Algorithmisches Denken und imperative Programmierung

12. Vorlesung

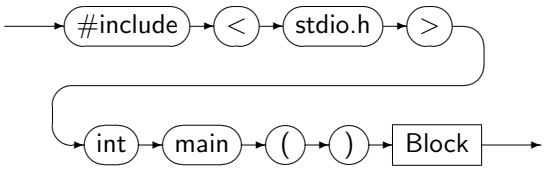
Janis Voigtländer

Universität Bonn

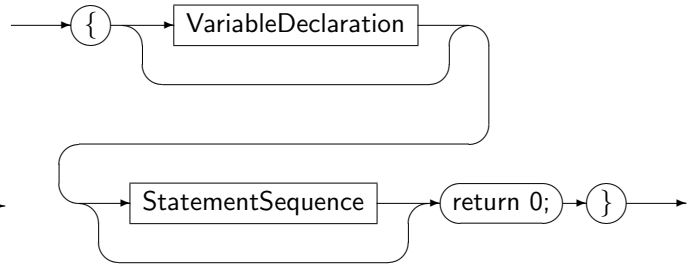
Wintersemester 2012/13

Wiederholung — C_0

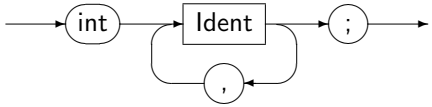
Program



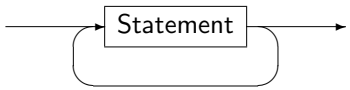
Block



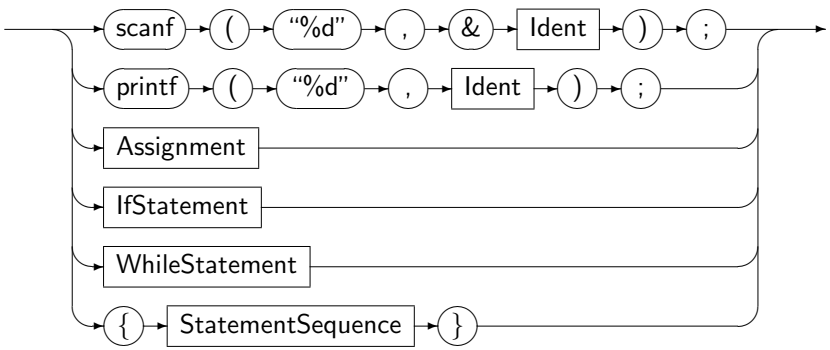
VariableDeclaration



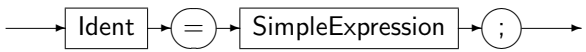
StatementSequence



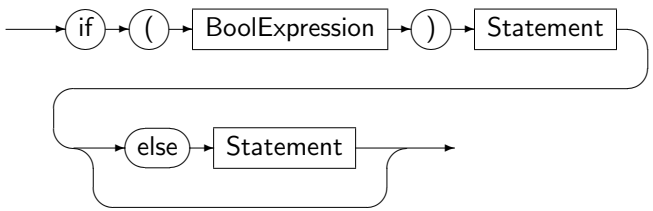
Statement



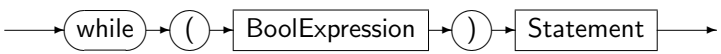
Assignment



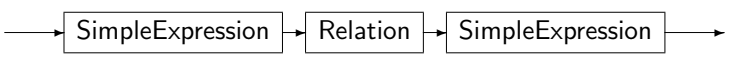
IfStatement



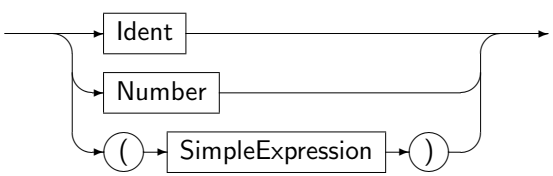
WhileStatement



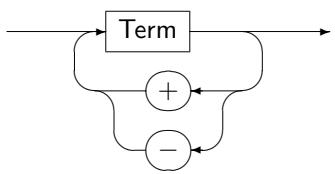
BoolExpression



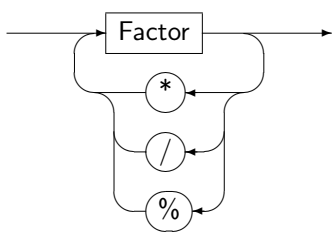
Factor



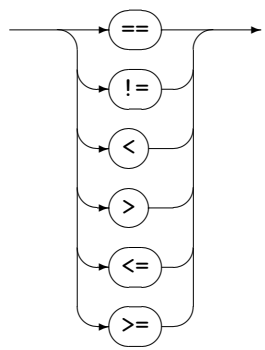
SimpleExpression



Term



Relation



Ident . . .

Number . . .

Wiederholung — AM

$\mathsf{AM} = \mathsf{BZ} \times \mathsf{DK} \times \mathsf{HS} \times \mathsf{Inp} \times \mathsf{Out}$, mit:

BZ	$= \mathbb{N}$	Befehlszähler
DK	$= \mathbb{Z}^*$	Datenkeller
HS	$= \{h \mid h : \mathbb{N}_+ \rightharpoonup \mathbb{Z}\}$	Hauptspeicher
Inp	$= \mathbb{Z}^*$	Eingabeband
Out	$= \mathbb{Z}^*$	Ausgabeband

- READ n: Lesen von Eingabeband in Hauptspeicher
- WRITE n: Ausgabe aus Hauptspeicher auf Ausgabeband
- LOAD n: Ablage aus Hauptspeicher auf Datenkeller
- STORE n: Entnahme aus Datenkeller in Hauptspeicher
- LIT z: Ablage einer Konstante auf Datenkeller
- ADD, MUL, SUB, DIV, MOD, LT, EQ, NE, GT, LE, GE: Berechnungen und Vergleiche (auf Datenkeller)
- JMP n: Sprung
- JMC n: bedingter Sprung abhängig von Datenkeller

Übersetzung von C_0 nach AM — Warum?

```
#include <stdio.h>

int main()
{ int i,n,s;
  scanf("%d",&n);
  i=1;
  s=0;
  while (i<=n)
    { s=s+i*i;
      i=i+1;
    }
  printf("%d",s);
  return 0;
}
```

$\overset{???}{\Longrightarrow}$

```
1: READ 2;
2: LIT 1;
3: STORE 1;
4: LIT 0;
5: STORE 3;
6: LOAD 1;
7: LOAD 2;
8: LE;
9: JMC 21;
10: LOAD 3;
11: LOAD 1;
12: LOAD 1;
13: MUL;
14: ADD;
15: STORE 3;
16: LOAD 1;
17: LIT 1;
18: ADD;
19: STORE 1;
20: JMP 6;
21: WRITE 3;
```

Warum wollen wir von C_0 nach AM?

