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

Betreung:
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 Schrifftlichen 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 Selbverständlichkeit 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 heraus, 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 Leidenschafft heraus tun, auch wenn es für sie keine Vorteile hat. Tobias[1] 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 habe[2], er hat sich bei der Korrektur dieser Schrifftlichen 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 Selbverständlichkeit, 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

[1] Wie auch Prof. Dr. Scholl. Hier geht es aber erstmal um Tobias.
[2] Wofür 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 Selbverständlichkeit, 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 ausgeinandergesetzt 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 perönliches Interessengebiet fällt[6]. Das Aufschreiben dieser Schrifftlichen Ausarbeitung hat mir dagegen eher weniger Spaß gemacht[7]. 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 Programmiesprache kann in der Verwendung ziemlich wilkürlich 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.

[3] Der PicoC-Compiler hätte schließlich mehr Funktionalitäten haben können.
[4] Vielleicht 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.
[6] Womit nicht alle Studenten so viel Glück haben.
[7] Dieses ständige überlegen, wo man möglicherweise eine Erklärlücke hat, ob man nicht was wichtiges ausgelassen hat usw.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Codeverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Definitionsverzeichnis

Grammatikverzeichnis

0.0.1 Umsetzung von Zeigern

Die **Zeigern** ist in diesem Unterkapitel schnell erklärt, auch Dank eines kleinen **Taschenspielertricks**[8]. Hierbei sind nur die **Operationen** für **Referenzierung** und **Dereferenzierung** in den Unterkapiteln 0.0.1.1 und 0.0.1.2 zu erläutern. **Referenzierung** kann dazu genutzt werden einen **Zeiger** zu **initialisieren** und **Dereferenzierung** kann dazu genutzt werden, um auf diesen später zuzugreifen.

0.0.1.1 Referenzierung

Die **Referenzierung** (z.B. `&var`) ist eine **Operation** bei der ein **Zeiger** auf eine **Location** (Definition **??**) in Form der **Anfangsadresse** dieser Location als Ergebnis zurückgegeben wird. Die Umsetzung der **Referenzierung** wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.1 erklärt.

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

Code 0.1: *PicoC-Code für Zeigerreferenzierung.*

Der Knoten `Ref(Name('var'))` repräsentiert im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.2 eine **Referenzierung** `&var` und der Knoten `PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))` repräsentiert einen Zeiger `*pntr`.

```
1 File
2   Name './example_pntr_ref.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10        Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr')),
          ↪  Ref(Name('var')))
11      ]
12  ]
```

Code 0.2: *Abstrakter Syntaxbaum für Zeigerreferenzierung.*

Bevor man einem **Zeiger** eine **Adresse** (z.B. `&var`) zuweisen kann, muss dieser erstmal **definiert** sein. Dafür braucht es einen Eintrag in der **Symboltabelle** in Code 0.3.

Anmerkung

Die **Anzahl Speicherzellen**[a], die ein Zeiger[b] `datatype *pntr` belegt ist dabei immer[c]: $size(type(\texttt{pntr})) = 1$ *Speicherzelle.*[def]

[a] Die im `size`-Attribut der **Symboltabelle** eingetragen ist.
[b] Z.B. ein Zeiger auf ein Feld von Integern: `int (*pntr)[3]`.
[c] Hier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache L_{PicoC} **nicht** die manchmal etwas

[8] Später mehr dazu.

unpraktische Designentscheidung, die eckigen Klammern `[]` bei der Definition eines Feldes **hinter** die Variable zu schreiben von L_C übernommen. Es wird so getan, als würde der restliche **Datentyp** komplett **vor** der Variable stehen: `datatype var`.

[d]Eine **Speicherzelle** ist in der **RETI-Architektur**, wie in Unterkapitel ?? erklärt 4 *Byte* breit.

[e]Die Funktion *size* berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein **Datentyp** belegt.

[f]Die Funktion *type* ordnet einer **Variable** ihren **Datentyp** zu. Das ist notwendig, weil die Funktion *size* als **Definitionsmenge** Datentypen hat.

```
SymbolTable
  [
    Symbol
      {
        type qualifier:         Empty()
        datatype:               FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
        name:                   Name('main')
        value or address:       Empty()
        position:               Pos(Num('1'), Num('5'))
        size:                   Empty()
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Writeable()
        datatype:               IntType('int')
        name:                   Name('var@main')
        value or address:       Num('0')
        position:               Pos(Num('2'), Num('6'))
        size:                   Num('1')
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Writeable()
        datatype:               PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))
        name:                   Name('pntr@main')
        value or address:       Num('1')
        position:               Pos(Num('3'), Num('7'))
        size:                   Num('1')
      }
  ]
```

Code 0.3: *Symboltabelle für Zeigerreferenzierung.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.4 wird der Knoten `Ref(Name('var'))` durch die Knoten `Ref(GlobalRead(Num('0')))` und `Assign(GlobalWrite(Num('1')),Tmp(Num('1')))` ersetzt. Im Fall, dass in `Ref(exp))` das `exp` vielleicht nicht direkt ein `Name('var')` enthält und `exp` z.B. ein `Subscr(Attr(Name('var'),Name('attr')),Num('1'))` ist, sind noch **weitere Anweisungen** zwischen den Zeilen `11` und `12` nötig. Diese weiteren Anweisungen würden sich bei z.B. `Subscr(Attr(Name('var'),Name('attr')),Num('1'))` um das Übersetzen von `Subscr(exp)` und `Attr(exp,name)` nach dem Schema in Unterkapitel 0.0.4.2 kümmern.[9]

```
File
  Name './example_pntr_ref.picoc_mon',
```

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

```
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('pntr'), Ref(Name('var')))
11        Ref(Global(Num('0')))
12        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13        Return(Empty())
14      ]
15  ]
```

Code 0.4: *PicoC-ANF Pass für Zeigerreferenzierung.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.5 werden die **PicoC-Knoten** `Ref(Global(Num('0')))` und `Assign(Global(Num('1')),Stack(Num('1')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
1 File
2   Name './example_pntr_ref.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('pntr'), 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        # Return(Empty())
27        LOADIN BAF PC -1;
28      ]
29  ]
```

Code 0.5: *RETI-Blocks Pass für Zeigerreferenzierung.*

0.0.1.2 Dereferenzierung

Die **Dereferenzierung** (z.B. `*var`) ist eine **Operation** bei der einem **Zeiger** zur Location (Definition **??**) hin **gefolgt** wird, auf welche dieser zeigt und das Ergebnis z.B. der **Inhalt** der ersten Speicherzelle der referenzierten Location ist. Die Umsetzung von **Dereferenzierung** wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.6 erklärt.

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

Code 0.6: *PicoC-Code für Zeigerdereferenzierung.*

Der Knoten `Deref(Name('var'), Num('0'))` repräsentiert im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.7 eine **Dereferenzierung** `*var`. Es gibt hierbei 3 Fälle. Bei der Anwendung von **Zeigerarithmetik**, wie z.B. `*(var + 2 - 1)` übersetzt sich diese zu `Deref(Name('var'), BinOp(Num('2'), Sub(), Num('1')))` und bei z.B. `*(var - 2 - 1)` zu `Deref(Name('var'), UnOp(Minus(), BinOp(Num('2'), Sub(), Num('1'))))`. Bei einer normalen **Dereferenzierung**, wie z.B. `*var`, übersetzt sich diese zu `Deref(Name('var'), Num('0'))`[10].

```
1 File
2   Name './example_pntr_deref.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
10        Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr')),
          ↪  Ref(Name('var')))
11        Exp(Deref(Name('pntr'), Num('0')))
12      ]
13  ]
```

Code 0.7: *Abstrakter Syntaxbaum für Zeigerdereferenzierung.*

Im **PicoC-Shrink Pass** in Code 0.8 wird ein **Trick** angewandet, bei dem jeder Knoten `Deref(exp1, exp2)` einfach durch den Knoten `Subscr(exp1, exp2)` ersetzt wird. Der Trick besteht darin, dass der **Dereferenzierungsoperator** (z.B. `*(var + 1)`) sich identisch zum **Operator für den Zugriff auf einen Feldindex** (z.B. `var[1]`) verhält, wie es bereits im Unterkapitel **??** erläutert wurde. Damit spart man sich viele vermeidbare **Fallunterscheidungen** und **doppelten Code** und kann die Übersetzung der **Derefenzierung** (z.B. `*(var + 1)`) einfach von den Routinen für einen **Zugriff auf einen Feldindex** (z.B. `var[1]`) übernehmen lassen. Das Vorgehen bei der Umsetzung eines **Zugriffs auf einen Feldindex** (z.B. `*(var + 1)`) wird in Unterkapitel 0.0.2.2 erläutert.[11]

[10] Das `Num('0')` steht dafür, dass dem **Zeiger gefolgt** wird, aber danach **nicht** noch mit einem **Versatz** von der **Größe des Unterdatentyps** (Definition 0.1) auf eine nebenliegende Location zugegriffen wird.

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

```
File
  Name './example_pntr_deref.picoc_shrink',
  [
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
        Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr')),
        ↪  Ref(Name('var')))
        Exp(Subscr(Name('pntr'), Num('0')))
      ]
  ]
```

Code 0.8: *PicoC-Shrink Pass für Zeigerdereferenzierung.*

0.0.2 Umsetzung von Feldern

Bei Feldern ist in diesem Unterkapitel die Umsetzung der **Innitialisierung eines Feldes** 0.0.2.1, des **Zugriffs auf einen Feldindex** 0.0.2.2 und der **Zuweisung an einen Feldindex** 0.0.2.3 zu klären.

0.0.2.1 Initialisierung eines Feldes

Die Umsetzung der **Initialisierung** eines **Feldes** (z.B. `int ar[2][1] = {{3+1}, {5}}`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.9 erklärt.

