     Name 'fun1.2',
12     [
13         # Return(Empty())
14         LOADIN BAF PC -1;
15     ],
16     Block
17     Name 'fun2.1',
18     [
19         # // Return(Num('1'))
20         # Exp(Num('1'))
21         SUBI SP 1;
22         LOADI ACC 1;
23         STOREIN SP ACC 1;
24         # Return(Stack(Num('1')))
25         LOADIN SP ACC 1;
26         ADDI SP 1;
27         LOADIN BAF PC -1;
28     ],
29     Block
30     Name 'main.0',
31     [
32         # Return(Empty())
33         LOADIN BAF PC -1;
34     ]
35 ]

```

Code 0.8: RETI-Patch Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.

Im **RETI Pass** in Code 0.9 wird das `Exp(GoTo(Name('main.<number>')))` durch den entsprechenden **Sprung** `JUMP <distance_to_main_function>` ersetzt und es werden die **Blöcke entfernt**.

```

1 # // Block(Name('start.3'), [])
2 # // Exp(GoTo(Name('main.0'))))
3 JUMP 8;
4 # // Block(Name('fun1.2'), [])
5 # Return(Empty())
6 LOADIN BAF PC -1;
7 # // Block(Name('fun2.1'), [])
8 # // Return(Num('1'))
9 # Exp(Num('1'))
10 SUBI SP 1;
11 LOADI ACC 1;
12 STOREIN SP ACC 1;
13 # Return(Stack(Num('1')))
14 LOADIN SP ACC 1;
15 ADDI SP 1;
16 LOADIN BAF PC -1;
17 # // Block(Name('main.0'), [])
18 # Return(Empty())
19 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 0.9: RETI Pass für Funktionen, wobei die main Funktion nicht die erste Funktion ist.

0.0.1.2 Funktionsdeklaration und -definition und Umsetzung von Sichtbarkeitsbereichen

In der Programmiersprache L_C und somit auch L_{PicoC} ist es notwendig, dass eine Funktion **deklariert** ist, bevor man einen **Funktionsaufruf** zu dieser Funktion machen kann. Das ist notwendig, damit **Fehlermeldungen** ausgegeben werden können, wenn der **Prototyp** (Definition ??) der Funktion nicht mit den **Datentypen** der **Argumente** oder der **Anzahl Argumente** übereinstimmt, die beim **Funktionsaufruf** an die Funktion in einer **festen Reihenfolge** übergeben werden.

Die **Deklaration** einer Funktion kann explizit erfolgen (z.B. `int fun2(int var);`), wie in der im Beispiel in Code 0.10 **markierten Zeile** 1 oder zusammen mit der **Funktionsdefinition** (z.B. `void fun1(){};`), wie in den **markierten Zeilen** 3-4.

In dem Beispiel in Code 0.10 erfolgt ein **Funktionsaufruf** der Funktion `fun2`, die allerdings erst nach der `main`-Funktion definiert ist. Daher ist eine **Funktionsdeklaration**, wie in der **markierten Zeile** 1 notwendig. Beim **Funktionsaufruf** der Funktion `fun1` ist das **nicht** notwendig, da die Funktion vorher **definiert** wurde, wie in den **markierten Zeilen** 3-4 zu sehen ist.

```

1 int fun2(int var);
2
3 void fun1() {
4 }
5
6 void main() {
7     int var = fun2(42);
8     fun1();
9     return;
10 }
11
12 int fun2(int var) {
13     return var;
14 }
```

Code 0.10: PicoC-Code für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss.

Die **Deklaration** einer **Funktion** erfolgt mithilfe der **Symboltabelle**, die in Code 0.11 für das Beispiel in Code 0.10 dargestellt ist. Für z.B. die Funktion `int fun2(int var)` werden die **Attribute** des **Symbols** `Symbols(type_qual, datatype, name, val_addr, pos, size)` wie üblich gesetzt. Dem `datatype`-Attribut wird dabei einfach die komplette **Funktionsdeklaration** `FunDecl(IntType('int'), Name('fun2'), [Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('var'))])` zugewiesen.

Die Variablen `var@main` und `var@fun2` der `main`-Funktion und der Funktion `fun2` haben unterschiedliche **Sichtbarkeitsbereiche** (Definition ??). Die **Sichtbarkeitsbereiche** der **Funktionen** werden mittels eines **Suffix** `"@<fun_name>"` umgesetzt, der an den **Bezeichner** `var` angehängt wird: `var@<fun_name>`. Dieser **Suffix** wird geändert, sobald beim **Top-Down**¹⁴-Iterieren über den **Abstrakten Syntaxbaum** des aktuellen **Passes** ein neuer `FunDef(datatype, name, allocs, stmts_blocks)`-Knoten betreten wird und über dessen Anweisungen im `stmts`-Attribut iteriert wird. Beim **Iterieren** über die Anweisungen eines **Funktionsknotens** wird beim Erstellen neuer **Symboltabelleneinträge** an die **Schlüssel** ein **Suffix** angehängt, der aus dem `name`-Attribut des **Funktionsknotens** `FunDef(name, datatype, params, stmts_blocks)` entnommen wird.

Ein Grund, warum **Sichtbarkeitsbereiche** über das Anhängen eines **Suffix** an den **Bezeichner** gelöst sind, ist, dass auf diese Weise die **Schlüssel**, die aus dem **Bezeichner** einer Variable und einem angehängten **Suffix** bestehen, in der als **Assoziatives Feld** umgesetzten **Symboltabelle** eindeutig sind. Des Weiteren lässt sich

¹⁴D.h. von der **Wurzel** zu den **Blättern** eines Baumes.

aus dem **Symboltabelleneintrag** einer **Variable** direkt ihr **Sichtbarkeitsbereich**, in dem sie definiert wurde ablesen. Der **Suffix** ist ebenfalls im **Name(str)**-Knoten des **name**-Attributbes eines **Symboltabelleneintrags** der Symboltabelle angehängt. Dies ist in Code 0.11 markiert.