- C_0 auf der abstrakten Maschine ausführbar machen (sozusagen ein Compiler)
- C_0 eine formale Semantik geben

Eingabesprache für die Übersetzung

Bezeichne $W(\langle \text{Program} \rangle)$ die Menge aller „Worte“, die mit dem Startdiagramm **Program** beginnend erzeugt werden können.
(analog auch für andere Teile des Syntaxdiagramm-Systems)

Unsere Eingabesprache sind alle Worte der Sprache $W(\langle \text{Program} \rangle)$, die folgende zwei (kontextsensitive) Nebenbedingungen erfüllen:

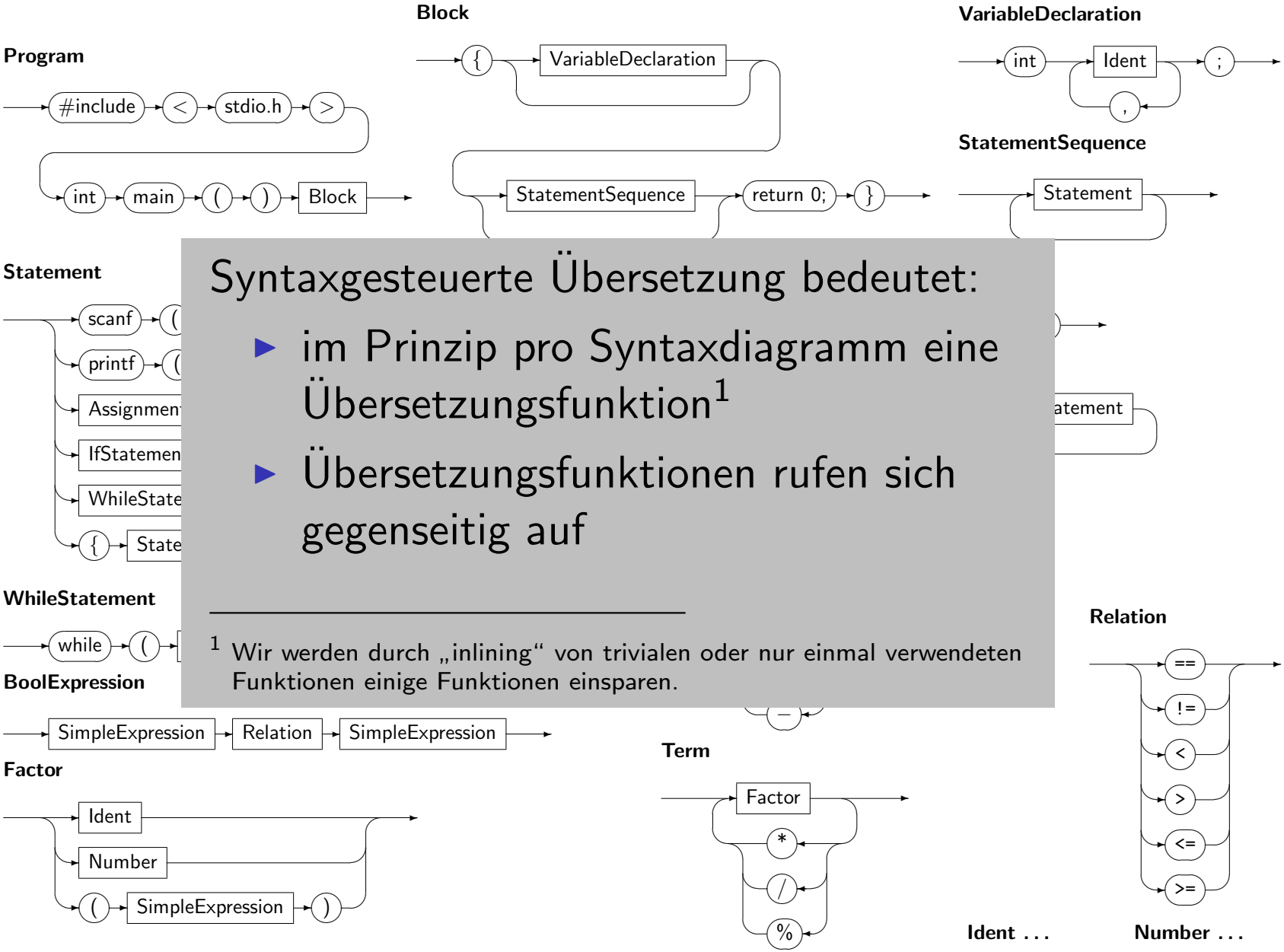
1. Jeder Bezeichner darf höchstens einmal in der eventuell vorhandenen VariableDeclaration deklariert sein.
2. Wenn ein Bezeichner in der eventuell vorhandenen StatementSequence des Blocks auftritt, so muss er in der (dann unbedingt vorhandenen) VariableDeclaration des Blocks deklariert sein.

Übersetzungsstrategie

Übersetzung erfolgt syntaxgesteuert, das heißt:

- Übersetzung von $W(\langle \text{Program} \rangle)$ benutzt Übersetzung von $W(\langle \text{Block} \rangle)$.
- Übersetzung von $W(\langle \text{Block} \rangle)$ benutzt Analyse von $W(\langle \text{VariableDeclaration} \rangle)$ und Übersetzung von $W(\langle \text{StatementSequence} \rangle)$.
- Übersetzung von $W(\langle \text{StatementSequence} \rangle)$ benutzt Übersetzung von $W(\langle \text{Statement} \rangle)$.
- ...

Auf geht's, aber wie?



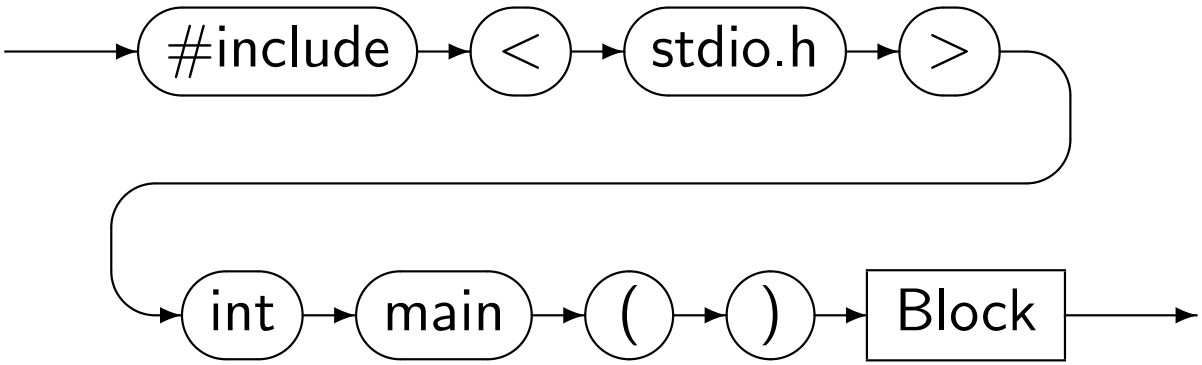
Syntaxgesteuerte Übersetzung bedeutet:

- im Prinzip pro Syntaxdiagramm eine Übersetzungsfunktion[1]
- Übersetzungsfunktionen rufen sich gegenseitig auf

[1] Wir werden durch „inlining" von trivialen oder nur einmal verwendeten Funktionen einige Funktionen einsparen.

