

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 dageben 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 Misst 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 Verbunden	1
0.0.1.1 Deklaration von Verbundtypen und Definition von Verbunden	1
0.0.1.2 Initialisierung von Verbunden	3
0.0.1.3 Zugriff auf Verbundsattribut	6
0.0.1.4 Zuweisung an Verbundsattribut	10
0.0.2 Umsetzung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen im Allgemeinen	12
0.0.2.1 Anfangsteil	15
0.0.2.2 Mittelteil	17
0.0.2.3 Schlussteil	20
Literatur	A

Abbildungsverzeichnis

1	Allgemeine Veranschaulichung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen.	13
---	--	----

Codeverzeichnis

0.1	PicoC-Code für die Deklaration eines Verbundstyps.	1
0.2	Abstrakter Syntaxbaum für die Deklaration eines Verbundstyps.	1
0.3	Symboltabelle für die Deklaration eines Verbundstyps.	3
0.4	PicoC-Code für Initialisierung von Verbunden.	3
0.5	Abstrakter Syntaxbaum für Initialisierung von Verbunden.	4
0.6	PicoC-ANF Pass für Initialisierung von Verbunden.	5
0.7	RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Verbunden.	6
0.8	PicoC-Code für Zugriff auf Verbundsattribut.	6
0.9	Abstrakter Syntaxbaum für Zugriff auf Verbundsattribut.	7
0.10	PicoC-ANF Pass für Zugriff auf Verbundsattribut.	9
0.11	RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Verbundsattribut.	10
0.12	PicoC-Code für Zuweisung an Verbundsattribut.	10
0.13	Abstrakter Syntaxbaum für Zuweisung an Verbundsattribut.	11
0.14	PicoC-ANF Pass für Zuweisung an Verbundsattribut.	11
0.15	RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Verbndsattribut.	12
0.16	PicoC-Code für den Anfangsteil.	15
0.17	Abstrakter Syntaxbaum für den Anfangsteil.	16
0.18	PicoC-ANF Pass für den Anfangsteil.	16
0.19	RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil.	17
0.20	PicoC-Code für den Mittelteil.	17
0.21	Abstrakter Syntaxbaum für den Mittelteil.	18
0.22	PicoC-ANF Pass für den Mittelteil.	19
0.23	RETI-Blocks Pass für den Mittelteil.	20
0.24	PicoC-Code für den Schlussteil.	21
0.25	Abstrakter Syntaxbaum für den Schlussteil.	21
0.26	PicoC-ANF Pass für den Schlussteil.	22
0.27	RETI-Blocks Pass für den Schlussteil.	24

Tabellenverzeichnis

Definitionsverzeichnis

Grammatikverzeichnis

0.0.1 Umsetzung von Verbunden

Bei Verbunden wird in diesem Unterkapitel zunächst geklärt, wie die **Deklaration von Verbundstypen** umgesetzt ist. Ist ein **Verbundstyp** deklariert, kann damit einhergehend ein **Verbund** mit diesem Verbundstyp **definiert** werden. Die Umsetzung von beidem wird in Unterkapitel 0.0.1.1 erläutert. Des Weiteren ist die Umsetzung der **Initalisierung eines Verbundes** 0.0.1.2, des **Zugriffs auf ein Verbundsattribut** 0.0.1.3 und der **Zuweisung an ein Verbundsattribut** 0.0.1.4 zu klären.

0.0.1.1 Deklaration von Verbundstypen und Definition von Verbunden

Die Umsetzung der **Deklaration** (Definition ??) eines neuen **Verbundstyps** (z.B. `struct st {int len; int ar[2];}`) und der **Definition** (Definition ??) eines **Verbundes** mit diesem **Verbundstyp** (z.B. `struct st st_var;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.1 erläutert.

```
1 struct st {int len; int ar[2];};
2
3 void main() {
4     struct st st_var;
5 }
```

Code 0.1: PicoC-Code für die Deklaration eines Verbundstyps.

Bevor ein Verbund definiert werden kann, muss erstmal ein **Verbundstyp** deklariert werden. Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.3 wird die **Deklaration eines Verbundstyps** `struct st {int len; int ar[2];}` durch die Knoten `StructDecl(Name('st'), [Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('len')) Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))])` dargestellt.

Die **Definition** einer Variable mit diesem **Verbundstyp** `struct st st_var;` wird durch die Knoten `Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var'))` dargestellt.

```
1 File
2   Name './example_struct_decl_def.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('len'))
8         Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Exp(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('st_var'))))
16      ]
17  ]
```

Code 0.2: Abstrakter Syntaxbaum für die Deklaration eines Verbundstyps.

Für den **Verbundstyp** selbst und seine **Verbundsattribute** werden in der **Symboltabelle**, die in Code 0.3 dargestellt ist Symboltabelleneinträge mit den **Schlüsseln** `st`, `len@st` und `ar@st` erstellt. Die Schlüssel der

Verbundsattribute haben einen **Suffix** `@st` angehängt, welcher für die Verbundsattribute einen Verbundstyps **indirekt** einen **Sichtbarkeitsbereich** (Definition ??) über den **Verbundstyp** selbst erzeugt. Im Unterkapitel ?? wird die **Funktionsweise** von **Sichtbarkeitsbereichen** genauer erläutert. Es gilt folglich, dass **innerhalb** eines **Verbundstyps** zwei Verbundsattribute **nicht** gleich benannt werden können, aber dafür zwei **unterschiedliche Verbundstypen** ihre Verbundsattribute gleich benennen können.

Das Symbol '`@`' wird aus einem bestimmten Grund als **Trennzeichen** verwendet, welcher bereits in Unterkapitel ?? erläutert wurde.

Die Attribute⁸ der Symboltabelleneinträge für die **Verbundsattribute** sind genauso belegt wie bei **üblichen Variablen**. Die Attribute des Symboltabelleneintrags für den **Verbundstyp** `type.qualifier`, `datatype`, `name`, `position` und `size` sind wie üblich belegt. In dem `value.address`-Attribut des Symboltabelleneintrags für den **Verbundstyp** sind die **Verbundsattribute** `[Name('len@st'), Name('ar@st')]` aufgelistet, sodass man über den **Verbundstyp** `st` als Schlüssel die **Verbundsattribute** des Verbundstyps in der **Symboltabelle** nachschlagen kann.

Für die **Definition** einer Variable `st.var@main` mit diesem **Verbundstyp** `st` wird ein **Symboltabelleneintrag** in der **Symboltabelle** angelegt. Das `datatype`-Attribut dieses **Symboltabelleneintrags** enthält dabei den Namen des **Verbundstyps** als `StructSpec(Name('st'))`. Dadurch können jederzeit alle wichtigen Informationen zu diesem **Verbundstyp**⁹ und seinen **Verbundsattributen** in der **Symboltabelle** nachgeschlagen werden.

Anmerkung

Die **Anzahl Speicherzellen** die eine Variable `st.var` belegt^a, die mit dem **Verbundstyp** `struct st {datatype1 attr1; ... datatypen attrn;}b definiert ist (struct st st_var;), berechnet sich aus der Summe der Anzahl Speicherzellen, welche die einzelnen Datentypen datatype1 ... datatypen der Verbundsattribute attr1, ... attrn des Verbundstyps belegen:`

$$size(st) = \sum_{i=1}^n size(datatype_i)^c$$

^aDie ihm `size`-Attribut des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist.

