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 Umsetzung von **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

Referenzierung (z.B. `&var`) ist eine **Operation** bei der ein **Zeiger** auf eine **Location** in Form der **Anfangsadresse** dieser Location als Ergebnis zurückgegeben wird. Die Implementierung 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 **Größe** eines Zeigers (z.B. eines Zeigers auf ein Feld von `int`: `pntr = int *pntr[3]`), die im `size`-Attribut der **Symboltabelle** eingetragen ist, ist dabei immer: `size(pntr)` = `1`.

[8] Später mehr dazu.

```
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, deren Bedeutung in Unterkapitel **??** erklärt wurde. 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')))` ist, sind noch **weitere Anweisungen** zwischen den Zeilen `11` und `12` nötig, die sich in diesem Beispiel um das Übersetzen von `Subscr(exp)` und `Attr(exp, name)` nach dem Schema in Subkapitel 0.0.4.2 kümmern.

```
File
  Name './example_pntr_ref.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Name('var'), Num('42'))
        Exp(Num('42'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
        // Assign(Name('pntr'), Ref(Name('var')))
        Ref(Global(Num('0')))
        Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
        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, deren Bedeutungen im **??** in Unterkapitel **??** erklärt sind.

```
File
  Name './example_pntr_ref.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('pntr'), Ref(Name('var')))
        # Ref(Global(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 0;
        ADD IN1 DS;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
        LOADIN SP ACC 1;
        STOREIN DS ACC 1;
        ADDI SP 1;
        # Return(Empty())
        LOADIN BAF PC -1;
      ]
  ]
```

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

0.0.1.2 Dereferenzierung durch Zugriff auf Feldindex ersetzen

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

```
void main() {
  int var = 42;
  int *pntr = &var;
  *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 **zwei** 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')))`. Bei einer normalen **Dereferenzierung**, wie z.B. `*var`, übersetzt sich diese zu `Deref(Name('var'), Num('0'))`[9].

```
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(Name('pntr'), Num('0'))` einfach durch den Knoten `Subscr(Name('pntr'), Num('0'))` ersetzt wird. Die Bedeutung des letzteren Knoten wurde in Unterkapitel **??** erklärt. 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 **Derefenzierung** (z.B. `*(var + 1)`) einfach von den Routinen für einen **Zugriff auf einen Feldindex** (z.B. `var[1]`) übernehmen lassen.

```
1 File
2   Name './example_pntr_deref.picoc_shrink',
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(Subscr(Name('pntr'), Num('0')))
12      ]
```

[9] Das `Num('0')` steht dafür, dass dem **Zeiger gefolgt** wird, aber danach **nicht** noch mit einem **Versatz** von der **Größe des Datentyps** in diesem Kontext auf eine nebenliegende Location zugegriffen wird.

```
13   ]
```

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}, {4}}`) wird im Folgenden anhand des Beispiels in Code 0.9 erklärt.

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

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

Die **Initialisierung** eines **Feldes** `intar[2][1]={{3+1},{4}}` wird im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.10 mithilfe der Komposition `Assign(Alloc(Writeable(),ArrayDecl([Num('2'),Num('1')],IntType('int')),Name('ar')),Array([Array([BinOp(Num('3'),Add('+'),Num('1'))]),Array([Num('4')])]))` dargestellt.

```
1  File
2    Name './example_array_init.ast',
3    [
4      FunDef
5        VoidType 'void',
6        Name 'main',
7        [],
8        [
9          Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('1')], IntType('int')),
           ↪  Name('ar')), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
           ↪  Array([Num('4')])]))
10       ],
11     FunDef
12       VoidType 'void',
13       Name 'fun',
14       [],
15       [
16         Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2'), Num('2')], IntType('int')),
           ↪  Name('ar')), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'), Num('6')])]))
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[10]. Das **Definieren** der Variable `ar` erfolgt mittels der **Symboltabelle**, die in Code 0.11 dargestellt ist.

Bei Variablen auf dem **Stackframe** wird ein Feld **rückwärts** auf das Stackframe geschrieben und auch die **Adresse des ersten Elements** als Adresse des Feldes genommen. Dies macht den **Zugriff auf einen Feldindex** in Subkapitel 0.0.2.2 deutlich unkomplizierter, da man so nicht mehr zwischen **Stackframe** und **Globalen Statischen Daten** beim **Zugriff auf einen Feldindex** unterscheiden muss, da es Probleme macht, dass ein **Stackframe** in die entgegengesetzte Richtung wächst, verglichen mit den **Globalen Statischen Daten**[11].

Anmerkung

Das **Größe** des Feldes `datatype ar`$[\mathtt{dim}_1]\dots[\mathtt{dim}_k]$, die ihm `size`-Attribut des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist, berechnet sich dabei aus der **Mächtigkeit** der einzelnen **Dimensionen** des Feldes multipliziert mit der **Größe** des **grundlegenden Datentyps** der einzelnen **Feldelemente**: $\mathtt{size}(\mathtt{datatype}(\mathtt{ar})) = \left(\prod_{j=1}^{n} \mathtt{dim}_j\right) \cdot \mathtt{size}(\mathtt{datatype})$[a].

[a] Die **Funktion** `type` ordnet einer **Variable** ihren **Datentyp** zu. Das ist notwendig, weil die **Funktion** `size` nur bei einem **Datentyp** als **Funktionsargument** die **Größe dieses Datentyps** als **Zielwert** liefert

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

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

[11] Wenn man beim **GCC** *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project* einen Stackframe mittels des **GDB** *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project* beobachtet, sieht man, dass dieser es genauso macht.

```
28          size:                   Empty()
29        },
30      Symbol
31        {
32          type qualifier:         Writeable()
33          datatype:               ArrayDecl([Num('2'), Num('2')], IntType('int'))
34          name:                   Name('ar@fun')
35          value or address:       Num('3')
36          position:               Pos(Num('6'), Num('6'))
37          size:                   Num('4')
38        }
39    ]
```

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

Im **PiocC-ANF Pass** in Code 0.12 werden zuerst die **Logischen Ausdrücke** in den Blättern des Teilbaumes, der beim **Feld-Initializers** Knoten `Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]), Array([Num('4')])])` anfängt nach dem Prinzip der **Tiefensuche**, von **links-nach-rechts** ausgewertet und auf den **Stack** geschrieben[12].

Im finalen Schritt muss zwischen **Globalen Statischen Daten** bei der `main`-Funktion und **Stackframe** bei der Funktion `fun` unterschieden werden. Die auf den Stack ausgewerteten Expressions werden mittels der Komposition `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))`, die in Tabelle **??** genauer beschrieben ist, versetzt in der selben Reihenfolge zu den **Globalen Statischen Daten** bzw. auf den **Stackframe** geschrieben.

Der **Trick** ist hier, dass egal wieviele Dimensionen und was für einen grundlegenden Datentyp[13] das **Feld** hat, man letztendlich immer das gesamte Feld erwischt, wenn man einfach die **Größe des Feldes** viele **Speicherzellen** mit z.B. der **Komposition** `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` verschiebt.

In die Knoten `Global('0')` und `Stackframe('3')` wurde hierbei die **Startadresse** des jeweiligen Feldes geschrieben, sodass man nach dem **PicoC-ANF Pass** nie mehr Variablen in der **Symboltabelle** nachsehen muss und gleich weiß, ob sie in Bezug zu den **Globalen Statischen Daten** oder dem **Stackframe** stehen.

```
1 File
2   Name './example_array_init.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         // Assign(Name('ar'), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
          ↪  Array([Num('4')])]))
8         Exp(Num('3'))
9         Exp(Num('1'))
10        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
11        Exp(Num('4'))
12        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
13        Return(Empty())
14      ],
```

[12] Da der **Zuweisungsoperator** = **rechtsassoziativ** ist und auch rein **logisch**, weil man nichts zuweisen kann, was man noch nicht berechnet hat.

[13] Z.B. ein **Verbund**, sodass es ein **„Feld von Verbunden“** ist.