```
void fun() {
  int ar[2][2] = {{3, 4}, {5, 6}};
}

void main() {
  int ar[2][1] = {{3+1}, {5}};
}
```

Code 0.9: *PicoC-Code für die Initialisierung eines Feldes.*

Die **Initialisierung** eines **Feldes** `intar[2][1]={{3+1},{5}}` wird im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.10 mithilfe der Knoten `Assign(Alloc(Writeable(),ArrayDecl([Num('2'),Num('1')],IntType('int')),Name('ar')),Array([Array([BinOp(Num('3'),Add('+'),Num('1'))]),Array([Num('5')])]))` dargestellt.

```
File
  Name './example_array_init.ast',
  [
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'fun',
      [],
      [
```

```
9         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('2')], IntType('int')),
          ↪  Name('ar')), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'), Num('6')])]))
10      ],
11    FunDef
12      VoidType 'void',
13      Name 'main',
14      [],
15      [
16        Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')),
          ↪  Name('ar')), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
          ↪  Array([Num('5')])]))
17      ]
18  ]
```

Code 0.10: *Abstrakter Syntaxbaum für die Initialisierung eines Feldes.*

Bei der **Initialisierung** eines **Feldes** wird zuerst `Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')))` ausgewertet, da eine Variable zuerst definiert sein muss, bevor man sie verwenden kann[12]. Das **Definieren** der Variable `ar` erfolgt mittels der **Symboltabelle**, die in Code 0.11 dargestellt ist.

Auf dem **Stackframe** wird ein Feld verglichen zur Wachstumrichtung des Stacks **rückwärts** in den Stackframe geschrieben und die **relative Adresse des ersten Elements** als Adresse des Feldes in der **Symboltabelle** in Code 0.11 genommen. Dies ist in Tabelle 1 für das Beispiel aus Code 0.9 dargestellt. Es wird hier so getann, als würde die **Funktion** `fun` ebenfalls **aufgerufen** werden. Obwohl der **Stack** zwar verglichen zu den **Globalen Statischen Daten** in die entgegengesetzte Richtung wächst, haben Felder in den **Globalen Statischen Daten** und in einem **Stackframe** auf diese Weise die gleiche Ausrichtung. Das macht den **Zugriff auf einen Feldindex** in Unterkapitel 0.0.2.2 deutlich unkomplizierter. Auf diese Weise muss beim **Zugriff auf einen Feldindex** nicht zwischen **Stackframe** und **Globalen Statischen Daten** unterschieden werden.

Relativ-adresse	Wert	Register
0	4	CS
1	5	
...	...	
3	3	
2	4	
1	5	
0	6	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 1: *Datensegment nach der Initialisierung beider Felder.*

Anmerkung

Die **Anzahl Speicherzellen**, die ein Feld[a] `datatype ar`$[\texttt{dim}_1]\dots[\texttt{dim}_n]$ belegt[b], berechnet sich aus der **Mächtigkeit** der einzelnen **Dimensionen** des Feldes und der **Anzahl Speicherzellen**, die der **Datentyp**, den alle **Feldelemente** haben belegt: $size(type(\texttt{ar})) = \left(\prod_{j=1}^{n} \texttt{dim}_j\right) \cdot size(\texttt{datatype})$.[cd]

[12] Das widerspricht der üblichen Auswertungsreihenfolge beim **Zuweisungsoperator** `=`, der **rechtsassoziativ** ist. Der **Zuweisungsoperator** `=` tritt allerdings erst später in Aktion.

[a] Die im `size`-Attribut des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist.
[b] Hier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache L_{PicoC} **nicht** die manchmal etwas unpraktische Designentscheidung, die eckigen Klammern `[]` bei der Definition eines Feldes **hinter** die Variable zu schreiben von L_C übernommen. Es wird so getan, als würde der restliche **Datentyp** komplett **vor** der Variable stehen: `datatype var`.
[c] Die Funktion *size* berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein Datentyp belegt.
[d] Die **Funktion** *type* ordnet einer **Variable** ihren **Datentyp** zu. Das ist notwendig, weil die Funktion *size* als **Definitionsmenge** Datentypen hat.

```
SymbolTable
  [
    Symbol
      {
        type qualifier:         Empty()
        datatype:               FunDecl(VoidType('void'), Name('fun'), [])
        name:                   Name('fun')
        value or address:       Empty()
        position:               Pos(Num('1'), Num('5'))
        size:                   Empty()
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Writeable()
        datatype:               ArrayDecl([Num('2'), Num('2')], IntType('int'))
        name:                   Name('ar@fun')
        value or address:       Num('3')
        position:               Pos(Num('2'), Num('6'))
        size:                   Num('4')
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Empty()
        datatype:               FunDecl(VoidType('void'), Name('main'), [])
        name:                   Name('main')
        value or address:       Empty()
        position:               Pos(Num('5'), Num('5'))
        size:                   Empty()
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Writeable()
        datatype:               ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int'))
        name:                   Name('ar@main')
        value or address:       Num('0')
        position:               Pos(Num('6'), Num('6'))
        size:                   Num('2')
      }
  ]
```

Code 0.11: *Symboltabelle für die Initialisierung eines Feldes.*

Im **PiocC-ANF Pass** in Code 0.12 werden zuerst die Knoten für die **Logischen Ausdrücke** in den **Blättern** des Teilbaumes, dessen Wurzel der **Feld-Initialisierer**-Knoten `Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]), Array([Num('5')])])` ist ausgewertet. Die Auswertung geschieht hierbei nach dem Prinzip der

Tiefensuche, von **links-nach-rechts**. Bei dieser Auswertung werden diese Knoten für die **Logischen Ausdrücke** durch Knoten erstetzt, welche das Ergebnis dieser Ausdrücke auf den **Stack** schreiben[13].

Im finalen Schritt muss zwischen den **Globalen Statischen Daten** der `main`-Funktion und dem **Stackframe** der Funktion `fun` unterschieden werden. Die auf dem **Stack** ausgewerteten **Logischen Ausdrücke** werden mittels der Knoten `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` (für **Globale Statische Daten**) bzw. der Knoten `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('5')))` (für **Stackframe**) zu den **Globalen Statischen Daten** bzw. auf den **Stackframe** geschrieben.[14]

Zur Veranschaulichung ist in Tabelle 2 ein **Ausschnitt des Datensegments** nach der Initialisierung des Feldes der Funktion `main`-Funktion dargestellt. Die auf den **Stack** ausgewerteten **Logischen Ausdrücke** sind in grauer Farbe markiert. Die **Kopien** dieser ausgewerteten Logischen Ausdrücke in den **Globalen Statischen Daten**, welche die einzelnen Elemente des Feldes darstellen sind in roter Farbe markiert. In Tabelle 3 ist das gleiche, allerdings für die Funktion `fun` und den **Stackframe** der Funktion `fun` dargestellt.

Relativ-adresse	Wert	Register
0	4	CS
1	5	
...	...	
1	5	
2	4	SP
...	...	

Tabelle 2: *Ausschnitt des Datensegments nach der Initialisierung des Feldes in der `main`-Funktion.*

Relativ-adresse	Wert	Register
...	...	
1	6	
2	5	
3	4	
4	3	SP
3	3	
2	4	
1	5	
0	6	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 3: *Ausschnitt des Datensegments nach der Initialisierung des Feldes in der Funktion `fun`.*

Der **Trick** ist hier, dass egal wieviele **Dimensionen** und was für einen **grundlegenden Datentyp**[15] das Feld hat, man letztendlich immer das gesamte Feld erwischt, wenn man z.B. mit den **Knoten** `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` einfach so viele Speicherzellen rüberkopiert, wie das Feld **Speicherzellen** belegt.

[13] Da der **Zuweisungsoperator** `=` **rechtsassoziativ** ist und auch rein **logisch**, weil man nichts zuweisen kann, was man noch nicht berechnet hat.
[14] Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel **??**, **??** und **??** erläutert.
[15] Z.B. ein **Verbund**, sodass es ein **„Feld von Verbunden“** ist.

In die Knoten `Global('0')` und `Stackframe('3')` wird hierbei die **Startadresse** des jeweiligen Feldes geschrieben. Daher müssen nach dem **PicoC-ANF Pass** nie mehr Variablen in der **Symboltabelle** nachgesehen werden und es ist möglich direkt abzulesen, ob diese in Bezug zu den **Globalen Statischen Daten** oder dem **Stackframe** stehen.