^bHier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache *LPicoC* **nicht** die manchmal etwas unpraktische Designentscheidung, auch die eckigen Klammern `[]` bei der Definition eines Feldes **hinter** die Variable zu schreiben von *L_C* übernommen. Es wird so getan, als würde der komplette **Datentyp** immer **vor** der Variable stehen: `datatype var`.

^cDie Funktion `size` berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein Datentyp belegt.

```

1 SymbolTable
2   [
3     Symbol
4     {
5       type qualifier:      Empty()
6       datatype:            IntType('int')
7       name:                Name('len@st')
8       value or address:    Empty()
9       position:            Pos(Num('1'), Num('15'))
10      size:                Num('1')
11    },
12    Symbol
13    {
14      type qualifier:      Empty()
15      datatype:            ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))

```

⁸Die über einen **Bezeichner** selektierbaren Elemente eines **Symboltabelleneintrags** und eines **Verbunds** heißen bei beiden **Attribute**.

⁹Wie z.B. vor allem die **Größe** bzw. **Anzahl an Speicherzellen**, die dieser **Verbundstyp** einnimmt.

```

16     name:                Name('ar@st')
17     value or address:    Empty()
18     position:            Pos(Num('1'), Num('24'))
19     size:                Num('2')
20 },
21 Symbol
22 {
23     type qualifier:      Empty()
24     datatype:            StructDecl(Name('st'), [Alloc(Writable(), IntType('int'),
25     ↪ Name('len'))Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')),
26     ↪ Name('ar'))])
25     name:                Name('st')
26     value or address:    [Name('len@st'), Name('ar@st')]
27     position:            Pos(Num('1'), Num('7'))
28     size:                Num('3')
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('3'), Num('5'))
37     size:                Empty()
38 },
39 Symbol
40 {
41     type qualifier:      Writable()
42     datatype:            StructSpec(Name('st'))
43     name:                Name('st_var@main')
44     value or address:    Num('0')
45     position:            Pos(Num('4'), Num('12'))
46     size:                Num('3')
47 }
48 ]

```

Code 0.3: *Symmetabelle für die Deklaration eines Verbundstyps.*

0.0.1.2 Initialisierung von Verbunden

Die Umsetzung der **Initialisierung eines Verbundes** wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.4 erklärt.

```

1 struct st1 {int *attr[2];};
2
3 struct st2 {int attr1; struct st1 attr2;};
4
5 void main() {
6     int var = 42;
7     struct st2 st = {.attr1=var, .attr2={.attr={&var, &var}}};
8 }

```

Code 0.4: *PicoC-Code für Initialisierung von Verbunden.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.5 wird die **Initialisierung eines Verbundes** `struct st1 st = {.attr1=var, .attr2={.attr={{&var, &var}}}}` mithilfe der **Knoten** `Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')), Struct(...))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_init.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st1',
6       [
7         Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], PtrDecl(Num('1'), IntType('int'))),
8           ↪ Name('attr'))
9       ],
10    StructDecl
11      Name 'st2',
12      [
13        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('attr1'))
14        Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('attr2'))
15      ],
16    FunDef
17      VoidType 'void',
18      Name 'main',
19      [],
20      [
21        Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
22        Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st2')), Name('st')),
23          ↪ Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')), Assign(Name('attr2'),
24            ↪ Struct([Assign(Name('attr'), Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))]))
25      ]
26    ]
27  ]

```

Code 0.5: Abstrakter Syntaxbaum für Initialisierung von Verbunden.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.6 wird `Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')), Struct(...))` auf fast dieselbe Weise ausgewertet, wie bei der **Initialisierung eines Feldes** in Unterkapitel ?? . Für **genauere Details** wird an dieser Stelle daher auf Unterkapitel ?? verwiesen. Um das Ganze interessanter zu gestalten, wurde das Beispiel in Code 0.4 so gewählt, dass sich daran eine komplexere, mehrstufige Initialisierung mit **verschiedenen** Datentypen erklären lässt.

Der Teilbaum `Struct([Assign(Name('attr1'),Name('var')),Assign(Name('attr2'),Struct([Assign(Name('attr'),Array([Array([Ref(Name('var')),Ref(Name('var'))]))]))]))]`, der beim äußersten **Verbund-Initialisierer**-Knoten `Struct(...)` anfängt, wird auf dieselbe Weise nach dem Prinzip der **Tiefensuche** von **links-nach-rechts** ausgewertet, wie es bei der **Initialisierung eines Feldes** in Unterkapitel ?? bereits erklärt wurde. Beim **Iterieren** über den **Teilbaum**, muss bei einem **Verbund-Initialisierer**-Knoten `Struct(...)` nur beachtet werden, dass bei den `Assign(exp1, exp2)`-Knoten¹⁰ der Teilbaum beim rechten `exp` Attribut weitergeht.

Im Allgemeinen gibt es im Teilbaum beim **Initialisieren** eines **Feldes** oder **Verbundes** auf der **rechten Seite** immer nur 3 Fälle. Auf der **rechten Seite** hat man es entweder mit einem **Verbund-Initialiser**, einem **Feld-Initialiser** oder einem **Logischen Ausdruck** zu tun. Bei einem **Feld-** oder **Verbund-Initialiser** wird über diesen nach dem Prinzip der **Tiefensuche** von **links-nach-rechts** iteriert und mithilfe von `Exp(exp)-`

¹⁰Über welche die **Attributzuweisung** (z.B. `attr1=var`) als z.B. `Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))]` dargestellt wird.

Knoten die Auswertung der **Logischen Ausdrücke** in den **Blättern** auf den **Stack** dargestellt. Der Fall, dass ein **Logischer Ausdruck** vorliegt erübrigt sich hiermit.

```

1 File
2   Name './example_struct_init.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')),
11        ↪ Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Ref(Name('var'))),
12        ↪ Ref(Name('var'))]))]))))
13        Exp(Global(Num('0')))
14        Ref(Global(Num('0')))
15        Ref(Global(Num('0')))
16        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))
17        Return(Empty())
18      ]
19    ]

```

Code 0.6: *PicoC-ANF Pass für Initialisierung von Verbunden.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.7 werden die **PicoC-Knoten** `Exp(Global(Num('0')))`, `Ref(Global(Num('0')))` und `Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_struct_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')),
17        ↪ Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Ref(Name('var'))),
18        ↪ Ref(Name('var'))]))]))))
19        # Exp(Global(Num('0')))
20        SUBI SP 1;
21        LOADIN DS ACC 0;
22        STOREIN SP ACC 1;
23        # Ref(Global(Num('0')))
24        SUBI SP 1;

```

```

23     LOADI IN1 0;
24     ADD IN1 DS;
25     STOREIN SP IN1 1;
26     # Ref(Global(Num('0')))
27     SUBI SP 1;
28     LOADI IN1 0;
29     ADD IN1 DS;
30     STOREIN SP IN1 1;
31     # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))
32     LOADIN SP ACC 1;
33     STOREIN DS ACC 3;
34     LOADIN SP ACC 2;
35     STOREIN DS ACC 2;
36     LOADIN SP ACC 3;
37     STOREIN DS ACC 1;
38     ADDI SP 3;
39     # Return(Empty())
40     LOADIN BAF PC -1;
41 ]
42 ]