```
15    Block
16      Name 'fun.0',
17      [
18        // Assign(Name('ar'), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'),
          ↪  Num('6')])]))
19        Exp(Num('3'))
20        Exp(Num('4'))
21        Exp(Num('5'))
22        Exp(Num('6'))
23        Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
24        Return(Empty())
25      ]
26  ]
```

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

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.13 werden die **Kompositionen** `Exp(exp)` und `Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))` bzw. `Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
1 File
2   Name './example_array_init.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Assign(Name('ar'), Array([Array([BinOp(Num('3'), Add('+'), Num('1'))]),
          ↪  Array([Num('4')])]))
8         # Exp(Num('3'))
9         SUBI SP 1;
10        LOADI ACC 3;
11        STOREIN SP ACC 1;
12        # Exp(Num('1'))
13        SUBI SP 1;
14        LOADI ACC 1;
15        STOREIN SP ACC 1;
16        # Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
17        LOADIN SP ACC 2;
18        LOADIN SP IN2 1;
19        ADD ACC IN2;
20        STOREIN SP ACC 2;
21        ADDI SP 1;
22        # Exp(Num('4'))
23        SUBI SP 1;
24        LOADI ACC 4;
25        STOREIN SP ACC 1;
26        # Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('2')))
27        LOADIN SP ACC 1;
28        STOREIN DS ACC 1;
29        LOADIN SP ACC 2;
30        STOREIN DS ACC 0;
31        ADDI SP 2;
32        # Return(Empty())
33        LOADIN BAF PC -1;
```

```
34        ],
35      Block
36        Name 'fun.0',
37        [
38          # // Assign(Name('ar'), Array([Array([Num('3'), Num('4')]), Array([Num('5'),
            ↪  Num('6')])]))
39          # Exp(Num('3'))
40          SUBI SP 1;
41          LOADI ACC 3;
42          STOREIN SP ACC 1;
43          # Exp(Num('4'))
44          SUBI SP 1;
45          LOADI ACC 4;
46          STOREIN SP ACC 1;
47          # Exp(Num('5'))
48          SUBI SP 1;
49          LOADI ACC 5;
50          STOREIN SP ACC 1;
51          # Exp(Num('6'))
52          SUBI SP 1;
53          LOADI ACC 6;
54          STOREIN SP ACC 1;
55          # Assign(Stackframe(Num('3')), Stack(Num('4')))
56          LOADIN SP ACC 1;
57          STOREIN BAF ACC -2;
58          LOADIN SP ACC 2;
59          STOREIN BAF ACC -3;
60          LOADIN SP ACC 3;
61          STOREIN BAF ACC -4;
62          LOADIN SP ACC 4;
63          STOREIN BAF ACC -5;
64          ADDI SP 4;
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

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

```
1 void main() {
2   int ar[1] = {42};
3   ar[0];
4 }
5
6 void fun() {
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.

```
File
  Name './example_array_access.ast',
  [
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('1')], IntType('int')), Name('ar')),
        ↪  Array([Num('42')]))
        Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
      ],
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'fun',
      [],
      [
        Assign(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int')), Name('ar')),
        ↪  Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
        Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
      ]
  ]
```

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

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.16 wird vom Knoten `Subscr(Name('ar'), Num('0'))` zuerst im **Anfangsteil** 0.0.4.1 die **Adresse** der Variable `Name('ar')` auf den **Stack** geschrieben. Bei den **Globalen Statischen Daten** der `main`-Funktion wird das durch die Komposition `Ref(Global(Num('0')))` dargestellt und beim **Stackframe** der Funktionm `fun` wird das durch die Komposition `Ref(Stackframe(Num('2')))` dargestellt.

In nächsten Schritt, dem **Mittelteil** 0.0.4.2 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. Da ein **Index** auf den Zugegriffen werden soll auch durch das Ergebnis eines **komplexeren Ausdrucks**, z.B. `ar[1 + var]` bestimmt sein kann, indem auch **Variablen** vorkommen können, 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 bestimmt werden, z.B. im einfachen Fall durch `Exp(Num('0'))` und dann muss die **Adresse des Index** berechnet werden, was durch die Komposition `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` dargestellt wird. Die Bedeutung der Komposition `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` ist in Tabelle ?? dokumentiert.

Zur **Adressberechnung** ist es notwendig auf die **Dimensionen** (z.B. `[Num('3')]`) des Feldes, auf dessen **Feldelement** zugegriffen wird, zugreifen zu können. Daher ist der **Felddatentyp** (z.B. `ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))`) dem Knoten `Ref(exp, datatype)` als versteckes Attribut `datatype` angehängt. Das versteckte Attribut wird 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 und es muss auch möglich sein, z.B. einen **Attributzugriff** `var.attr` und eine **Zugriff auf einen Arryindex** `var[1]` miteinander zu kombinieren, was in Subkapitel 0.0.4.2 allgemein erklärt ist.

Im letzten Schritt, dem **Schlussteil** 0.0.4.3 wird der **Inhalt** des **Index**, dessen **Adresse** in den vorherigen Schritten berechnet wurde, nun auf den **Stack** geschrieben, wobei dieser die **Adresse** auf dem Stack ersetzt, die es zum Finden des **Index** brauchte. Dies wird durch den Knoten `Exp(Stack(Num('1')))` dargestellt. Je nachdem, welchen **Datentyp** die Variable `ar` hat und auf welchen **Unterdatentyp** folglich im **Kontext** zuletzt zugegriffen wird, abhängig davon wird der **Schlussteil** `Exp(Stack(Num('1')))` auf eine andere Weise verarbeitet (siehe Subkapitel 0.0.4.3). Der **Unterdatentyp** ist dabei ein versteckter Attribut des `Exp(Stack(Num('1')))`-Knoten.

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, bei dem unterschiedliche **RETI-Befehle** für eine Variable, die in den **Globalen Statischen Daten** liegt und eine Variable, die auf dem **Stackframe** liegt erzeugt werden müssen.

Anmerkung

Die Berechnung der **Adresse**, ab der ein **Feldelement** eines Feldes $\texttt{datatype ar}[\texttt{dim}_1]\dots[\texttt{dim}_n]$ abgespeichert ist, kann mittels der Formel 0.0.1:

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

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

Die Komposition `Ref(Global(num))` bzw. `Ref(Stackframe(num))` repräsentiert dabei den Summanden $\texttt{ref}(\texttt{ar})$ in der Formel.

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

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

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

[a] `ref(exp)` steht dabei für die Berechnung der **Adresse** von `exp`, wobei `exp` z.B. `ar[3][2]` sein könnte.

```
File
  Name './example_array_access.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.1',
      [
        // Assign(Name('ar'), Array([Num('42')]))
        Exp(Num('42'))
        Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
        // Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
```

```
11        Ref(Global(Num('0')))
12        Exp(Num('0'))
13        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
14        Exp(Stack(Num('1')))
15        Return(Empty())
16      ],
17    Block
18      Name 'fun.0',
19      [
20        // Assign(Name('ar'), Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
21        Exp(Num('1'))
22        Exp(Num('2'))
23        Exp(Num('3'))
24        Assign(Stackframe(Num('2')), Stack(Num('3')))
25        // Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
26        Ref(Stackframe(Num('2')))
27        Exp(Num('1'))
28        Exp(Num('1'))
29        Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Add('+'), Stack(Num('1'))))
30        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
31        Exp(Stack(Num('1')))
32        Return(Empty())
33      ]
34  ]
```