Syntaxgesteuerte Übersetzung (I)

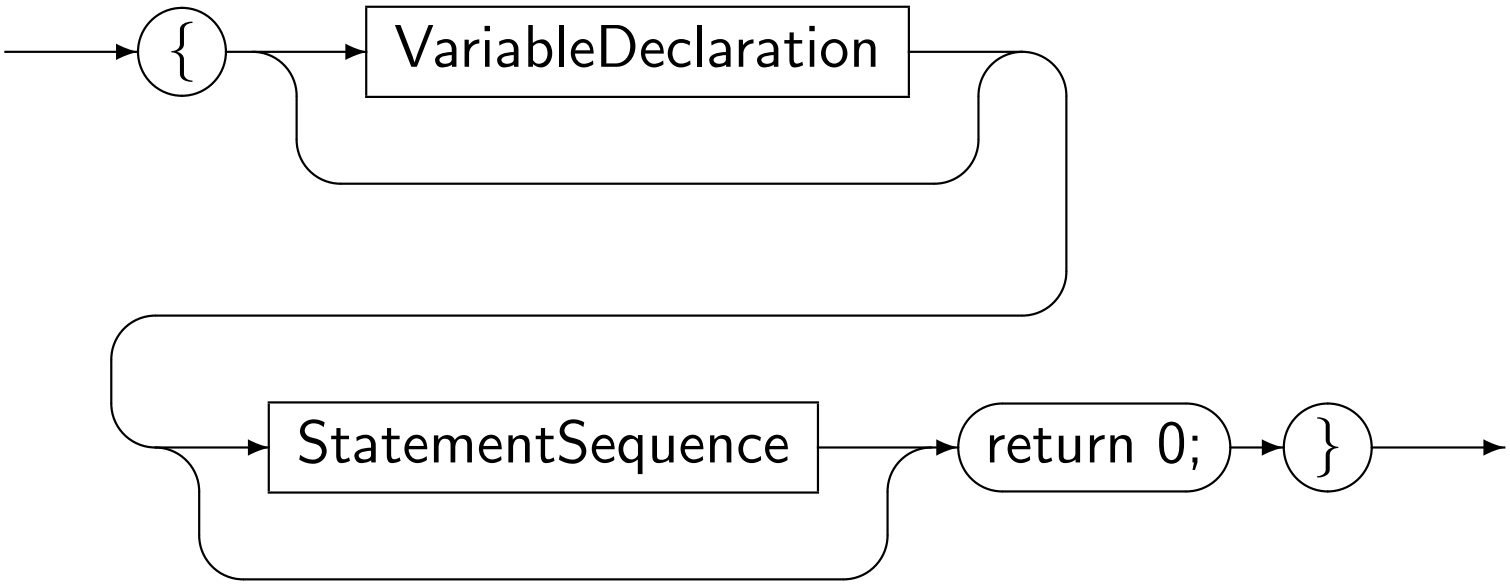
Program



$\rightsquigarrow$ $\underline{trans}$(**#include** <stdio.h> **int** main() $block)
$= \underline{blocktrans}(\$block)$
für alle $\$block \in W(\langle \text{Block} \rangle)$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (II)

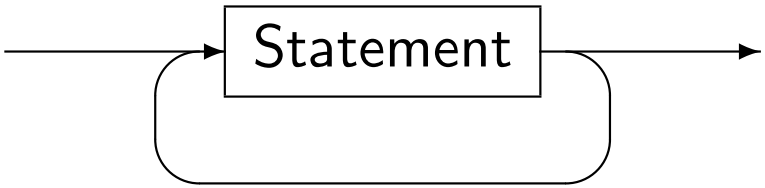
Block



$\rightsquigarrow$ $\underline{blocktrans}(\{\$vardecl\ \$statseq\ \textbf{return}\ 0;\})$
$= \underline{stseqtrans}(\$statseq, \cdots)$
für alle $\$vardecl \in \{\varepsilon\} \cup W(\langle \text{VariableDeclaration} \rangle)$
und $\$statseq \in \{\varepsilon\} \cup W(\langle \text{StatementSequence} \rangle)$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (III)

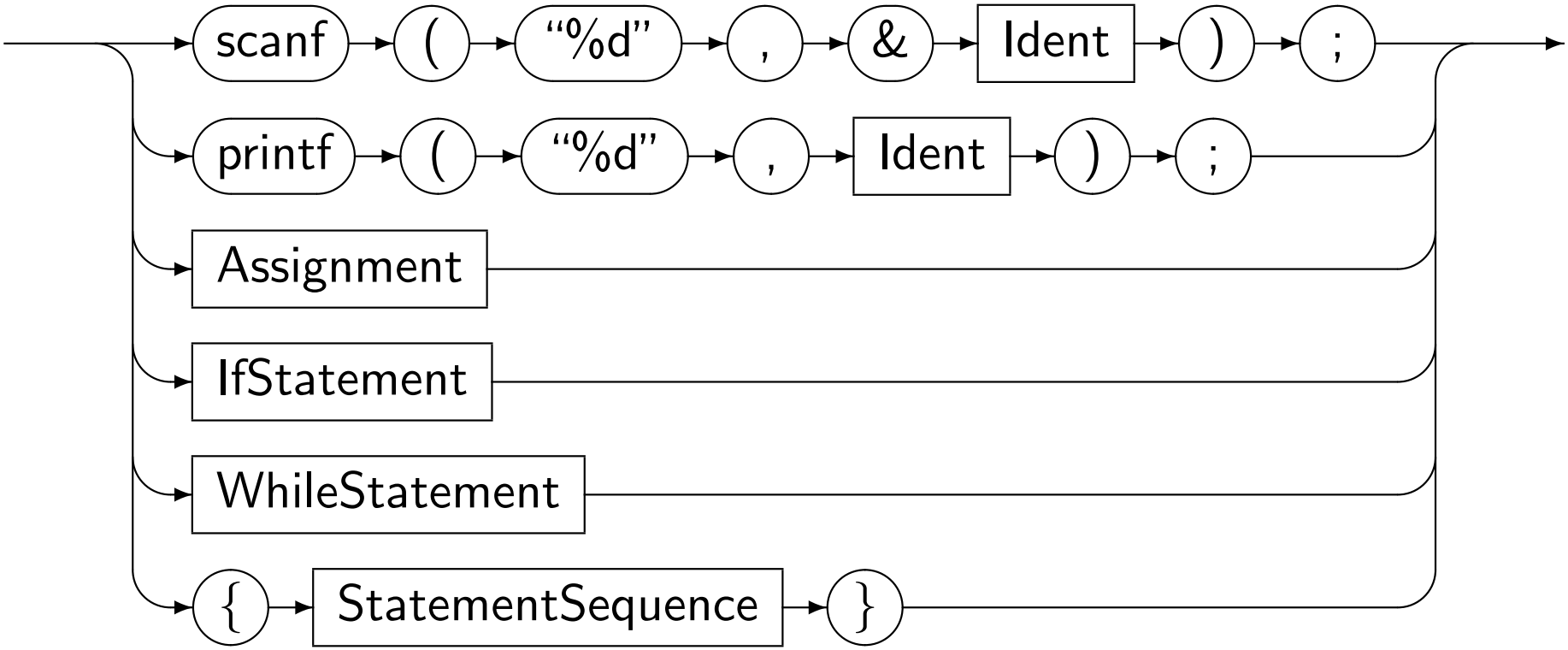
StatementSequence



$$\rightsquigarrow \underline{stseqtrans}(\$stat_1 \ \ldots \ \$stat_n, \cdots)$$
$$= \underline{sttrans}(\$stat_1, \cdots)$$
$$\vdots$$
$$\underline{sttrans}(\$stat_n, \cdots)$$
für alle $\$stat_1, \ldots, \$stat_n \in W(\langle \text{Statement} \rangle)$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (IV)