```
File
  Name './example_array_init.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'fun.1',
      [
        // Assign(Name('ar'), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'),
        ↪  Num('6')])]))
        Exp(Num('3'))
        Exp(Num('4'))
        Exp(Num('5'))
        Exp(Num('6'))
        Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
        Return(Empty())
      ],
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('ar'), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
        ↪  Array([Num('5')])]))
        Exp(Num('3'))
        Exp(Num('1'))
        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
        Exp(Num('5'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

Code 0.12: *PicoC-ANF Pass für die Initialisierung eines Feldes.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.13 werden die **PicoC-Knoten** `Exp(exp)` und `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('5')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
File
  Name './example_array_init.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'fun.1',
      [
        # // Assign(Name('ar'), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'),
        ↪  Num('6')])]))
        # Exp(Num('3'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 3;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Exp(Num('4'))
```

```
13        SUBI SP 1;
14        LOADI ACC 4;
15        STOREIN SP ACC 1;
16        # Exp(Num('5'))
17        SUBI SP 1;
18        LOADI ACC 5;
19        STOREIN SP ACC 1;
20        # Exp(Num('6'))
21        SUBI SP 1;
22        LOADI ACC 6;
23        STOREIN SP ACC 1;
24        # Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
25        LOADIN SP ACC 1;
26        STOREIN BAF ACC -2;
27        LOADIN SP ACC 2;
28        STOREIN BAF ACC -3;
29        LOADIN SP ACC 3;
30        STOREIN BAF ACC -4;
31        LOADIN SP ACC 4;
32        STOREIN BAF ACC -5;
33        ADDI SP 4;
34        # Return(Empty())
35        LOADIN BAF PC -1;
36      ],
37    Block
38      Name 'main.0',
39      [
40        # // Assign(Name('ar'), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
          ↪  Array([Num('5')])]))
41        # Exp(Num('3'))
42        SUBI SP 1;
43        LOADI ACC 3;
44        STOREIN SP ACC 1;
45        # Exp(Num('1'))
46        SUBI SP 1;
47        LOADI ACC 1;
48        STOREIN SP ACC 1;
49        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
50        LOADIN SP ACC 2;
51        LOADIN SP IN2 1;
52        ADD ACC IN2;
53        STOREIN SP ACC 2;
54        ADDI SP 1;
55        # Exp(Num('5'))
56        SUBI SP 1;
57        LOADI ACC 5;
58        STOREIN SP ACC 1;
59        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
60        LOADIN SP ACC 1;
61        STOREIN DS ACC 1;
62        LOADIN SP ACC 2;
63        STOREIN DS ACC 0;
64        ADDI SP 2;
65        # Return(Empty())
66        LOADIN BAF PC -1;
67      ]
68  ]
```

Code 0.13: *RETI-Blocks Pass für die Initialisierung eines Feldes.*

0.0.2.2 Zugriff auf einen Feldindex

Die Umsetzung des **Zugriffs auf einen Feldindex** (z.B. `ar[0]`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.14 erklärt.

```
1 void fun() {
2   int ar[1] = {42};
3   ar[0];
4 }
5
6 void main() {
7   int ar[3] = {1, 2, 3};
8   ar[1+1];
9 }
```

Code 0.14: *PicoC-Code für Zugriff auf einen Feldindex.*

Der **Zugriff auf einen Feldindex** `ar[0]` wird im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.15 mithilfe des Knotens `Subscr(Name('ar'), Num('0'))` dargestellt.

```
1 File
2   Name './example_array_access.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'fun',
7       [],
8       [
9         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('ar')),
          ↪  Array([Num('42')]))
10        Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
11      ],
12    FunDef
13      VoidType 'void',
14      Name 'main',
15      [],
16      [
17        Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')), Name('ar')),
          ↪  Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
18        Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
19      ]
20  ]
```

Code 0.15: *Abstrakter Syntaxbaum für Zugriff auf einen Feldindex.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.16 wird zuerst das Schreiben der **Adresse** einer Variable `Name('ar')` des Knoten `Subscr(Name('ar'), Num('0'))` auf den **Stack** dargestellt. Bei den **Globalen Statischen Daten** der `main`-Funktion wird das durch die Knoten `Ref(Global(Num('0')))` dargestellt und beim **Stackframe**

der Funktionm `fun` wird das durch die Knoten `Ref(Stackframe(Num('2')))` dargestellt. Diese Phase wird als **Anfangsteil** 0.0.4.1 bezeichnet.

Die nächste Phase wird als **Mittelteil** 0.0.4.2 bezeichnet. In dieser Phase wird die **Adresse**, ab der das **Feldelement** des Feldes auf das zugegriffen werden soll anfängt berechnet. Dabei wurde im **Anfangsteil** bereits die **Anfangsadresse** des Feldes, in dem dieses **Feldelement** liegt auf den **Stack** gelegt. Ein **Index** eines Feldelements auf das zugegriffen werden soll kann auch durch das Ergebnis eines **komplexeren Ausdrucks**, wie z.B. `ar[1 + var]` bestimmt sein, in dem auch **Variablen** vorkommen. Aus diesem Grund kann dieser nicht während des **Kompilierens** berechnet werden, sondern muss zur **Laufzeit** berechnet werden.

Daher muss zuerst der Wert des **Index**, dessen Adresse berechnet werden soll auf den **Stack** gelegt werden, was z.B. im einfachsten Fall durch `Exp(Num('0'))` dargestellt wird. Danach kann die **Adresse des Index** berechnet werden, was durch die Knoten `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` dargestellt wird.

In Tabelle 4 ist das ganze **veranschaulicht**. In dem Auschnitt liegt die **Startadresse** $2^{31} + 67$ des Felds `int ar[3] = {1, 2, 3}` der `main`-Funktion auf dem **Stack** und darüber wurde der **Wert des Index** `[1+1]` berechnet und auf dem Stack gespeichert (in rot markiert). Der Wert des Index wurde noch **nicht** auf die **Startadresse** des Felds **draufaddiert**.[16]

Absolutadresse	Wert	Register
...	...	
$2^{31} + 64$	1	SP
$2^{31} + 65$	2	
$2^{31} + 66$	$2^{31} + 67$	
$2^{31} + 67$	1	
$2^{31} + 68$	2	
$2^{31} + 69$	3	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 4: *Ausschnitt des Datensegments bei der Adressberechnung.*

Zur **Adressberechnung** ist es notwendig auf die **Dimensionen** (z.B. `[Num('3')]`) des Feldes, auf dessen **Feldelement** zugegriffen werden soll, zugreifen zu können. Daher ist der **Felddatentyp** (z.B. `ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))`) dem Knoten `Ref(exp, datatype)` als verstecktes Attribut `datatype` angehängt. Das versteckte Attribut wird zuvor, während des Kompiliervorgangs im **PiocC-ANF Pass** dem Knoten `Ref(exp, datatype)` angehängt.

Je nachdem, ob mehrere `Subscr(exp,exp)` eine Komposition bilden (z.B. `Subscr(Subscr(Name('var'), Num('1')), Num('1'))`) ist es notwendig mehrere **Adressberechnungsschritte für den Index** `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` einzuleiten. Es muss auch möglich sein, z.B. einen **Attributzugriff** `var.attr` und einen **Zugriff auf einen Arryindex** `var[1]` miteinander zu kombinieren, was in Unterkapitel 0.0.4.2 allgemein erklärt wird.

Die letzte Phase wird als **Schlussteil** 0.0.4.3 bezeichnet. In dieser Phase wird der **Inhalt** des **Index**, dessen **Adresse** in den vorherigen Schritten berechnet wurde nun auf den **Stack** geschrieben. Hierfür wird die **Adresse**, die in den vorherigen Schritten auf dem **Stack** berechnet wurde verwendet. Beim Schreiben des **Inhalts dieses Index** auf den **Stack**, wird dieser die **Adresse** auf dem Stack ersetzen, die in den vorherigen Schritten berechnet wurde. Dies wird durch den Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` dargestellt. In Tabelle 5 ist das ganze veranschaulicht. In rot ist der **Inhalt des Feldindex** markiert, der auf den **Stack** geschrieben wurde.

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

Absolutadresse	Wert	Register
...	...	
$2^{31}+64$	1	
$2^{31}+65$	2	SP
$2^{31}+66$	3	
$2^{31}+67$	1	
$2^{31}+68$	2	
$2^{31}+69$	3	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 5: *Ausschnitt des Datensegments nach Schlussteil.*

Je nachdem auf welchen **Unterdatentyp** (Definition 0.1) im **Kontext** zuletzt zugegriffen wird, wird der **PicoC-Knoten** `Exp(Stack(Num('1')))` durch verschiedene **semantisch** entsprechende **RETI-Knoten** ersetzt (siehe Unterkapitel 0.0.4.3 für genauere Erklärung). Der **Unterdatentyp** ist dabei über das versteckte Attribut `datatype` des `Exp(exp, datatype)`-Knoten zugänglich.

Definition 0.1: Unterdatentyp

***Datentyp**, der durch einen **Teilbaum** dargestellt wird. Dieser Teilbaum ist ein **Teil** eines Baumes, der einen gesamten **Datentyp** darstellt.*

Der einzige **Unterschied**, je nachdem, ob der **Zugriff auf einen Feldindex** (z.B. `ar[1]`) in der `main`-Funktion oder der Funktion `fun` erfolgt, ist eigentlich nur beim **Anfangsteil**, beim Schreiben der **Adresse** der Variable `ar` auf den **Stack** zu finden. Hierbei wird, je nachdem, ob eine Variable in den **Globalen Statischen Daten** liegt oder sie auf dem **Stackframe** liegt, das ganze durch die Knoten `Ref(Global(Num('0')))` oder die Knoten `Ref(Stackframe(Num('1')))` dargestellt, die durch unterschiedliche **semantisch** entsprechende **RETI-Befehle** ersetzt werden.

Anmerkung

Die Berechnung der **Adresse**, ab der ein **Feldelement** am Ende einer Aneinanderreihung von Zugriffen auf **Feldelemente** eines Feldes `datatype ar`$[\texttt{dim}_1]\dots[\texttt{dim}_n]$ abgespeichert ist[a], kann mittels der Formel 0.0.1:

$$ref(\texttt{ar}[\texttt{idx}_1]\dots[\texttt{idx}_n]) = ref(\texttt{ar}) + \left(\sum_{i=1}^{n}\left(\prod_{j=i+1}^{n}\texttt{dim}_j\right)\cdot\texttt{idx}_i\right)\cdot size(\texttt{datatype}) \tag{0.0.1}$$

aus der Betriebssysteme Vorlesung Scholl, „Betriebssysteme“ berechnet werden[b c].

Die Knoten `Ref(Global(num))` bzw. `Ref(Stackframe(num))` repräsentieren dabei den Summanden für die **Anfangsadresse** $ref(\texttt{ar})$ in der Formel.

Der Knoten `Exp(num)` repräsentiert dabei einen **Index** beim **Zugriff auf ein Feldelement** (z.B. `j` in `a[i][j][k]`), der als Faktor $\texttt{idx}_i$ in der Formel auftaucht.

Die Knoten `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` repräsentieren dabei einen **ausmultiplizierten Summanden** $\left(\prod_{j=i+1}^{n}\texttt{dim}_j\right)\cdot\texttt{idx}_i\cdot size(\texttt{datatype})$ in der Formel.

Die Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` repräsentieren dabei das Lesen des **Inhalts** $M\,[ref(\texttt{ar}[\texttt{idx}_1]\ldots[\texttt{idx}_n])]$ der Speicherzelle an der finalen **Adresse** $ref(\texttt{ar}[\texttt{idx}_1]\ldots[\texttt{idx}_n])$.[d]

[a] Hier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache L_{PicoC} **nicht** die manchmal etwas unpraktische Designentscheidung, die eckigen Klammern `[]` bei der Definition eines Feldes **hinter** die Variable zu schreiben von L_C übernommen. Es wird so getan, als würde der restliche **Datentyp** komplett **vor** der Variable stehen: `datatype var`.
[b] ref(`exp`) steht dabei für die Berechnung der **Adresse** von `exp`, wobei `exp` z.B. `ar[3][2]` sein könnte.
[c] Die Funktion *size* berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein Datentyp belegt.
[d] $M[addr]$ ist ein Zugriff auf den **Inhalt** der Speicherzelle an der **Adresse** *addr* im **SRAM**, in der **UART** oder im **EPROM**.