Die Variable **var@main**, bei der es sich um eine **Lokale Variable** der **main**-Funktion handelt, ist nur innerhalb des **Codeblocks** {} der **main**-Funktion **sichtbar** und die Variable **var@fun2** bei der es sich um einen **Parameter** handelt, ist nur innerhalb des **Codeblocks** {} der Funktion **fun2** **sichtbar**. Das ist dadurch umgesetzt, dass der **Suffix**, der bei jedem **Funktionswechsel** angepasst wird, auch beim Nachschlagen eines **Symbols** in der **Symboltabelle** an den **Bezeichner** der Variablen, die man nachschlagen will angehängt wird. Und da die Zuordnungen im **Assoziativen Feld eindeutig** sein müssen¹⁵, kann eine Variable nur in genau der Funktion nachgeschlagen werden, in der sie **definiert** wurde.

Das Symbol '@' wurde aus einem bestimmten Grund als **Trennzeichen** verwendet, nämlich, weil kein Bezeichner das Symbol '@' jemals selbst enthalten kann. Die **Produktionen** für einen Bezeichner in der **Konkreten Grammatik** $G_{Lex} \uplus G_{Parse}$ (siehe ?? und ??) lassen das Symbol @ nicht zu. Damit ist es ausgeschlossen, dass es zu **Problemen** kommt, falls ein Benutzer des **PicoC-Compilers** zufällig auf die Idee kommt seine Funktion auf eine unpassende Weise zu benennen¹⁶.

```

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      value or address:    Empty()
19      position:            Pos(Num('3'), Num('5'))
20      size:                Empty()
21    },
22    Symbol
23    {
24      type qualifier:      Empty()
25      datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
26      name:                Name('main')
27      value or address:    Empty()
28      position:            Pos(Num('6'), Num('5'))
29      size:                Empty()
30    },
31    Symbol
32    {
33      type qualifier:      Writable()
34      datatype:            IntType('int')
35      name:                Name('var@main')

```

¹⁵Sonst gibt es eine **Fehlermeldung**, wie **ReDeclarationOrDefinition**.

¹⁶Z.B. **var@fun2** als Funktionsname.

```

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('12'), Num('13'))
46     size:               Num('1')
47   }
48 ]

```

Code 0.11: *Symoltabelle für Funktionen, wobei eine Funktion vorher deklariert werden muss.*

0.0.1.3 Funktionsaufruf

Ein **Funktionsaufruf** (z.B. `stack_fun(local_var)`) wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.12 erklärt. Das Beispiel ist so gewählt, dass alleinig der **Funktionsaufruf** im **Vordergrund** steht und das Beispiel nicht auch noch mit z.B. Aspekten wie der Umsetzung eines **Rückgabewertes** überladen ist. Der Aspekt der Umsetzung eines **Rückgabewertes** wird erst im nächsten Unterkapitel 0.0.1.3.1 erklärt. Zudem wurde, um die **Adressberechnung anschaulicher** zu machen als **Datentyp** für den **Parameter** `param` der Funktion `stack_fun` ein **Verbund** gewählt, der **mehrere Speicherzellen** im Hauptspeicher einnimmt.

```

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

```

Code 0.12: *PicoC-Code für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.13 wird ein **Funktionsaufruf** `stack_fun(local_var)` durch die **Knoten** `Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_no_return_value.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [

```

```

7      Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr'))
8      ],
9      FunDecl
10     VoidType 'void',
11     Name 'stack_fun',
12     [
13       Alloc
14       Writeable,
15       IntType 'int',
16       Name 'param'
17     ],
18     FunDef
19     VoidType 'void',
20     Name 'main',
21     [],
22     [
23       Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], StructSpec(Name('st'))),
24         ↪ Name('local_var'))),
25       Exp(Call(Name('stack_fun'), [BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))])),
26       Return(Empty())
27     ],
28     FunDef
29     VoidType 'void',
30     Name 'stack_fun',
31     [
32       Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('param'))
33     ],
34     [
35       Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], StructSpec(Name('st'))),
36         ↪ Name('local_var'))),
37     ]
38 ]

```

Code 0.13: Abstrakter Syntaxbaum für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.15 werden die Knoten `Exp(Call(Name('stack_fun'), [Name('local_var')]))` durch die Knoten `StackMalloc(Num('2')), Ref(Global(Num('0'))), NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))), Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))` und `RemoveStackframe()` ersetzt.¹⁷

Bei einem Funktionsaufruf wird für die **aufgerufene Funktion** ein **Stackframes** (Definition 0.1) angelegt werden. Das ganze ist in Tabelle 1 für das Beispiel in Code 0.13 veranschaulicht.

Definition 0.1: Stackframe



Eine Datenstruktur, die

*Üblicherweise steht als **erstes** auf einem Stackframe die **Startadresse** des **Vorgängerframes**. Diese ist notwendig damit beim Rücksprung aus einer aufgerufenen Funktion, zurück zur aufrufenden Funktion das BAF-Register wieder auf die aktuell aktive Funktion zeigt. Als **zweites** steht auf einem Stackframe üblicherweise die **Rücksprungadresse**. Die **Rücksprungadresse** ist die Adresse im **Codesegment** an der . Die **main-Funktion** besitzt keine Stackframe, bei dieser werden **Lokale Variablen** einfach zu den **Globalen Statischen Daten** geschrieben.^a*

¹⁷Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel ??, ?? und ?? erläutert.

^aScholl, „Betriebssysteme“.

Relativ- adresse	Wert	Register
0	$\langle local_var@main \rangle$	CS
1	$\langle local_var@main \rangle$	
2	$\langle local_var@main \rangle$	
3	$\langle local_var@main \rangle$	
...	...	
...	...	SP
4	$\langle local_var@stack_fun \rangle$	
3	$\langle local_var@stack_fun \rangle$	
2	$\langle local_var@stack_fun \rangle$	
1	$\langle local_var@stack_fun \rangle$	
0	$\langle param_var@stack_fun \rangle$	
...	Rücksprungadresse	
...	Startadresse Vorgängerframe	BAF

Tabelle 1: Datensegment mit Stackframe.

Der Knoten `StackMalloc(Num('2'))` ist notwendig, weil auf dem **Stackframe** für den Wert des **BAF**-Registers der **aufzufinden Funktion** und die **Rücksprungadresse** 2 Speicherzellen Platz am **Anfang** des **Stackframes** gelassen werden müssen. Das wird durch den Knoten `StackMalloc(Num('2'))` umgesetzt, indem das **SP**-Register einfach um zwei Speicherzellen **dekrementiert** wird und somit Speicher auf dem **Stack** belegt wird¹⁸.