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

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

```
1 File
2   Name './example_array_access.reti_blocks',
3   [
4     Block
5       Name 'main.1',
6       [
7         # // Assign(Name('ar'), 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        # // Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))
17        # Ref(Global(Num('0')))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI IN1 0;
20        ADD IN1 DS;
21        STOREIN SP IN1 1;
22        # Exp(Num('0'))
23        SUBI SP 1;
```

```
24        LOADI ACC 0;
25        STOREIN SP ACC 1;
26        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
27        LOADIN SP IN1 2;
28        LOADIN SP IN2 1;
29        MULTI IN2 1;
30        ADD IN1 IN2;
31        ADDI SP 1;
32        STOREIN SP IN1 1;
33        # Exp(Stack(Num('1')))
34        LOADIN SP IN1 1;
35        LOADIN IN1 ACC 0;
36        STOREIN SP ACC 1;
37        # Return(Empty())
38        LOADIN BAF PC -1;
39      ],
40    Block
41      Name 'fun.0',
42      [
43        # // Assign(Name('ar'), Array([Num('1'), Num('2'), Num('3')]))
44        # Exp(Num('1'))
45        SUBI SP 1;
46        LOADI ACC 1;
47        STOREIN SP ACC 1;
48        # Exp(Num('2'))
49        SUBI SP 1;
50        LOADI ACC 2;
51        STOREIN SP ACC 1;
52        # Exp(Num('3'))
53        SUBI SP 1;
54        LOADI ACC 3;
55        STOREIN SP ACC 1;
56        # Assign(Stackframe(Num('2')), Stack(Num('3')))
57        LOADIN SP ACC 1;
58        STOREIN BAF ACC -2;
59        LOADIN SP ACC 2;
60        STOREIN BAF ACC -3;
61        LOADIN SP ACC 3;
62        STOREIN BAF ACC -4;
63        ADDI SP 3;
64        # // Exp(Subscr(Name('ar'), BinOp(Num('1'), Add('+'), Num('1'))))
65        # Ref(Stackframe(Num('2')))
66        SUBI SP 1;
67        MOVE BAF IN1;
68        SUBI IN1 4;
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 **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 Komposition `Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))` dargestellt.

```
1 File
2   Name './example_array_assignment.ast',
3   [
4     FunDef
5       VoidType 'void',
6       Name 'main',
7       [],
8       [
9         Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar')))
10        Assign(Subscr(Name('ar'), Num('1')), Num('42'))
11      ]
12  ]
```

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

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.20 wird zuerst die **rechte** Seite des **rechtsassoziativen** Zuweisungsoperators `=`, bzw. des Knotens der diesen darstellt ausgewertet: `Exp(Num('42'))`.

Danach ist das Vorgehen, bzw. sind die Kompostionen, die dieses darauffolgende 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 Subkapitel 0.0.2.2. Es wird die **Adresse** des **Index**, dem das Ergebnis der Ausdrucks auf der rechten Seite des **Zuweisungsoperators** `=` zugewiesen wird berechet, wie in Subkapitel 0.0.2.2.

Zum Schluss stellt die **Komposition** `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))`[14] die Zuweisung `=` des Ergebnisses des Ausdrucks auf der **rechten** Seite der Zuweisung zum **Feldindex**, dessen **Adresse** im Schritt danach berechnet wurde dar.

```
File
  Name './example_array_assignment.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        // Assign(Subscr(Name('ar'), Num('1')), Num('42'))
        Exp(Num('42'))
        Ref(Global(Num('0')))
        Exp(Num('1'))
        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
        Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

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

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.21 werden die **Kompositionen** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` und `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))` durch ihre 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;
```

[14] Ist in Tabelle **??** genauer beschrieben ist

```
17        # Exp(Num('1'))
18        SUBI SP 1;
19        LOADI ACC 1;
20        STOREIN SP ACC 1;
21        # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
22        LOADIN SP IN1 2;
23        LOADIN SP IN2 1;
24        MULTI IN2 1;
25        ADD IN1 IN2;
26        ADDI SP 1;
27        STOREIN SP IN1 1;
28        # Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))
29        LOADIN SP IN1 1;
30        LOADIN SP ACC 2;
31        ADDI SP 2;
32        STOREIN IN1 ACC 0;
33        # Return(Empty())
34        LOADIN BAF PC -1;
35    ]
36 ]
```

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, der **Zuweisung an ein Verbundsattribut** 0.0.3.4 zu klären.

0.0.3.1 Deklaration von Verbundstypen und Definition von Verbunden

Die **Deklaration** (Definition **??**) eines neuen **Verbundstyps** (z.B. `struct st {int len; int ar[2];}`) und die **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 irgendwas 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 Komposition `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 Komposition `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 wird in der **Symboltabelle**, die in Code 0.24 dargestellt ist ein Eintrag mit dem **Schlüssel** `st` erstellt. Die Attribute dieses Symbols `type_qualifier`, `datatype`, `name`, `position` und `size` sind

wie üblich belegt, allerdings sind in dem `value_address`-Attribut des Symbols die Attribute des **Verbundstyps** `[Name('len@st'), Name('ar@st')]` aufgelistet, sodass man über den **Verbundstyp** `st` die **Attribute** des Verbundstyps in der **Symboltabelle** nachschlagen kann. Die Schlüssel der **Attribute** haben einen **Suffix** `@st` angehängt, der eine Art **Sichtbarkeitsbereich** innerhalb des **Verbundtyps** für seine Attribut darstellt. Es gilt foglich, dass **innerhalb** eines **Verbundstyps** zwei Attribute nicht gleich benannt werden können, aber dafür zwei **unterschiedliche Verbundstypen** ihre Attribute gleich benennen können.

Jedes der **Attribute** `[Name('len@st'), Name('ar@st')]` erhält auch einen eigenen Eintrag in der **Symboltabelle**, wobei die Attribute `type_qualifier`, `datatype`, `name`, `value_address`, `position` und `size` wie üblich belegt werden. Die Attribute `type_qualifier`, `datatype` und `name` werden z.B. bei `Name('ar@st')` mithilfe der Attribute von `Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], IntType('int')), Name('ar'))])` belegt.

Für die **Definition** einer Variable `st_var@main` mit diesem **Verbundstyp** `st` wird ein Eintrag in der **Symboltabelle** angelegt. Das `datatyp`-Attribut enthält dabei den Namen des **Verbundstyps** als Komposition `StructSpec(Name('st'))`, wodurch jederzeit alle wichtigen Informationen zu diesem **Verbundstyp**[15] und seinen **Attributen** in der **Symboltabelle** nachgeschlagen werden können.

Anmerkung

Die **Größe** einer Variable `st_var`, die ihm `size`-Attribut des **Symboltabelleneintrags** eingetragen ist und mit dem **Verbundstyp** `struct st` {$\texttt{datatype}_1$ $\texttt{attr}_1$; ... $\texttt{datatype}_n$ $\texttt{attr}_n$;};[a] definiert ist (`struct st st_var;`), berechnet sich dabei aus der Summe der **Größen** der einzelnen **Datentypen** $\texttt{datatype}_1$ ... $\texttt{datatpye}_n$ der **Attribute** $\texttt{attr}_1$, ... $\texttt{attr}_n$ des **Verbundstyps**: $\texttt{size}(\texttt{st}) = \sum_{i=1}^{n} \texttt{size}(\texttt{datatype}_i)$.

[a] Hier wird es der Einfachheit halber so dargestellt, als hätte die Programmiersprache L_{PicoC} nicht die Fragwürdige Designentscheidung, auch die eckigen Klammern `[]` für die Definition eines Feldes **vor** die Variable zu schreiben von Lc übernommen. Es wird so getann, als würde der komplette **Datentyp** immer **hinter** der Variable stehen: `datatype var`.