```
File
  Name './example_array_access.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'fun.1',
      [
        // Assign(Name('ar'), Array([Num('42')]))
        Exp(Num('42'))
        Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
        // Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
        Ref(Stackframe(Num('0')))
        Exp(Num('0'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Stack(Num('1')))
        Return(Empty())
      ],
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('ar'), Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
        Exp(Num('1'))
        Exp(Num('2'))
        Exp(Num('3'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('3')))
        // Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
        Ref(Global(Num('0')))
        Exp(Num('1'))
        Exp(Num('1'))
        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Stack(Num('1')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

Code 0.16: *PicoC-ANF Pass für Zugriff auf einen Feldindex.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.17 werden die **PicoC-Knoten** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2'))undStack(Num('1'))))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
File
  Name './example_array_access.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'fun.1',
      [
        # // Assign(Name('ar'), Array([Num('42')]))
        # Exp(Num('42'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 42;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Assign(Stackframe(Num('0')), Stack(Num('1')))
        LOADIN SP ACC 1;
        STOREIN BAF ACC -2;
        ADDI SP 1;
        # // Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
        # Ref(Stackframe(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        MOVE BAF IN1;
        SUBI IN1 2;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Exp(Num('0'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 0;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        LOADIN SP IN1 2;
        LOADIN SP IN2 1;
        MULTI IN2 1;
        ADD IN1 IN2;
        ADDI SP 1;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Exp(Stack(Num('1')))
        LOADIN SP IN1 1;
        LOADIN IN1 ACC 0;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Return(Empty())
        LOADIN BAF PC -1;
      ],
    Block
      Name 'main.0',
      [
        # // Assign(Name('ar'), Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
        # Exp(Num('1'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 1;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Exp(Num('2'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 2;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Exp(Num('3'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 3;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('3')))
        LOADIN SP ACC 1;
```

```
58          STOREIN DS ACC 2;
59          LOADIN SP ACC 2;
60          STOREIN DS ACC 1;
61          LOADIN SP ACC 3;
62          STOREIN DS ACC 0;
63          ADDI SP 3;
64          # // Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
65          # Ref(Global(Num('0')))
66          SUBI SP 1;
67          LOADI IN1 0;
68          ADD IN1 DS;
69          STOREIN SP IN1 1;
70          # Exp(Num('1'))
71          SUBI SP 1;
72          LOADI ACC 1;
73          STOREIN SP ACC 1;
74          # Exp(Num('1'))
75          SUBI SP 1;
76          LOADI ACC 1;
77          STOREIN SP ACC 1;
78          # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
79          LOADIN SP ACC 2;
80          LOADIN SP IN2 1;
81          ADD ACC IN2;
82          STOREIN SP ACC 2;
83          ADDI SP 1;
84          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
85          LOADIN SP IN1 2;
86          LOADIN SP IN2 1;
87          MULTI IN2 1;
88          ADD IN1 IN2;
89          ADDI SP 1;
90          STOREIN SP IN1 1;
91          # Exp(Stack(Num('1')))
92          LOADIN SP IN1 1;
93          LOADIN IN1 ACC 0;
94          STOREIN SP ACC 1;
95          # Return(Empty())
96          LOADIN BAF PC -1;
97      ]
98  ]
```

Code 0.17: *RETI-Blocks Pass für Zugriff auf einen Feldindex.*

0.0.2.3 Zuweisung an Feldindex

Die Umsetzung einer **Zuweisung** eines Wertes an einen **Feldindex** (z.B. `ar[2] = 42;`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.18 erläutert.

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

Code 0.18: *PicoC-Code für Zuweisung an Feldindex.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.19 wird eine **Zuweisung** an einen **Feldindex** `ar[2] = 42;` durch die Knoten `Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))` dargestellt.

```
File
  Name './example_array_assignment.ast',
  [
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))
        Assign(Subscr(Name('ar'), Num('1')), Num('42'))
      ]
  ]
```

Code 0.19: *Abstrakter Syntaxbaum für Zuweisung an Feldindex.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.20 wird zuerst die **rechte** Seite von `Assign(Subscr(Name('ar'), Num('1')), Num('42'))` ausgewertet durch: `Exp(Num('42'))`. Dies ist in Tabelle 6 für das Beispiel in Code 0.18 veranschaulicht. Der **Wert** 42 (in rot markiert) wird auf den **Stack** geschrieben.

Absolutadresse	Wert	Register
...	...	
$2^{31}+64$	...	
$2^{31}+65$	...	SP
$2^{31}+66$	42	
$2^{31}+67$	...	
$2^{31}+68$	...	
$2^{31}+69$	...	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 6: *Ausschnitt des Datensegments nach Auswerten der rechten Seite.*

Danach ist das Vorgehen und die damit verbundenen Knoten, die dieses Vorgehen darstellen: `Ref(Global(Num('0')))`, `Exp(Num('2'))` und `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` identisch zum **Anfangsteil** und **Mittelteil** aus dem vorherigen Unterkapitel 0.0.2.2. Die eben genannten Knoten stellen die Berechnung der **Adresse** des **Index**, dem das Ergebnis des Logischen Ausdrucks auf der rechten Seite des **Zuweisungsoperators** `=` zugewiesen wird dar. Dies ist in Tabelle 7 für das Beispiel in Code 0.18 veranschaulicht. Die **Adresse** $2^{31}+68$ (in rot markiert) des **Index** wurde auf dem **Stack** berechnet.

Absolutadresse	Wert	Register
...	...	
$2^{31} + 64$	1	SP
$2^{31} + 65$	$2^{31} + 68$	
$2^{31} + 66$	42	
$2^{31} + 67$	...	
$2^{31} + 68$	...	
$2^{31} + 69$	...	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 7: *Ausschnitt des Datensegments vor Zuweisung.*

Zum Schluss stellen die Knoten `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))` die **Zuweisung** `stack(1) = stack(2)` des Ergebnisses des Ausdrucks auf der **rechten Seite der Zuweisung** zum **Feldindex** dar. Die **Adresse** des Feldindex wurde im Schritt davor berechnet. Die **Zuweisung** des Wertes 42 an den **Feldindex** `[1]` ist in Tabelle 8 veranschaulicht (in rot markiert).[17]

Absolutadresse	Wert	Register
...	...	
$2^{31} + 64$	1	
$2^{31} + 65$	$2^{31} + 68$	
$2^{31} + 66$	42	SP
$2^{31} + 67$	...	
$2^{31} + 68$	42	
$2^{31} + 69$	...	
...	...	
...	...	BAF

Tabelle 8: *Ausschnitt des Datensegments nach Zuweisung.*

