Einführung in yacc

1 Einleitung, Motivation

- yacc ist ein universelles Werkzeug für die syntaktische Analyse (Parsergenerator) ("yet another compiler compiler")
- Entwicklung in den 70er Jahren, GNU Version heißt bison
- Unentbehrlich bei der Erstellung eines LR-Parsers, da Handkodierung sehr mühsam und fehleranfällig

Einsatzgebiet (meistens zusammen mit `lex`):

- Prinzipiell überall dort, wo Eingaben mit einer komplexen syntaktischen Struktur verarbeitet werden müssen
- Compilerbau
- Design und Implementierung von Kommandoprozessoren
- Menügeneratoren, ...

Mittels `lex` und `yacc` wurden hunderte von Compiler-Frontends erstellt

Vorgehensweise bei der Erstellung eines Parsers mit `lex` und `yacc` :

1 a) Spezifikation lexikalischer Einheiten (Token) als reguläre Ausdrücke in `lex`-Programm (z.B. `meinProg.lex`)

b) Übersetzung nach `lex.yy.c`

2 a) Spezifikation der syntaktischen Struktur als kontextfreie Grammatik in `yacc`-Programm (z.B. `meinProg.yacc`)

b) Einbinden des Scanners (`#include "lex.yy.c"`) in `yacc`-Programm

c) Übersetzung nach `y.tab.c`

3 a) ggf. Einbinden in eigenes Programm, Übersetzung in Maschinencode (Linken von Libraries `liby.a` und `libl.a`)

2 yacc-Programme

2.1 Struktur

Definitionsteil
%%
Regelteil
%%
Benutzerdefinierte Routinen

Spezifikation einer kontextfreien Grammatik $G = (N, T, S, P)$ in yacc-Programm:

Definitionsteil:
Definition von T und S

Regelteil:
Definition von N und P

Benutzerdef. Routinen:
u.a. Routine `int yylex()`, welche Token des Eingabetextes liefert (wird in der Regel durch `lex` realisiert)

2.2 Der Definitionsteil

Funktion des Definitionsteils:

- Definition von Token (T)
- Festlegung des Startsymbols (S)
- Einbinden von C-Code
- Prioritäts- und Assoziationsbedingungen (Kapitel 3)
- Definition beliebiger Rückgabetypen (Kapitel 4)

2.2.1 Definition von Token

`lex` liefert die Token als Integer-Werte
(Genauer: `lex.yy.c` enthält die Funktion
`int yylex()`, die von `yacc` benutzt wird)

Wie werden die Token mit Integer-Werten versehen?

Zum konsistenten Gebrauch der Tokenkodierung in `lex` und `yacc` wird wie folgt vorgegangen:

- Token ist ein einzelnes Zeichen (Literal)
  $\rightarrow$ ASCII-Wert wird verwendet $(1 - 256)$
- Token ist eine Zeichenkette, die von `lex` als regulärer Ausdruck erkannt wurde
  - Es wird ein Tokenname in `yacc` definiert und entsprechende symbolische Konstanten erzeugt (≥ 257)
  - Die symbolischen Konstanten werden dem `lex`-Programm zugänglich gemacht und dort als Rückgabewert verwendet
- Tokenwert ≤ 0 signalisiert Ende des Eingabetextes

Tokendefinition in `yacc`

```
%token NAME_1 NAME_2 ... NAME_n
```

oder

```
%token NAME_1
%token NAME_2
.
.
%token NAME_n
```

- Gültige Namen für Token sind C-Identifier
- *Konvention*: Tokennamen werden in Großbuchstaben geschrieben

Generierung der symbolischen Konstanten

Die Option `-d` beim Aufruf von `yacc`, z.B.

```
yacc -d meinProg.yacc
```

erzeugt zusätzlich zu `y.tab.c` die header-Datei `y.tab.h`, welche C-Konstantendefinitionen für die definierten Token enthält

Verwendung im `lex`-Programm

- Die header-Datei `y.tab.h` wird im Definitionsteil des `lex`-Programmes eingebunden[a]
- Die Aktionen zu den regulären Ausdrücken enden mit return-Anweisungen, die als Rückgabewert die symbolische Konstante für das erkannte Token verwenden

[a] Falls `lex.yy.c` nicht in `y.tab.c` inkludiert wird.