```
SymbolTable
  [
    Symbol
      {
        type qualifier:         Empty()
        datatype:               IntType('int')
        name:                   Name('len@st')
        value or address:       Empty()
        position:               Pos(Num('1'), Num('15'))
        size:                   Num('1')
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Empty()
        datatype:               ArrayDecl([Num('2')], IntType('int'))
        name:                   Name('ar@st')
        value or address:       Empty()
        position:               Pos(Num('1'), Num('24'))
        size:                   Num('2')
      },
    Symbol
      {
        type qualifier:         Empty()
```

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

```
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 **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 **Komposition** `Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')), Struct(...))` dargestellt.

```
1 File
2   Name './example_struct_init.ast',
```

```
3  [
4    StructDecl
5      Name 'st1',
6      [
7        Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('2')], PntrDecl(Num('1'), IntType('int'))),
         ↪  Name('attr'))
8      ],
9    StructDecl
10     Name 'st2',
11     [
12       Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('attr1'))
13       Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('attr2'))
14     ],
15   FunDef
16     VoidType 'void',
17     Name 'main',
18     [],
19     [
20       Assign(Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('var')), Num('42'))
21       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'))]))]))]))
22     ]
23 ]
```

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

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.27 wird die **Komposition** `Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('st1')), Name('st')), Struct(...))` auf fast dieselbe Weise ausgewertet, wie bei der **Initialisierung eines Feldes** in Subkapitel 0.0.2.1 daher wird um keine Wiederholung zu betreiben auf Subkapitel 0.0.2.1 verwiesen. Um das ganze interressanter zu gestalten wurde das Beispiel in Code 0.25 so gewählt, dass sich daran eine komplexere, mehrstufige Initialisierung mit **verschiedenen** Datentypen erklären lässt.

Der **Verbund-Initializer** Teilbaum `Struct([Assign(Name('attr1'), Name('var')), Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))])]))]))])`, der beim **Verbund-Initializer** Knoten anfängt, wird auf dieselbe Weise nach dem Prinzip der **Tiefensuche** von **links-nach-rechts** ausgewertet, wie es bei der **Initialisierung eines Feldes** in Subkapitel 0.0.2.1 bereits erklärt wurde.

Beim **Iterieren** über den **Teilbaum**, muss beim **Verbund-Initializer** nur beachtet werden, dass bei den `Assign(lhs, exp)`-Knoten, über welche die **Attributzuweisung** dargestellt wird (z.B. `Assign(Name('attr2'), Struct([Assign(Name('attr'), Array([Array([Ref(Name('var')), Ref(Name('var'))])]))]))`) der Teilbaum beim rechten `exp` Attribut weitergeht.

Im Allgemeinen gibt es beim **Initialisieren** eines **Feldes** oder **Verbundes** im Teilbaum auf der **rechten Seite**, der beim jeweiligen obersten **Initializer** anfängt immer nur 3 Fällte, man hat es auf der **rechten** Seite entweder mit einem **Verbund-Initialiser**, einem **Feld-Initialiser** oder einem **Logischen Ausdruck** zu tuen. Bei **Feld-** und **Verbund-Initialisier** wird einfach über diese nach dem Prinzip der **Tiefensuche** von **links-nach-rechts** iteriert und die Ergebnisse der **Logischen Ausdrücken** in den **Blättern** auf den **Stack** gespeichert. Der Fall, dass ein **Logischer Ausdruck** vorliegt erübrigt sich damit.

```
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 **Kompositionen** `Exp(exp)`, `Ref(exp)` und `Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('3')))` durch ihre 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;
        # Ref(Global(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 0;
        ADD IN1 DS;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Ref(Global(Num('0')))
        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

Der **Zugriff 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 **Komposition** `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 wird die Komposition `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` auf ähnliche Weise ausgewertet, wie die Komposition, die einen **Zugriff auf ein Feldelement** `Exp(Subscr(Name('ar'), Num('0')))` in Subkapitel 0.0.2.2 darstellt. Daher wird hier, um Wiederholung zu vermeiden nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsnten auf das Subkapitel 0.0.2.2 verwiesen.

Die Komposition `Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))` wird genauso, wie in Subkapitel 0.0.2.2 durch Kompositionen 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, wie in Subkapitel 0.0.2.2.

Nur für den **Mittelteil** wird eine andere Komposition `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` gebraucht. Diese Komposition `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` erfüllt die Aufgabe die **Adresse**, ab der das **Attribut** auf das zugegriffen wird anfängt zu berechnen. Dabei wurde die **Anfangsadresse** des **Verbundes** indem dieses Attribut liegt bereits vorher auf den **Stack** gelegt.

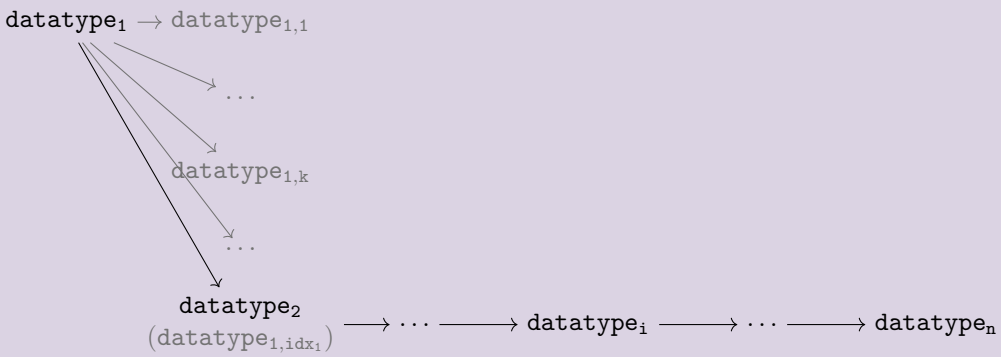
Im Gegensatz zur Komposition `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` beim **Zugriff auf einen Feldindex** in Subkapitel 0.0.2.2, muss hier vorher nichts anderes als die **Anfangsadresse** des **Verbundes** auf dem **Stack** liegen. Das **Verbundsattribut** auf welches zugegriffen wird steht bereits in der Komposition `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))`, nämlich `Name('y')`. Den **Verbundstyp**, dem dieses Attribut gehört, kann man aus dem versteckten Attribut `datatype` herauslesen. Das versteckte Attribut wird während des Kompiliervorgangs im **PiocC-ANF Pass** dem Knoten `Ref(exp, datatype)` angehängt.

Anmerkung

Sei $\texttt{datatype}_\texttt{i}$ ein **Knoten** eines **entarteten Baumes** (siehe Definition 0.1 und Abbildung 0.0.2), dessen Wurzel $\texttt{datatype}_\texttt{1}$ ist. Dabei steht `i` für eine **Ebene** des entarteten Baumes. Die Knoten des entarteten Baumes lassen sich **Startadressen** $\texttt{ref}(\texttt{datatype}_\texttt{i})$ von Speicherbereichen $\texttt{ref}(\texttt{datatype}_\texttt{i})$ ... $\texttt{ref}(\texttt{datatype}_\texttt{i}) + \texttt{size}(\texttt{datatype}_\texttt{i})$ im **Hauptspeicher** zuordnen, wobei gilt, dass $\texttt{ref}(\texttt{datatype}_\texttt{i}) \leq \texttt{ref}(\texttt{datatype}_{\texttt{i+1}}) < \texttt{ref}(\texttt{datatype}_\texttt{i}) + \texttt{size}(\texttt{datatype}_\texttt{i})$.[ab]

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

Sei $\texttt{datatype}_{\texttt{i,idx}_\texttt{i}}$ ein beliebiges **Element / Attribut** des **Datentyps** $\texttt{datatype}_\texttt{i}$, sodass gilt: $\texttt{datatype}_{\texttt{i,idx}_\texttt{i}} = \texttt{datatype}_{\texttt{i+1}}$.



(0.0.2)

Die Berechnung der **Adresse** für eine beliebige Folge verschiedener Datentypen ($\texttt{datatype}_{1,\texttt{idx}_1}, \ldots, \texttt{datatype}_{n,\texttt{idx}_n}$), die das Resultat einer Aneinandereihung von **Zugriffen** auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattributte** unterschiedlicher Datentypen $\texttt{datatype}_i$ ist (z.B. `*complex_var.attr3[2]`), kann mittels der Formel 0.0.3:

$$\texttt{ref}(\texttt{datatype}_{1,\texttt{idx}_1}, \ldots, \texttt{datatype}_{n,\texttt{idx}_n}) = \texttt{ref}(\texttt{datatype}_1) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=1}^{idx_i - 1} \text{size}(\texttt{datatype}_{i,k}) \quad (0.0.3)$$

berechnet werden.[c]

Dabei darf nur der letzte Knoten $\texttt{datatype}_n$ vom Datentyp **Zeiger** sein. Ist in einer Folge von **Datentypen** ein Knoten vom Datentyp **Zeiger**, der nicht der **letzte Datentyp** $\texttt{datatype}_n$ in der Folge ist, so muss die **Adressberechnung** in 2 Adressberechnungen aufgeteilt werden, wobei die **erste Adressberechnung** vom ersten Datentyp $\texttt{datatype}_1$ bis direkt zum Dantentyp Zeiger geht $\texttt{datatype}_{\texttt{pntr}}$ und die **zweite Adressberechnung** einen Dantentyp nach dem Datentyp Zeiger anfängt $\texttt{datatpye}_{\texttt{pntr}+1}$ und bis zum letzten Datenyp $\texttt{datatype}_n$ geht. Bei der **zweiten Adressberechnung** muss dabei die **Adresse** $\texttt{ref}(\texttt{datatype}_1)$ des Summanden aus der Formel 0.0.3 auf den Inhalt der Speicherzelle an der gerade in der **zweiten Adressberechnung** berechneten Adresse $\texttt{M}\left[\texttt{ref}(\texttt{datatype}_1, \ldots, \texttt{datatype}_{\texttt{pntr}})\right]$ gesetzt werden.

Die Formel 0.0.3 stellt dabei eine **Verallgemeinerung** der Formel 0.0.1 dar, die für alle möglichen Aneinandereihungen von Zugriffen auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattribute** funktioniert (z.B. `(*complex_var.attr2)[3]`). Da die Formel **allgemein** sein muss, lässt sie sich nicht so elegant mit einem Produkt $\prod$ schreiben, wie die Formel 0.0.1, da man nicht davon ausgehen kann, dass alle Elemente den gleichen Datentyp haben[d].

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

Die Komposition `Exp(Attr(Stack(Num('1')), name))` repräsentiert dabei einen Summanden $\sum_{k=1}^{idx_i - 1} \text{size}(\texttt{datatype}_{i,k})$ in der Formel.

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

[a] Es ist ein Baum, der **nur** die **Datentypen** als Knoten enthält, auf die **zugegriffen** wird.
[b] `ref(datatype)` steht dabei für das Schreiben der **Startadresse**, die dem **Datentyp** `datatype` zugeordnet ist auf den **Stack**.

[c]Die **äußere Schleife** iteriert nacheinander über die Folge von Datentypen, die aus den **Zugriffen** auf **Zeigerelmente**, **Feldelemente** oder **Verbundsattribute** resultiert. Die **innere Schleife** iteriert über alle **Elemente** oder **Attribute** des momentan betrachteten **Datentyps** $\texttt{datatype}_i$, die vor dem **Element** / **Attribut** $\texttt{datatype}_{i,\texttt{idx}_i}$ liegen.
[d]Verbundsattribute haben **unterschiedliche** Größen.

Definition 0.1: Entarteter Baum

*Baum bei dem jeder Knoten **maximal** eine ausgehende Kante hat, also maximal **Außengrad** 1.*

Oder alternativ: *Baum beim dem jeder Knoten des Baumes **maximal** eine eingehende Kante hat, also maximal **Innengrad**[a] 1.*

*Der Baum entspricht also einer **verketteten Liste**.*[b]

[a]Der **Innengrad** ist die Anzahl **eingehener Kanten**.
[b]*Bäume*.