```
1  File
2    Name './example_array_assignment.picoc_mon',
3    [
4      Block
5        Name 'main.0',
6        [
7          // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('1')), Num('42'))
8          Exp(Num('42'))
9          Ref(Global(Num('0')))
10         Exp(Num('1'))
11         Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
12         Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
13         Return(Empty())
14       ]
15   ]
```

Code 0.20: *PicoC-ANF Pass für Zuweisung an Feldindex.*

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

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.21 werden die **PicoC-Knoten** `Exp(Num('42'))`, `Ref(Global(Num('0')))`, `Exp(Num('1'))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')),Stack(Num('1'))))` und `Assign(Stack(Num('1')),Stack(Num('2')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
File
  Name './example_array_assignment.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        # // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('1')), Num('42'))
        # Exp(Num('42'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 42;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Ref(Global(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 0;
        ADD IN1 DS;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Exp(Num('1'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 1;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        LOADIN SP IN1 2;
        LOADIN SP IN2 1;
        MULTI IN2 1;
        ADD IN1 IN2;
        ADDI SP 1;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
        LOADIN SP IN1 1;
        LOADIN SP ACC 2;
        ADDI SP 2;
        STOREIN IN1 ACC 0;
        # Return(Empty())
        LOADIN BAF PC -1;
      ]
  ]
```

Code 0.21: *RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Feldindex.*

0.0.3 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 0.0.3.1 erläutert. Des Weiteren ist die Umsetzung der **Innitialisierung eines Verbundes** 0.0.3.2, des **Zugriffs auf ein Verbundsattribut** 0.0.3.3 und der **Zuweisung an ein Verbundsattribut** 0.0.3.4 zu klären.

0.0.3.1 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 0.22 erläutert.

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

Code 0.22: *PicoC-Code für die Deklaration eines Verbundstyps.*

Bevor ein Verbund definiert werden kann, muss erstmal ein **Verbundstyp** deklariert werden. Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.24 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 0.23: *Abstrakter Syntaxbaum für die Deklaration eines Verbundstyps.*

Für den **Verbundstyp** selbst und seine **Verbundsattribute** werden in der **Symboltabelle**, die in Code 0.24 dargestellt ist Symboltabelleneintrage 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 Attribute[18] 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 or 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**[19] und seinen **Verbundsattributen** in der **Symboltabelle** nachgeschlagen werden.

Anmerkung

Die **Anzahl Speicherzellen**, die ein **Verbund** `struct st st_var` belegt[a], der mit dem **Verbundstyp** `struct st` $\{$`datatype`$_1$ `attr`$_1$; ...; `datatype`$_n$ `attr`$_n$;$\}$ definiert ist[b], berechnet sich aus der Summe der **Anzahl Speicherzellen**, welche die einzelnen **Datentypen** `datatype`$_1$ ... `datatype`$_n$ der **Verbundsattribute** `attr`$_1$, ... `attr`$_n$ des **Verbundstyps** belegen: $size(type(\texttt{st\_var})) = \sum_{i=1}^{n} size(\texttt{datatype}_i)$.[c][d]

[a] Die ihm `size`-Attribut des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist.
[b] Hier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache L_{PicoC} **nicht** die manchmal etwas unpraktische Designentscheidung, die eckigen Klammern `[]` bei der Definition eines Feldes **hinter** die Variable zu schreiben von L_C übernommen. Es wird so getan, als würde der restliche **Datentyp** komplett **vor** der Variable stehen: `datatype var`.
[c] Die Funktion *size* berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein **Datentyp** belegt.
[d] Die Funktion *type* ordnet einer **Variable** ihren **Datentyp** zu. Das ist notwendig, weil die Funktion *size* als **Definitionsmenge** Datentypen hat.

```
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       {
```

[18] Die über einen **Bezeichner** selektierbaren Elemente eines **Symboltabelleneintrags** und eines **Verbunds** heißen bei beiden **Attribute**.
[19] Wie z.B. vor allem die **Größe** bzw. **Anzahl an Speicherzellen**, die dieser **Verbundstyp** einnimmt.

```
14        type qualifier:         Empty()
15        datatype:               ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))
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(Writeable(), IntType('int'),
          ↪  Name('len'))Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')),
          ↪  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:         Writeable()
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 0.24: *Symboltabelle für die Deklaration eines Verbundstyps.*

0.0.3.2 Initialisierung von Verbunden

Die Umsetzung der **Initialisierung eines Verbundes** wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.25 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 0.25: *PicoC-Code für Initialisierung von Verbunden.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.26 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.

```
File
  Name './example_struct_init.ast',
  [
    StructDecl
      Name 'st1',
      [
        Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))),
        ↪  Name('attr'))
      ],
    StructDecl
      Name 'st2',
      [
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('attr1'))
        Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('attr2'))
      ],
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
        Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st2')), Name('st')),
        ↪  Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')), Assign(Name('attr2'),
        ↪  Struct([Assign(Name('attr'), Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))]))]))]))])
      ]
  ]
```

Code 0.26: *Abstrakter Syntaxbaum für Initialisierung von Verbunden.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.27 wird `Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')), Struct(...))` auf fast dieselbe Weise ausgewertet, wie bei der **Initialisierung eines Feldes** in Unterkapitel 0.0.2.1. Für **genauere Details** wird an dieser Stelle daher auf Unterkapitel 0.0.2.1 verwiesen. Um das Ganze interessanter zu gestalten, wurde das Beispiel in Code 0.25 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 0.0.2.1 bereits erklärt wurde. Beim **Iterieren** über den **Teilbaum**, muss bei einem **Verbund-Initialisierer**-Knoten `Struct(...)` nur beachtet werden, dass bei den `Assign(exp1, exp2)`-Knoten[20] der Teilbaum beim rechten `exp2` 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

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

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

```
File
  Name './example_struct_init.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('var'), Num('42'))
        Exp(Num('42'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
        // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')),
        ↪  Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Ref(Name('var')),
        ↪  Ref(Name('var'))]))]))]))
        Exp(Global(Num('0')))
        Ref(Global(Num('0')))
        Ref(Global(Num('0')))
        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

Code 0.27: *PicoC-ANF Pass für Initialisierung von Verbunden.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.28 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.

```
File
  Name './example_struct_init.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        # // Assign(Name('var'), Num('42'))
        # Exp(Num('42'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 42;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
        LOADIN SP ACC 1;
        STOREIN DS ACC 0;
        ADDI SP 1;
        # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')),
        ↪  Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Ref(Name('var')),
        ↪  Ref(Name('var'))]))]))]))
        # Exp(Global(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        LOADIN DS ACC 0;
        STOREIN SP ACC 1;
```

```
21        # Ref(Global(Num('0')))
22        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 0.28: *RETI-Blocks Pass für Initialisierung von Verbunden.*

0.0.3.3 Zugriff auf Verbundsattribut

Die Umsetzung des **Zugriffs auf ein Verbundsattribut** (z.B. `st.y`) wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.29 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 0.29: *PicoC-Code für Zugriff auf Verbundsattribut.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.30 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(Writeable(), IntType('int'), Name('x'))
8         Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('y'))
9       ],
```

```
10      FunDef
11        VoidType 'void',
12        Name 'main',
13        [],
14        [
15          Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
            ↪  Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
16          Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
17        ]
18    ]
```

Code 0.30: *Abstrakter Syntaxbaum für Zugriff auf Verbundsattribut.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.31 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 0.0.2.2 einen **Zugriff auf ein Feldelement** darstellen. Daher wird hier, um Redundanz zu vermeiden, nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsten auf das Unterkapitel 0.0.2.2 verwiesen.

Die Knoten `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` werden genauso, wie in Unterkapitel 0.0.2.2 durch Knoten ersetzt, die sich in **Anfangsteil** 0.0.4.1, **Mittelteil** 0.0.4.2 und **Schlussteil** 0.0.4.3 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')))` (**Schlussteil**). Der **Anfangsteil** und **Schlussteil** sind genau gleich umgesetzt, wie in Unterkapitel 0.0.2.2.