Beispiel 1 (Number/Identifier)

Bei der Verarbeitung eines Eingabetextes durch das `yacc`*-Programm* `numId.yacc` *sollen für ganze Zahlen und C-Bezeichner die Token* `NUMBER` *und* `IDENTIFIER` *verwendet werden.*

1. *Definition der Token in* `numId.yacc`

   ```
   %token NUMBER IDENTIER
   %%
   ...
   ```

2. *Generierung symbolischer Konstanten*

   ```
   yacc -d numId.yacc
   ```

3. *Inhalt der Headerdatei* `y.tab.h`

```
#define NUMBER 257
#define IDENTIFIER 258
```

4. *Verwendung der symbolischen Konstanten im* `lex`*-Programm* `numId.lex`

```
%{
#include "y.tab.h"
%}
%%
[+-]?(0|[1-9][0-9]*)    return(NUMBER);
[a-zA-Z_][a-zA-Z0-9_]* return(IDENTIFIER);
.                       return(yytext[0]);
\n                      return('\n');
```


2.2.2 Festlegen des Startsymbols

Das Startsymbol wird folgendermaßen festgelegt:

`%start nonterminal`

- Definition nicht zwingend, aber empfohlen für bessere Lesbarkeit
- Falls kein Startsymbol definiert wird, wird defaultmäßig die linke Seite der ersten Regel als Startsymbol interpretiert.

2.2.3 Einbinden von C-Code

Analog zu `lex`-Programm mit

```
%{

  C-Anweisungen

%}
```

2.3 Der Regelteil

Funktion des Regelteils:

- Festlegen der Nonterminals (N)
  (geschieht implizit)
- Spezifikation der Produktionen (P) und
  dazugehöriger Aktionen

2.3.1 Aufbau des Regelteils

Eine Produktion

$$\begin{array}{lcl} A & \rightarrow & X_{11}X_{12}...X_{1n_1} \\ & | & X_{21}X_{22}...X_{2n_2} \\ & | & ... \\ & | & X_{m1}X_{m2}...X_{mn_m} \end{array}$$

mit $A \in N$, $X_{ij} \in N \cup T$

wird als yacc-Regel in der folgenden Form angegeben:

$$\begin{array}{lcl} \mathit{lsymbol} & : & \mathit{rsymbol}_{11}\ \{\ \mathit{aktion}_{11}\ \}\ ...\ \mathit{rsymbol}_{1n_1}\ \{\ \mathit{aktion}_{1n_1}\ \} \\ & | & \mathit{rsymbol}_{21}\ \{\ \mathit{aktion}_{21}\ \}\ ...\ \mathit{rsymbol}_{2n_2}\ \{\ \mathit{aktion}_{2n_2}\ \} \\ & | & ... \\ & | & \mathit{rsymbol}_{m1}\ \{\ \mathit{aktion}_{m1}\ \}\ ...\ \mathit{rsymbol}_{mn_m}\ \{\ \mathit{aktion}_{mn_m}\ \} \\ & ; & \end{array}$$

2.3.2 Terminal- und Nichtterminalsymbole

Terminal- und Nichtterminalsymbole müssen gültige C-Bezeichner als Namen haben

Terminalsymbole

- Token aus Definitionsteil
- Literale, d.h. einzelne Zeichen in Hochkomma, z.B. `'\n'`

Nichterminalsymbole

implizit definiert durch

- Linke Seite einer Regel
- Alle Symbole der rechten Seite, welche nicht Terminalsymbol sind

Jedes vorkommende Nichtterminalsymbol muß auf der linken Seite von mindestens einer Regel stehen.

Konvention: Nichtterminalsymbole werden klein geschrieben

2.3.3 ε-Regeln

ε-Regeln werden durch eine leere rechte Seite realisiert

```
lsymbol : /* leer */
        | rsymbol1 rsymbol2
        ;
```

oder explizit

```
lsymbol : epsilon
        | rsymbol1 rsymbol2
        ;

epsilon : /* leer */
        ;
```


2.3.4 Aktionen

Zu jedem Symbol der rechten Seite kann eine zugehörige Aktion angegeben werden.

Zur Erinnerung:

```
lsymbol : rsymbol11 { aktion11 } ... rsymbol1n1 { aktion1n1 }
        | rsymbol21 { aktion21 } ... rsymbol2n2 { aktion2n2 }
        | ...
        | rsymbolm1 { aktionm1 } ... rsymbolmnm { aktionmnm }
        ;
```

- Eine Aktion besteht aus einer oder mehreren C-Anweisungen in geschweiften Klammern.
- Eine Aktion $aktion_{ij}$ wird dann ausgeführt, wenn das Symbol $rsymbol_{ij}$ abgedeckt worden ist.
- Aktionen, die nicht am Ende einer Regel angegeben sind, werden wie ein nichtterminales Symbol behandelt.
- Es wird intern eine zusätzliche Regel eingefügt, welche als linke Seite dieses Nichtterminalsymbol hat und als rechte Seite nur die Aktion selbst.