```
File
  Name './example_struct_attr_access.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')))
        // Exp(Attr(Name('st'), Name('y')))
        Ref(Global(Num('0')))
        Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
        Exp(Stack(Num('1')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

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

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.32 werden die **Kompositionen** `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` und `Exp(Stack(Num('1')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt.

```
File
  Name './example_struct_attr_access.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;
```

```
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 **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 **Abstact Syntax Tree** wird eine **Zuweisung an ein Verbundsattribut** (z.B. `st.y = 42`) durch die Komposition `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` dargestellt.

```
File
  Name './example_struct_attr_assignment.ast',
  [
    StructDecl
      Name 'pos',
      [
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('x'))
        Alloc(Writeable(), IntType('int'), Name('y'))
      ],
    FunDef
      VoidType 'void',
      Name 'main',
      [],
      [
        Assign(Alloc(Writeable(), StructSpec(Name('pos')), Name('st')),
        ↪  Struct([Assign(Name('x'), Num('4')), Assign(Name('y'), Num('2'))]))
        Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))
      ]
  ]
```

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

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.35 wird die Komposition `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` auf ähnliche Weise ausgewertet, wie die Komposition, die einen **Zugriff auf ein Feldelement** `Assign(Subscr(Name('ar'), Num('2')), Num('42'))` in Subkapitel 0.0.2.3 darstellt. Daher wird hier, um Wiederholung zu vermeiden nur auf wichtige Aspekte hingewiesen und ansonsnten auf das Unterkapitel 0.0.2.3 verwiesen.

Im Gegensatz zum Vorgehen in Unterkapitel 0.0.2.3 muss hier für das Auswerten des **linken** Knoten `Attr(Name('st'), Name('y'))` von `Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), Num('42'))` wie in Subkapitel 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 **Kompositionen** `Exp(Num('42'))`, `Ref(Global(Num('0')))`, `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))` und `Assign(Stack(Num('1')), Stack(Num('2')))` durch ihre 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;
        STOREIN DS ACC 1;
        LOADIN SP ACC 2;
        STOREIN DS ACC 0;
        ADDI SP 2;
        # // Assign(Attr(Name('st'), Name('y')), 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;
        # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('y')))
        LOADIN SP IN1 1;
        ADDI IN1 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 0.36: *RETI-Blocks Pass für Zuweisung an Verbndsattribut.*

0.0.4 Umsetzung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen im Allgemeinen

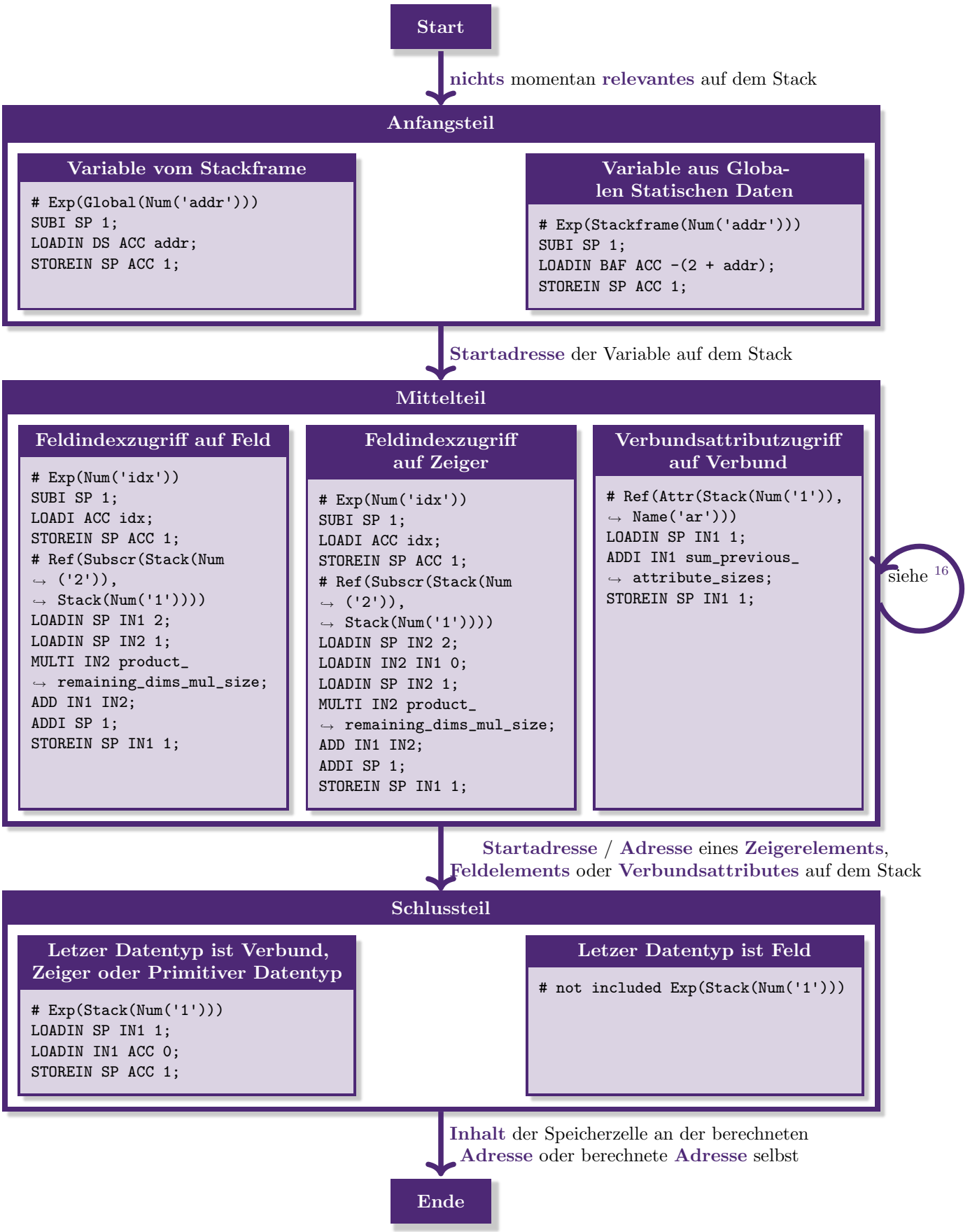


Abbildung 1: *Allgemeine Veranschaulichung des Zugriffs auf Zusammengesetzte Datentypen.*

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 beschriebenen Datentypen (**Zeiger**, **Feld** und **Verbund**) sehr ähnlich abläuft. Es lässt sich ein allgemeines Vorgehen, bestehend aus einem **Anfangsteil**, **Mittelteil** und **Schlussteil** darin erkennen.

Dieses Vorgehen ist in Abbildung 1 veranschaulicht. Dieses Vorgehen erlaubt es auch gemischte Ausdrücke zu schreiben, in denen die verschiedenen **Zugriffsarten** für **Elemente** / **Attribute** der Datenypen **Zeiger**, **Feld** und **Verbund** gemischt sind (z.B. `(*st_var.ar)[0]`).

Dies ist 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 und die dazu passende **Zugriffsoperation** `Subscr(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` vorliegt, einen anderen **RETI-Code** generiert wird. Dieser **RETI-Code** berechet die **Startadresse** eines gewünschten **Zeigerelements**, **Feldelements** oder **Verbundsattributs**.

Würde man bei einem `Subscr(Name('var'), exp2)` den Datentyp der Variable `Name('var')` von `ArrayDecl(nums, IntType())` zu `PointerDecl(num, IntType())` ändern, müsste nur der **Mittelteil** ausgetauscht werden. **Anfangsteil** und **Schlussteil** bleiben unverändert.

Die **Zugriffsoperation** muss dabei zum **Datentyp** im versteckten Attribut `datatype` passen, ansonsten gibt es eine `DatatypeMismatch`-**Fehlermeldung**. Ein **Zugriff auf ein Feldindex** `Subscr(exp1, epp2)` kann dabei mit den Datentypen **Feld** `ArrayDecl(nums, datatype)` und **Zeiger** `PntrDecl(num, datatype)` kombiniert werden. Allerdings benötigen beide Kombinationen unterschiedlichen **RETI-Code**. Das liegt daran, dass bei einem **Zeiger** `PntrDecl(num, datatype)` die **Adresse**, die auf dem **Stack** liegt auf eine Speicherzelle mit einer weiteren **Adresse** zeigt und das gewünschte Element erst zu finden ist, wenn man der letzteren **Adresse** folgt. Ein **Zugriff auf ein Verbundsattribut** `Attr(exp, name)` kann nur mit dem Datentyp **Struct** `StructSpec(name)` kombiniert werden.

Anmerkung