```

Code 0.7: *RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Verbunden.*

0.0.1.3 Zugriff auf Verbundsattribut

Die Umsetzung des **Zugriffs auf ein Verbundsattribut** (z.B. `st.y`) wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.8 erklärt.

```

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

```

Code 0.8: *PicoC-Code für Zugriff auf Verbundsattribut.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.9 wird der **Zugriff auf ein Verbundsattribut** `st.y` mithilfe der Knoten `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [
7         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('x'))
8         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('y'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',

```



```

12     Name 'main',
13     [],
14     [
15         Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
16             ↳ Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
17         Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
18     ]

```

Code 0.9: Abstrakter Syntaxbaum für Zugriff auf Verbundsattribut.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.10 werden die Knoten `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` auf eine ähnliche Weise ausgewertet, wie die Knoten `Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))`, die in Unterkapitel ?? einen **Zugriff auf ein Feldelement** darstellen. Daher wird hier, um Redundanz zu vermeiden, nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsten auf das Unterkapitel ?? verwiesen.

Die Knoten `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` werden genauso, wie in Unterkapitel ?? durch Knoten ersetzt, die sich in **Anfangsteil** 0.0.2.1, **Mittelteil** 0.0.2.2 und **Schlusssteil** 0.0.2.3 aufteilen lassen. In diesem Fall sind es `Ref(Global(Num('0')))` (**Anfangsteil**), `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` (**Mittelteil**) und `Exp(Stack(Num('1')))` (**Schlusssteil**). Der **Anfangsteil** und **Schlusssteil** sind genau gleich, wie in Unterkapitel ??.

Nur für den **Mittelteil** werden andere Knoten `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` gebraucht. Diese Knoten `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` stellen die Aufgabe dar, die **Anfangsadresse** des **Attributs** auf welches zugegriffen wird zu berechnen und auf den Stack zu legen. Hierfür wird die **Anfangsadresse** des **Verbundes**, in dem dieses Attribut liegt verwendet. Das auf den **Stack**-Speichern dieser **Anfangsadresse** wird durch Knoten des **Anfangsteils** dargestellt.

Beim **Zugriff auf einen Feldindex** muss vorher durch z.B. `Exp(Num('3'))` die **Berechnung des Indexwerts** und das auf den **Stack** legen des Ergebnisses dargestellt werden. Beim **Zugriff auf ein Verbundsattribut** steht der Bezeichner des **Verbundsattributs** `Name('y')` dagegen bereits während des Kompilierens in `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` zur Verfügung. Der **Verbundstyp**, dem dieses Attribut gehört, wird im **Mittelteil** aus dem versteckten Attribut `datatype` des Knoten `Ref(exp, datatype)` herausgelesen. Der **Verbundstyp** wird während des Kompiliervorgangs im **PiocC-ANF Pass** dem Knoten `Ref(exp, datatype)` über das versteckten Attribut `datatype` angehängt.

Anmerkung 🔍

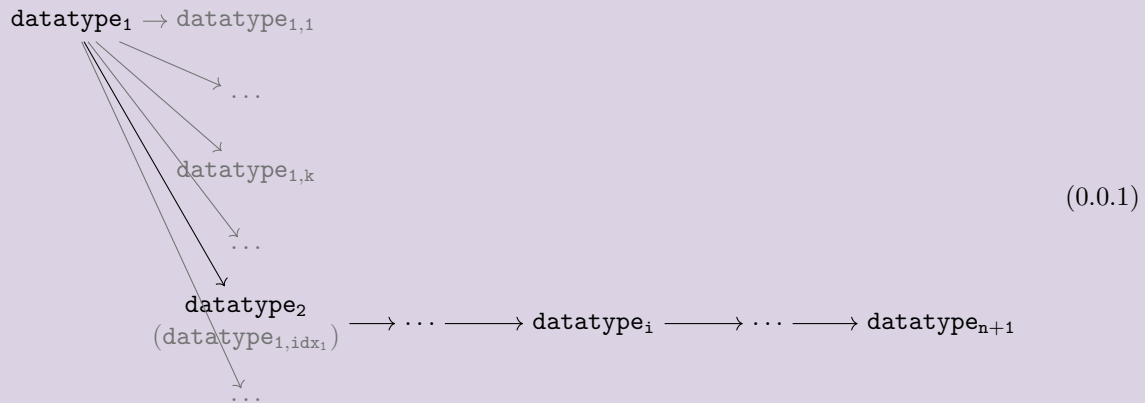
Sei datatype_i ein **Folgeglied** einer **Folge** $(\text{datatype}_i)_{i=1,\dots,n+1}$, dessen erstes Folgeglied datatype_1 ist. Dabei steht i für eine **Ebene** eines Baumes. Die Folgeglieder der Folge lassen sich **Startadressen** $\text{ref}(\text{datatype}_i)$ von Speicherbereichen $\text{ref}(\text{datatype}_i) \dots \text{ref}(\text{datatype}_i) + \text{size}(\text{datatype}_i)$ im **Hauptspeicher** zuordnen. Hierbei gilt, dass $\text{ref}(\text{datatype}_i) \leq \text{ref}(\text{datatype}_{i+1}) < \text{ref}(\text{datatype}_i) + \text{size}(\text{datatype}_i)$.^{a b}

Sei $\text{datatype}_{i,k}$ ein beliebiges **Element** / **Attribut** des **Datentyps** datatype_i . Dabei gilt: $\text{ref}(\text{datatype}_{i,k}) < \text{ref}(\text{datatype}_{i,k+1})$ und $\text{ref}(\text{datatype}_i) \leq \text{ref}(\text{datatype}_{i,k}) < \text{ref}(\text{datatype}_i) + \text{size}(\text{datatype}_i)$.

Sei $\text{datatype}_{i,\text{idx}_i}$ das **Element** / **Attribut** des **Datentyps** datatype_i für das gilt: $\text{datatype}_{i,\text{idx}_i} = \text{datatype}_{i+1}$. Hierbei ist idx_i der **Index**^c des **Elements** / **Attributs** auf welches zugegriffen wird innerhalb des Datentyps datatype_i .

In Abbildung 0.0.1 ist das ganze veranschaulicht. Die ausgegrauten Knoten stellen die verschiedenen

Elemente / **Attribute** $\text{datatype}_{i,k}$ des **Datentyps** datatype_i dar. Allerdings können nur die Knoten datatype_i **Folgeglieder** der **Folge** $(\text{datatype}_i)_{i=1,\dots,n+1}$ darstellen.



Die Berechnung der **Adresse** für die Folge $(\text{datatype}_{i,idx_i})_{i=1,\dots,n}$ verschiedener Datentypen $(\text{datatype}_{1,idx_1}, \dots, \text{datatype}_{n,idx_n})$, die das Resultat einer Aneinandereiung von **Zugriffen** auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattribute** unterschiedlicher Datentypen datatype_i ist (z.B. `*complex_var.attr3[2]`), kann mittels der Formel 0.0.2:

$$\text{ref}(\text{datatype}_{1,idx_1}, \dots, \text{datatype}_{n,idx_n}) = \text{ref}(\text{datatype}_1) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{idx_i-1} \text{size}(\text{datatype}_{i,k}) \quad (0.0.2)$$

berechnet werden.^d

Dabei darf nur das letzte Folgenglied datatype_{n+1} vom Datentyp **Zeiger** sein. Ist in einer Folge von **Datentypen** ein Knoten vom Datentyp **Zeiger**, der nicht der **letzte Datentyp** datatype_{n+1} in der Folge ist, so muss die **Adressberechnung** in 2 Adressberechnungen aufgeteilt werden. Dabei geht die **erste Adressberechnung** vom ersten Datentyp datatype_1 bis direkt zum Zeiger-Datentyp $\text{datatype}_{\text{pntr}}$ und die **zweite Adressberechnung** fängt einen Datentyp nach dem Zeiger-Datentyp $\text{datatype}_{\text{pntr}+1}$ an und geht bis zum letzten Datentyp datatype_n . Bei der **zweiten Adressberechnung** muss dabei die **Adresse** $\text{ref}(\text{datatype}_1)$ des Summanden aus der Formel 0.0.2 auf den **Inhalt**^e der Speicherzelle an der **Adresse**, welche in der **ersten Adressberechnung**^f $\text{ref}(\text{datatype}_1, \dots, \text{datatype}_{\text{pntr}})$ berechnet wurde gesetzt werden: $M[\text{ref}(\text{datatype}_1, \dots, \text{datatype}_{\text{pntr}})]$.

Die Formel 0.0.2 stellt dabei eine **Verallgemeinerung** der Formel ?? dar, die für alle möglichen Aneinandereiungen von Zugriffen auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattribute** funktioniert (z.B. `(*complex_var.attr2)[3]`). Da die Formel **allgemein** sein muss, lässt sie sich nicht so elegant mit einem Produkt \prod schreiben, wie die Formel ??, da man **nicht** davon ausgehen kann, dass alle Elemente / Attribute den **gleichen Datentyp** haben^g.

Die Knoten $\text{Ref}(\text{Global}(\text{num}))$ bzw. $\text{Ref}(\text{Stackframe}(\text{num}))$ repräsentieren dabei den Summanden $\text{ref}(\text{datatype}_1)$ in der Formel.

Die Knoten $\text{Ref}(\text{Attr}(\text{Stack}(\text{Num}('1')), \text{name}))$ bzw. $\text{Ref}(\text{Subscr}(\text{Stack}(\text{Num}('2')), \text{Stack}(\text{Num}('1'))))$ repräsentieren dabei einen Summanden $\sum_{k=1}^{idx_i-1} \text{size}(\text{datatype}_{i,k})$ in der Formel.

Die Knoten $\text{Exp}(\text{Stack}(\text{Num}('1')))$ repräsentieren dabei das Lesen des **Inhalts** $M[\text{ref}(\text{datatype}_{1,idx_1}, \dots, \text{datatype}_{n,idx_n})]$ der Speicherzelle an der finalen **Adresse**

$ref(datatype_{1,idx_1}, \dots, datatype_{n,idx_n}).$

^a $ref(datatype)$ ordnet dabei dem **Datentyp** $datatype$ eine **Startadresse** zu.

^bDie Funktion **size** berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein Datentyp belegt.

^cMan fängt hier bei den **Indices** von 1 zu zählen an.

^dDie **äußere Schleife** iteriert nacheinander über die Folge von Datentypen $datatype_i$, die aus den **Zugriffen** auf **Zeigerelmente**, **Feldelemente** oder **Verbundsattribute** resultiert. Die **innere Schleife** iteriert über alle **Elemente** oder **Attribute** $datatype_{i,k}$ des momentan betrachteten **Datentyps** $datatype_i$, die vor dem **Element** / **Attribut** $datatype_{i,idx_i}$ liegen.

^eDer **Inhalt** dieser Speicherzelle ist eine **Adresse**, da im momentanen Kontext ein **Zeiger** betrachtet wird.

^fHierbei kommt die **Adresse** des **Zeigers** selbst raus.

^gVerbundsattribute haben **unterschiedliche** Größen.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8           ↪ Num('2'))]))
9         Exp(Num('4'))
10        Exp(Num('2'))
11        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
12        // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
13        Ref(Global(Num('0')))
14        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
15        Exp(Stack(Num('1')))
16      ]
17    ]