```

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

```

¹⁸Wobei hier „reserviert“ besser passen würde.

```

24     datatype:      FunDecl(VoidType('void'), Name('stack_fun'),
25     ↪ [Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('param'))])
26     name:          Name('stack_fun')
27     value or address: Empty()
28     position:      Pos(Num('3'), Num('5'))
29     size:          Empty()
30 },
31 Symbol
32 {
33     type qualifier: Empty()
34     datatype:      FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
35     name:          Name('main')
36     value or address: Empty()
37     position:      Pos(Num('5'), Num('5'))
38     size:          Empty()
39 },
40 Symbol
41 {
42     type qualifier: Writable()
43     datatype:      ArrayDecl([Num('2')], StructSpec(Name('st')))
44     name:          Name('local_var@main')
45     value or address: Num('0')
46     position:      Pos(Num('6'), Num('12'))
47     size:          Num('4')
48 },
49 Symbol
50 {
51     type qualifier: Writable()
52     datatype:      IntType('int')
53     name:          Name('param@stack_fun')
54     value or address: Num('0')
55     position:      Pos(Num('11'), Num('19'))
56     size:          Num('1')
57 },
58 Symbol
59 {
60     type qualifier: Writable()
61     datatype:      ArrayDecl([Num('2')], StructSpec(Name('st')))
62     name:          Name('local_var@stack_fun')
63     value or address: Num('4')
64     position:      Pos(Num('12'), Num('12'))
65     size:          Num('4')
66 }
67 ]

```

Code 0.14: Symboltabelle 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(Num('2'))

```



```

8      Exp(Num('1'))
9      Exp(Num('1'))
10     Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
11     NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))))
12     Exp(GoTo(Name('stack_fun.0'))))
13     RemoveStackframe()
14     Return(Empty())
15 ],
16 Block
17   Name 'stack_fun.0',
18   [
19     Return(Empty())
20   ]
21 ]

```

Code 0.15: *PicoC-ANF Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.16 werden die Kompositionen `StackMalloc(Num('2'))`, `Ref(Global(Num('0')))`, `NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr')))`, `Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))` und `RemoveStackframe()` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

Unter den **RETI-Knoten** entsprechen die **Kompositionen** `LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'))` und `Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))` noch keine fertigen **RETI-Befehlen** und werden später in dem für sie vorgesehenen **RETI-Pass** passend ergänzt bzw. ersetzt.

Für den **Bezeichner des Blocks** `stack_fun.0` in der Komposition `Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))` wird im **Assoziativen Feld** `fun_name_to_block_name`¹⁹ mit dem Schlüssel `stack_fun`²⁰, der im Knoten `NewStackframe(Name('stack_fun'))` gespeichert ist, nachgeschlagen.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_no_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # StackMalloc(Num('2'))
8         SUBI SP 2;
9         # Exp(Num('1'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 1;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Exp(Num('1'))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI ACC 1;
16        STOREIN SP ACC 1;
17        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
18        LOADIN SP ACC 2;
19        LOADIN SP IN2 1;
20        ADD ACC IN2;
21        STOREIN SP ACC 2;
22        ADDI SP 1;

```

¹⁹Dieses **Assoziative Feld** wurde in Unterkapitel 0.0.1.1 eingeführt.

²⁰Dem **Bezeichner der Funktion**.