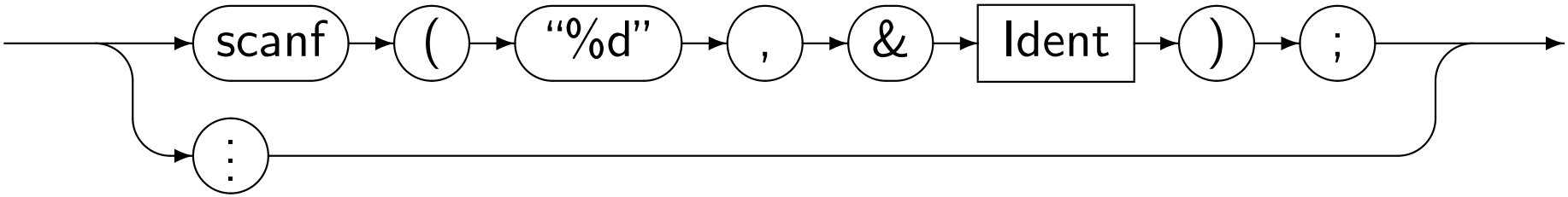
Statement



$\rightsquigarrow$ Fallunterscheidung,
zum Beispiel: $\underline{sttrans}(\text{scanf}(\text{"\%d"},\&\$id\,);,\cdots)$
$= \text{READ}\ ?$
für alle $\$id \in W(\langle\text{Ident}\rangle)$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (IV)

Statement

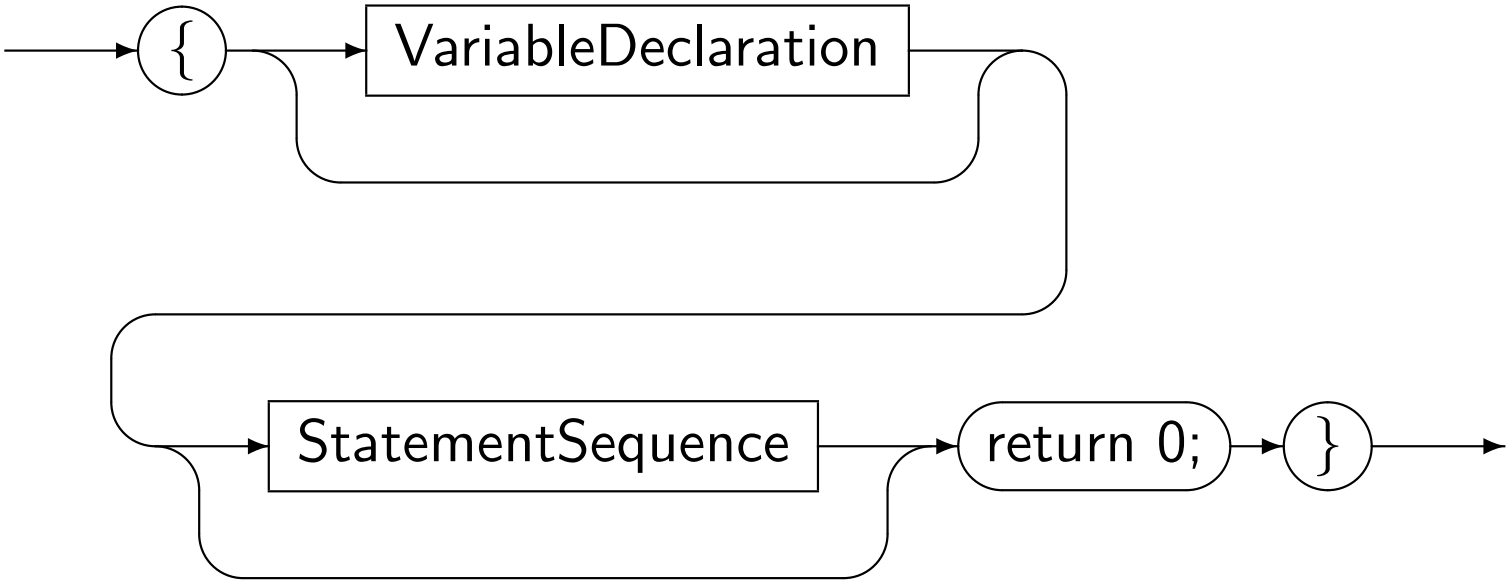


$\rightsquigarrow$ Fallunterscheidung,
zum Beispiel: $\underline{sttrans}(\text{scanf}(\text{"\%d"},\&\$id\,);,\cdots)$
$= \text{READ}\ ?$
für alle $\$id \in W(\langle\text{Ident}\rangle)$

Wir brauchen Informationen über die Zuordnung von Bezeichnern (im Programm) zu Speicherplätzen (im HS der AM)!

Erzeugung einer sogenannten Symboltabelle (I)

Block

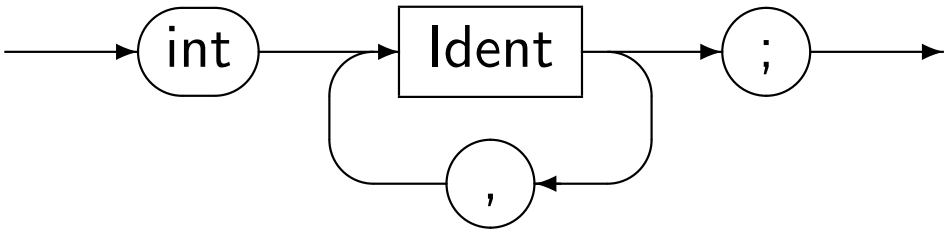


$\rightsquigarrow$ *blocktrans*({$*vardecl* $*statseq* **return** 0;})
$= \underline{\textit{stseqtrans}}(\$\textit{statseq}, \underline{\textit{mksymtab}}(\$\textit{vardecl}), \cdots)$
für alle $\$\textit{vardecl} \in \{\varepsilon\} \cup W(\langle\text{VariableDeclaration}\rangle)$
und $\$\textit{statseq} \in \{\varepsilon\} \cup W(\langle\text{StatementSequence}\rangle)$

Menge der Symboltabellen:
$\text{Tab} = \{tab \mid tab : W(\langle\text{Ident}\rangle) \rightarrow\!\!\!\!\!\rightarrow \mathbb{N}_+\}$