```

Code 0.10: *PicoC-ANF Pass für Zugriff auf Verbundsattribut.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.11 werden die **PicoC-Knoten** $Ref(Global(Num('0')))$, $Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))$ und $Exp(Stack(Num('1')))$ durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.O',
6       [
7         # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8           ↪ Num('2'))]))
9         # Exp(Num('4'))
10        SUBI SP 1;
11        LOADI ACC 4;
12        STOREIN SP ACC 1;
13        # Exp(Num('2'))
14        SUBI SP 1;
15        LOADI ACC 2;

```

```

15     STOREIN SP ACC 1;
16     # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
17     LOADIN SP ACC 1;
18     STOREIN DS ACC 1;
19     LOADIN SP ACC 2;
20     STOREIN DS ACC 0;
21     ADDI SP 2;
22     # // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
23     # Ref(Global(Num('0')))
24     SUBI SP 1;
25     LOADI IN1 0;
26     ADD IN1 DS;
27     STOREIN SP IN1 1;
28     # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
29     LOADIN SP IN1 1;
30     ADDI IN1 1;
31     STOREIN SP IN1 1;
32     # Exp(Stack(Num('1')))
33     LOADIN SP IN1 1;
34     LOADIN IN1 ACC 0;
35     STOREIN SP ACC 1;
36     # Return(Empty())
37     LOADIN BAF PC -1;
38 ]
39 ]

```

Code 0.11: *RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Verbundsattribut.*

0.0.1.4 Zuweisung an Verbundsattribut

Die Umsetzung der **Zuweisung an ein Verbundsattribut** (z.B. `st.y = 42`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.12 erklärt.

```

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 0.12: *PicoC-Code für Zuweisung an Verbundsattribut.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** wird eine **Zuweisung an ein Verbundsattribut** `st.y = 42` durch die Knoten `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'pos',
6       [

```

```

7      Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('x'))
8      Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('y'))
9  ],
10  FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15          Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
16              ↪ Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
17          Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
18      ]
19  ]

```

Code 0.13: Abstrakter Syntaxbaum für Zuweisung an Verbundsattribut.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.14 werden die Knoten `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` auf eine ähnliche Weise ausgewertet, wie die Knoten `Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))`, die in Unterkapitel ?? einen **Zugriff auf ein Feldelement** darstellen. Daher wird hier, um Redundanz zu vermeiden nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsten auf das Unterkapitel ?? verwiesen.

Im Gegensatz zum Vorgehen in Unterkapitel ?? muss hier zum Auswerten des **linken** Knoten `Attr(Name('st'), Name('y'))` von `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` wie in Unterkapitel 0.0.1.3 vorgegangen werden.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8         ↪ Num('2'))]))
9         Exp(Num('4'))
10        Exp(Num('2'))
11        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
12        // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
13        Exp(Num('42'))
14        Ref(Global(Num('0')))
15        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
16        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
17        Return(Empty())
18      ]
19    ]

```

Code 0.14: PicoC-ANF Pass für Zuweisung an Verbundsattribut.