Um Verwirrung vorzubeugen, wird hier vorausschauend nochmal darauf hingewiesen, dass eine **Dereferenzierung** in der Form `Deref(exp1, exp2)` nicht mehr existiert, denn wie in Unterkapitel 0.0.1 bereits erklärt wurde, wurde der Knoten `Deref(exp1, exp2)` im **PicoC-Shrink Pass** durch `Subscr(exp1, exp2)` ersetzt. 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**.

Das versteckte Attribut `datatype` beinhaltet den **Unterdatentyp**, in welchem der Zugriff auf ein **Zeigerelment**, **Feldelement** oder **Verbundsattribut** erfolgt. Der **Unterdatentyp** ist dabei ein **Teilbaum** des Baumes, der vom gesamten **Datentyp** der **Variable** gebildet wird. Wobei man sich allerdings nur für den obersten **Knoten** in diesem **Unterdatentyp** interessiert und die möglicherweise unter diesem momentan betrachteten **Knoten** liegenden Knoten in einem anderen `Ref(exp, versteckte Attribut)`-Knoten, dem jeweiligen versteckten Attribut `datatype` zugeordnet sind. Das versteckte Attribut `datatype` enthält also die Information auf welchen **Unterdatentyp** im dem momentanen **Kontext** gerade zugegriffen wird.

Der **Anfangsteil**, der durch die Komposition `Ref(Name('var'))` repräsentiert wird, ist dafür zuständig die **Startadresse** der Variablen `Name('var')` auf den Stack zu schreiben und je nachdem, ob diese Variable in den **Globalen Statischen Daten** oder auf dem **Stackframe** liegt einen anderen **RETI-Code** zu generieren.

Der **Schlussteil** wird durch die Komposition `Exp(Stack(Num('1')), datatype)` dargestellt. Je nachdem, ob das versteckte Attribut `datatype` ein `CharType()`, `IntType()`, `PntrDecl(num, datatype)` oder `StructType(name)` ist, wird ein entsprechender **RETI-Code** generiert, der die **Adresse**, die auf dem **Stack** liegt dazu nutzt, um den **Inhalt** der Speicherzelle an dieser **Adresse** auf den **Stack** zu schreiben. Dabei wird die Speicherzelle der **Adresse** mit dem **Inhalt** auf den sie selbst zeigt überschreiben. 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[17], 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 wird immer der **Inhalt** der Speicherzelle ausgegeben, die an der **Adresse** zu finden ist, die auf dem **Stack** liegt.

Anmerkung

Implementieren lässt sich dieses Vorgehen, indem beim Antreffen eines `Subscr(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)` Ausdrucks ein `Exp(Stack(Num('1')))` an die Spitze einer **Liste der generierten Ausdrücke** gesetzt wird und der Ausdruck selbst als `exp`-Attribut des `Ref(exp)`-Knotens gesetzt wird und hinter dem `Exp(Stack(Num('1')))`-Knoten in der Liste eingefügt wird. Beim Antreffen eines `Ref(exp)` wird fast gleich vorgegangen, wie beim Antreffen eines `Subscr(exp1, exp2)` oder `Attr(exp, name)`, nur, dass kein `Exp(Stack(Num('1')))` vorne an die Spitze der **Liste der generierten Ausdrücke** gesetzt wird. Und ein `Ref(exp)` bei dem `exp` direkt ein `Name(str)` ist, wird dieser einfach direkt durch `Ref(Global(num))` bzw. `Ref(Stackframe(num))` ersetzt.

Es wird solange dem jeweiligen `exp1` des `Subscr(exp1, exp2)`-Knoten, dem `exp` des `Attr(exp, name)`-Knoten oder dem `exp` des `Ref(exp)`-Knoten gefolgt und der jeweilige Knoten selbst als `exp` des `Ref(exp)`-Knoten eingesetzt und hinten in die **Liste der generierten Ausdrücke** eingefügt, bis man bei einem `Name(name)` ankommt. Der `Name(name)`-Knoten wird zu einem `Ref(Global(num))` oder `Ref(Stackframe(num))` umgewandelt und ebenfalls ganz hinten in die **Liste der generierten Ausdrücke** eingefügt. Wenn man dem `exp` Attribut eines `Ref(exp)`-Knoten folgt, wird allerdings kein `Ref(exp)` in die **Liste der generierten Ausdrücke** eingefügt, sondern das `datatype`-Attribut des zuletzt eingefügten `Ref(exp, datatype)` manipuliert, sodass dessen `datatype` in ein `ArrayDecl([Num('1')], datatype)` eingebettet ist und so ein auf das `Ref(exp)` folgendes `Deref(exp1, exp2)` oder `Subscr(exp1, exp2)` direkt behandelt wird.

Parallel wird eine Liste der `Ref(exp)`-Knoten geführt, deren versteckte Attribute `datatype` und `error_data` die entsprechenden Informationen zugewiesen bekommen müssen. Sobald man beim `Name(name)`-Knoten angekommen ist und mithilfe dieses in der **Symboltabelle** den **Dantentyp** der Variable nachsehen kann, wird der **Datentyp** der Variable nun ebenfalls, wie die Ausdrücke `Subscr(exp1, exp2)` und `Attr(exp, name)` schrittweise durchiteriert und dem jeweils nächsten `datatype`-Attribut gefolgt werden. Das **Iterieren** über den **Datentyp** wird solange durchgeführt, bis alle `Ref(exp)`-Knoten ihren im jeweiligen **Kontext** vorliegenden **Datentyp** in ihrem `datatype`-Attribut zugewiesen bekommen haben. Alles andere führt zu einer **Fehlermeldung**, für die das versteckte Attribut `error_data` genutzt wird.

Im Folgenden werden anhand mehrerer Beispiele die einzelnen Abschnitte **Anfangsteil** 0.0.4.1, **Mittelteil** 0.0.4.2 und **Schlussteil** 0.0.4.3 bei der Kompilierung von **Zugriffen** auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente**, **Verbundsattribute** bei gemischten Ausdrücken, wie `(*st_first.ar)[0];` einzeln isoliert betrachtet und erläutert.

0.0.4.1 Anfangsteil

Der **Anfangsteil**, bei dem die **Adresse** einer Variable auf den **Stack** geschrieben wird (z.B. `&st`), wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.37 erklärt.