Erzeugung einer sogenannten Symboltabelle (II)

VariableDeclaration



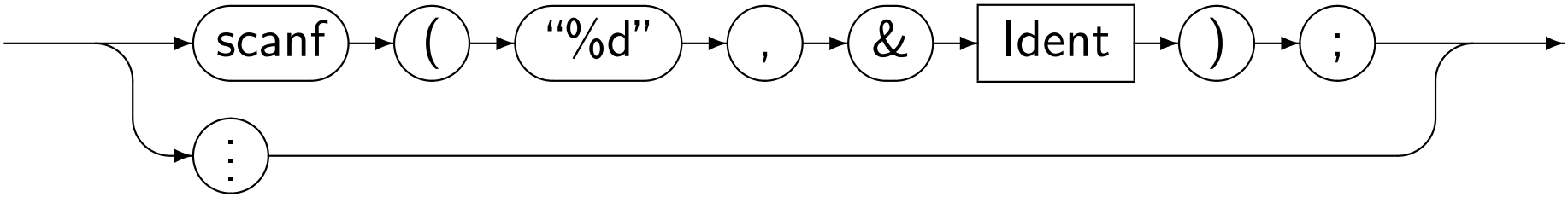
$\rightsquigarrow$ $\underline{mksymtab}(\varepsilon) = [\,]$ (leere Abbildung)
$\underline{mksymtab}(\textbf{int}\ \$id_1, \ldots, \$id_m;)$
$= [\$id_1/1, \ldots, \$id_m/m]$
für alle $\$id_1, \ldots, \$id_m \in W(\langle \text{Ident} \rangle)$

Die Symboltabelle wird von $\underline{stseqtrans}$ aus in weitere Übersetzungsfunktionen propagiert!

Zuordnung in der Symboltabelle ist eindeutig, wegen der ersten kontextsensitiven Nebenbedingung (keine Doppeldeklarationen).

Syntaxgesteuerte Übersetzung (IV)

Statement

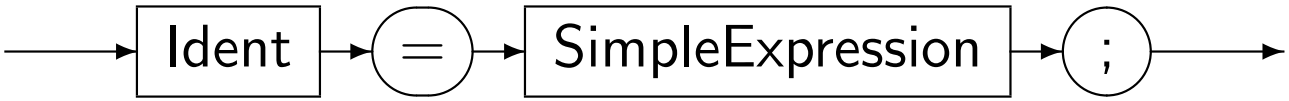


$\rightsquigarrow$ Fallunterscheidung,
zum Beispiel: $\underline{sttrans}(\text{scanf}(\text{"\%d"},\&\$id\,);, tab, \cdots)$
$=$ wenn $tab(\$id) = n$, dann READ n;
für alle $\$id \in W(\langle\text{Ident}\rangle)$ und $tab \in \text{Tab}$

Zugriff auf *tab* hier ist immer definiert, wegen der zweiten kontextsensitiven Nebenbedingung (nur deklarierte Bezeichner dürfen verwendet werden).

Syntaxgesteuerte Übersetzung (V)

Assignment



$\rightsquigarrow \underline{sttrans}(\$id = \$exp;, tab, \cdots)$
$= $ wenn $tab(\$id) = n$, dann:
$\underline{simpleexptrans}(\$exp, tab)$
STORE n;
für alle $\$id \in W(\langle\text{Ident}\rangle)$, $\$exp \in W(\langle\text{SimpleExpression}\rangle)$
und $tab \in \text{Tab}$

Geht auf, wenn (weil!) $\underline{simpleexptrans}(\$exp, tab)$ zu einem Stack mit dem Berechnungsergebnis an oberster Position führt (wobei nicht tiefer in den Datenkeller eingegriffen wird).

Einschub: Prinzip der Berechnungsübersetzung

Jede Rechnung in C_0 wird in AM mittels der sogenannten „reverse polish notation“ (Postfix-Notation) umgesetzt, d.h. Operatoren stehen hinter den Operanden.

Beispiel: $1 + 2 \Rightarrow 1\ 2\ +$

Der Vorteil ist, dass keine Klammerung mehr nötig ist, da jeder Operator nur so viel Operanden konsumiert, wie er benötigt.

Beispiel: $2 * (1 + 3 - 2) \Rightarrow 2\ 1\ 3\ +\ 2\ -\ *$

Legt man Operanden auf den Stack und führt Operatoren jeweils direkt aus, dann ergeben sich die Zwischen- und Endergebnisse.

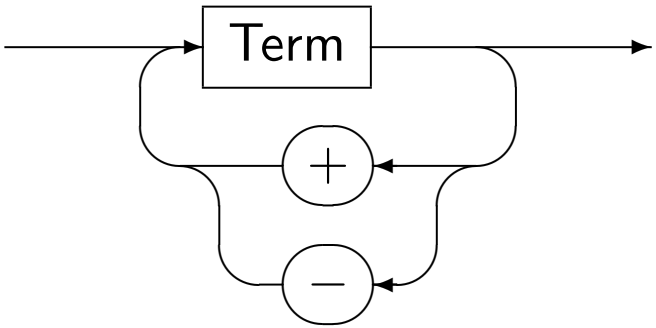
Beispiel:

$$2 * (1 + 3 - 2) \Rightarrow 2\ 1\ 3\ + \Rightarrow 2\ 4 \Rightarrow 2\ 4\ 2\ - \Rightarrow 2\ 2 \Rightarrow 2\ 2\ * \Rightarrow 4$$

Wir wissen nun auch: Jede Berechnung nimmt nie mehr vom Stack als sie drauflegt.

Syntaxgesteuerte Übersetzung (VI)

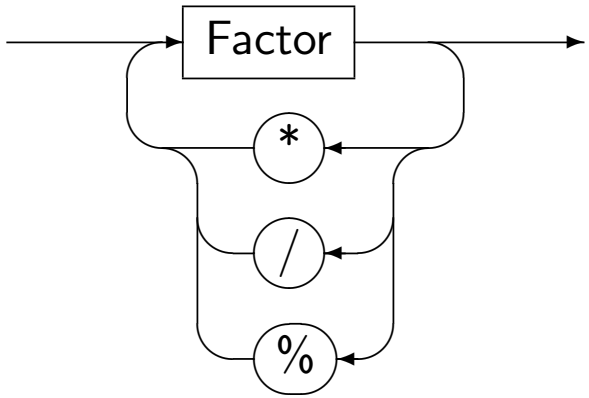
SimpleExpression



$\rightsquigarrow$ $\underline{simpleexptrans}(\$t_1\ \$op_2\ \$t_2\ \ldots\ \$op_n\ \$t_n, tab)$
$= \underline{termtrans}(\$t_1, tab)$
$\underline{termtrans}(\$t_2, tab)$
OP_2;
$\vdots$
$\underline{termtrans}(\$t_n, tab)$
OP_n;
für alle $\$t_1, \ldots, \$t_n \in W(\langle \mathrm{Term} \rangle)$,
$\$op_2, \ldots, \$op_n \in \{+, -\}$ und $tab \in \mathrm{Tab}$,
wobei $\mathrm{OP}_i = \mathrm{ADD}$, falls $\$op_i = +$
$\mathrm{OP}_i = \mathrm{SUB}$, falls $\$op_i = -$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (VII)