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: `Ref(Global(Num('0')))`.

Beim **Zugriff auf einen Feldindex** musste 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

Im Unterkapitel 0.0.4.2 wird mit der **allgemeinen Formel** 0.0.3 ein allgemeines Vorgehen zur **Adressberechnung** für alle möglichen Aneinanderreihungen von **Zugriffen** auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattribute** erklärt. Um die **Adresse**, ab der ein **Verbundsattribut** am Ende einer Aneinanderreihung von **Zugriffen** auf **Verbundsattribute** abgespeichert ist, zu berechnen, kann diese **allgemeine Formel** 0.0.3 ebenfalls genutzt werden. Im Gegensatz zu **Feldern**, lässt sich bei Verbunden **keine** vereinfachte Formel aus der allgemeinen Formel bilden, da die **Verbundsattribute** eines Verbunds **unterschiedlich viele Speicherzellen** belegen können.

```
1 File
2   Name './example_struct_attr_access.picoc_mon',
3   [
```

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

Code 0.31: *PicoC-ANF Pass für Zugriff auf Verbundsattribut.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.32 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.0',
6       [
7         # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
          ↪  Num('2'))]))
8         # Exp(Num('4'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 4;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Exp(Num('2'))
13        SUBI SP 1;
14        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 0.32: *RETI-Blocks Pass für Zugriff auf Verbundsattribut.*

0.0.3.4 Zuweisung an Verbundsattribut

Die Umsetzung der **Zuweisung an ein Verbundsattribut** (z.B. `st.y = 42`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.33 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 0.33: *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(Writeable(), IntType('int'), Name('x'))
8          Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('y'))
9        ],
10     FunDef
11       VoidType 'void',
12       Name 'main',
13       [],
14       [
15         Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
           ↪  Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
16         Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
17       ]
18   ]
```

Code 0.34: *Abstrakter Syntaxbaum für Zuweisung an Verbundsattribut.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.35 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 0.0.2.3 einen **Zugriff auf ein Feldelement** darstellen. Daher wird hier, um Redundanz zu vermeiden nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsten auf das Unterkapitel 0.0.2.3 verwiesen.

Im Gegensatz zum Vorgehen in Unterkapitel 0.0.2.3 muss hier zum Auswerten des **linken** Knoten `Attr(Name('st'),Name('y'))` von `Assign(Attr(Name('st'),Name('y')),Num('42'))` wie in Unterkapitel 0.0.3.3 vorgegangen werden.

```
File
  Name './example_struct_attr_assignment.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
        ↪  Num('2'))]))
        Exp(Num('4'))
        Exp(Num('2'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
        // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
        Exp(Num('42'))
        Ref(Global(Num('0')))
        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

Code 0.35: *PicoC-ANF Pass für Zuweisung an Verbundsattribut.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.36 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.

```
File
  Name './example_struct_attr_assignment.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        # // Assign(Name('st'), Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'),
        ↪  Num('2'))]))
        # Exp(Num('4'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 4;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Exp(Num('2'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 2;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
        LOADIN SP ACC 1;
```

```
18          STOREIN DS ACC 1;
19          LOADIN SP ACC 2;
20          STOREIN DS ACC 0;
21          ADDI SP 2;
22          # // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
23          # Exp(Num('42'))
24          SUBI SP 1;
25          LOADI ACC 42;
26          STOREIN SP ACC 1;
27          # Ref(Global(Num('0')))
28          SUBI SP 1;
29          LOADI IN1 0;
30          ADD IN1 DS;
31          STOREIN SP IN1 1;
32          # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
33          LOADIN SP IN1 1;
34          ADDI IN1 1;
35          STOREIN SP IN1 1;
36          # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
37          LOADIN SP IN1 1;
38          LOADIN SP ACC 2;
39          ADDI SP 2;
40          STOREIN IN1 ACC 0;
41          # Return(Empty())
42          LOADIN BAF PC -1;
43      ]
44  ]
```

Code 0.36: *RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Verbndsattribut.*

0.0.4 Umsetzung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen im Allgemeinen

In den Unterkapiteln 0.0.1, 0.0.2 und 0.0.3 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** 0.0.4.1 , **Mittelteil** 0.0.4.2 und **Schlussteil** 0.0.4.3 darin erkennen. In diesem **allgemeinen Vorgehen** lassen sich die verschiedenen Zugriffsarten für **Elemente** / **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. Die **Formelzeichen** der **Formeln** in Abbildung 1 werden zusammen mit Formel 0.0.1 und Formel 0.0.3 erklärt.

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.

Das gerade erwähnte Vorgehen berechnet die **Startadresse** eines gewünschten **Zeigerelementes**, **Feldelementes** oder **Verbundsattributes**. Zur Berechnung wird die **Startadresse** des **Zeigers**, **Feldes** oder **Verbundes**, dessen **Attribut** oder **Element** berechnet werden soll gebraucht. Die **Startadresse** wird in einem **vorherigen Berechnungschritt** 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**

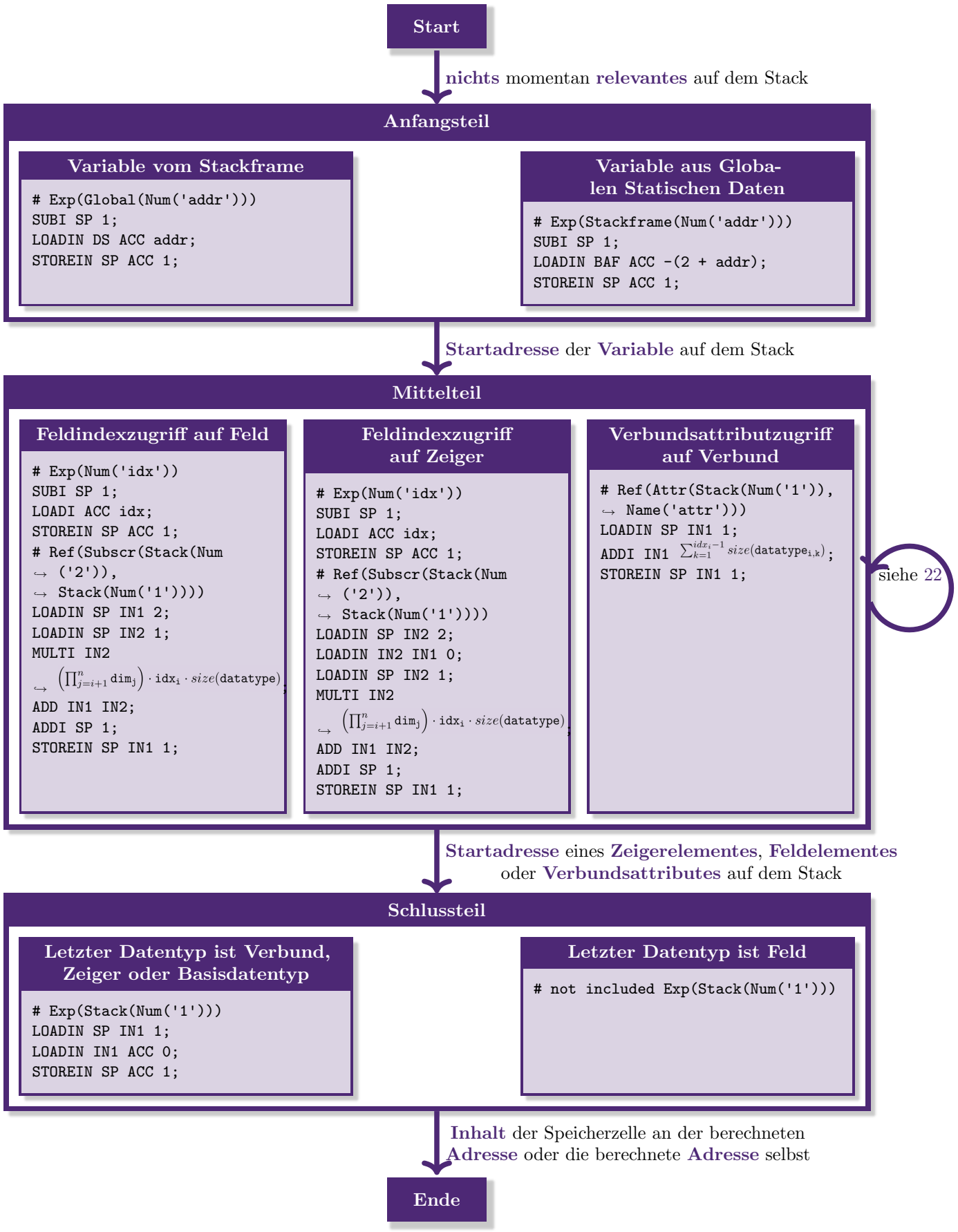


Abbildung 1: *Allgemeine Veranschaulichung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen.*

geschrieben wird. Dies wurde in Unterkapitel 0.0.2.2 bereits veranschaulicht.

