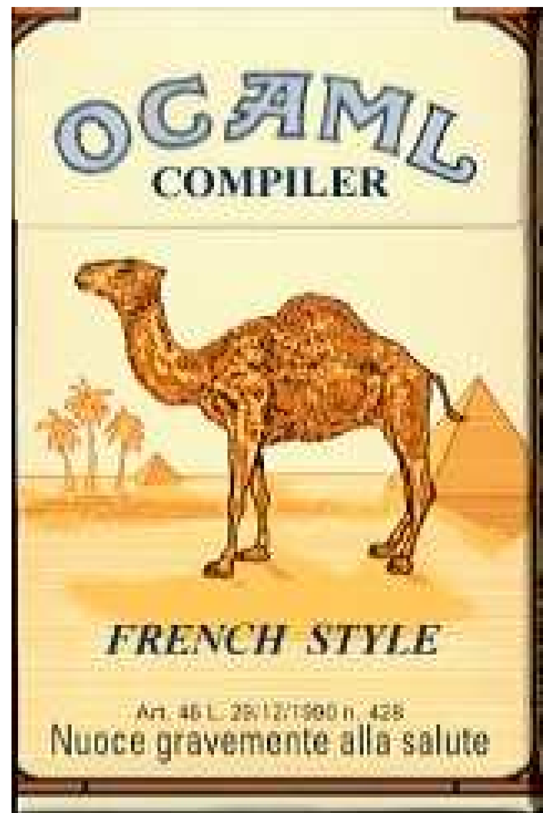
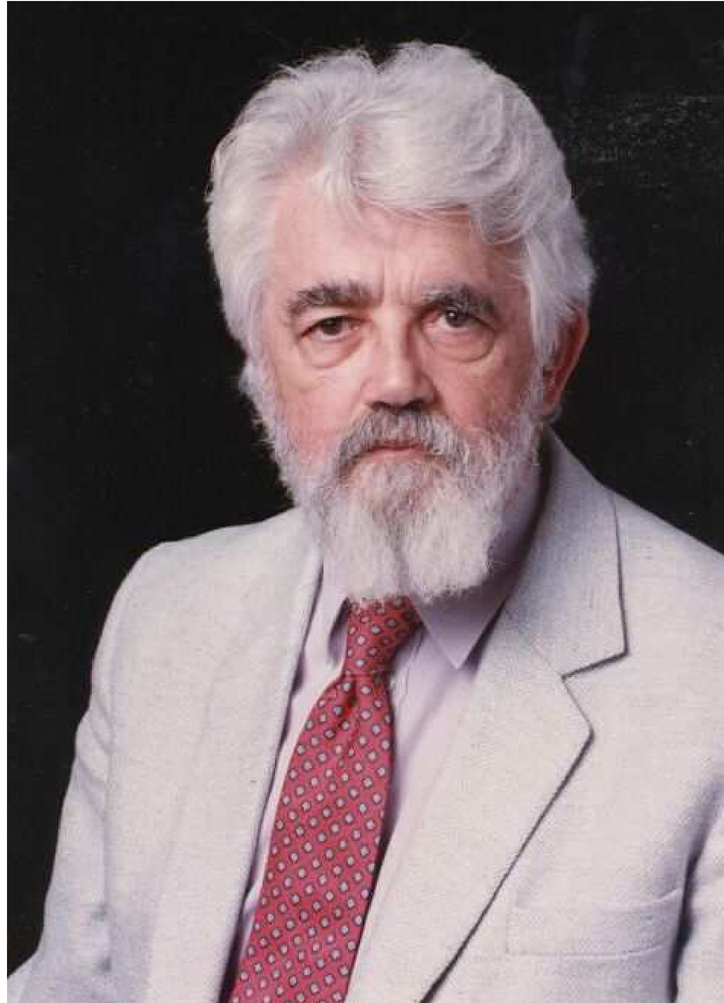
Abschluss:

- Jedes weitere Sprachkonstrukt erfordert neue Methoden zur Verifikation :-)
- Wie behandelt man dynamische Datenstrukturen, Objekte, Klassen, Vererbung ?
- Wie geht man mit Nebenläufigkeit, Reaktivität um ??
- Erlauben die vorgestellten Methoden alles zu beweisen $\Longrightarrow$ Vollständigkeit ?
- Wie weit lässt sich Verifikation automatisieren ?
- Wieviel Hilfe muss die Programmiererin und/oder die Verifiziererin geben ?

