Diskussion:

- Alle kontextfreien Sprachen, die sich mit einem deterministischen Kellerautomaten parsen lassen, können durch eine LR(1)-Grammatik beschrieben werden.
- Durch LR(0)-Grammatiken lassen sich alle präfixfreien deterministisch kontextfreien Sprachen beschreiben :-)
- Die Sprachklassen zu LL(k)-Grammatiken bilden dagegen eine Hierarchie innerhalb der deterministisch kontextfreien Sprachen.
- Da zu jeder LL(k)-Grammatik eine äquivalente starke LL(k)-Grammatik konstruiert werden kann, sinde letztere nicht in der Übersicht vermerkt.

3 Semantische Analyse

- Lexikalisch und syntaktisch korrekte Programme können trotzdem fehlerhaft sein ;-(
- Einige von diesen Fehlern werden bereits durch die Sprachdefinition ausgeschlossen und müssen vom Compiler überprüft werden :-)
- Weitere Analysen sind erforderlich, um:

  → Bezeichner eindeutig zu machen;

  → die Typen von Variablen zu ermitteln;

  → Möglichkeiten zur Programm-Optimierung zu finden.

3.1 Symbol-Tabellen

Beispiel:

```
void foo() {
    int A;
    void fee() {
        double A;
        A = 0.5;
        write(A);
    }
    A = 2;
    fee();
    write(A);
}
```

Diskussion:

- Innerhalb des Rumpfs von fee wird die Definition von A durch die lokale Definition verdeckt :-)
- Für die Code-Erzeugung benötigen wir für jede Benutzung eines Bezeichners die zugehörige Definitionsstelle.
- Statische Bindung bedeutet, dass dass die Definition eines Namens A an allen Programmpunkten innerhalb ihres gesamten Blocks gültig ist.
- Sichtbar ist sie aber nur außerhalb derjenigen Teilbereiche, in an denen eine weitere Definition von A gültig ist :-)

... im Beispiel:

```
void foo() {
    int A;
    void fee() {
        double A;
        A = 0.5;
        write(A);
    }
    A = 2;
    fee();
    write(A);
}
```

Kompliziertere Regeln der Sichtbarkeit gibt es in objektorientierten Programmiersprachen wie Java ...

Beispiel:

```
public class Foo {
    protected int x = 17;
    protected int y = 5;
    private int z = 42;
    public int b() { return 1; }
}
class Fee extends Foo {
    protected double y = .5;
    public int b(int a) { return a; }
}
```

Diskussion:

- **private** Members sind nur innerhalb der aktuellen Klasse gültig :-)
- **protected** Members sind innerhalb der Klasse, in den Unterklassen sowie innerhalb des gesamten package gültig :-)
- Methoden b gleichen Namens sind stets verschieden, wenn ihre Argument-Typen verschieden sind !!!
- Bei Aufrufen einer Methode wird dynamisch entschieden, welche Definition gemeint ist ...

Beispiel:

```
public class Foo {
    protected int foo() { return 1; }
  }
class Fee extends Foo {
    protected int foo() { return 2; }
    public int test(boolean b) {
        Foo x = (b) ? new Foo() : new Fee();
        return x.foo();
      }
  }
```

Aufgabe: Finde zu jeder Benutzung eines Bezeichners die zugehörige Definition

1. Schritt: Ersetze Bezeichner durch eindeutige Nummern !

Input: Folge von Strings

Output:
(1) Folge von Nummern
(2) Tabelle, die zu Nummern die Strings auflistet

Beispiel:

das	schwein	ist	dem	schwein	was	...

