

8. Logische Programmierung

GPS-8-1

Themen dieses Kapitels:

- Prolog-Notation und kleine Beispiele
- prädikatenlogische Grundlagen
- Interpretationsschema
- Anwendbarkeit von Klauseln, Unifikation
- kleine Anwendungen

© 2011 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Übersicht zur logischen Programmierung

GPS-8-2

Deklaratives Programmieren:

Problem beschreiben statt Algorithmus implementieren (idealisiert).
Das System findet die Lösung selbst, z. B. Sortieren einer Liste:

```
sort(old, new) <= permute(old, new) ^ sorted(new)
sorted(list) <=  $\forall j$  such that  $1 <= j < n$ : list(j) <= list(j+1)
```

Relationen bzw. Prädikate (statt Funktionen):

```
(a, b)  $\in$  R  $\subseteq$  (S x T)
magEssen(hans, salat)
```

Programmkonstrukte entsprechen eingeschränkten prädikatenlogischen Formeln

```
 $\forall X, Y, Z$ : grossMutterVon(X, Z) <= mutterVon(X, Y) ^ elternteilVon(Y, Z)
```

Resolution implementiert durch Interpretierer:

Programm ist Menge von PL-Formeln,

Interpretierer sucht Antworten (erfüllende Variablenbelegungen) durch **Backtracking**

```
?-sort([9,4,6,2], X).      Antwort:      X = [2,4,6,9]
```

Datenmodell: strukturierte **Terme mit Variablen** (mathematisch, nicht imperativ);
Bindung von Termen an Variable durch **Unifikation**

© 2011 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Prolog Übersicht

GPS-8-3

Wichtigste logische Programmiersprache: Prolog (Colmerauer, Roussel, 1971)

Typische Anwendungen: Sprachverarbeitung, Expertensysteme, Datenbank-Management

Ein Programm ist eine **Folge von Klauseln** (Fakten, Regeln, eine Anfrage)
formuliert über Terme.

```
mother(mary, jake).
mother(mary, shelley).
father(bill, jake).
```

Fakten

```
parent(X, Y) :- mother(X, Y).
parent(X, Y) :- father(X, Y).
```

Regeln

```
?- parent(X, jake)
```

Anfrage

Antworten: X = mary
 X = bill

Ein **Interpretierer** prüft, ob Werte an die Variablen so gebunden werden können, dass die Anfrage mit den gegebenen Prädikaten und Regeln erfüllbar ist (Resolution).

Es wird ein **universelles Suchverfahren (Backtracking)** angewendet (Folie GPS-8-7).

© 2013 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Prolog Sprachkonstrukte: Fakten

GPS-8-4

Fakten geben Elemente von **n-stelligen Relationen** bzw. **Prädikaten** an, z. B.

```
stern(sonne).
stern(sirius).
```

bedeutet, **sonne** und **sirius** sind Konstante,
sie erfüllen das Prädikat (die 1-stellige Relation) **stern**.

Einige Fakten, die Elemente der 2-stelligen Relation **umkreist** angeben:

```
umkreist(jupiter, sonne).
umkreist(erde, sonne).
umkreist(mars, sonne).
umkreist(mond, erde).
umkreist(phobos, mars).
```

Fakten können auch mit Variablen formuliert werden:

```
istGleich(X,X).
```

bedeutet in PL: $\forall X$: **istGleich(X,X)**

Prolog hat **keine Deklarationen**. **Namen** für Prädikate, Konstante und Variablen werden **durch ihre Benutzung eingeführt**.

Namen für Konstante beginnen mit kleinem, für Variable mit großem Buchstaben.

© 2011 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Prolog Sprachkonstrukte: Regeln

Regeln definieren **n-stellige Relationen** bzw. **Prädikate** durch **Implikationen** (intensional), z. B.

```
planet(B) :- umkreist(B, sonne).
satellit(B) :- umkreist(B, P), planet(P).
```

bedeutet in PL:

$$\forall B: \text{planet}(B) \Leftarrow \text{umkreist}(B, \text{sonne})$$

$$\forall B, P: \text{satellit}(B) \Leftarrow \text{umkreist}(B, P) \wedge \text{planet}(P)$$

In einer Klausel müssen an alle Vorkommen eines Variablennamens dieselben Werte gebunden sein, z. B. B/mond und P/erde

Allgemein definiert man eine Relation durch **mehrere Fakten und Regeln**. sie gelten dann **alternativ (oder-Verknüpfung)**

```
sonnensystem(sonne).
sonnensystem(B) :- planet(B).
sonnensystem(B) :- satellit(B).
```

Man kann Relationen auch **rekursiv definieren**:

```
sonnensystem(sonne).
sonnensystem(X) :- umkreist(X, Y), sonnensystem(Y).
```

Prolog Sprachkonstrukte: Anfragen

Das Prolog-System überprüft, ob eine **Anfrage** mit den **Fakten und Regeln** des gegebenen Programms (durch prädikatenlogische Resolution) **als wahr nachgewiesen** werden kann.