Funktionale Programmierung





John McCarthy, Stanford

Robin Milner, Edinburgh

Xavier Leroy, INRIA, Paris

4 Grundlagen

- Interpreter-Umgebung
- Ausdrücke
- Wert-Definitionen
- Komplexere Datenstrukturen
- Listen
- Definitionen (Forts.)
- Benutzer-definierte Datentypen

4.1 Die Interpreter-Umgebung

Der Interpreter wird mit `ocaml` aufgerufen...

```
seidl@linux:~> ocaml
        Objective Caml version 3.08.2
#
```

Definitionen von Variablen, Funktionen, ... können direkt eingegeben werden :-)

Alternativ kann man sie aus einer Datei einlesen:

```
# #use "Hallo.ml";;
```

4.2 Ausdrücke

```
# 3+4;;
- : int = 7
# 3+
  4;;
- : int = 7
#
```

→ Bei `#` wartet der Interpreter auf Eingabe.

→ Das `;;` bewirkt Auswertung der bisherigen Eingabe.

→ Das Ergebnis wird berechnet und mit seinem Typ ausgegeben.

Vorteil: Das Testen von einzelnen Funktionen kann stattfinden, ohne jedesmal neu zu übersetzen :-)

Vordefinierte Konstanten und Operatoren:

<table>
<tr><th>Typ</th><th>Konstanten: Beispiele</th><th>Operatoren</th></tr>
<tr><td>int</td><td>0 3 -7</td><td>+ - * / mod</td></tr>
<tr><td>float</td><td>-3.0 7.0</td><td>+. -. *. /.</td></tr>
<tr><td>bool</td><td>true false</td><td>not || &&</td></tr>
<tr><td>string</td><td>"hallo"</td><td>^</td></tr>
<tr><td>char</td><td>'a' 'b'</td><td></td></tr>
</table>

Typ	Vergleichsoperatoren
int	`= <> < <= >= >`
float	`= <> < <= >= >`
bool	`= <> < <= >= >`
string	`= <> < <= >= >`
char	`= <> < <= >= >`

Typ	Vergleichsoperatoren
int	= <> < <= >= >
float	= <> < <= >= >
bool	= <> < <= >= >
string	= <> < <= >= >
char	= <> < <= >= >

```
# -3.0/.4.0;;
- : float = -0.75
# "So"^" "^"geht"^" "^"das";;
- : string = "So geht das"
# 1>2 || not (2.0<1.0);;
- : bool = true
```

4.3 Wert-Definitionen

Mit `let` kann man eine Variable mit einem Wert belegen.

Die Variable behält diesen Wert für immer :-)

```
# let seven = 3+4;;
val seven : int = 7
# seven;;
- : int = 7
```

Achtung: Variablen-Namen werden klein geschrieben !!!

Eine erneute Definition für `seven` weist nicht `seven` einen neuen Wert zu, sondern erzeugt eine neue Variable mit Namen `seven`.

```
# let seven = 42;;
val seven : int = 42
# seven;;
- : int = 42
# let seven = "seven";;
val seven : string = "seven"
```

Die alte Definition wurde unsichtbar (ist aber trotzdem noch vorhanden :-)

Offenbar kann die neue Variable auch einen anderen Typ haben :-)

4.4 Komplexere Datenstrukturen

- Paare:

```
# (3,4);;
- : int * int = (3, 4)
# (1=2,"hallo");;
- : bool * string = (false, "hallo")
```