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.15 werden die **PicoC-Knoten** `Exp(Num('42'))`, `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` und `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_struct_attr_assignment.reti_blocks',
3   [
4     Block
5     Name 'main.O',
6     [
7       # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
8         ↪ Num('2'))]))
9       # Exp(Num('4'))
10      SUBI SP 1;
11      LOADI ACC 4;
12      STOREIN SP ACC 1;
13      # Exp(Num('2'))
14      SUBI SP 1;
15      LOADI ACC 2;
16      STOREIN SP ACC 1;
17      # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
18      LOADIN SP ACC 1;
19      STOREIN DS ACC 1;
20      LOADIN SP ACC 2;
21      STOREIN DS ACC 0;
22      ADDI SP 2;
23      # // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
24      # Exp(Num('42'))
25      SUBI SP 1;
26      LOADI ACC 42;
27      STOREIN SP ACC 1;
28      # Ref(Global(Num('0')))
29      SUBI SP 1;
30      LOADI IN1 0;
31      ADD IN1 DS;
32      STOREIN SP IN1 1;
33      # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
34      LOADIN SP IN1 1;
35      ADDI IN1 1;
36      STOREIN SP IN1 1;
37      # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
38      LOADIN SP IN1 1;
39      LOADIN SP ACC 2;
40      ADDI SP 2;
41      STOREIN IN1 ACC 0;
42      # Return(Empty())
43      LOADIN BAF PC -1;
44    ]
45  ]

```

Code 0.15: RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Verbandsattribut.

0.0.2 Umsetzung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen im Allgemeinen

In den Unterkapiteln ??, ?? und 0.0.1 fällt auf, dass der **Zugriff** auf **Elemente** / **Attribute** der in diesen Kapiteln vorkommenden Datentypen (**Zeiger**, **Feld** und **Verbund**) sehr **ähnlich** abläuft. Es lässt sich ein **allgemeines Vorgehen**, bestehend aus einem **Anfangsteil** 0.0.2.1 , **Mittelteil** 0.0.2.2 und **Schlussenteil** 0.0.2.3 darin erkennen. In diesem **allgemeinen Vorgehen** lassen sich die verschiedenen Zugriffsarten für Elemente bzw.

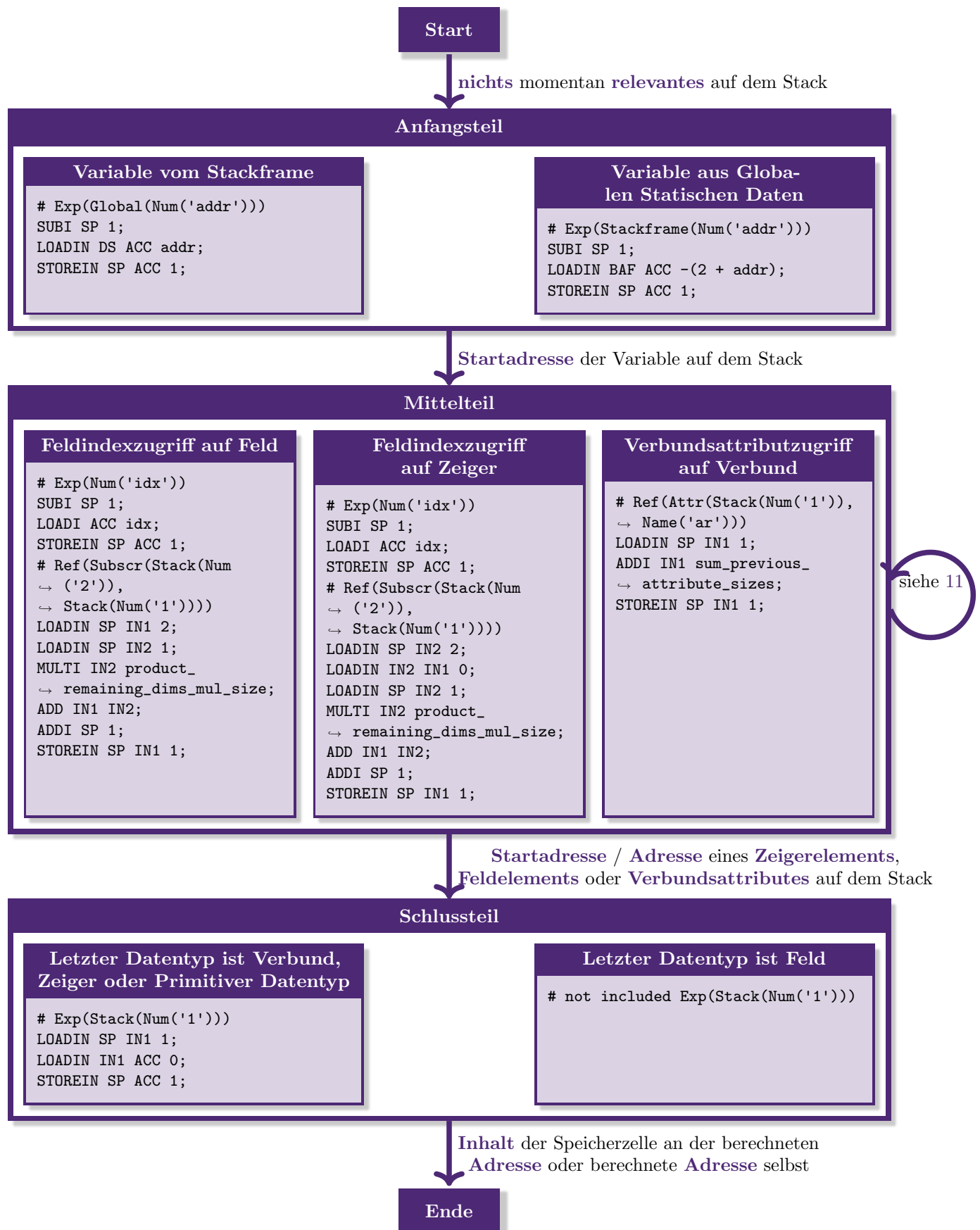


Abbildung 1: Allgemeine Veranschaulichung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen.

Attribute von **Zeigern** (z.B. `*(pntr + i)`), **Feldern** (z.B. `ar[i]`) und **Verbunden** (z.B. `st.attr`) miteinander kombinieren und so **gemischte Ausdrücke**, wie z.B. `(*st_first.ar)[0]` bilden. Dieses **allgemeine Vorgehen** ist in Abbildung 1 veranschaulicht.

Gemischte Ausdrücke sind möglich, indem im **Mittelteil**, je nachdem, ob das versteckte Attribut `datatype` des `Ref(exp, datatype)`-Knotens ein `ArrayDecl(nums, datatype)`, ein `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructSpec(name)` beinhaltet ein anderer **RETI-Code** generiert wird. Hierzu muss im `exp`-Attribut des `Ref(exp, datatype)`-Knoten die passende **Zugriffsoperation** `Subscr(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` vorliegen.

Der gerade erwähnte **RETI-Code** berechnet die **Startadresse** eines gewünschten **Zeigerelements**, **Feldelements** oder **Verbundsattributs**. Zur Berechnung wird die **Startadresse** des **Zeigers**, **Feldes** oder **Verbundes**, dessen **Attribut** oder **Element** berechnet werden soll verwendet. Die **Startadresse** wird in einem **vorherigen Berechnungsschritt** oder im **Anfangsteil** auf den **Stack** geschrieben. Bei einem **Zugriff** auf einen **Feldindex** wird zudem mithilfe von entsprechendem **RETI-Code** dafür gesorgt, dass beim Ausführen zur **Laufzeit** der **Wert** des **Index** berechnet wird und nach der **Startadresse** auf den **Stack** geschrieben wird. Dies wurde in Unterkapitel ?? bereits veranschaulicht.

Würde man bei einer Operation `Subsc(Name('var'), Num('0'))` den Datentyp der Variable `Name('var')` von `ArrayDecl([Num('3')], IntType())` zu `PointerDecl(Num('1'), IntType())` ändern, müssten beim generierten **RETI-Code** nur die **RETI-Befehle** des **Mittelteils** ausgetauscht werden. Die **RETI-Befehle** des **Anfangsteils** würden unverändert bleiben, da die Variable immer noch entweder in den **Globalen Statischen Daten** oder in einem **Stackframe** abgespeichert ist. Die **RETI-Befehle** des **Schlussteils** würden unverändert bleiben, da der **letzte Datentyp** auf den Zugriffen wird immer noch `IntType()` ist.

Im `Ref(exp, datatype)`-Knoten muss die **Zugriffsoperation** im `exp`-Attribut zum **Datentyp** im versteckten Attribut `datatype` passen. Im Fall, dass Operation und Datentyp **nicht zusammenpassen**, gibt es eine **DatatypeMismatch-Fehlermeldung**. Ein **Zugriff auf einen Feldindex** `Subscr(exp1, exp2)` kann dabei mit den Datentypen **Feld** `ArrayDecl(nums, datatype)` und **Zeiger** `PntrDecl(num, datatype)` kombiniert werden. Allerdings wird für beide Kombinationen unterschiedlicher **RETI-Code** generiert. Das liegt daran, dass in der Speicherzelle des **Zeigers** `PntrDecl(num, datatype)` eine **Adresse** steht und das **gewünschte Element** erst zu finden ist, wenn man dieser **Adresse** folgt. Hierfür muss ein anderer **RETI-Code** erzeugt werden, wie für ein **Feld** `ArrayDecl(nums, datatype)`, bei dem direkt auf dessen **Elemente** zugegriffen werden kann. Ein **Zugriff auf ein Verbundsattribut** `Attr(exp, name)` kann nur mit dem Datentyp **Struct** `StructSpec(name)` kombiniert werden.¹²

Anmerkung 🔍

Um Verwirrung vorzubeugen, wird hier vorausschauend nochmal darauf hingewiesen, dass eine **Dereferenzierung** in der Form `Deref(exp1, exp2)` nicht mehr existiert. In Unterkapitel ?? wurde bereits erklärt, dass alle Knoten `Deref(exp1, exp2)` im **PicoC-Shrink Pass** durch `Subscr(exp1, exp2)` ersetzt wurden. Das hatte den Zweck, **doppelten Code** zu vermeiden, da die **Dereferenzierung** und der **Zugriff auf ein Feldelement** jeweils gegenseitig austauschbar sind. Der **Zugriff auf einen Feldindex** steht also gleichermaßen auch für eine **Dereferenzierung**.

Der **Anfangsteil**, der durch die Knoten `Ref(Name('var'))` repräsentiert wird, ist dafür zuständig die **Startadresse** der Variablen `Name('var')` auf den **Stack** zu schreiben. Je nachdem, ob diese Variable in den **Globalen Statischen Daten** oder auf einem **Stackframe** liegt, wird ein anderer **RETI-Code** generiert.

Der **Schlussteil** wird durch die Knoten `Exp(Stack(Num('1')), datatype)` dargestellt. Wenn das versteckte Attribut `datatype` ein `CharType()`, `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructType(name)` ist, wird ein

¹¹**Startadresse** / **Adresse** eines **Zeigerelements**, **Feldelements** oder **Verbundsattributs** auf dem Stack.

¹²Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel ??, ?? und ?? erläutert.

entsprechender **RETI-Code** generiert. Dieser **RETI-Code** nutzt die **Adresse**, die in den vorherigen Phasen auf dem **Stack** berechnet wurde dazu, um den **Inhalt** der Speicherzelle an dieser **Adresse** auf den **Stack** zu schreiben. Hierbei wird die Speicherzelle, in welcher die **Adresse** steht mit dem **Inhalt** auf den sie selbst zeigt überschrieben. Bei einem `ArrayDecl(nums, datatype)` hingegen wird kein weiterer **RETI-Code** generiert, die **Adresse**, die auf dem **Stack** liegt, stellt bereits das gewünschte Ergebnis dar.

Felder haben in der Sprache L_C und somit auch in L_{PicoC} die Eigenheit, dass wenn auf ein gesamtes **Feld** zugegriffen wird¹³, die **Adresse** des ersten Elements ausgegeben wird und nicht der **Inhalt** der Speicherzelle des ersten Elements. Bei allen anderen in der Sprache L_{PicoC} implementierten Datentypen¹⁴ wird immer der **Inhalt** der Speicherzelle der ersten Elements bzw. Elements ausgegeben.

0.0.2.1 Anfangsteil

Die Umsetzung des **Anfangsteils**, bei dem die **Startadresse** einer Variable auf den **Stack** geschrieben wird (z.B. `&st`), wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.16 erklärt.