Beispiele zu den Fakten und Regeln der vorigen Folien:

	Antwort:
?- umkreist(erde, sonne).	yes
?- umkreist(mond, sonne).	no

Eine Anfrage	?- umkreist(mond, B).
bedeutet in PL	$\exists B: \text{umkreist}(\text{mond}, B)$

Wenn die **Anfrage Variablen** enthält, werden **Belegungen** gesucht, mit denen die Anfrage als wahr nachgewiesen werden kann:

	Antworten:
?- umkreist(mond, B).	B=erde
?- umkreist(B, sonne).	B=jupiter; B=erde; B=mars
?- umkreist(B, jupiter).	no (keine Belegung ableitbar)
?- satellit(mond).	yes
?- satellit(S).	S=mond; S=phobos

Notation von Prolog-Programmen

Beliebige Folge von **Klauseln: Fakten, Regeln und Anfragen** (am Ende).
Klauseln mit **Prädikaten** $p(t_1, \dots, t_n)$, Terme t_i

Terme sind beliebig zusammengesetzt aus Literalen, Variablen, Listen, Strukturen.

- **Literale** für Zahlen, Zeichen(reihen) 127 "text" 'a'
- **Symbole** (erste Buchstabe klein) hans
- **Variablen** (erste Buchstabe groß) X Person
unbenannte Variable -
- **Listen-Notation:** [a, b, c] []
erstes Element H, Restliste T [H | T] wie $H : T$ in SML
- **Strukturen:** kante(a, b) a - b datum(T, M, J)
Operatoren kante, - werden
ohne Definition verwendet, nicht „ausgerechnet“

Grundterm: Term ohne Variablen, z. B. datum(11, 7, 1995)

Prolog ist **nicht typisiert**:

- An eine Variable können beliebige Terme gebunden werden,
- an Parameterpositionen von Prädikaten können beliebige Terme stehen.

Prädikatenlogische Grundlagen

Prädikatenlogische Formeln (siehe Modellierung, Abschn. 4.2):

atomare Formeln $p(t_1, \dots, t_n)$ bestehen aus einem Prädikat p und Termen t_i
mit **Variablen**, z. B. last([X], X)
darauf werden logische Junktoren (\neg \wedge \vee) und **Quantoren** (\forall \exists) angewandt,

z. B. $\forall X \forall Y: \text{sonnensystem}(X) \vee \neg \text{umkreist}(X, Y) \vee \neg \text{sonnensystem}(Y)$
äquivalent zu
 $\forall X \forall Y: \text{sonnensystem}(X) \Leftarrow \text{umkreist}(X, Y) \wedge \text{sonnensystem}(Y)$

Allgemeine PL-Formeln werden auf die **3 Formen von Prolog-Klauseln (Horn-Klauseln)** eingeschränkt, z. B.

Prolog-Fakt: last([X], X).

PL: $\forall X: \text{last}([X], X).$

Prolog-Regel: sonnensystem(X) :- umkreist(X,Y), sonnensystem(Y).

PL: $\forall X \forall Y: \text{sonnensystem}(X) \Leftarrow \text{umkreist}(X, Y) \wedge \text{sonnensystem}(Y).$

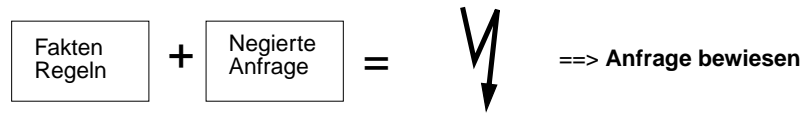
Prolog-Anfrage: umkreist(X, erde), umkreist(X, jupiter).