```
1 struct ar_with_len {int len; int ar[2];};
2
3 void main() {
```

[17] Und nicht auf ein **Element** des Feldes.
[17] **Startadresse** / **Adresse** eines **Zeigerelements**, **Feldelements** oder **Verbundsattributes** auf dem Stack.

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

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

Im **Abstrakten Syntaxbaum** in Code 0.38 wird die **Refererenzierung** `&complex_var` mit der Komposition `Exp(Ref(Name('complex_var')))` dargestellt. Üblicherweise wird aber einfach nur `Ref(Name('complex_var')` geschrieben, aber da beim Erstellen des **Abstract Syntx Tree** jeder **Logischer Ausdruck** in ein `Exp(exp)` eingebettet wird, ist das `Ref(Name('complex_var')` in ein `Exp()` eingebettet. Man müsste an vielen Stellen eine gesonderte **Fallunterschiedung** aufstellen, um von `Exp(Ref(Name('complex_var')))` das `Exp()` zu entfernen, obwohl das `Exp()` in den darauffolgenden **Passes** so oder so herausgefiltet wird. Daher wurde darauf verzichtet den Code ohne triftigen Grund **komplexer** zu machen.

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_introduction_part.ast',
3   [
4     StructDecl
5       Name 'ar_with_len',
6       [
7         Alloc(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(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
          ↪ Name('st_ar')))
16        Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], PntrDecl(Num('1'),
          ↪ IntType('int')))), Name('complex_var')))
17        Exp(Ref(Name('complex_var')))
18      ],
19    FunDef
20      VoidType 'void',
21      Name 'fun',
22      [],
23      [
24        Exp(Alloc(Writeable(), ArrayDecl([Num('3')], StructSpec(Name('ar_with_len'))),
          ↪ Name('st_ar')))
25        Exp(Alloc(Writeable(), PntrDecl(Num('1'), ArrayDecl([Num('3')], IntType('int'))),
          ↪ Name('complex_var')))
26        Exp(Ref(Name('complex_var')))
27      ]
28  ]
```

Code 0.38: *Abstrakter Syntaxbaum für den Anfangsteil.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.39 wird die Komposition `Exp(Ref(Name('complex_var')))` durch die Komposition `Ref(Global(Num('9')))` bzw. `Ref(Stackframe(Num('9')))` ersetzt, je nachdem, ob die Variable `Name('complex_var')` in den **Globalen Statischen Daten** oder auf dem **Stack** liegt.

```
File
  Name './example_derived_dts_introduction_part.picoc_mon',
  [
    Block
      Name 'main.1',
      [
        // Exp(Ref(Name('complex_var')))
        Ref(Global(Num('9')))
        Return(Empty())
      ],
    Block
      Name 'fun.0',
      [
        // Exp(Ref(Name('complex_var')))
        Ref(Stackframe(Num('9')))
        Return(Empty())
      ]
  ]
```

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

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.40 werden die Komposition `Ref(Global(Num('9')))` bzw. `Ref(Stackframe(Num('9')))` durch ihre 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('9')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 9;
        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('9')))
        SUBI SP 1;
```

```
22        MOVE BAF IN1;
23        SUBI IN1 11;
24        STOREIN SP IN1 1;
25        # Return(Empty())
26        LOADIN BAF PC -1;
27      ]
28  ]
```

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

0.0.4.2 Mittelteil

Der **Mittelteil**, bei dem die **Startadresse** / **Adresse** einer Aneinandereihung 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 Aneinandererihung von Zugriffen auf **Zeigerelemente**, **Feldelemente** und **Verbundsattribute** `(*complex_var.ar)[2-2]` durch die Komposition `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-ANF Pass** in Code 0.43 wird die Komposition `Exp(Subscr(Deref(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')), BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))` durch die Kompositionen `Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))`, `Exp(Num('2'))`, `Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))`, `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` und `Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))` ersetzt. Bei `Subscr(exp1, exp2)` wird dieser Knoten einfach dem `exp` Attribut des `Ref(exp)`-Knoten zugewiesen und die **Indexberechnung** für `exp2` davorgezogen (in diesem Fall dargestellt durch `Exp(Num('2'))` und `Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))`) und über `Stack(Num('1'))` auf das Ergebnis der **Indexberechnung** auf dem **Stack** zugegriffen: `Exp(BinOp(Stack(Num('2')), Sub('-'), Stack(Num('1'))))`.