```

23      # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))))
24      MOVE BAF ACC;
25      ADDI SP 3;
26      MOVE SP BAF;
27      SUBI SP 7;
28      STOREIN BAF ACC 0;
29      LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
30      ADD ACC CS;
31      STOREIN BAF ACC -1;
32      # Exp(GoTo(Name('stack_fun.0'))))
33      Exp(GoTo(Name('stack_fun.0'))))
34      # RemoveStackframe()
35      MOVE BAF IN1;
36      LOADIN IN1 BAF 0;
37      MOVE IN1 SP;
38      # Return(Empty())
39      LOADIN BAF PC -1;
40  ],
41  Block
42      Name 'stack_fun.0',
43      [
44          # Return(Empty())
45          LOADIN BAF PC -1;
46      ]
47  ]

```

Code 0.16: *RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.*

Im **RETI Pass** in Code 0.16 wird nun der finale **RETI-Code** erstellt. Eine Änderung, die direkt auffällt, ist, dass die **RETI-Befehle** aus den **Blöcken** nun zusammengefügt sind und es keine **Blöcke** mehr gibt. Des Weiteren wird das `GoTo(Name('addr@next_instr'))` in der Komposition `LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'))` nun durch die **Adresse** des nächsten Befehls direkt nach dem dem Befehl `JUMP 5`, der für den **Sprung zur gewünschten Funktion** verantwortlich ist²¹ ersetzt: `LOADI ACC 14`. Und auch der Knoten, der den Sprung `Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))` darstellt wird durch den Knoten `JUMP 5` ersetzt.

Die **Distanz** 5 im **RETI-Knoten** `JUMP 5` wird mithilfe des `instrs.before`-Attributs des **Zielblocks** `Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size)`²² und des **aktuellen Blocks**, in dem der **RETI-Knoten** `JUMP 5` enthalten ist berechnet.

Die **relative Adresse** 14 direkt nach dem Befehl `JUMP 5` wird ebenfalls mithilfe des `instrs.before`-Attributs des **aktuellen Blocks** `Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size)` berechnet. Es handelt sich bei bei 14 um eine **relative Adresse**, die **relativ** zum `CS`-Register²³ berechnet wird.

Anmerkung

Die Berechnung der **Adresse** '`<addr@next_instr>`' (bzw. in der Formel adr_{danach}) des Befehls nach dem **Sprung** `JUMP <distanz>` für den Befehl `LOADI ACC <addr@next_instr>` erfolgt dabei mithilfe der

²¹Also der Befehl, der bisher durch die Komposition `Exp(GoTo(Name('stack_fun.0')))` dargestellt wurde.

²²Welcher den **ersten Befehl** der gewünschten Funktion enthält.

²³Welches im **RETI-Interpreter** von einem **Startprogramm** im **EPROM** immer so gesetzt wird, dass es die **Adresse** enthält, an der das **Codesegment** anfängt.

folgenden Formel:

$$adr_{danach} = \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} + idx + 4 \quad (0.0.1)$$

wobei:

- es sich bei adr_{danach} um eine **relative Adresse** handelt, die **relativ** zum CS-Register berechnet wird.
- $\#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} \hat{=}$ **Anzahl** Befehle vor dem momentanen Block. Es handelt sich hierbei um ein verstecktes Attribut `instrs_before` eines jeden **Blockes** `Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size)`, welches im **RETI-Patch**-Pass gesetzt wird. Der Grund dafür, dass das Zuweisen dieses versteckten Attributes `instrs_before` im **RETI-Patch** Pass erfolgt ist, weil erst im **RETI-Patch** Pass die **finale Anzahl** an Befehlen in einem Block feststeht, da im **RETI-Patch** Pass `GoTo()`'s entfernt werden, deren Sprung nur **eine** Adresse weiterspringen würde. Die **finale Anzahl** an Befehlen kann sich in diesem **Pass** also noch ändern und steht erst nach diesem **Pass** fest.
- $idx \hat{=}$ relativer Index des Befehls `LOADI ACC <addr@next_instr>` selbst im Block.
- 4 $\hat{=}$ **Distanz**, die zwischen den in Code 0.17 markierten Befehlen `LOADI ACC <im>` und `JUMP <im>` liegt und noch **eins** mehr, weil man ja zum nächsten Befehl will.

Die Berechnung der **Distanz** `<distanz>` für den Sprung `JUMP <distanz>` zum **ersten** Befehl eines im vorhergehenden **Pass** **existenten Blockes**^a erfolgt dabei nach der folgenden Formel:

$$distanz = \begin{cases} \#Bef_{vor\ Zielbl.} - \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} - idx & \#Bef_{vor\ Zielbl.} \neq \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} \\ -idx & \#Bef_{vor\ Zielbl.} = \#Bef_{vor\ akt.\ Bl.} \end{cases} \quad (0.0.2)$$

wobei:

- $\#Bef_{vor\ Zielbl.} \hat{=}$ **Anzahl** Befehle vor dem **Zielblock**, der den **ersten** Befehl einer Funktion enthält und zu dem gesprungen werden soll. Es handelt sich hierbei um ein verstecktes Attribut `instrs_before` eines jeden **Blockes** `Block(name, stmts_instrs, instrs_before, num_instrs, param_size, local_vars_size)`.
- $\#Bef_{vor\ akt.\ Bl.}$ und idx haben die **gleiche Bedeutung** wie in der Formel 0.0.1.

^aIm **RETI-Pass** gibt es **keine** Blöcke mehr.

```

1 # // Exp(GoTo(Name('main.1')))
2 # // not included Exp(GoTo(Name('main.1')))
3 # StackMalloc(Num('2'))
4 SUBI SP 2;
5 # Exp(Num('1'))
6 SUBI SP 1;
7 LOADI ACC 1;
8 STOREIN SP ACC 1;
9 # Exp(Num('1'))
10 SUBI SP 1;
11 LOADI ACC 1;
12 STOREIN SP ACC 1;
13 # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
14 LOADIN SP ACC 2;
15 LOADIN SP IN2 1;

```

```

16 ADD ACC IN2;
17 STOREIN SP ACC 2;
18 ADDI SP 1;
19 # NewStackframe(Name('stack_fun'), GoTo(Name('addr@next_instr'))))
20 MOVE BAF ACC;
21 ADDI SP 3;
22 MOVE SP BAF;
23 SUBI SP 7;
24 STOREIN BAF ACC 0;
25 LOADI ACC 21;
26 ADD ACC CS;
27 STOREIN BAF ACC -1;
28 # Exp(GoTo(Name('stack_fun.0'))))
29 JUMP 5;
30 # RemoveStackframe()
31 MOVE BAF IN1;
32 LOADIN IN1 BAF 0;
33 MOVE IN1 SP;
34 # Return(Empty())
35 LOADIN BAF PC -1;
36 # Return(Empty())
37 LOADIN BAF PC -1;

```

Code 0.17: RETI-Pass für Funktionsaufruf ohne Rückgabewert.

0.0.1.3.1 Rückgabewert

Ein **Funktionsaufruf inklusive Zuweisung eines Rückgabewertes** (z.B. `int var = fun_with_return_value()`) wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.18 erklärt.

Um den Unterschied zwischen einem `return` ohne **Rückgabewert** und einem `return 21 * 2` mit **Rückgabewert** hervorzuheben, wurde ist auch eine Funktion `fun_no_return_value`, die **keinen** Rückgabewert hat in das Beispiel integriert.