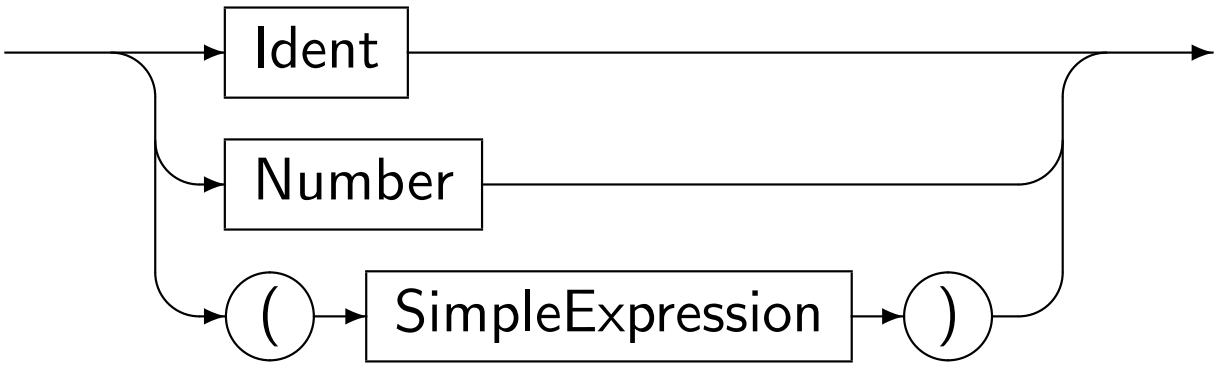
Term



$\rightsquigarrow$ $\underline{termtrans}(\$f_1\ \$op_2\ \$f_2\ \ldots\ \$op_n\ \$f_n, tab)$
$= \underline{factortrans}(\$f_1, tab)$
$\underline{factortrans}(\$f_2, tab)$
OP_2;
$\vdots$
$\underline{factortrans}(\$f_n, tab)$
OP_n;
für alle $\$f_1, \ldots, \$f_n \in W(\langle \mathrm{Factor} \rangle)$,
$\$op_2, \ldots, \$op_n \in \{*, /, \%\}$ und $tab \in \mathrm{Tab}$,
wobei $\mathrm{OP}_i = \mathrm{MUL}$, falls $\$op_i = *$
$\mathrm{OP}_i = \mathrm{DIV}$, falls $\$op_i = /$
$\mathrm{OP}_i = \mathrm{MOD}$, falls $\$op_i = \%$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (VIII)

Factor



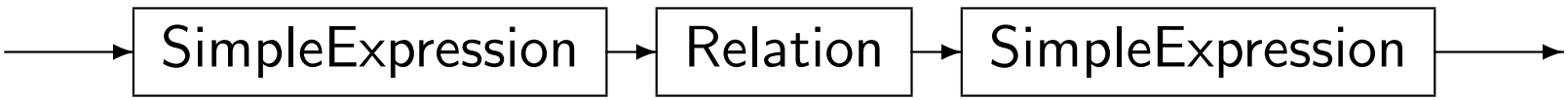
$\rightsquigarrow$ $\underline{factortrans}(\$id, tab)$
$=$ wenn $tab(\$id) = n$, dann LOAD n;
für alle $\$id \in W(\langle \text{Ident} \rangle)$ und $tab \in \text{Tab}$

$\underline{factortrans}(\$z, tab)$
$=$ LIT $\$z$;
für alle $\$z \in W(\langle \text{Number} \rangle)$ und $tab \in \text{Tab}$

$\underline{factortrans}((\$se), tab)$
$= \underline{simpleexptrans}(\$se, tab)$
für alle $\$se \in W(\langle \text{SimpleExpression} \rangle)$ und $tab \in \text{Tab}$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (IX)

BoolExpression



$\rightsquigarrow$ $\underline{boolexptrans}(\$se_1\ \$rel\ \$se_2, tab)$
$=$ $\underline{simpleexptrans}(\$se_1, tab)$
$\underline{simpleexptrans}(\$se_2, tab)$
REL;
für alle $\$se_1, \$se_2 \in W(\langle \text{SimpleExpression} \rangle)$,
$\$rel \in \{==, !=, <, >, <=, >=\}$ und $tab \in \text{Tab}$,
wobei REL $=$ EQ, falls $\$rel = ==$
REL $=$ NE, falls $\$rel = !=$
REL $=$ LT, falls $\$rel = <$
$\ldots$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (X)

WhileStatement

$\rightsquigarrow$ *sttrans*(**while** ($*exp*) $*stat*, *tab*, $\cdots$)
$=$ *boolexptrans*($*exp*, *tab*)
JMC ?;
sttrans($*stat*, *tab*, $\cdots$)
JMP ?;
für alle $*exp* $\in W(\langle$BoolExpression$\rangle)$,
$*stat* $\in W(\langle$Statement$\rangle)$ und *tab* $\in$ Tab

Problem:
- keine konkreten Adressen bekannt
- hängen unter anderem von Länge des übersetzten Codes für $*exp* und $*stat* ab

Lösung:
- zunächst nur abstrakte Adressen, später Nachbearbeitung
- „baumstrukturierte Adressen“: Listen über natürlichen Zahlen (Notation 3.2.4.1)

Syntaxgesteuerte Übersetzung (X)

$\underline{sttrans}$(**while** ($exp) $stat, $tab, $a)
= a.2: $\underline{boolexptrans}$($exp, $tab)
JMC a;
$\underline{sttrans}$($stat, $tab, $a.1)
JMP a.2;
a:

für alle $exp $\in W(\langle \text{BoolExpression} \rangle)$,
$stat $\in W(\langle \text{Statement} \rangle)$, $tab $\in$ Tab und $a \in \mathbb{N}^*$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (XI)

$\underline{blocktrans}(\{\$vardecl\ \$statseq\ \textbf{return}\ 0;\})$
$= \underline{stseqtrans}(\$statseq, \underline{mksymtab}(\$vardecl), 1)$
für alle $\$vardecl \in \{\varepsilon\} \cup W(\langle \text{VariableDeclaration} \rangle)$
und $\$statseq \in \{\varepsilon\} \cup W(\langle \text{StatementSequence} \rangle)$

$\underline{stseqtrans}(\$stat_1 \ \ldots \ \$stat_n, tab, a)$
$= \underline{sttrans}(\$stat_1, tab, a.1)$
$\ldots$
$\underline{sttrans}(\$stat_n, tab, a.n)$
für alle $\$stat_1, \ldots, \$stat_n \in W(\langle \text{Statement} \rangle)$, $tab \in \text{Tab}$ und $a \in \mathbb{N}^*$

Noch einige Fälle offen ...