...	das	schwein	dem	menschen	ist	wurst

... liefert:

0	1	2	3	1	4	0	1	3	5	2	6

0	das
1	schwein
2	ist
3	dem
4	was
5	menschen
6	wurst

Implementierung 1:

Wir benutzen eine partielle Abbildung: S : **String**$\rightarrow$**int** verwaltet :-)

Wir verwalten einen Zähler **int** count $= 0$; für die Anzahl der bereits gefundenen Wörter :-)

Damit definieren wir eine Funktion: **int** getIndex(**String** w) :

```
int getIndex(String w) {
    if (S (w) ≡ undefined) {
        S = S ⊕ {w ↦ count};
        return count++;
    else return S (w);
}
```

Implementierung 2: Partielle Abbildungen

Ideen:

- Liste von Paaren $(w, i) \in$ **String** $\times$ **int** :

  Einfügen: $\mathcal{O}(1)$

  Finden: $\mathcal{O}(n)$ $\Longrightarrow$ zu teuer :-(

- balancierte Bäume :

  Einfügen: $\mathcal{O}(\log(n))$

  Finden: $\mathcal{O}(\log(n))$ $\Longrightarrow$ zu teuer :-(

- Hash Tables :

  Einfügen: $\mathcal{O}(1)$

  Finden: $\mathcal{O}(1)$ ... zumindest im Mittel :-)

... im Beispiel:

- Wir legen ein Feld M von hinreichender Größe m an :-)
- Wir wählen eine Hash-Funktion H : **String** $\rightarrow [0, m-1]$ mit den Eigenschaften:

  $\rightarrow$ $H(w)$ ist leicht zu berechnen :-)

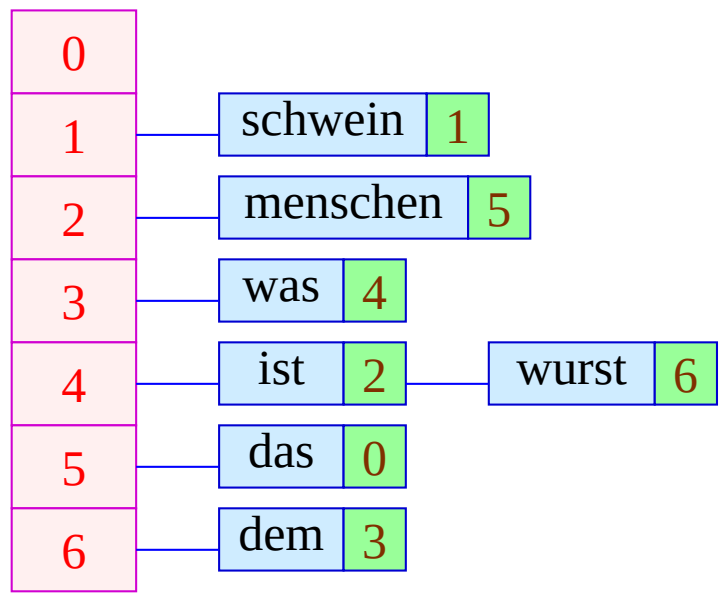
  $\rightarrow$ H streut die vorkommenden Wörter gleichmäßig über $[0, m-1]$:-)

  Mögliche Wahlen:

$$
\begin{aligned}
H_0(x_0 \ldots x_{r-1}) &= (x_0 + x_{r-1}) \,\%\, m \\
H_1(x_0 \ldots x_{r-1}) &= (\textstyle\sum_{i=0}^{r-1} x_i \cdot p^i) \,\%\, m \\
&= (x_0 + p \cdot (x_1 + p \cdot (\ldots + p \cdot x_{r-1} \cdots))) \,\%\, m \\
&\quad \text{für eine Primzahl } p \qquad \text{(z.B. } 31 \text{ :-)}
\end{aligned}
$$

- Das Argument-Wert-Paar (w, i) legen wir dann in $M[H(w)]$ ab :-)

Mit $m = 7$ und H_0 erhalten wir:



Um den Wert des Worts w zu finden, müssen wir w mit allen Worten x vergleichen, für die $H(w) = H(x)$:-)

2. Schritt: Symboltabellen

- Durchmustere den Syntaxbaum in einer geeigneten Reihenfolge, die

  → jede Definition vor ihren Benutzungen besucht :-)

  → die jeweils aktuell sichtbare Definition zuletzt besucht :-)