```

1 int fun_with_return_value() {
2     return 21 * 2;
3 }
4
5 void fun_no_return_value() {
6     return;
7 }
8
9 void main() {
10     int var = fun_with_return_value();
11     fun_no_return_value();
12 }

```

Code 0.18: PicoC-Code für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.19 wird eine **Return-Anweisung mit Rückgabewert** `return 21 * 2` mit der Komposition `Return(BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2')))` dargestellt, eine **Return-Anweisung ohne Rückgabewert** `return` mit der Komposition `Return(Empty())` und ein **Funktionsaufruf** inklusive

Zuweisung des Rückgabewertes `int var = fun_with_return_value()` durch die Komposition `Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Call(Name('fun_with_return_value'), []))`.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_with_return_value.ast',
3   [
4     FunDef
5       IntType 'int',
6       Name 'fun_with_return_value',
7       [],
8       [
9         Return(BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2')))
10      ],
11     FunDef
12       VoidType 'void',
13       Name 'fun_no_return_value',
14       [],
15       [
16         Return(Empty())
17      ],
18     FunDef
19       VoidType 'void',
20       Name 'main',
21       [],
22       [
23         Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')),
24               ↪ Call(Name('fun_with_return_value'), []))
25         Exp(Call(Name('fun_no_return_value'), []))
26      ]
27   ]

```

Code 0.19: Abstrakter Syntaxbaum für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.20 wird bei der **Komposition** `Return(BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2')))` erst die **Expression** `BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2'))` ausgewertet. Die hierfür erstellten Kompositionen `Exp(Num('21'))`, `Exp(Num('2'))` und `Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))` berechnen das Ergebnis des Ausdrucks `21*2` auf dem **Stack**. Dieses Ergebnis wird dann von der **Komposition** `Return(Stack(Num('1')))` vom **Stack** gelesen und in das **Register ACC** geschrieben. Als letztes wird die **Rücksprungadresse** in das PC-Register geladen, die durch den `NewStackframe()`-Knoten eine Speicherzelle nach dem Wert des BAF-Registers der aufrufenden Funktion im **Stackframe** gespeichert ist.

Ein wichtiges Detail bei der **Funktion** `fun_with_return_value` ist, dass der **Funktionsaufruf** `Call(Name('fun_with_return_value'), [])` anders übersetzt wird, da die **Funktion** einen Rückgabewert vom **Datentyp** `IntType()` und nicht `VoidType()` hat. Um den **Rückgabewert**, der durch die Komposition `Return(BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2')))` in das ACC-Register geschrieben wurde für die aufrufende Funktion, deren Stackframe nun wieder das aktuelle ist auf den **Stack** zu schreiben, muss ein neue **Komposition** `Exp(ACC)`²⁴ definiert werden.

Dieser Trick mit dem Speichern des **Rückgabewertes** im ACC-Register ist notwendig, weil durch das **Entfernen** des **Stackframes** der **aufgerufenen Funktion** das SP-Register nicht mehr an der gleichen Stelle steht. Daher sind alle **temporären Werte**, die in der **aufgerufenen Funktion** auf den **Stack** geschrieben

²⁴Diese Komposition schreibt den **aktuellen Wert** des Registers ACC auf den **Stack**

wurden unzugänglich, weil man nicht wissen kann, um wieviel die Adresse im SP-Register verglichen zu vorher verschoben ist, weil der **Stackframe** von unterschiedlichen **aufgerufenen Funktionen** unterschiedlich groß sein kann.

Die **Komposition** `Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Call(Name('fun_with_return_value'), []))` wird nach dem **allokieren** der Variable `Name('var')` durch die Komposition `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))` ersetzt, welche den **Rückgabewert** der Funktion `Name('fun_with_return_value')`, welcher durch die **Komposition** `Exp(Acc)` aus dem ACC-Register auf den **Stack** geschrieben wurde nun vom **Stack** in die Speicherzelle der Variable `Name('var')` in den **Globalen Statischen Daten** speichert. Hierzu muss die **Adresse** der Variable `Name('var')` in der **Symboltabelle** nachgeschlagen werden.

Die **Komposition** `Return(Empty())` für ein **return ohne Rückgabewert** bleibt unverändert, sie stellt nur das Laden der **Rücksprungsadresse** in das PC-Register dar.

Des Weiteren ist zu beobachten, dass wenn bei einer Funktion mit dem **Rückgabedatentyp** `void` keine **return**-Anweisung explizit ans Ende geschrieben wird, im **PicoC-ANF Pass** eines hinzugefügt wird in Form der Komposition `Return(Empty())`. Beim Nicht-Angeben im Falle eines Dantentyps, der **nicht** `void` ist, wird allerdings eine **MissingReturn-Fehlermeldung** ausgelöst.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_with_return_value.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'fun_with_return_value.2',
6       [
7         // Return(BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2')))
8         Exp(Num('21'))
9         Exp(Num('2'))
10        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
11        Return(Stack(Num('1')))
12      ],
13    Block
14      Name 'fun_no_return_value.1',
15      [
16        Return(Empty())
17      ],
18    Block
19      Name 'main.0',
20      [
21        // Assign(Name('var'), Call(Name('fun_with_return_value'), []))
22        StackMalloc(Num('2'))
23        NewStackframe(Name('fun_with_return_value'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
24        Exp(GoTo(Name('fun_with_return_value.2')))
25        RemoveStackframe()
26        Exp(ACC)
27        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
28        StackMalloc(Num('2'))
29        NewStackframe(Name('fun_no_return_value'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
30        Exp(GoTo(Name('fun_no_return_value.1')))
31        RemoveStackframe()
32        Return(Empty())
33      ]
34    ]

```

Code 0.20: *PicoC-ANF Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.21 werden die Kompositionen `Exp(Num('21'))`, `Exp(Num('2'))`, `Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))`, `Return(Stack(Num('1')))` und `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_with_return_value.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'fun_with_return_value.2',
6       [
7         # // Return(BinOp(Num('21'), Mul('*'), Num('2')))
8         # Exp(Num('21'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 21;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Exp(Num('2'))
13        SUBI SP 1;
14        LOADI ACC 2;
15        STOREIN SP ACC 1;
16        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Mul('*'), Stack(Num('1'))))
17        LOADIN SP ACC 2;
18        LOADIN SP IN2 1;
19        MULT ACC IN2;
20        STOREIN SP ACC 2;
21        ADDI SP 1;
22        # Return(Stack(Num('1')))
23        LOADIN SP ACC 1;
24        ADDI SP 1;
25        LOADIN BAF PC -1;
26      ],
27     Block
28       Name 'fun_no_return_value.1',
29       [
30         # Return(Empty())
31        LOADIN BAF PC -1;
32      ],
33     Block
34       Name 'main.0',
35       [
36        # // Assign(Name('var'), Call(Name('fun_with_return_value'), []))
37        # StackMalloc(Num('2'))
38        SUBI SP 2;
39        # NewStackframe(Name('fun_with_return_value'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
40        MOVE BAF ACC;
41        ADDI SP 2;
42        MOVE SP BAF;
43        SUBI SP 2;
44        STOREIN BAF ACC 0;
45        LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
46        ADD ACC CS;
47        STOREIN BAF ACC -1;
48        # Exp(GoTo(Name('fun_with_return_value.2')))
49        Exp(GoTo(Name('fun_with_return_value.2')))
50        # RemoveStackframe()
51        MOVE BAF IN1;
52        LOADIN IN1 BAF 0;