```

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

Code 0.16: PicoC-Code für den Anfangsteil.

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.17 wird die **Referenzierung** `&complex_var` mit den Knoten `Exp(Ref(Name('complex_var')))` dargestellt. Üblicherweise wird für eine **Referenzierung** einfach nur `Ref(Name('complex_var'))` geschrieben, aber da beim Erstellen des **Abstrakten Syntaxbaums** jeder **Logische Ausdruck** in ein `Exp(exp)` eingebettet wird, ist das `Ref(Name('complex_var'))` in ein `Exp(exp)` eingebettet. **Semantisch** macht es in diesem Zwischenschritt der Kompilierung **keinen Unterschied**, ob an einer Stelle `Ref(Name('complex_var'))` oder `Exp(Ref(Name('complex_var')))` steht. Man müsste an vielen Stellen eine gesonderte **Fallunterscheidung** aufstellen, um bei `Exp(Ref(Name('complex_var')))` das `Exp(exp)` zu entfernen. Das `Exp(exp)` wird allerdings in den darauffolgenden **Passes** sowieso herausgefiltert. Daher wurde darauf verzichtet den Code ohne triftigen Grund **komplexer** zu machen.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'ar_with_len',
6       [
7         Alloc(Writable(), IntType('int'), Name('len'))
```

¹³Und nicht auf ein **Element** des Feldes, welches den Datentyp `CharType()` oder `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructType(name)` hat.

¹⁴Also `CharType()`, `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructType(name)`.