Würde man bei einer Operation `Subsc(Name('var'), Num('0'))` den in der **Symboltabelle** gespeicherten **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 Zugegriffen 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 **Verbundsdatentyp** `StructSpec(name)` kombiniert werden.[21]

Anmerkung

Um Verwirrung vorzubeugen, wird hier vorausschauend nochmal darauf hingewiesen, dass eine **Dereferenzierung** in der Form `Deref(exp1, exp2)` nicht mehr existiert. In Unterkapitel 0.0.1.2 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 `StructSpec(name)` ist, wird ein 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_{PiocC} die Eigenheit, dass wenn auf ein gesamtes **Feld** zugegriffen wird[23], die **Adresse** des ersten Elements ausgegeben wird und nicht der **Inhalt** der Speicherzelle des ersten Elements. Bei allen anderen in der Sprache L_{PicoC} implementieren Datentypen[24] wird immer der **Inhalt** der Speicherzelle der ersten Elements bzw. Elements ausgegeben.

[21] Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel **??**, **??** und **??** erläutert.
[22] **Startadresse** eines **Zeigerelementes**, **Feldelementes** oder **Verbundsattributes** auf dem Stack.
[23] Und nicht auf ein **Element** des Feldes, welches den Datentyp `CharType()` oder `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructSpec(name)` hat.
[24] Also `CharType()`, `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructSpec(name)`.

0.0.4.1 Anfangsteil

Die Umsetzung des **Anfangsteils**, bei dem die **Startadresse** einer Variable auf den **Stack** geschrieben wird, wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.37 erklärt. Der **Anfangsteil** entspricht dem Anwenden des **Referenzierungsoperators** auf eine Variable: `&var`.

```
1 void main() {
2   int *(*complex_var)[3];
3   &complex_var;
4 }
5
6 void fun() {
7   int (*complex_var)[3];
8   &complex_var;
9 }
```

Code 0.37: *PicoC-Code für den Anfangsteil.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.38 wird die **Refererenzierung** `&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 Pass **keinen Unterschied**, ob an einer Stelle `Ref(Name('complex_var')` oder `Exp(Ref(Name('complex_var')))` steht. Man müsste an vielen Stellen eine gesonderte **Fallunterschiedung** 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 der Implementierung ohne triftigen Grund **komplexer** zu machen.

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PntrDecl(Num('1'),
          ↪  IntType('int')))), Name('complex_var')))
10        Exp(Ref(Name('complex_var')))
11      ],
12    FunDef
13      VoidType 'void',
14      Name 'fun',
15      [],
16      [
17        Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
          ↪  Name('complex_var')))
18        Exp(Ref(Name('complex_var')))
19      ]
20  ]
```

Code 0.38: *Abstrakter Syntaxbaum für den Anfangsteil.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.39 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('0')))` oder `Ref(Stackframe(Num('0')))` ersetzt.[25]

```
File
  Name './example_derived_dts_introduction_part.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.1',
      [
        // Exp(Ref(Name('complex_var')))
        Ref(Global(Num('0')))
        Return(Empty())
      ],
    Block
      Name 'fun.0',
      [
        // Exp(Ref(Name('complex_var')))
        Ref(Stackframe(Num('0')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

Code 0.39: *PicoC-ANF Pass für den Anfangsteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.40 werden die **PicoC-Knoten** `Ref(Global(Num('0')))` bzw. `Ref(Stackframe(Num('0')))` durch ihre **semantisch** entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
File
  Name './example_derived_dts_introduction_part.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'main.1',
      [
        # // Exp(Ref(Name('complex_var')))
        # Ref(Global(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 0;
        ADD IN1 DS;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Return(Empty())
        LOADIN BAF PC -1;
      ],
    Block
      Name 'fun.0',
      [
        # // Exp(Ref(Name('complex_var')))
        # Ref(Stackframe(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        MOVE BAF IN1;
        SUBI IN1 2;
```

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

```
24        STOREIN SP IN1 1;
25        # Return(Empty())
26        LOADIN BAF PC -1;
27      ]
28  ]
```

Code 0.40: *RETI-Blocks Pass für den Anfangsteil.*

0.0.4.2 Mittelteil

Der Umsetzung des **Mittelteils**, bei dem die **Startadresse** des letzten Attributes / Elementes 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 0.41 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 0.41: *PicoC-Code für den Mittelteil.*

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.42 wird die Aneinanderreihung 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(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int'))),
           ↪  Name('ar'))
8        ],
9      FunDef
10       VoidType 'void',
11       Name 'main',
12       [],
13       [
14         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('var')),
           ↪  Array([Num('42')]))
15         Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('complex_var')),
           ↪  Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
16         Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')), BinOp(Num('2'),
           ↪  Sub('-'), Num('2'))))
17       ]
18   ]
```

Code 0.42: *Abstrakter Syntaxbaum für den Mittelteil.*

Im **PicoC-Shrink Pass** in Code 0.43 wird der `Deref(exp1,Num('0'))`-Knoten in `Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('complex_var'),Name('ar')),Num('0')),BinOp(Num('2'),Sub('-'),Num('2'))))` durch den `Subscr(exp1,Num('0'))`-Knoten in `Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'),Name('ar')),Num('0')),BinOp(Num('2'),Sub('-'),Num('2'))))` ersetzt.

```
File
  Name './example_derived_dts_main_part.picoc_shrink',
  [
    StructDecl
      Name 'st',
      [
        Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int'))),
        ↪ Name('ar'))
      ],
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('var')),
        ↪ Array([Num('42')]))
        Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st')), Name('complex_var')),
        ↪ Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
        Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')), BinOp(Num('2'),
        ↪ Sub('-'), Num('2'))))
      ]
  ]
```

Code 0.43: *PicoC-Shrink Pass für den Mittelteil.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.44 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(str)))`, `Exp(num)`, `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 die **Startadresse** des momentanen **Feldes**, in dem das **Feldelement** liegt, auf das zugegriffen werden soll. Diese **Startadresse** wurde **vorher** in einer **vorherigen Adressberechnung** oder durch den **Anfangsteil** auf den **Stack** geschrieben. Die vorhin erwähnte **Indexberechnung** wird bei `Exp(Subscr(exp1, BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))` durch die Knoten `Exp(Num('2'))` und `Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))` dargestellt.[26]

Anmerkung

Sei $\texttt{datatype}_\texttt{i}$ ein **Folgeglied** einer **Folge** $(\texttt{datatype}_\texttt{i})_{i=1,\dots,n+1}$, dessen erstes Folgeglied $\texttt{datatype}_\texttt{1}$ ist. Dabei steht `i` für eine **Ebene** eines Baumes. Die Folgeglieder der Folge lassen sich **Startadressen**

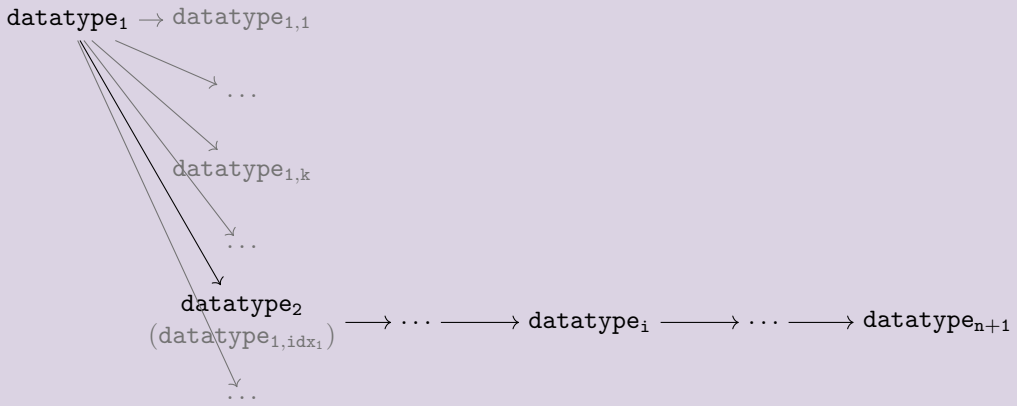
[26] Die **Bedeutung** aller hier erwähnten **Knoten** und **Kompositionen** von Knoten wird in den Tabellen der Kapitel **??**, **??** und **??** erläutert.

$ref(\texttt{datatype}_\texttt{i})$ von Speicherbereichen $ref(\texttt{datatype}_\texttt{i})$ ... $ref(\texttt{datatype}_\texttt{i}) + size(\texttt{datatype}_\texttt{i})$ im **Hauptspeicher** zuordnen. Hierbei gilt, dass $ref(\texttt{datatype}_\texttt{i}) \leq ref(\texttt{datatype}_{\texttt{i+1}}) < ref(\texttt{datatype}_\texttt{i}) + size(\texttt{datatype}_\texttt{i})$.[ab]

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

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

In Abbildung 0.0.2 ist das ganze veranschaulicht. Die ausgegrauten Knoten stellen die verschiedenen **Elemente** / **Attribute** $\texttt{datatype}_{\texttt{i,k}}$ des **Datentyps** $\texttt{datatype}_\texttt{i}$ dar. Allerdings können nur die Knoten $\texttt{datatype}_\texttt{i}$ **Folgeglieder** der **Folge** $(\texttt{datatype}_\texttt{i})_{i=1,\ldots,n+1}$ darstellen.