```

```

53     MOVE IN1 SP;
54     # Exp(ACC)
55     SUBI SP 1;
56     STOREIN SP ACC 1;
57     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
58     LOADIN SP ACC 1;
59     STOREIN DS ACC 0;
60     ADDI SP 1;
61     # StackMalloc(Num('2'))
62     SUBI SP 2;
63     # NewStackframe(Name('fun_no_return_value'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
64     MOVE BAF ACC;
65     ADDI SP 2;
66     MOVE SP BAF;
67     SUBI SP 2;
68     STOREIN BAF ACC 0;
69     LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
70     ADD ACC CS;
71     STOREIN BAF ACC -1;
72     # Exp(GoTo(Name('fun_no_return_value.1')))
73     Exp(GoTo(Name('fun_no_return_value.1')))
74     # RemoveStackframe()
75     MOVE BAF IN1;
76     LOADIN IN1 BAF 0;
77     MOVE IN1 SP;
78     # Return(Empty())
79     LOADIN BAF PC -1;
80 ]
81 ]

```

Code 0.21: RETI-Blocks Pass für Funktionsaufruf mit Rückgabewert.

0.0.1.3.2 Umsetzung der Übergabe eines Feldes

Die Eigenheit, dass bei der **Übergabe** eines **Feldes** an eine andere Funktion, dieses als Zeiger übergeben wird, wurde bereits im Unterkapitel ?? erläutert. Die Umsetzung der **Übergabe** eines **Feldes** an eine andere Funktion wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.22 erklärt.

```

1 void fun_array_from_stackframe(int (*param)[3]) {
2 }
3
4 void fun_array_from_global_data(int param[2][3]) {
5     int local_var[2][3];
6     fun_array_from_stackframe(local_var);
7 }
8
9 void main() {
10     int local_var[2][3];
11     fun_array_from_global_data(local_var);
12 }

```

Code 0.22: PicoC-Code für die Übergabe eines Feldes.

Im **PicoC-ANF Pass** muss im Fall dessen, dass der **oberste Knoten** im Teilbaum, der den Datentyp darstellt und an die Funktion übergeben wird ein **Feld** `ArrayDecl(nums, datatype)` ist auf spezielle Weise vorgegangen werden. Dieser **oberste Knoten** des Teilbaums, der den Datentyp darstellt muss zu einem **Zeiger** `PntrDecl(num, datatype)` umgewandelt und der Rest des Teilbaumes, der am `datatype`-Attribut hängt, muss an das `datatype`-Attribut des **Zeigers** `PntrDecl(num, datatype)` gehängt werden.

Diese **Umwandlung** des **Datentyps** kann in der **Symboltabelle** in Code 0.23 beobachtet werden. Die **lokalen Variablen** `local_var@main` und `local_var@fun_array_from_global_data` sind beide vom Datentyp `ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))` und bei der Übergabe ändert sich der Datentyp beider Variablen zu `PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))`. Die **Größe** dieser Variablen ändert sich damit zu `Num('1')`, da ein **Zeiger** nur eine **Speicherzelle** braucht.

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('fun_array_from_stackframe'),
7         ↪ [Alloc(Writable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
8         ↪ Name('param'))])
9       name:                Name('fun_array_from_stackframe')
10      value or address:     Empty()
11      position:            Pos(Num('1'), Num('5'))
12      size:                Empty()
13    },
14    Symbol
15    {
16      type qualifier:      Writable()
17      datatype:            PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
18      name:                Name('param@fun_array_from_stackframe')
19      value or address:     Num('0')
20      position:            Pos(Num('1'), Num('37'))
21      size:                Num('1')
22    },
23    Symbol
24    {
25      type qualifier:      Empty()
26      datatype:            FunDecl(VoidType('void'), Name('fun_array_from_global_data'),
27        ↪ [Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')), Name('param'))])
28      name:                Name('fun_array_from_global_data')
29      value or address:     Empty()
30      position:            Pos(Num('4'), Num('5'))
31      size:                Empty()
32    },
33    Symbol
34    {
35      type qualifier:      Writable()
36      datatype:            PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')))
37      name:                Name('param@fun_array_from_global_data')
38      value or address:     Num('0')
39      position:            Pos(Num('4'), Num('36'))
40      size:                Num('1')
41    },
42    Symbol
43    {
44      type qualifier:      Writable()

```