```
1  File
2    Name './example_derived_dts_main_part.picoc_mon',
3    [
4      Block
5        Name 'main.0',
6        [
7          // Assign(Name('var'), Array([Num('42')]))
8          Exp(Num('42'))
9          Assign(Global(Num('0')), Stack(Num('1')))
10         // Assign(Name('complex_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
11         Ref(Global(Num('0')))
12         Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
13         // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')),
           ↪  BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))
14         Ref(Global(Num('1')))
15         Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
16         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 0.43: *PicoC-ANF Pass für den Mittelteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.44 werden die Kompositionen `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 entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt. Bei der Generierung des **RETI-Code** muss auch das versteckte Attribut `datatype` im `Ref(exp, datatpye)`-Knoten berücksichtigt werden, was in Unterkapitel 0.0.4 zusammen mit der Abbildung 1 bereits erklärt wurde.

```
File
  Name './example_derived_dts_main_part.reti_blocks',
  [
    Block
      Name 'main.0',
      [
        # // Assign(Name('var'), Array([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('complex_var'), Struct([Assign(Name('ar'), Ref(Name('var')))]))
        # Ref(Global(Num('0')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 0;
        ADD IN1 DS;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Assign(Global(Num('1')), Stack(Num('1')))
        LOADIN SP ACC 1;
        STOREIN DS ACC 1;
        ADDI SP 1;
        # // Exp(Subscr(Subscr(Attr(Name('complex_var'), Name('ar')), Num('0')),
        ↪  BinOp(Num('2'), Sub('-'), Num('2'))))
        # Ref(Global(Num('1')))
        SUBI SP 1;
        LOADI IN1 1;
        ADD IN1 DS;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Ref(Attr(Stack(Num('1')), Name('ar')))
        LOADIN SP IN1 1;
        ADDI IN1 0;
        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 IN2 2;
        LOADIN IN2 IN1 0;
        LOADIN SP IN2 1;
        MULTI IN2 1;
        ADD IN1 IN2;
        ADDI SP 1;
        STOREIN SP IN1 1;
        # Exp(Num('2'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 2;
        STOREIN SP ACC 1;
        # Exp(Num('2'))
        SUBI SP 1;
        LOADI ACC 2;
        STOREIN SP ACC 1;
        # 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 0.44: *RETI-Blocks Pass für den Mittelteil.*

0.0.4.3 Schlussteil

Der **Schlussteil**, bei dem der **Inhalt** der Speicherzelle an der **Adresse**, die im **Anfangsteil** 0.0.4.1 und **Mittelteil** 0.0.4.2 auf dem **Stack** berechnet wurde, auf den **Stack** gespeichert wird[18], wird im Folgenden mithilfe des Beispiels in Code 0.45 erklärt.

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

Code 0.45: *PicoC-Code für den Schlussteil.*

Das Generieren des **Abstrakten Syntaxbaumes** in Code 0.46 verläuft wie üblich.

```
1  File
2    Name './example_derived_dts_final_part.ast',
```

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

```
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 0.46: *Abstrakter Syntaxbaum für den Schlussteil.*

Im **PicoC-ANF Pass** in Code 0.47 wird das eben angesprochene auf den **Stack** speichern des **Inhalts** der berechneten **Adresse** mit der Komposition `Exp(Stack(Num('1')))` dargestellt.

```
1 File
2   Name './example_derived_dts_final_part.picoc_mon',
3   [
4     Block
5       Name 'main.0',
6       [
7         // Assign(Name('var'), Num('42'))
8         Exp(Num('42'))
9         Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
10        // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
11        Ref(Global(Num('4')))
12        Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
13        // Assign(Name('complex_var3'), Ref(Name('pntr1')))
14        Ref(Global(Num('5')))
15        Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
16        // Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
17        Ref(Global(Num('0')))
18        Exp(Num('0'))
19        Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
20        Exp(Stack(Num('1')))
21        // Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
22        Ref(Global(Num('2')))
23        Exp(Num('0'))
```

```
24          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
25          Exp(Stack(Num('1')))
26          // Exp(Subscr(Name('complex_var3'), Num('0')))
27          Ref(Global(Num('6')))
28          Exp(Num('0'))
29          Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
30          Exp(Stack(Num('1')))
31          Return(Empty())
32        ]
33    ]
```

Code 0.47: *PicoC-ANF Pass für den Schlussteil.*

Im **RETI-Blocks Pass** in Code 0.48 wird die Komposition `Exp(Stack(Num('1')))` durch ihre entsprechenden **RETI-Knoten** ersetzt, wenn das versteckte Attribut `datatype` im `Exp(exp,datatpye)`-Knoten kein **Feld** `ArrayDecl(nums, datatype)` enthält, ansonsten ist bei einem **Feld** die **Adresse** auf dem **Stack** bereits das gewünschte Ergebnis. Genaueres wurde in Unterkapitel 0.0.4 zusammen mit der Abbildung 1 bereits erklärt.

```
1  File
2    Name './example_derived_dts_final_part.reti_blocks',
3    [
4      Block
5        Name 'main.0',
6        [
7          # // Assign(Name('var'), Num('42'))
8          # Exp(Num('42'))
9          SUBI SP 1;
10         LOADI ACC 42;
11         STOREIN SP ACC 1;
12         # Assign(Global(Num('4')), Stack(Num('1')))
13         LOADIN SP ACC 1;
14         STOREIN DS ACC 4;
15         ADDI SP 1;
16         # // Assign(Name('pntr1'), Ref(Name('var')))
17         # Ref(Global(Num('4')))
18         SUBI SP 1;
19         LOADI IN1 4;
20         ADD IN1 DS;
21         STOREIN SP IN1 1;
22         # Assign(Global(Num('5')), Stack(Num('1')))
23         LOADIN SP ACC 1;
24         STOREIN DS ACC 5;
25         ADDI SP 1;
26         # // Assign(Name('complex_var3'), Ref(Name('pntr1')))
27         # Ref(Global(Num('5')))
28         SUBI SP 1;
29         LOADI IN1 5;
30         ADD IN1 DS;
31         STOREIN SP IN1 1;
32         # Assign(Global(Num('6')), Stack(Num('1')))
33         LOADIN SP ACC 1;
34         STOREIN DS ACC 6;
35         ADDI SP 1;
```

```
36          # // Exp(Subscr(Name('complex_var1'), Num('0')))
37          # Ref(Global(Num('0')))
38          SUBI SP 1;
39          LOADI IN1 0;
40          ADD IN1 DS;
41          STOREIN SP IN1 1;
42          # Exp(Num('0'))
43          SUBI SP 1;
44          LOADI ACC 0;
45          STOREIN SP ACC 1;
46          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
47          LOADIN SP IN1 2;
48          LOADIN SP IN2 1;
49          MULTI IN2 2;
50          ADD IN1 IN2;
51          ADDI SP 1;
52          STOREIN SP IN1 1;
53          # // not included Exp(Stack(Num('1')))
54          # // Exp(Subscr(Name('complex_var2'), Num('0')))
55          # Ref(Global(Num('2')))
56          SUBI SP 1;
57          LOADI IN1 2;
58          ADD IN1 DS;
59          STOREIN SP IN1 1;
60          # Exp(Num('0'))
61          SUBI SP 1;
62          LOADI ACC 0;
63          STOREIN SP ACC 1;
64          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
65          LOADIN SP IN1 2;
66          LOADIN SP IN2 1;
67          MULTI IN2 2;
68          ADD IN1 IN2;
69          ADDI SP 1;
70          STOREIN SP IN1 1;
71          # Exp(Stack(Num('1')))
72          LOADIN SP IN1 1;
73          LOADIN IN1 ACC 0;
74          STOREIN SP ACC 1;
75          # // Exp(Subscr(Name('complex_var3'), Num('0')))
76          # Ref(Global(Num('6')))
77          SUBI SP 1;
78          LOADI IN1 6;
79          ADD IN1 DS;
80          STOREIN SP IN1 1;
81          # Exp(Num('0'))
82          SUBI SP 1;
83          LOADI ACC 0;
84          STOREIN SP ACC 1;
85          # Ref(Subscr(Stack(Num('2')), Stack(Num('1'))))
86          LOADIN SP IN2 2;
87          LOADIN IN2 IN1 0;
88          LOADIN SP IN2 1;
89          MULTI IN2 1;
90          ADD IN1 IN2;
91          ADDI SP 1;
92          STOREIN SP IN1 1;
```

```
93          # Exp(Stack(Num('1')))
94          LOADIN SP IN1 1;
95          LOADIN IN1 ACC 0;
96          STOREIN SP ACC 1;
97          # Return(Empty())
98          LOADIN BAF PC -1;
99        ]
100   ]
```

Code 0.48: *RETI-Blocks Pass für den Schlussteil.*

Literatur

Online

- *Bäume*. URL: https://www.stefan-marr.de/pages/informatik-abivorbereitung/baume/ (besucht am 17. 07. 2022).
- *GCC, the GNU Compiler Collection - GNU Project*. URL: https://gcc.gnu.org/ (besucht am 13. 07. 2022).

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).