Syntaxgesteuerte Übersetzung (XII)

$\underline{sttrans}$(**if** ($exp) $stat, tab, a)
= $\underline{boolexptrans}$($exp, tab)
JMC a;
$\underline{sttrans}$($stat, tab, a.1)
a:
für alle $exp $\in W(\langle$BoolExpression$\rangle)$, $stat $\in W(\langle$Statement$\rangle)$,
$tab \in$ Tab und $a \in \mathbb{N}^*$

$\underline{sttrans}$(**if** ($exp) $stat$_1$ **else** $stat$_2, tab, a)$
= $\underline{boolexptrans}$($exp, tab)
JMC a;
$\underline{sttrans}$($stat$_1, tab, a.1)$
JMP a.3;
a: $\underline{sttrans}$($stat$_2, tab, a.2)$
a.3:
für alle $exp $\in W(\langle$BoolExpression$\rangle)$,
$stat$_1, $stat$_2 \in W(\langle$Statement$\rangle)$, $tab \in$ Tab und $a \in \mathbb{N}^*$

Syntaxgesteuerte Übersetzung (XIII)

$\underline{sttrans}(\text{printf}\,(\texttt{"\%d"},\$id\,);\,, tab, a)$
$= \text{wenn } tab(\$id) = n, \text{ dann WRITE } n;$
für alle $\$id \in W(\langle\text{Ident}\rangle)$, $tab \in \text{Tab}$ und $a \in \mathbb{N}^*$

$\underline{sttrans}(\{\$stat_1 \ \ldots \ \$stat_n\}, tab, a)$
$= \underline{stseqtrans}(\$stat_1 \ \ldots \ \$stat_n, tab, a)$
für alle $\$stat_1, \ldots, \$stat_n \in W(\langle\text{Statement}\rangle)$,
$tab \in \text{Tab}$ und $a \in \mathbb{N}^*$

Übersetzungsfunktionen kompakt

Zusammenfassung (I)

$\underline{trans}$(**#include** <stdio.h> **int** main() $\$block$)
$= \underline{blocktrans}(\$block)$

$\underline{blocktrans}$({$\$vardecl$ $\$statseq$ **return** 0;})
$= \underline{stseqtrans}(\$statseq, \underline{mksymtab}(\$vardecl), 1)$

$\underline{mksymtab}(\varepsilon) = [\,]$
$\underline{mksymtab}(\textbf{int}\ \ \$id_1, \ldots, \$id_m;) = [\$id_1/1, \ldots, \$id_m/m]$

$\underline{stseqtrans}(\$stat_1\ \ \ldots\ \ \$stat_n, tab, a)$
$= \underline{sttrans}(\$stat_1, tab, a.1)$
$\ldots$
$\underline{sttrans}(\$stat_n, tab, a.n)$

Zusammenfassung (II)

$\underline{sttrans}(\$id = \$exp;, tab, a)$
= wenn $tab(\$id) = n$, dann:
  $\underline{simpleexptrans}(\$exp, tab)$
  STORE n;

$\underline{sttrans}(\textbf{if}\ (\$exp)\ \$stat, tab, a)$
= $\underline{boolexptrans}(\$exp, tab)$
  JMC a;
  $\underline{sttrans}(\$stat, tab, a.1)$
  a:

$\underline{sttrans}(\textbf{if}\ (\$exp)\ \$stat_1\ \textbf{else}\ \$stat_2, tab, a)$
= $\underline{boolexptrans}(\$exp, tab)$
  JMC a;
  $\underline{sttrans}(\$stat_1, tab, a.1)$
  JMP a.3;
  a: $\underline{sttrans}(\$stat_2, tab, a.2)$
  a.3:

Zusammenfassung (III)

$\underline{sttrans}$(**while** ($exp) $stat, tab, a)
= a.2: $\underline{boolexptrans}$($exp, tab)
JMC a;
$\underline{sttrans}$($stat, tab, a.1)
JMP a.2;
a:

$\underline{sttrans}$(scanf("%d",&$id);, tab, a)
= wenn tab($id) = n, dann READ n;

$\underline{sttrans}$(printf ("%d",$id);, tab, a)
= wenn tab($id) = n, dann WRITE n;

$\underline{sttrans}$({$stat_1 \ldots \ $stat_n$}, tab, a)
= $\underline{stseqtrans}$($stat_1 \ldots \ $stat_n$, tab, a)

Zusammenfassung (IV)

$\underline{boolexptrans}(\$se_1\ \$rel\ \$se_2, tab)$
$= \underline{simpleexptrans}(\$se_1, tab)$
$\underline{simpleexptrans}(\$se_2, tab)$
REL;
wobei REL $=$ EQ, falls $\$rel == $
$\ldots$

$\underline{simpleexptrans}(\$t_1\ \$op_2\ \$t_2\ \ldots\ \$op_n\ \$t_n, tab)$
$= \underline{termtrans}(\$t_1, tab)$
$\underline{termtrans}(\$t_2, tab)$
OP_2;
$\ldots$
$\underline{termtrans}(\$t_n, tab)$
OP_n;
wobei OP_i $=$ ADD, falls $\$op_i = +$
OP_i $=$ SUB, falls $\$op_i = -$

Zusammenfassung (V)

$\underline{termtrans}(\$f_1\ \$op_2\ \$f_2\ \ldots\ \$op_n\ \$f_n, tab)$
$= \underline{factortrans}(\$f_1, tab)$
$\underline{factortrans}(\$f_2, tab)$
OP_2;
$\ldots$
$\underline{factortrans}(\$f_n, tab)$
OP_n;
wobei $\mathrm{OP}_i = \mathrm{MUL}$, falls $\$op_i = *$
$\ldots$

$\underline{factortrans}(\$id, tab)$
$=$ wenn $tab(\$id) = n$, dann LOAD n;

$\underline{factortrans}(\$z, tab) = \mathrm{LIT}\ \$z$;

$\underline{factortrans}((\$se), tab) = \underline{simpleexptrans}(\$se, tab)$

Zusammenfassung (VI)

C_0 wird auf AM abgebildet, indem:

- „atomare Befehle“ (wie scanf oder printf) direkt umgesetzt/übersetzt werden,
- Kontrollstrukturen in (geeignet arrangierte) Sprünge übersetzt werden, wobei
  - wegen syntaktischer Schachtelung (Blockstruktur, komplexe Statements als Teile anderer Statements) die Übersetzung in flach strukturierten AM-Code nicht (bzw. schwer) möglich ist, daher ein Umweg über baumstrukturierte Adressen gegangen wird,
- Schachtelung bei Ausdrücken mittels Stackprinzip umgesetzt wird.

schließlich . . .