```

42     datatype:      ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))
43     name:          Name('local_var@fun_array_from_global_data')
44     value or address: Num('6')
45     position:      Pos(Num('5'), Num('6'))
46     size:          Num('6')
47   },
48   Symbol
49   {
50     type qualifier: Empty()
51     datatype:      FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
52     name:          Name('main')
53     value or address: Empty()
54     position:      Pos(Num('9'), Num('5'))
55     size:          Empty()
56   },
57   Symbol
58   {
59     type qualifier: Writeable()
60     datatype:      ArrayDecl([Num('2'), Num('3')], IntType('int'))
61     name:          Name('local_var@main')
62     value or address: Num('0')
63     position:      Pos(Num('10'), Num('6'))
64     size:          Num('6')
65   }
66 ]

```

Code 0.23: *Symboleltabelle für die Übergabe eines Feldes.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.24 ist zu sehen, dass zur Übergabe der beiden Felder die **Adresse** des jeweiligen Feldes auf den **Stack** geschrieben wird. Die **Adressen** der beiden Felder auf den **Stack** zu schreiben wird durch die Kompositionen `Ref(Global(Num('0')))` und `Ref(Stackframe(Num('6')))` repräsentiert.

Die Komposition `Ref(Global(Num('0')))` ist für die **Variable** `local_var` aus der `main`-Funktion, da diese in den **Globalen Statischen Daten** liegt und die Komposition `Ref(Stackframe(Num('6')))` ist für die Variable `local_var` aus der Funktion `fun_array_from_global_data`, da diese auf dem **Stackframe** dieser Funktion liegt. Dabei stellen die Zahlen in den Knoten `Global(num)` bzw. `Stackframe(num)` die **relative Adressen** relativ zum `DS-Register` bzw. `SP-Register` dar, die aus der **Symboleltabelle** entnommen sind.

```

1 File
2 Name './example_fun_call_by_sharing_array.picoc_mon',
3 [
4   Block
5     Name 'fun_array_from_stackframe.2',
6     [
7       Return(Empty())
8     ],
9   Block
10    Name 'fun_array_from_global_data.1',
11    [
12      StackMalloc(Num('2'))
13      Ref(Stackframe(Num('6'))))
14      NewStackframe(Name('fun_array_from_stackframe'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
15      Exp(GoTo(Name('fun_array_from_stackframe.2'))))

```

```

16     RemoveStackframe()
17     Return(Empty())
18 ],
19 Block
20     Name 'main.0',
21     [
22         StackMalloc(Num('2'))
23         Ref(Global(Num('0'))))
24         NewStackframe(Name('fun_array_from_global_data'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
25         Exp(GoTo(Name('fun_array_from_global_data.1')))
26         RemoveStackframe()
27         Return(Empty())
28     ]
29 ]

```

Code 0.24: *PicoC-ANF Pass für die Übergabe eines Feldes.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.25 werden Kompositionen `Ref(Global(Num('0')))` und `Ref(Stackframe(Num('6')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2     Name './example_fun_call_by_sharing_array.reti_blocks',
3     [
4         Block
5             Name 'fun_array_from_stackframe.2',
6             [
7                 # Return(Empty())
8                 LOADIN BAF PC -1;
9             ],
10        Block
11            Name 'fun_array_from_global_data.1',
12            [
13                # StackMalloc(Num('2'))
14                SUBI SP 2;
15                # Ref(Stackframe(Num('6'))))
16                SUBI SP 1;
17                MOVE BAF IN1;
18                SUBI IN1 8;
19                STOREIN SP IN1 1;
20                # NewStackframe(Name('fun_array_from_stackframe'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
21                MOVE BAF ACC;
22                ADDI SP 3;
23                MOVE SP BAF;
24                SUBI SP 3;
25                STOREIN BAF ACC 0;
26                LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
27                ADD ACC CS;
28                STOREIN BAF ACC -1;
29                # Exp(GoTo(Name('fun_array_from_stackframe.2')))
30                Exp(GoTo(Name('fun_array_from_stackframe.2')))
31                # RemoveStackframe()
32                MOVE BAF IN1;
33                LOADIN IN1 BAF 0;
34                MOVE IN1 SP;

```

```

35     # Return(Empty())
36     LOADIN BAF PC -1;
37 ],
38 Block
39     Name 'main.O',
40     [
41         # StackMalloc(Num('2'))
42         SUBI SP 2;
43         # Ref(Global(Num('0')))
44         SUBI SP 1;
45         LOADI IN1 0;
46         ADD IN1 DS;
47         STOREIN SP IN1 1;
48         # NewStackframe(Name('fun_array_from_global_data'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
49         MOVE BAF ACC;
50         ADDI SP 3;
51         MOVE SP BAF;
52         SUBI SP 9;
53         STOREIN BAF ACC 0;
54         LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
55         ADD ACC CS;
56         STOREIN BAF ACC -1;
57         # Exp(GoTo(Name('fun_array_from_global_data.1')))
58         Exp(GoTo(Name('fun_array_from_global_data.1')))
59         # RemoveStackframe()
60         MOVE BAF IN1;
61         LOADIN IN1 BAF 0;
62         MOVE IN1 SP;
63         # Return(Empty())
64         LOADIN BAF PC -1;
65     ]
66 ]

```

Code 0.25: RETI-Block Pass für die Übergabe eines Feldes.

0.0.1.3.3 Umsetzung einer Übergabe eines Verbundes

Die Eigenheit, dass ein **Verbund** als Argument beim **Funktionsaufruf** einer anderen Funktion in den **Stackframe** der **aufgerufenen** Funktion **kopiert** wird, wurde bereits im Unterkapitel ?? erläutert. Die Umsetzung der **Übergabe** eines **Verbundes** wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.26 erklärt.

```

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

```

```

13 struct st local_var;
14 fun_struct_from_global_data(local_var);
15 }

```

Code 0.26: *PicoC-Code für die Übergabe eines Verbundes.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.27 wird zur **Übergabe eines Verbundes**, der komplette Verbund auf den **Stack** kopiert. Das wird mittels der Komposition `Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))` bzw. der Komposition `Assign(Stack(Num('3')), Stackframe(Num('2')))` dargestellt.