PL: $\exists X: \text{umkreist}(X, \text{erde}) \wedge \text{umkreist}(X, \text{jupiter}).$

äquivalent zu: $\neg \forall X \neg \text{umkreist}(X, \text{erde}) \vee \neg \text{umkreist}(X, \text{jupiter}).$

Resolution

Resolution führt einen **Widerspruchsbeweis** für eine Anfrage:



Prolog-Anfrage: $\text{umkreist}(X, \text{erde}), \text{umkreist}(X, \text{jupiter}).$

PL: $\exists X: \text{umkreist}(X, \text{erde}) \wedge \text{umkreist}(X, \text{jupiter}).$

äquivalent zu: $\neg \forall X \neg \text{umkreist}(X, \text{erde}) \vee \neg \text{umkreist}(X, \text{jupiter}).$

negiert: $\forall X \neg \text{umkreist}(X, \text{erde}) \vee \neg \text{umkreist}(X, \text{jupiter}).$

Die Antwort ist gültig für **alle** zu einem Programm durch induktive Anwendung von Operatoren **konstruierbaren Terme** (Herbrand-Universum, „Hypothese der abgeschlossenen Welt“).

Antwort Ja: Aussage ist mit den vorhandenen Fakten und Regeln beweisbar.

Antwort Nein: Aussage ist mit den gegebenen Fakten und Regeln nicht beweisbar.
Das heißt nicht, dass sie falsch ist.

Daher kann eine Negation, wie in
Formel F gilt, wenn Formel H **nicht** gilt
in Prolog-Systemen nicht ausgedrückt werden.

Der vordefinierte Operator **not** ist „nicht-logisch“ und mit Vorsicht zu verwenden.

Interpretationsschema Backtracking

Aus Programm mit Fakten, Regeln und Anfrage spannt der Interpretierer einen **abstrakten Lösungsbaum** auf (Beispiel auf nächster Folie):

Wurzel: Anfrage

Knoten: Folge noch zu verifizierender Teilziele

Kanten: anwendbare Regeln oder Fakten des Programms

Der Interpretierer iteriert folgende Schritte am aktuellen Knoten:

- **Wähle ein noch zu verifizierendes Teilziel** (Standard: von links nach rechts)
Falls die Folge der Teilziele leer ist, wurde eine Lösung gefunden (success);
ggf. wird nach weiteren gesucht: backtracking zum vorigen Knoten.
- **Wähle eine auf das Teilziel anwendbare Klausel** (Standard: Reihenfolge im Programm);
bilde einen neuen Knoten, bei dem das Teilziel durch die rechte Seite der Regel bzw. bei einem Fakt durch nichts ersetzt wird; weiter mit diesem neuen Knoten.
Ist keine Klausel anwendbar, gibt es in diesem Teilbaum keine Lösung: backtracking zum vorigen Knoten.

Bei rekursiven Regeln, z.B. $\text{nachbar}(A, B) :- \text{nachbar}(B, A)$

ist der **Baum nicht endlich**. Abhängig von der **Suchstrategie terminiert** die Suche dann eventuell **nicht**.

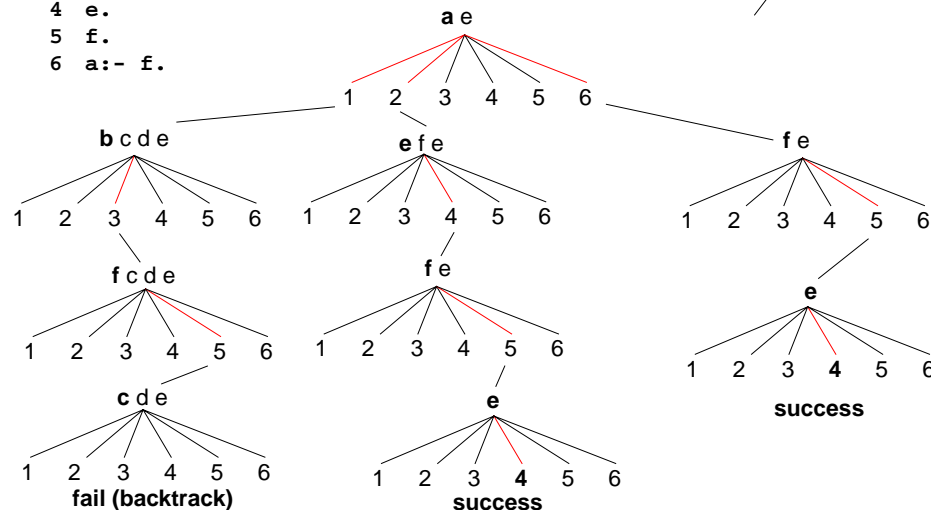
Die Reihenfolge, in der die Wahl (s.o.) getroffen wird, ist entscheidend für die **Terminierung** der Suche und die Reihenfolge, in der Lösungen gefunden werden!