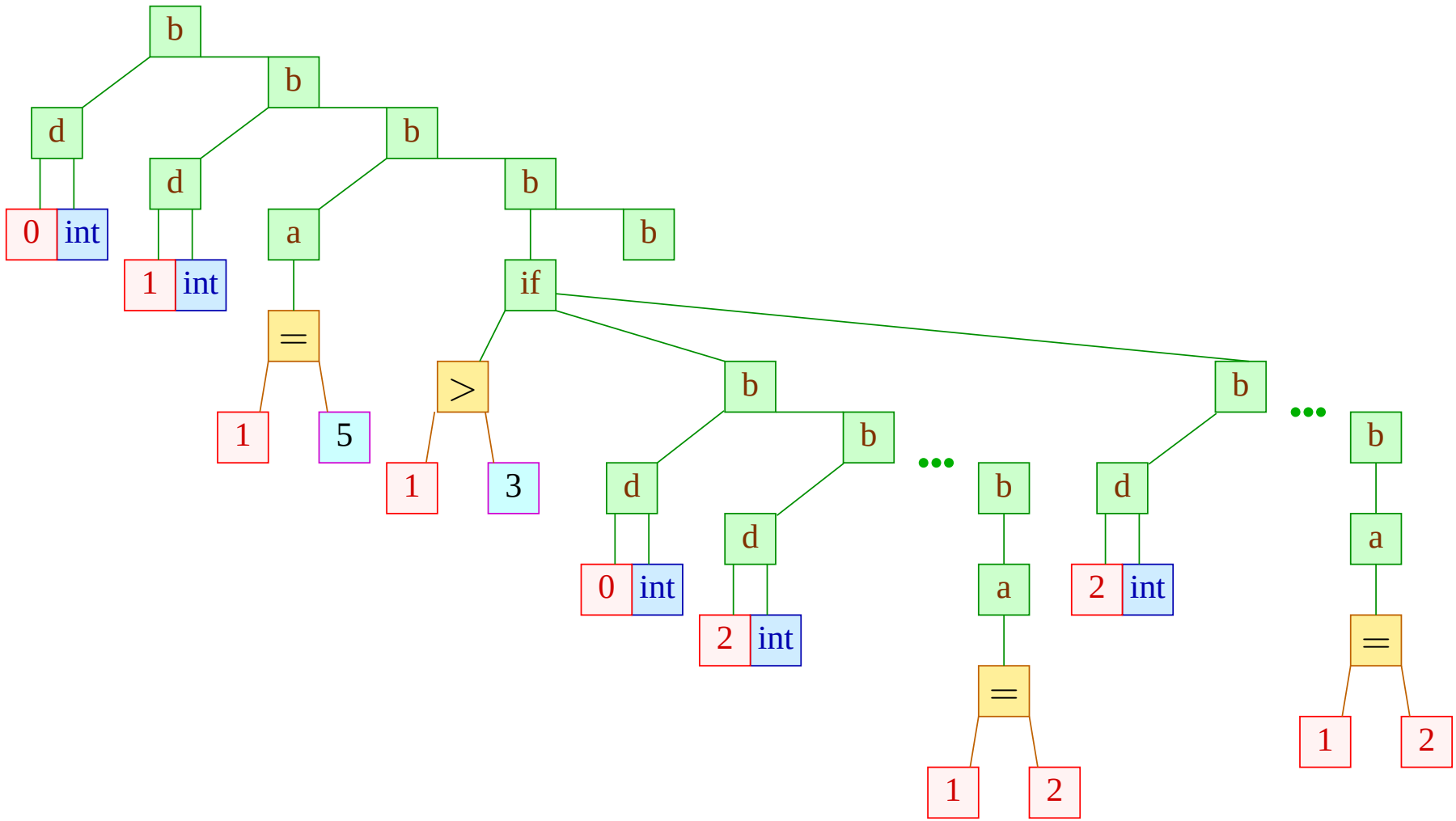
- Für jeden Bezeichner verwaltet man einen Keller der gültigen Definitionen.
- Trifft man bei der Durchmusterung auf eine Definition eines Bezeichners, schiebt man sie auf den Keller.
- Verlässt man den Gültigkeitsbereich, muss man sie wieder vom Keller werfen :-)
- Trifft man bei der Durchmusterung auf eine Benutzung, schlägt man die letzte Definition auf dem Keller nach ...
- Findet man keine Definition, haben wir einen Fehler gefunden :-)