- Tupel:

```
# (2,3,4,5);;
- : int * int * int * int = (2, 3, 4, 5)
# ("hallo",true,3.14159);;
-: string * bool * float = ("hallo", true, 3.14159)
```

Simultane Definition von Variablen:

```
# let (x,y) = (3,4.0);;
val x : int = 3
val y : float = 4.

# val (3,y) = (3,4.0);;
val y : float = 4.0
```

Records: Beispiel:

```
# type person = {vor:string; nach:string; alter:int};;
type person = { vor : string; nach : string; alter : int; }
# let paul = { vor="Paul"; nach="Meier"; alter=24 };;
val paul : person = {vor = "Paul"; nach = "Meier"; alter = 24}
# let hans = { nach="kohl"; alter=23; vor="hans"};;
val hans : person = {vor = "hans"; nach = "kohl"; alter = 23}
# let hansi = {alter=23; nach="kohl"; vor="hans"}
val hansi : person = {vor = "hans"; nach = "kohl"; alter = 23}
# hans=hansi;;
- : bool = true
```

Bemerkung:

- ... Records sind Tupel mit benannten Komponenten, deren Reihenfolge irrelevant ist :-)
- ... Als neuer Typ muss ein Record vor seiner Benutzung mit einer `type`-Deklaration eingeführt werden.
- ... Typ-Namen und Record-Komponenten werden klein geschrieben :-)

Bemerkung:

... Records sind Tupel mit benannten Komponenten, deren Reihenfolge irrelevant ist :-)

... Als neuer Typ muss ein Record vor seiner Benutzung mit einer `type`-Deklaration eingeführt werden.

... Typ-Namen und Record-Komponenten werden klein geschrieben :-)

Zugriff auf Record-Komponenten

... per Komponenten-Selektion:

```
# paul.vor;;
- : string =  "Paul"
```

... mit Pattern Matching:

```
# let {vor=x;nach=y;alter=z} = paul;;
val x : string = "Paul"
val y : string = "Meier"
val z : int = 24
```

... und wenn einen nicht alles interessiert:

```
# let {vor=x} = paul;;
val x : string = "Paul"
```

Fallunterscheidung: `match` und `if`

```
match n
 with 0 -> "Null"
    | 1 -> "Eins"
    | _ -> "Soweit kann ich nicht zaehlen!"

match e
 with true  -> e1
    | false -> e2
```

Das zweite Beispiel kann auch so geschrieben werden (-:

```
if e then e1 else e2
```

Vorsicht bei redundanten und unvollständigen Matches!

```
# let n = 7;;
val n : int = 7
# match n with 0 -> "null";;
Warning: this pattern-matching is not exhaustive.
Here is an example of a value that is not matched:
1
Exception: Match_failure ("", 5, -13).
# match n
   with 0 -> "null"
      | 0 -> "eins"
      | _ -> "Soweit kann ich nicht zaehlen!";;
Warning: this match case is unused.
- : string = "Soweit kann ich nicht zaehlen!"
```

4.5 Listen

Listen werden mithilfe von `[]` und `::` konstruiert.

Kurzschreibweise: `[42; 0; 16]`

```
# let mt = [];;
val mt : 'a list = []
# let l1 = 1::mt;;
val l1 : int list = [1]
# let l = [1;2;3];;
val l : int list = [1; 2; 3]
# let l = 1::2::3::[];;
val l : int list = [1; 2; 3]
```

Achtung:

Alle Elemente müssen den gleichen Typ haben:

```
# 1.0::1::[];;
This expression has type int but is here used with type float
```

Achtung:

Alle Elemente müssen den gleichen Typ haben:

```
# 1.0::1::[];;
This expression has type int but is here used with type float
```

`tau list` beschreibt Listen mit Elementen vom Typ `tau` :-)

Der Typ `'a` ist eine Typ-Variable:

`[]` bezeichnet eine leere Liste für beliebige Element-Typen :-))

Pattern Matching auf Listen:

```
# match l
    with []     -> -1
       | x::xs -> x;;
-: int = 1
```