Lösungsbaum Beispiel

Beispiel (a, b, ... stehen für Prädikate; Parameterterme sind hier weggelassen):

- 1 a:- b, c, d. **Anfrage:** ?- a, e
- 2 a:- e, f.
- 3 b:- f.
- 4 e.
- 5 f.
- 6 a:- f.

anwendbar
 nicht anwendbar



Anwendung von Klauseln

In Klauseln werden **Terme als Muster** verwendet.

Darin vorkommende Variablennamen müssen konsistent an Terme gebunden werden:

$\text{last}([X], X).$ [X] Muster für eine einelementige Liste
 $\text{heuer}(T, M, \text{datum}(T, M, 2013)).$ Muster für ein datum mit bestimmten Teiltermen

Eine Klausel (Fakt oder linke Seite einer Regel) ist auf ein Teilziel anwendbar, wenn es einen **Unifikator** gibt, der die **Parameterterme der Klausel und des Teilziels paarweise gleich macht**:

Fakt: $\text{heuer}(T, M, \text{datum}(T, M, 2013)).$

Anfrage: ?- $\text{heuer}(12, 7, Z).$ Unifikator: $[T/12, M/7, Z/\text{datum}(12, 7, 2013)]$

Fakt: $\text{heuer}(T, M, \text{datum}(T, M, 2013)).$

Anfrage: ?- $\text{heuer}(X, Y, \text{datum}(14, 7, 2013)).$
Unifikator: $[X/14, T/14, Y/7, M/7]$

Regel: $\text{last}([_ | T], Y) :- \text{last}(T, Y).$

Teilziel: $\text{last}([2, 3], Z)$ Unifikator: $[T/[3], Y/Z]$

Fakt: $\text{last}([X], X).$

Teilziel: $\text{last}([2, 3], Z)$ nicht unifizierbar, also nicht anwendbar

Wird die Klausel angewandt, werden die **Variablen gemäß Unifikator gebunden**.

Unifikation

GPS-8-12a

siehe Modellierung, Kap. 3.1

Term: Formel bestehend aus Literalen, Variablen, Operatoren, Funktoren; z. B. $x + f(2*y)$

Substitution $s = [x_1/e_1, \dots, x_n/e_n]$ **angewandt auf** T , geschrieben $T s$ bedeutet: alle Vorkommen der Variablen x_i in T werden gleichzeitig durch den Term e_i ersetzt.
z. B. $Y+Y [Y/3*Z]$ ergibt $3*Z+3*Z$

Unifikation: Allgemeines Prinzip: Terme durch Substitution gleich machen.

gegeben: zwei Terme T_1, T_2

gesucht: eine Substitution σ , sodass gilt $T_1 \sigma = T_2 \sigma$. Dann ist σ ein **Unifikator** für T_1 und T_2 .

Beispiele:

datum(T, M, 2011) datum(14, 7, 2011)	f(h(a, b), g(Y), V) f(X, g(h(a,c)), Z)
U = [T/14, M/7]	allgemeinste Unifikatoren: Ua = [X/h(a,b), Y/h(a,c), V/Z]
X+f(2*g(1)) 3+f(2*Y)	Ua = [X/h(a,b), Y/h(a,c), Z/V]
U = [X/3, Y/g(1)]	nicht-allgemeinster Unifikator, unnötige Bindungen an V und Z: U = [X/h(a,b), Y/h(a,c), V/a, Z/a]

© 2011 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Rekursive Anwendung von Klauseln

GPS-8-13

Variable sind lokal für jede Anwendung einer Klausel.

Bei **rekursiven Anwendungen** entstehen **neue lokale Variable**.

Mehrfache Auftreten einer Variable stehen für denselben Wert.

Beispiel: mit folgenden Klauseln

```
(1) last([X], X).
(2) last([_|T], Y):- last(T, Y).
```

wird die Anfrage berechnet:

```
?-last([1,2,3], Z).
(2) last([_|T1], Y1):- last([2,3], Z).
(2) last([_|T2], Y2):- last([3], Z).
(1) T1 = [2,3]      T2 = [3]      last([X], X). bindet Z=3
      Y1 = Z        Y2 = Z        X = 3
                        X = 3 = Z
```

© 2013 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Beispiel: Wege im gerichteten Graph

GPS-8-13a

Das folgende kleine Prolog-Programm beschreibt die Berechnung von Wegen in einem gerichteten Graph.

Die Menge der gerichteten Kanten wird durch eine Folge von Fakten definiert:

```
kante(a,b).
kante(a,c).
...
```

Die Knoten werden dabei implizit durch Namen von Symbolen eingeführt.