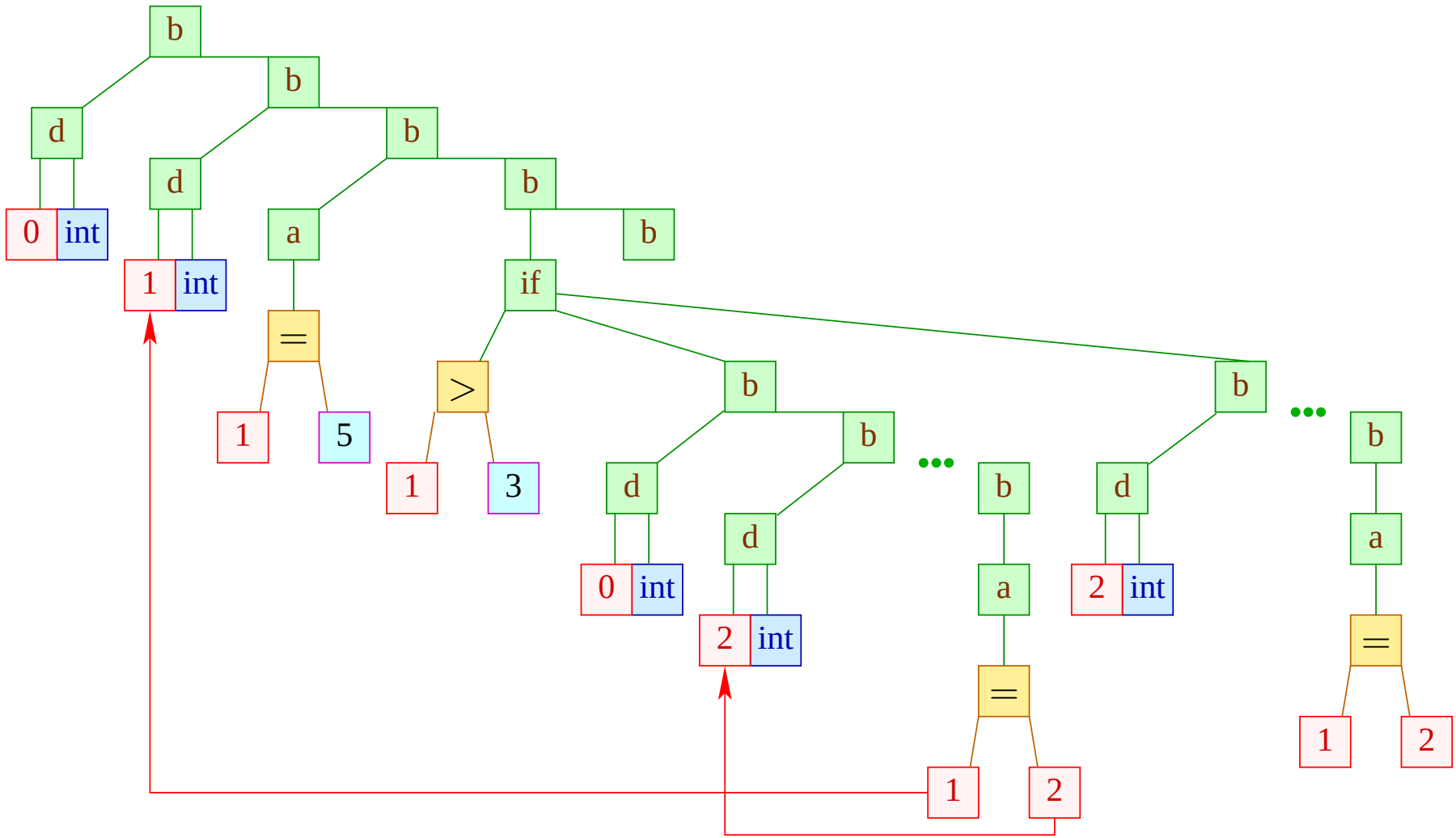
Beispiel:

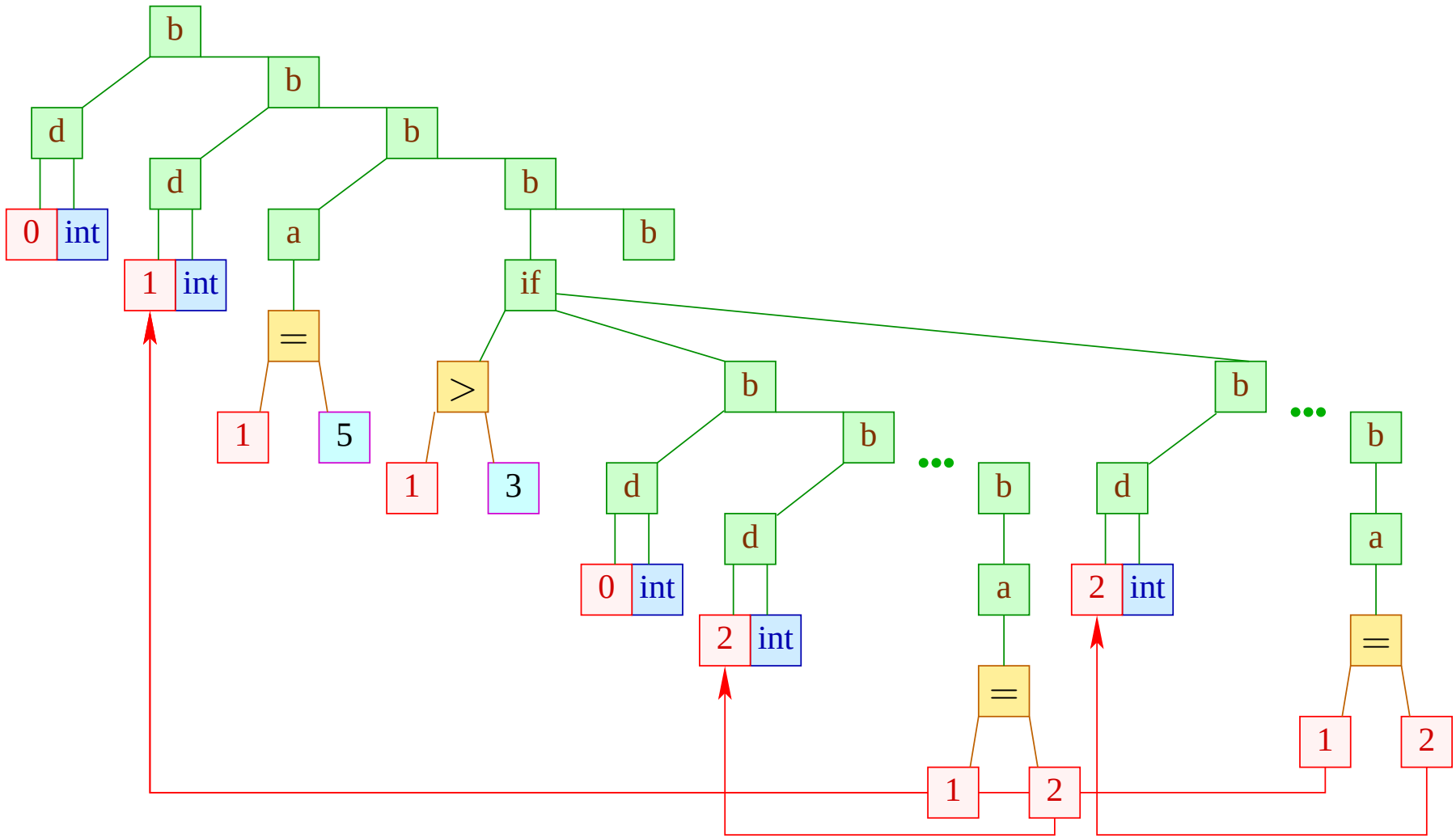
```
{ int a, b;
  a = 5;
  if (a > 3) {
        int a, c;
        a = 3;
        c = a + 1;
        b = c;
  } else {
        int c;
        c = a + 1;
        b = c;
    }
  b = a + b;
}
```