```

8      Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))
9  ],
10  FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15          Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
16              ↪ Name('st_ar')))
17          Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PtrDecl(Num('1'),
18              ↪ IntType('int')))), Name('complex_var')))
19          Exp(Ref(Name('complex_var')))
20      ],
21  FunDef
22      VoidType 'void',
23      Name 'fun',
24      [],
25      [
26          Exp(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
27              ↪ Name('st_ar')))
28          Exp(Alloc(Writable(), PtrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
29              ↪ Name('complex_var')))
30          Exp(Ref(Name('complex_var')))
31      ]
32  ]

```

Code 0.17: *Abstrakter Syntaxbaum für den Anfangsteil.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.18 werden die Knoten `Exp(Ref(Name('complex_var')))`, je nachdem, ob die Variable `Name('complex_var')` in den **Globalen Statischen Daten** oder in einem **Stackframe** liegt durch die Knoten `Ref(Global(Num('9')))` oder `Ref(Stackframe(Num('9')))` ersetzt.¹⁵

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Exp(Ref(Name('complex_var')))
8         Ref(Global(Num('9')))
9         Return(Empty())
10      ],
11     Block
12       Name 'fun.0',
13       [
14         // Exp(Ref(Name('complex_var')))
15         Ref(Stackframe(Num('9')))
16         Return(Empty())
17      ]
18  ]

```

¹⁵Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel ??, ?? und ?? erläutert.

Code 0.18: *PicoC-ANF Pass für den Anfangsteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.19 werden die **PicoC-Knoten** `Ref(Global(Num('9')))` bzw. `Ref(Stackframe(Num('9')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Exp(Ref(Name('complex_var')))
8         # Ref(Global(Num('9')))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI IN1 9;
11        ADD IN1 DS;
12        STOREIN SP IN1 1;
13        # Return(Empty())
14        LOADIN BAF PC -1;
15      ],
16    Block
17      Name 'fun.0',
18      [
19        # // Exp(Ref(Name('complex_var')))
20        # Ref(Stackframe(Num('9')))
21        SUBI SP 1;
22        MOVE BAF IN1;
23        SUBI IN1 11;
24        STOREIN SP IN1 1;
25        # Return(Empty())
26        LOADIN BAF PC -1;
27      ]
28    ]

```

Code 0.19: *RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil.***0.0.2.2 Mittelteil**

Der Umsetzung des **Mittelteils**, bei dem die **Startadresse** bzw. **Adresse** des letzten Attributs oder Elements einer Aneinanderreihung von Zugriffen auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** oder **Verbundsattribute** berechnet wird (z.B. `(*complex_var.ar)[2-2]`), wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.20 erklärt.

```

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

```

Code 0.20: *PicoC-Code für den Mittelteil.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.21 wird die Aneinandererihung von Zugriffen auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattribute** (*complex_var.ar)[2-2] durch die Knoten `Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('complex_var'),Name('ar')),Num('0')),BinOp(Num('2'),Sub('-',Num('2')))))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int'))),
8           ↪ Name('ar'))
9       ],
10    FunDef
11      VoidType 'void',
12      Name 'main',
13      [],
14      [
15        Assign(Alloc(Writable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('var')),
16          ↪ Array([Num('42')]))
17        Assign(Alloc(Writable(), StructSpec(Name('st')), Name('complex_var')),
18          ↪ Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
19        Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')), BinOp(Num('2'),
20          ↪ Sub('-', Num('2')))))
21      ]
22  ]

```

Code 0.21: Abstrakter Syntaxbaum für den Mittelteil.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.22 werden die Knoten `Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('complex_var'),Name('ar')),Num('0')),BinOp(Num('2'),Sub('-',Num('2')))))` durch die Knoten `Ref(Attr(Stack(Num('1')),Name('ar')))`, `Exp(Num('2'))`, `Exp(BinOp(Stack(Num('2')),Sub('-',Stack(Num('1'))))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')),Stack(Num('1'))))` und `Ref(Subscr(Stack(Num('2')),Stack(Num('1'))))` ersetzt. Bei z.B. dem `Subscr(exp1,exp2)`-Knoten wird dieser einfach dem `exp`-Attribut des `Ref(exp)`-Knoten zugewiesen und die **Indexberechnung** für `exp2` davor gezogen. Bei `Ref(Subscr(Stack(Num('2')),Stack(Num('1'))))` wird über `Stack(Num('1'))` auf das Ergebnis der **Indexberechnung** auf dem **Stack** zugegriffen und über `Stack(Num('2'))` auf das Ergebnis der **Adressberechnung** auf dem **Stack** zugegriffen. Die gerade erwähnte **Indexberechnung** wird in diesem Fall durch die Knoten `Exp(Num(str))` und `Exp(BinOp(Stack(Num('2')),Sub('-',Stack(Num('1')))))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('complex_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
11        Ref(Global(Num('0')))
12        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))

```

```

13      // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')),
14      ↪ BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))
15      Ref(Global(Num('1')))
16      Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
17      Exp(Num('0'))
18      Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
19      Exp(Num('2'))
20      Exp(Num('2'))
21      Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
22      Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
23      Exp(Stack(Num('1')))
24      Return(Empty())
25  ]

```

Code 0.22: *PicoC-ANF Pass für den Mittelteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.23 werden die **PicoC-Knoten** `Ref(Attr(Stack(Num('1')),Name('ar')))`, `Exp(Num('2'))`, `Exp(BinOp(Stack(Num('2')),Sub('-'),Stack(Num('1'))))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')),Stack(Num('1'))))` und `Ref(Subscr(Stack(Num('2')),Stack(Num('1'))))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt. Bei der Generierung des **RETI-Code** muss auch das versteckte Attribut `datatype` des `Ref(exp, datatype)`-Knoten berücksichtigt werden, wie es am Anfang dieses Unterkapitels 0.0.2 zusammen mit der Abbildung 1 bereits erklärt wurde.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_main_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
13        LOADIN SP ACC 1;
14        STOREIN DS ACC 0;
15        ADDI SP 1;
16        # // Assign(Name('complex_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
17        # Ref(Global(Num('0')))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI IN1 0;
20        ADD IN1 DS;
21        STOREIN SP IN1 1;
22        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
23        LOADIN SP ACC 1;
24        STOREIN DS ACC 1;
25        ADDI SP 1;
26        # // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')),
27        ↪ BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))
28        # Ref(Global(Num('1')))
29        SUBI SP 1;

```

```

29     LOADI IN1 1;
30     ADD IN1 DS;
31     STOREIN SP IN1 1;
32     # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
33     LOADIN SP IN1 1;
34     ADDI IN1 0;
35     STOREIN SP IN1 1;
36     # Exp(Num('0'))
37     SUBI SP 1;
38     LOADI ACC 0;
39     STOREIN SP ACC 1;
40     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
41     LOADIN SP IN2 2;
42     LOADIN IN2 IN1 0;
43     LOADIN SP IN2 1;
44     MULTI IN2 1;
45     ADD IN1 IN2;
46     ADDI SP 1;
47     STOREIN SP IN1 1;
48     # Exp(Num('2'))
49     SUBI SP 1;
50     LOADI ACC 2;
51     STOREIN SP ACC 1;
52     # Exp(Num('2'))
53     SUBI SP 1;
54     LOADI ACC 2;
55     STOREIN SP ACC 1;
56     # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
57     LOADIN SP ACC 2;
58     LOADIN SP IN2 1;
59     SUB ACC IN2;
60     STOREIN SP ACC 2;
61     ADDI SP 1;
62     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
63     LOADIN SP IN1 2;
64     LOADIN SP IN2 1;
65     MULTI IN2 1;
66     ADD IN1 IN2;
67     ADDI SP 1;
68     STOREIN SP IN1 1;
69     # Exp(Stack(Num('1')))
70     LOADIN SP IN1 1;
71     LOADIN IN1 ACC 0;
72     STOREIN SP ACC 1;
73     # Return(Empty())
74     LOADIN BAF PC -1;
75 ]
76 ]

```

Code 0.23: RETI-Blocks Pass für den Mittelteil.