(0.0.2)

Die **Adresse**, ab der ein **Element / Attribut** am Ende einer Folge $(\texttt{datatype}_{\texttt{i,idx}_\texttt{i}})_{i=1,\ldots,n}$ verschiedener **Elemente / Attribute** abgespeichert ist, kann mittels der Formel 0.0.3 berechnet werden. Diese Folge ist das Resultat einer Aneinanderreihung von **Zugriffen** auf **Feldelemente** und **Verbundsattributte** unterschiedlicher Datentypen $\texttt{datatype}_\texttt{i}$ (z.B. `*complex_var.attr3[2]`).

$$ref(\texttt{datatype}_{\texttt{1,idx}_\texttt{1}},\ \ldots,\ \texttt{datatype}_{\texttt{n,idx}_\texttt{n}}) = ref(\texttt{datatype}_\texttt{1}) + \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{idx_i - 1} size(\texttt{datatype}_{\texttt{i,k}}) \quad (0.0.3)$$

Die **äußere Schleife** iteriert nacheinander über die Folge von **Attributen / Elementen** $(\texttt{datatype}_{\texttt{i,idx}_\texttt{i}})_{i=1,\ldots,n}$, die aus den **Zugriffen** auf **Feldelemente** oder **Verbundsattribute** resultiert (z.B. `*complex_var.attr3[2]`). Die **innere Schleife** iteriert über alle **Elemente** oder **Attribute** $\texttt{datatype}_{\texttt{i,k}}$ des momentan betrachteten **Datentyps** $\texttt{datatype}_\texttt{i}$, die vor dem **Element / Attribut** $\texttt{datatype}_{\texttt{i,idx}_\texttt{i}}$ liegen.

Dabei darf nur das letzte Folgenglied $\texttt{datatype}_{\texttt{n+1}}$ vom Datentyp **Zeiger** sein. Ist in einer Folge von **Datentypen** ein Knoten vom Datentyp **Zeiger**, der nicht der **letzte Datentyp** $\texttt{datatype}_{\texttt{n+1}}$ in der Folge ist, so muss die **Adressberechnung** in 2 Adressberechnungen aufgeteilt werden. Dabei geht die **erste Adressberechnung** vom ersten Datentyp $\texttt{datatype}_\texttt{1}$ bis zum Zeiger-

Datentyp $\texttt{datatype}_{\texttt{pntr}}$ und die **zweite Adressberechnung** fängt einen Datentyp nach dem Zeiger-Datentyp an $\texttt{datatype}_{\texttt{pntr+1}}$ und geht bis zum letzten Datentyp $\texttt{datatype}_{\texttt{n+1}}$. Bei der **zweiten Adressberechnung** muss dabei die **Adresse** $ref(\texttt{datatype}_1)$ des Summanden aus der Formel 0.0.3 auf den **Inhalt**[d] der Speicherzelle an der **Adresse**, welche in der **ersten Adressberechnung**[e] $ref(\texttt{datatype}_{1,\texttt{idx}_1},\ \ldots,\ \texttt{datatype}_{\texttt{pntr}-1,\texttt{idx}_{\texttt{pntr}-1}})$ berechnet wurde gesetzt werden: $M\left[ref(\texttt{datatype}_{1,\texttt{idx}_1},\ \ldots,\ \texttt{datatype}_{\texttt{pntr}-1,\texttt{idx}_{\texttt{pntr}-1}})\right]$.[fg]

Die Formel 0.0.3 stellt dabei eine **Verallgemeinerung** der Formel 0.0.1 dar, die für alle möglichen Aneinanderreihungen von Zugriffen auf **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 0.0.1, da man **nicht** davon ausgehen kann, dass alle Elemente / Attribute den **gleichen Datentyp** haben[h].

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

Die Knoten `Exp(Num(num))` bzw. `Name(str)` aus `Ref(Attr(Stack(Num(num)), Name(str)))` repräsentieren dabei das $\texttt{idx}_\texttt{i}$ in der Formel.

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

Die Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` repräsentieren dabei das Lesen des **Inhalts** $M\left[ref(\texttt{datatype}_{1,\texttt{idx}_1},\ \ldots,\ \texttt{datatype}_{\texttt{n},\texttt{idx}_\texttt{n}})\right]$ der Speicherzelle an der finalen **Adresse** $ref(\texttt{datatype}_{1,\texttt{idx}_1},\ \ldots,\ \texttt{datatype}_{\texttt{n},\texttt{idx}_\texttt{n}})$.

[a] $ref(\texttt{datatype})$ ordent dabei dem **Datentyp** `datatype` eine **Startadresse** zu.
[b] Die Funktion `size` berechnet die **Anzahl Speicherzellen**, die ein Datentyp belegt.
[c] Man fängt hier bei den **Indices** von 1 zu zählen an.
[d] Der **Inhalt** dieser Speicherzelle ist eine **Adresse**, da im momentanen Kontext ein **Zeiger** betrachtet wird.
[e] Hierbei kommt die **Adresse** des **Zeigers** selbst raus.
[f] $M[addr]$ ist ein Zugriff auf den **Inhalt** der Speicherzelle an der **Adresse** *addr* im **SRAM**, in der **UART** oder im **EPROM**.
[g] Zur Erinnerung: $\texttt{datatype}_{\texttt{pntr}-1,\texttt{idx}_{\texttt{pntr}-1}} = \texttt{datatype}_{\texttt{pntr}}$, es wird also die **Adresse** des **Zeigers** berechnet und der **Inhalt** der **Speicherzelle** an dieser **Adresse**, der wiederum eine **Adresse** ist, wird als **Startadresse** der **zweiten Adressberechnung** verwendet.
[h] Verbundsattribute haben z.B. **unterschiedliche** Größen.

```
File
  Name './example_derived_dts_main_part.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
        Exp(Num('42'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
        // Assign(Name('complex_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
        Ref(Global(Num('0')))
        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
        // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')),
        ↪  BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))
        Ref(Global(Num('1')))
        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
        Exp(Num('0'))
```

```
17        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
18        Exp(Num('2'))
19        Exp(Num('2'))
20        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))
21        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
22        Exp(Stack(Num('1')))
23        Return(Empty())
24      ]
25  ]
```

Code 0.44: *PicoC-ANF Pass für den Mittelteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.45 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 0.0.4 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')),
          ↪  BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))
27        # Ref(Global(Num('1')))
28        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 0.45: *RETI-Blocks Pass für den Mittelteil.*

0.0.4.3 Schlussteil

Die Umsetzung des **Schlussteils**, bei dem ein **Attribut** oder **Element**, dessen **Adresse** im **Anfangsteil** 0.0.4.1 und **Mittelteil** 0.0.4.2 auf dem **Stack** berechnet wurde, auf den **Stack** gespeichert wird[27], wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.46 erklärt.

[27] Und dabei die Speicherzelle der **Adresse** selbst überschreibt.

```
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 0.46: *PicoC-Code für den Schlussteil.*

Die Generierung des **Abstrakten Syntaxbaumes** in Code 0.47 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')),
           ↪  Name('complex_var1')))
15         Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], StructSpec(Name('st'))),
           ↪  Name('complex_var2')))
16         Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
17         Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), IntType('int')), Name('pntr1')),
           ↪  Ref(Name('var')))
18         Assign(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('2'), IntType('int')), Name('complex_var3')),
           ↪  Ref(Name('pntr1')))
19         Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
20         Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
21         Exp(Deref(Name('complex_var3'), Num('0')))
22       ]
23   ]
```

Code 0.47: *Abstrakter Syntaxbaum für den Schlussteil.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.48 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.

```
File
  Name './example_derived_dts_final_part.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('var'), Num('42'))
        Exp(Num('42'))
        Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
        // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
        Ref(Global(Num('4')))
        Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
        // Assign(Name('complex_var3'), Ref(Name('pntr1')))
        Ref(Global(Num('5')))
        Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
        // Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
        Ref(Global(Num('0')))
        Exp(Num('0'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Stack(Num('1')))
        // Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
        Ref(Global(Num('2')))
        Exp(Num('0'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Stack(Num('1')))
        // Exp(Subscr(Name('complex_var3'), Num('0')))
        Ref(Global(Num('6')))
        Exp(Num('0'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Exp(Stack(Num('1')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

Code 0.48: *PicoC-ANF Pass für den Schlussteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.49 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. Genaueres wurde am Anfang dieses Unterkapitels 0.0.4 zusammen mit der Abbildung 1 bereits erklärt.

```
File
  Name './example_derived_dts_final_part.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        # // Assign(Name('var'), Num('42'))
        # Exp(Num('42'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 42;
        STOREIN SP ACC 1;
        # 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 0.49: *RETI-Blocks Pass für den Schlussteil.*

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).