0	a
1	b
2	c

Der zugehörige Syntaxbaum ...


b
d
0
int
b
d
1
int
b
a
=
1
5
b
if
>
1
3
b
d
0
int
b
d
2
int
...
b
a
=
1
2
b
d
2
int
...
b
a
=
1
2


b
b
d
b
d
b
0
int
a
b
1
int
if
=
b
b
b
>
1
5
b
...
b
1
3
d
d
d
a
0
int
2
int
a
2
int
=
=
1
2
1
2
1
2


b
d
b
0
int
d
b
1
int
a
b
a
b
=
if
1
5
>
b
b
b
1
3
d
b
d
b
a
0
int
d
a
2
int
=
2
int
=
1
2
1
2

Diskussion:

- Der Durchlauf ist hier einfach links-rechts DFS.
- Benutzt man eine Listen-Implementierung der Keller und eine rekursive Implementierung, kann man auf das Beseitigen der jeweils neuen Definitionen verzichten :-)
- Anstelle erst die Namen durch Nummern zu ersetzen und dann die Zuordnung von Benutzungen zu Definitionen vorzunehmen, kann man auch gleich eindeutige Nummern vergeben :-))

Diskussion:

- Der Durchlauf ist hier einfach links-rechts DFS.
- Benutzt man eine Listen-Implementierung der Keller und eine rekursive Implementierung, kann man auf das Beseitigen der jeweils neuen Definitionen verzichten :-)
- Anstelle erst die Namen durch Nummern zu ersetzen und dann die Zuordnung von Benutzungen zu Definitionen vorzunehmen, kann man auch gleich eindeutige Nummern vergeben :-))

Achtung:

- Manche Programmiersprachen verbieten eine Mehrfach-Deklaration des selben Namens innerhalb eines Blocks ;-)
- Dann muss man für jede Deklaration einen Pointer auf den Block verwalten, zu dem sie gehört.
- Gibt es eine weitere Deklaration des gleichen Namens mit dem selben Pointer, muss ein Fehler gemeldet werden :-))

Erweiterung:

- Hat man mehrere wechselseitig rekursive Funktionsdefinitionen in einem Block, müssen deren Namen vor Durchmustern der Rümpfe in die Tabelle eingetragen werden ...

$$
\begin{array}{lll}
\textbf{fun} & \mathsf{odd}\,0 & = & \textbf{false} \\
\mid & \mathsf{odd}\,1 & = & \textbf{true} \\
\mid & \mathsf{odd}\,x & = & \mathsf{even}\,(x-1) \\
\textbf{and} & \mathsf{even}\,0 & = & \textbf{true} \\
\mid & \mathsf{even}\,1 & = & \textbf{false} \\
\mid & \mathsf{even}\,x & = & \mathsf{odd}\,(x-1)
\end{array}
$$

- Hat man eine objektorientierte Sprache mit Vererbung zwischen Klassen, sollte die übergeordnete Klasse vor der Unterklasse besucht werden :-)
- Bei Überladung muss simultan eine Typüberprüfung vorgenommen werden ...

3.2 Typ-Überprüfung

In modernen (imperativen / objektorientierten / funktionalen) Programmiersprachen besitzen Variablen und Funktionen einen Typ, z.B. **int**, **struct** { **int** x; **int** y; }.

Typen sind nützlich für:

- die Speicherverwaltung;
- die Vermeidung von Laufzeit-Fehlern :-)

In imperativen /objektorientierten Programmiersprachen muss der Typ bei der Deklaration spezifiziert und vom Compiler die typ-korrekte Verwendung überprüft werden :-)