0.0.2.3 Schlussteil

Die Umsetzung des **Schlussteils**, bei dem ein **Attribut** oder **Element**, dessen **Adresse** im **Anfangsteil** 0.0.2.1 und **Mittelteil** 0.0.2.2 auf dem **Stack** berechnet wurde, auf den **Stack** gespeichert wird¹⁶, wird

¹⁶Und dabei die Speicherzelle der **Adresse** selbst überschreibt.

im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.24 erklärt.

```

1 struct st {int attr[2];};
2
3 void main() {
4     int complex_var1[1][2];
5     struct st complex_var2[1];
6     int var = 42;
7     int *pntr1 = &var;
8     int **complex_var3 = &pntr1;
9
10    complex_var1[0];
11    complex_var2[0];
12    *complex_var3;
13 }
```

Code 0.24: PicoC-Code für den Schlussteil.

Die Generierung des **Abstrakten Syntaxbaumes** in Code 0.25 verläuft wie üblich.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'st',
6       [
7         Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('attr'))
8       ],
9     FunDef
10      VoidType 'void',
11      Name 'main',
12      [],
13      [
14        Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], Num('2')], IntType('int')),
15          ↪ Name('complex_var1'))
16        Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))),
17          ↪ Name('complex_var2'))
18        Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
19        Assign(Alloc(Writeable(), PtrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr1')),
20          ↪ Ref(Name('var')))
21        Assign(Alloc(Writeable(), PtrDecl(Num('2'), IntType('int')), Name('complex_var3')),
22          ↪ Ref(Name('pntr1')))
23        Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
24        Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
25        Exp(Deref(Name('complex_var3'), Num('0')))
26      ]
27    ]
28  ]
```

Code 0.25: Abstrakter Syntaxbaum für den Schlussteil.

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.26 wird das am Anfang dieses **Unterkapitels** angesprochene auf den **Stack** speichern des **Attributs** oder **Elements**, dessen **Adresse** in den vorherigen Schritten auf dem **Stack** berechnet wurde mit den Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` dargestellt.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
11        Ref(Global(Num('4')))
12        Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
13        // Assign(Name('complex_var3'), Ref(Name('pntr1')))
14        Ref(Global(Num('5')))
15        Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
16        // Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
17        Ref(Global(Num('0')))
18        Exp(Num('0'))
19        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
20        Exp(Stack(Num('1')))
21        // Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
22        Ref(Global(Num('2')))
23        Exp(Num('0'))
24        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
25        Exp(Stack(Num('1')))
26        // Exp(Subscr(Name('complex_var3'), Num('0')))
27        Ref(Global(Num('6')))
28        Exp(Num('0'))
29        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
30        Exp(Stack(Num('1')))
31        Return(Empty())
32      ]
33    ]

```

Code 0.26: *PicoC-ANF Pass für den Schlussteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.27 werden die **PicoC-Knoten** `Exp(Stack(Num('1')))` durch **semantisch** entsprechende **RETI-Knoten** ersetzt, wenn das versteckte Attribut `datatype` im `Exp(exp,datatype)`-Knoten kein **Feld** `ArrayDecl(nums, datatype)` enthält. Wenn doch, dann ist bei einem **Feld** die **Adresse**, die in vorherigen Schritten auf dem **Stack** berechnet wurde bereits das gewünschte Ergebnis. Genauer wurde am Anfang dieses Unterkapitels 0.0.2 zusammen mit der Abbildung 1 bereits erklärt.

```

1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         # // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         # Exp(Num('42'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 42;

```



```

11      STOREIN SP ACC 1;
12      # Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
13      LOADIN SP ACC 1;
14      STOREIN DS ACC 4;
15      ADDI SP 1;
16      # // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
17      # Ref(Global(Num('4')))
18      SUBI SP 1;
19      LOADI IN1 4;
20      ADD IN1 DS;
21      STOREIN SP IN1 1;
22      # Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
23      LOADIN SP ACC 1;
24      STOREIN DS ACC 5;
25      ADDI SP 1;
26      # // Assign(Name('complex_var3'), Ref(Name('pntr1')))
27      # Ref(Global(Num('5')))
28      SUBI SP 1;
29      LOADI IN1 5;
30      ADD IN1 DS;
31      STOREIN SP IN1 1;
32      # Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
33      LOADIN SP ACC 1;
34      STOREIN DS ACC 6;
35      ADDI SP 1;
36      # // Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
37      # Ref(Global(Num('0')))
38      SUBI SP 1;
39      LOADI IN1 0;
40      ADD IN1 DS;
41      STOREIN SP IN1 1;
42      # Exp(Num('0'))
43      SUBI SP 1;
44      LOADI ACC 0;
45      STOREIN SP ACC 1;
46      # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
47      LOADIN SP IN1 2;
48      LOADIN SP IN2 1;
49      MULTI IN2 2;
50      ADD IN1 IN2;
51      ADDI SP 1;
52      STOREIN SP IN1 1;
53      # // not included Exp(Stack(Num('1')))
54      # // Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
55      # Ref(Global(Num('2')))
56      SUBI SP 1;
57      LOADI IN1 2;
58      ADD IN1 DS;
59      STOREIN SP IN1 1;
60      # Exp(Num('0'))
61      SUBI SP 1;
62      LOADI ACC 0;
63      STOREIN SP ACC 1;
64      # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
65      LOADIN SP IN1 2;
66      LOADIN SP IN2 1;
67      MULTI IN2 2;

```

```
68     ADD IN1 IN2;
69     ADDI SP 1;
70     STOREIN SP IN1 1;
71     # Exp(Stack(Num('1')))
72     LOADIN SP IN1 1;
73     LOADIN IN1 ACC 0;
74     STOREIN SP ACC 1;
75     # // Exp(Subscr(Name('complex_var3'), Num('0')))
76     # Ref(Global(Num('6')))
77     SUBI SP 1;
78     LOADI IN1 6;
79     ADD IN1 DS;
80     STOREIN SP IN1 1;
81     # Exp(Num('0'))
82     SUBI SP 1;
83     LOADI ACC 0;
84     STOREIN SP ACC 1;
85     # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
86     LOADIN SP IN2 2;
87     LOADIN IN2 IN1 0;
88     LOADIN SP IN2 1;
89     MULTI IN2 1;
90     ADD IN1 IN2;
91     ADDI SP 1;
92     STOREIN SP IN1 1;
93     # Exp(Stack(Num('1')))
94     LOADIN SP IN1 1;
95     LOADIN IN1 ACC 0;
96     STOREIN SP ACC 1;
97     # Return(Empty())
98     LOADIN BAF PC -1;
99 ]
100 ]
```

Code 0.27: *RETI-Blocks Pass für den Schlussteil.*

Literatur