2.3.5 Bindung von Werten an Symbole

- Es ist möglich, Werte an Terminal- und Nichtterminalsymbole zu binden.
- Defaultmäßig sind dies `int`-Werte (es können beliebige Datentypen verwendet werden → Kapitel 4)

Verwendung von Werten

Werte der Symbole einer rechten Seite

$rsymbol_1$ ... $rsymbol_n$

sind über die Variablen

`$1 ... $n`

verfügbar.
(Beachte: Aktionen, die nicht am Ende einer Regel stehen, werden auch als Symbol behandelt.)

Zuweisung von Werten an Nichtterminalsymbole

- Zuweisung eines Wertes an die linke Seite einer Regel
- Verwendung des Platzhalters `$$` für die Zuweisung

z.B. Zuweisung an Nichtterminal *a*:

```
a   :   b '+' c {$$ = $1 + $3;}
    ;
```

- Defaultmäßig Zuweisung des ersten Wertes der rechten Seite an `$$`

```
a   :   b '+' c {$$ = $1;} /* default */
    ;
```

Zuweisung von Werten an Terminalsymbole

- Verwendung der gemeinsamen Variablen `yylval` in `lex` und `yacc`
- Zuweisung des Wertes eines Token an `yylval` während des Scannens

Beispiel 2 (Dual Nach Dezimal)

Das `yacc`*-Programm* `dualNachDezimal.yacc` *liest Dualzahlen und wandelt diese in Dezimalzahlen um.*

2.3.6 Fehlerbehandlung

Default Fehlerbehandlung

Bei Lesen eines Tokens, welches nicht in die syntaktische Struktur paßt:

- Ausgabe der Meldung `"syntax error"`
- Abbruch

Wünschenswert ist eine Fehlerbehandlung, die

- präzisere Information über einen aufgetretenen Fehler liefert
  (Grund, Zeilennummer, ...)
- mit der Syntaxanalyse an einem geeigneten Punkt fortfährt

Das Symbol *error*

- `yacc` stellt "künstliches" Nichtterminal *error* zur Verfügung
- Verwendung bei fehlergefährdeten Produktionen als alternative rechte Seite
- Zusätzlich Angabe eines "Aufsetztoken" möglich

z. B.:

expression-statement : *expression*
| *error* `';'` {*froutine()*}
;

- `';'` ist das Aufsetztoken
- `froutine()` könnte eigene Fehlerbehandlungsroutine sein

Funktionsweise:

- Fehler beim Lesen eines Tokens → Fehlerbehandlungsmodus wird eingeschaltet
- Solange Zustände vom Stack entfernen, bis Zustand erreicht ist, in dem der Punkt vor Nichtterminal *error* steht
- Falls solch ein Zustand nicht existiert → Ausgabe von "syntax error" und Abbruch
- Solange Eingabezeichen lesen, bis Aufsetztoken erkannt wird
- Fehlerbehandlungsmodus wird verlassen, sobald drei gültige Eingabesymbole erkannt werden
- Direktes Verlassen durch Aufruf der Funktion `yyerrok()` möglich

Die Funktion `yyerror`

Funktion

```
void yyerror(char *s)
```

ist zuständig für die Ausgabe der Fehlermeldung

Anpassung der Fehlerausgabe durch Überschreiben der Funktion möglich

Die char-Variable `yychar`

enthält die Tokennummer des aktuell gelesenen Tokens

Beispiel 3 (Taschenrechner)
Es soll ein einfacher Taschenrechner entwickelt werden, der folgende Operatoren kennt

- `+` *Addition*
- `-` *Subtraktion*
- `*` *Multiplikation*
- `/` *Division*

Es werden ganze Zahlen verarbeitet.

2.4 Benutzerdefinierte Routinen

Funktion:

- Code wird unverändert nach `y.tab.c` kopiert
- Einbinden von benutzerdefinierten Funktionen, die in den Aktionen benutzt werden können
- Bereitstellung der Funktion `int yylex()`
- ggf. Überschreiben der Funktionen `yyerror()` und `main`

3 Konflikte und Mehrdeutigkeiten

- yacc verarbeitet $LALR(1)$-Grammatiken
- Ist geg. Grammatik nicht $LALR(1)$, so meldet yacc Konflikt:
  - shift/reduce-Konflikt
  - reduce/reduce-Konflikt
- Generierung einer lesbaren Action- und Goto-Tabelle in Datei `y.output` (Option `-v` für yacc benutzen)
- Konflikte lassen sich direkt in der Tabelle ablesen

Beispiel 4 (shift/reduce-Konflikt)
Der Konflikt tritt in Zustand 4 bei Lookahead-zeichen 'Y' auf, weil unklar ist, ob geshiftet oder die Regel $b \to X$ reduziert werden soll.