Die Relation `weg(X,Y)` gibt an, ob es einen Weg von x nach y gibt:

```
weg(X, X).           Weg der Länge 0
weg(X, Y):-kante(X, Y). Weg der Länge 1
weg(X, Y):-kante(X, Z), weg(Z, Y). weitere Weg e
```

Anfragen:

```
?-weg(a,c).         prüft, ob es einen Weg von a nach c gibt.
?-weg(a,X).         sucht alle von a erreichbaren Knoten.
?-weg(X,c).         sucht alle Knoten, von denen c erreichbar ist.
```

© 2011 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Beispiel: Symbolische Differentiation

GPS-8-14

Das folgende Prolog-Programm beschreibt einige einfache Regeln zur Differentiation. Sie werden auf Terme angewandt, die Ausdrücke beschreiben, und liefern die Ableitung in Form eines solchen Terms, z. B. `?-diff(2*x,x,D)` liefert z. B. `D = 2*1+x*0`. Mit weiteren Regeln zur Umformung von Ausdrücken kann das Ergebnis noch vereinfacht werden.

In Prolog werden Ausdrücke wie $2*x$ **nicht ausgewertet** (sofern nicht durch `is` explizit gefordert), sondern als Struktur dargestellt, also etwa `*(2, x)`.

Prolog-Regeln zur Symbolischen Differentiation:

```
diff(X, X, 1):- !.
diff(T, X, 0):- atom(T).
diff(T, X, 0):- number(T).

diff(U+V, X, DU+DV):- diff(U, X, DU), diff(V, X, DV).

diff(U-V, X, DU-DV):- diff(U, X, DU), diff(V, X, DV).

diff(U*V, X, (U*DV)+(V*DU)):- diff(U, X, DU), diff(V, X, DV).

diff(U/V, X, ((V*DU)-(U*DV))/V*V):- diff(U, X, DU), diff(V, X, DV).
```

Falls die erste Regel anwendbar ist, bewirkt der **Cut (!)**, dass bei beim Backtracking keine Alternative dazu versucht wird, obwohl die nächsten beiden Klauseln auch anwendbar wären.

© 2005 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

Erläuterungen zur Symbolischen Differentiation

1. Hier werden Terme konstruiert, z. B. zu $2*x$ der Term $2*1+x*0$
Ausrechnen formuliert man in Prolog durch spezielle IS-Klauseln:
`dupl(X,Y):- Y IS X*2.` x muss hier eine gebundene Variable sein.

2. Problemnahe Beschreibung der Differentiationsregeln, z. B. Produktregel:

$$\frac{d(u*v)}{d x} = u * \frac{d v}{d x} + v * \frac{d u}{d x}$$

3. `diff` ist definiert als Relation über 3 Terme:
`diff` (abzuleitende Funktion, Name der Veränderlichen, Ableitung)

4. Muster in Klauselkopf legen die Anwendbarkeit fest, z. B. Produktregel:
`diff(U*V, X, (U*DV)+(V*DU)):- ...`

5. Regeln 1 - 3 definieren: $\frac{d x}{d x} = 1$ $\frac{d a}{d x} = 0$ $\frac{d 1}{d x} = 0$

!-Operator (Cut) vermeidet falsche Alternativen.

6. `diff` ist eine Relation - nicht eine Funktion!!

`?-diff(a+a,a,D).` liefert `D = 1 + 1`
`?-diff(F,a,1+1).` liefert `F = a + a`

Beispielrechnung zur Symbolischen Differentiation

```
?- diff(2*y, y, D)
diff(U*V, X1,(2*DV)+(y*DU)):- diff(2, y, DU), diff(y, y, DV)
                                diff(T1, X2, 0) diff(X3, X3, 1)
                                :-number(2) :- !
                                success      success
```

liefert Bindungen `DU=0 DV=1 D=(2*1)+(y*0)`

Das Programm kann systematisch erweitert werden, damit Terme nach algebraischen Rechenregeln vereinfacht werden, z. B.

```
simp(X*1, X). simp(X+0, X).
simp(X*0, 0). simp(X-0, X).
...
```

So einsetzen, dass es auf alle Teilterme angewandt wird.

Zusammenfassung zum Kapitel 8

Mit den Vorlesungen und Übungen zu Kapitel 8 sollen Sie nun Folgendes können:

- Kleine typische Beispiele in Prolog-Notation lesen, verstehen und schreiben
- Interpretationsschema und prädikatenlogische Grundlagen verstehen
- Unifikation zum Anwenden von Klauseln einsetzen