Übersetzung am Beispiel:

```
#include <stdio.h>

int main()
{ int i,n,s;
  scanf("%d",&n);
  i=1;
  s=0;
  while (i<=n)
    { s=s+i*i;
      i=i+1;
    }
  printf("%d",s);
  return 0;
}
```

Übersetzung am Beispiel

$$\underline{\textit{trans}}(\#\textbf{include}\ \langle\text{stdio.h}\rangle\ \textbf{int}\ \text{main}()\ \{\ \ldots\ \textbf{return}\ 0;\ \})$$

$$= \underline{\textit{blocktrans}}(\{\ \textbf{int}\ \ \text{i},\text{n},\text{s};\ \ \text{scanf}(\text{"\%d"},\&\text{n});\ \ \ldots\ \textbf{return}\ 0;\ \})$$

$$= \underline{\textit{stseqtrans}}(\text{scanf}(\text{"\%d"},\&\text{n});\ \ \ldots\ \ \text{printf}\,(\text{"\%d"},\text{s});\ ,$$
$$\underline{\textit{mksymtab}}(\textbf{int}\ \ \text{i},\text{n},\text{s};)\ ,\ 1)$$

$$= \underline{\textit{stseqtrans}}(\text{scanf}(\text{"\%d"},\&\text{n});\ \ \ldots\ \ \text{printf}\,(\text{"\%d"},\text{s});\ ,$$
$$\underbrace{[\text{i}/1,\text{n}/2,\text{s}/3]}_{tab_1}\ ,\ 1)$$

$$= \underline{\textit{sttrans}}(\text{scanf}(\text{"\%d"},\&\text{n});\ ,\ tab_1\ ,\ 1.1)$$
$$\underline{\textit{sttrans}}(\text{i}{=}1;\ ,\ tab_1\ ,\ 1.2)$$
$$\underline{\textit{sttrans}}(\text{s}{=}0;\ ,\ tab_1\ ,\ 1.3)$$
$$\underline{\textit{sttrans}}(\textbf{while}\ (\text{i}{<=}\text{n})\ \{\ \text{s}{=}\text{s}{+}\text{i}{*}\text{i};\ \text{i}{=}\text{i}{+}1;\ \}\ ,\ tab_1\ ,\ 1.4)$$
$$\underline{\textit{sttrans}}(\text{printf}\,(\text{"\%d"},\text{s});\ ,\ tab_1\ ,\ 1.5)$$

Übersetzung am Beispiel

$=$ READ 2;
simpleexptrans(1 , tab_1) STORE 1;
simpleexptrans(0 , tab_1) STORE 3;
1.4.2 : *boolexptrans*(i<=n , tab_1)
JMC 1.4;
sttrans({ s=s+i*i; i=i+1; } , tab_1 , 1.4.1)
JMP 1.4.2;
1.4 : WRITE 3;

Übersetzung am Beispiel

$$
\begin{array}{rll}
= & & \text{READ 2;} \\
 & \underline{\mathit{simpleexptrans}}(1\,, \mathit{tab}_1) & \text{STORE 1;} \\
 & \underline{\mathit{simpleexptrans}}(0\,, \mathit{tab}_1) & \text{STORE 3;} \\
1.4.2: & \underline{\mathit{boolexptrans}}(\mathsf{i}{<=}\mathsf{n}\,, \mathit{tab}_1) & \\
 & \text{JMC 1.4;} & \\
 & \underline{\mathit{stseqtrans}}(\mathsf{s}{=}\mathsf{s}{+}\mathsf{i}{*}\mathsf{i};\ \mathsf{i}{=}\mathsf{i}{+}1;\,, \mathit{tab}_1\,, 1.4.1) & \\
 & \text{JMP 1.4.2;} & \\
1.4: & \text{WRITE 3;} &
\end{array}
$$

Übersetzung am Beispiel

$=$ READ 2;
LIT 1; STORE 1;
LIT 0; STORE 3;
1.4.2 : *simpleexptrans*(i, tab_1) *simpleexptrans*(n, tab_1) LE;
JMC 1.4;
sttrans(s=s+i∗i; , tab_1 , 1.4.1.1)
sttrans(i=i+1; , tab_1 , 1.4.1.2)
JMP 1.4.2;
1.4 : WRITE 3;

Übersetzung am Beispiel

$=$ READ 2;
LIT 1; STORE 1;
LIT 0; STORE 3;
1.4.2 : *termtrans*(i, tab_1) *termtrans*(n, tab_1) LE;
JMC 1.4;
simpleexptrans(s+i∗i, tab_1) STORE 3;
simpleexptrans(i+1, tab_1) STORE 1;
JMP 1.4.2;
1.4 : WRITE 3;

Übersetzung am Beispiel

$=$ READ 2;
LIT 1; STORE 1;
LIT 0; STORE 3;
1.4.2 : $\underline{factortrans}(\mathsf{i}, tab_1)$ $\underline{factortrans}(\mathsf{n}, tab_1)$ LE;
JMC 1.4;
$\underline{termtrans}(\mathsf{s}, tab_1)$ $\underline{termtrans}(\mathsf{i}*\mathsf{i}, tab_1)$
ADD; STORE 3;
$\underline{termtrans}(\mathsf{i}, tab_1)$ $\underline{termtrans}(1, tab_1)$ ADD; STORE 1;
JMP 1.4.2;
1.4 : WRITE 3;

Übersetzung am Beispiel

$=$ READ 2;
LIT 1; STORE 1;
LIT 0; STORE 3;
1.4.2 : LOAD 1; LOAD 2; LE;
JMC 1.4;
$\underline{factortrans}(\mathsf{s}, tab_1)$ $\underline{factortrans}(\mathsf{i}, tab_1)$ $\underline{factortrans}(\mathsf{i}, tab_1)$
MUL; ADD; STORE 3;
$\underline{factortrans}(\mathsf{i}, tab_1)$ $\underline{factortrans}(1, tab_1)$ ADD; STORE 1;
JMP 1.4.2;
1.4 : WRITE 3;

Übersetzung am Beispiel

```
=       READ 2;
        LIT 1;   STORE 1;
        LIT 0;   STORE 3;
1.4.2 : LOAD 1;   LOAD 2;   LE;
        JMC 1.4;
        LOAD 3;   LOAD 1;   LOAD 1;
        MUL;   ADD;   STORE 3;
        LOAD 1;   LIT 1;   ADD;   STORE 1;
        JMP 1.4.2;
  1.4 : WRITE 3;
```

Beispiel — übersetzt

```
      READ 2;
      LIT 1;
      STORE 1;
      LIT 0;
      STORE 3;
1.4.2: LOAD 1;
      LOAD 2;
      LE;
      JMC 1.4;
      LOAD 3;
      LOAD 1;
      LOAD 1;
      MUL;
      ADD;
      STORE 3;
      LOAD 1;
      LIT 1;
      ADD;
      STORE 1;
      JMP 1.4.2;
1.4:  WRITE 3;
```

Linearisierung:

1. Durchnummerierung der Befehle, beginnend mit 1
2. Merken von Paaren aus baumstrukturierter Adresse und nummerierter Adresse
3. Anpassen von Sprungbefehlen entsprechend der gemerkten Paare

Beispiel — linearisiert

```
 1: READ 2;
 2: LIT 1;
 3: STORE 1;
 4: LIT 0;
 5: STORE 3;
 6: LOAD 1;
 7: LOAD 2;
 8: LE;
 9: JMC 21;
10: LOAD 3;
11: LOAD 1;
12: LOAD 1;
13: MUL;
14: ADD;
15: STORE 3;
16: LOAD 1;
17: LIT 1;
18: ADD;
19: STORE 1;
20: JMP 6;
21: WRITE 3;
```