Bei der **Übergabe** an eine **Funktion** wird der Zugriff auf einen gesamten **Verbund** anders gehandhabt als sonst. Normalerweise wird beim Zugriff auf einen Verbund die **Adresse** des **ersten Attributs** dieses Verbundes auf den **Stack** geschrieben. Bei der **Übergabe an eine Funktion** wird dagegen der gesamte **Verbund** auf den **Stack** kopiert.

Das wird durch eine Variable `argmode_on` implementiert, die auf `true` gesetzt wird, solange der **Funktionsaufruf** im **Picoc-ANF Pass** verarbeitet wird und wieder auf `false` gesetzt, wenn die Verarbeitung des **Funktionsaufrufs** abgeschlossen ist. Solange die Variable `argmode_on` auf `true` gesetzt ist, wird immer die **Komposition** `Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))` bzw. die **Komposition** `Assign(Stack(Num('3')), Stackframe(Num('2')))` für die Ersetzung verwendet. Ist die Variable `argmode_on` auf `false` wird die **Komposition** `Ref(Globalnum())` bzw. `Ref(Stackframe(num))` für die Ersetzung verwendet.

Die Komposition `Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))` wird verwendet, da die Verbundsvariable `local_var` der `main`-Funktion in den **Globalen Statischen Daten** liegt und die Komposition `Assign(Stack(Num('3')), Stackframe(Num('2')))` wird verwendet, da die Verbundsvariable `local_var` der Funktion `fun_struct_from_global_data` im **Stackframe** liegt.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_by_value_struct.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'fun_struct_from_stackframe.2',
6       [
7         Return(Empty())
8       ],
9     Block
10      Name 'fun_struct_from_global_data.1',
11      [
12        StackMalloc(Num('2'))
13        Assign(Stack(Num('3')), Stackframe(Num('2'))))
14        NewStackframe(Name('fun_struct_from_stackframe'), GoTo(Name('addr@next_instr'))
15        Exp(GoTo(Name('fun_struct_from_stackframe.2'))))
16        RemoveStackframe()
17        Return(Empty())
18      ],
19    Block
20      Name 'main.0',
21      [
22        StackMalloc(Num('2'))
23        Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0'))))
24        NewStackframe(Name('fun_struct_from_global_data'), GoTo(Name('addr@next_instr'))
25        Exp(GoTo(Name('fun_struct_from_global_data.1'))))

```

```

26     RemoveStackframe()
27     Return(Empty())
28 ]
29 ]

```

Code 0.27: *PicoC-ANF Pass für die Übergabe eines Verbundes.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.28 werden die Kompositionen `Assign(Stack(Num('3')), Stackframe(Num('2')))` und `Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_fun_call_by_value_struct.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'fun_struct_from_stackframe.2',
6       [
7         # Return(Empty())
8         LOADIN BAF PC -1;
9       ],
10    Block
11      Name 'fun_struct_from_global_data.1',
12      [
13        # StackMalloc(Num('2'))
14        SUBI SP 2;
15        # Assign(Stack(Num('3')), Stackframe(Num('2'))))
16        SUBI SP 3;
17        LOADIN BAF ACC -4;
18        STOREIN SP ACC 1;
19        LOADIN BAF ACC -3;
20        STOREIN SP ACC 2;
21        LOADIN BAF ACC -2;
22        STOREIN SP ACC 3;
23        # NewStackframe(Name('fun_struct_from_stackframe'), GoTo(Name('addr@next_instr'))
24        MOVE BAF ACC;
25        ADDI SP 5;
26        MOVE SP BAF;
27        SUBI SP 5;
28        STOREIN BAF ACC 0;
29        LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
30        ADD ACC CS;
31        STOREIN BAF ACC -1;
32        # Exp(GoTo(Name('fun_struct_from_stackframe.2'))))
33        Exp(GoTo(Name('fun_struct_from_stackframe.2'))))
34        # RemoveStackframe()
35        MOVE BAF IN1;
36        LOADIN IN1 BAF 0;
37        MOVE IN1 SP;
38        # Return(Empty())
39        LOADIN BAF PC -1;
40      ],
41    Block
42      Name 'main.0',
43      [

```

```
44      # StackMalloc(Num('2'))
45      SUBI SP 2;
46      # Assign(Stack(Num('3')), Global(Num('0')))
47      SUBI SP 3;
48      LOADIN DS ACC 0;
49      STOREIN SP ACC 1;
50      LOADIN DS ACC 1;
51      STOREIN SP ACC 2;
52      LOADIN DS ACC 2;
53      STOREIN SP ACC 3;
54      # NewStackframe(Name('fun_struct_from_global_data'), GoTo(Name('addr@next_instr')))
55      MOVE BAF ACC;
56      ADDI SP 5;
57      MOVE SP BAF;
58      SUBI SP 5;
59      STOREIN BAF ACC 0;
60      LOADI ACC GoTo(Name('addr@next_instr'));
61      ADD ACC CS;
62      STOREIN BAF ACC -1;
63      # Exp(GoTo(Name('fun_struct_from_global_data.1')))
64      Exp(GoTo(Name('fun_struct_from_global_data.1')))
65      # RemoveStackframe()
66      MOVE BAF IN1;
67      LOADIN IN1 BAF 0;
68      MOVE IN1 SP;
69      # Return(Empty())
70      LOADIN BAF PC -1;
71  ]
72 ]
```

Code 0.28: *RETI-Block Pass für die Übergabe eines Verbundes.*

Literatur

Vorlesungen

- Scholl, Christoph. „Betriebssysteme“. Vorlesung. Vorlesung. Universität Freiburg, 2020. URL: https://abs.informatik.uni-freiburg.de/src/teach_main.php?id=157 (besucht am 09.07.2022).