Beispiel 5 (reduce/reduce-Konflikt)
Der Konflikt tritt in Zustand 4 bei Lookahead-zeichen 'B' auf, weil unklar ist, ob die Regel $x \to A$ oder $y \to A$ zur Reduktion benutzt werden soll.

Default Konfliktlösung

Konflikte werden von `yacc` nach folgenden Regeln aufgelöst

- shift/reduce Konflikt
  → es wird shift angewendet
- reduce/reduce-Konflikt
  → es wird erstangegebene Regel im Regelteil zur Reduktion verwendet

Besser: Konflikt selbst auflösen durch

- Transformation der Grammatik oder
- Festlegung von Prioritäts- und Assoziativitätsbedingungen

Beispiel 6 (Keine Assoziativität)
Es tritt ein shift/reduce-Konflikt in Zustand 4 bei Lookaheadzeichen '-' auf.
Dieser soll durch Zuweisung einer Assoziativität an das Minuszeichen beseitigt werden.

3.1 Prioritäts- und Assoziativitätsbedingungen

3.1.1 Assoziativität

Die Befehle `%left` und `%right`

Mit den Anweisungen

```
%left TOKEN_1 ... TOKEN_n
```

oder

```
%left TOKEN_1
...
%left TOKEN_n
```

lassen sich Token im Definitionsteil als *linksassoziativ* definieren.
Analog werden mit `%right` *rechtsassoziative* Token definiert.

Beispiel 7 (Linksassoziativität)
Der Konflikt wird zugunsten des reduce aufgelöst.
Linksassoziativität → semantische Auswertung von links nach rechts

Beispiel 8 (Rechtsassoziativität)
Der Konflikt wird zugunsten des shift aufgelöst.
Rechtsassoziativität → semantische Auswertung von rechts nach links

3.1.2 Prioritäten

Die Reihenfolge der `%left` und `%right` Angaben bestimmen die Prioritäten der einzelnen Token (aufsteigende Priorität).

Zum Beispiel legen die Anweisungen

```
%left '+' '-'
%left '*' '/'
```

fest, dass

- `'+'`, `'-'`, `'*'`, `'/'` linksassoziativ sind
- `'*'` und `'/'` höhere Priorität haben als `'+'` und `'-'`
- `'*'` und `'/'` sowie `'+'` und `'-'` jeweils gleiche Priorität haben

Beispiel 9 (Erweiterter Taschenrechner)
Der Taschenrechner aus Beispiel 3 wird erweitert, so dass Register mit den Namen `a` *...* `z` *zur Verfügung stehen, sowie die Operatoren*

- `+` *Addition*
- `-` *Subtraktion*
- `*` *Multiplikation*
- `/` *Division*
- `%` *Modulo*
- `&` *Bitweises AND*
- `|` *Bitweises ODER*
- `^` *Potenz*
- `=` *Zuweisung*

Auf der linken Seite einer Zuweisung sollen dabei nur Registernamen erlaubt sein.

Der Taschenrechner arbeitet noch nicht ganz korrekt:
Bei der Eingabe

```
-2^4
```

wird als Ergebnis `-16` *anstatt* `16` *ausgegeben.*

Grund: Festgelegte Priorität für das Minuszeichen bezieht sich auf den Subtraktionsoperator; diese ist niedriger als die des Potenzoperators.

Der Befehl %prec

Mit der Anweisung

```
%prec TOKEN
```

auf der rechten Seite einer Regel läßt sich dieser die Priorität des angegebenen Tokens zuweisen.

Beispiel 10 (Mod. erw. Taschenrechner)
Der Taschenrechner aus Beispiel 9 wird nun so modifiziert, dass das Minus-Vorzeichen die höchste Priorität hat.

4 Beliebige Rückgabetypen

Der Standard Datentyp für den Rückgabewert von Aktionen (`$$`, `$1`, ...) oder des einem Token zugeordneten Wertes (`yylval`) ist `int`.

Sollen weitere Datentypen für die Rückgabe verwendet werden, so müssen diese mittels des `%union` Schlüsselwortes im Definitionsteil festgelegt werden:

```
%union{
    typ_1   typname_1
    typ_2   typname_2
    ...
}
```

Anwendung bei Token

Es ist zu kennzeichnen, welchen Rückgabedatentyp ein Token haben soll:

```
%token <typname_i> TOKEN
```

Anwendung bei Nichtterminalen

Für Nichtterminale wird mittels des `%type` Schlüsselwortes der Rückgabewert festgelegt:

```
%type  <typname_i> nichtterminal
```


Beispiel 11 (Double Erw. Taschenrechner)
Der Taschenrechner aus Beispiel 10 wird nun so modifiziert, dass er auch mit Gleitpunktzahlen rechnen kann.