

## 9 Funktionale Sprachen: Lisp

nach Peter Thiemann: *Grundlagen der Funktionalen Programmierung*, Teubner, 1994

### Lisp

- 1960 von **McCarthy** am MIT entwickelt
- **klassischer Artikel**: J. McCarthy: *Recursive functions of symbolic expressions and their computation by machine, Part I.*, Communications of the ACM, 3(4), 184-195, 1960
- sehr **einfacher Interpretierer**: Funktionen `eval` (Ausdruck) und `apply` (Aufruf)
- sehr **einfache Notation für Daten und Programm**: Zahlen, Symbole, Listen als Paare  
Preis der Einfachheit: Klammerstruktur wird schon bei kleinen Programmen unübersichtlich
- HOF erfordern spezielle Notation
- erste Sprache mit automatischer **Speicherbereinigung (garbage collection)**
- **keine Typisierung (nur Unterscheidung zwischen Atom und Liste)**
- **dynamische Namensbindung**
- **ursprünglich call-by-name**
- auch imperative Variablen
- moderne Dialekte: Common Lisp, Scheme  
call-by-value und statische Namensbindung

## Funktionale Sprachen: FP, ML, SML

### FP

- Theoretische, einflussreiche Arbeit, Turing Award Lecture:  
J. Backus: *Can Programming Be Liberated from the von Neumann Style? A Functional Style and Its Algebra of Programs*, Communications of the ACM, 21(8), 613-641, 1978
- In FP gibt es **nur Funktionen** - keine Daten; Berechnungen Kombination von Funktionen

### ML, SML

- erster ML-Compiler 1974  
**SML** 1990: R. Milner, M. Tofte, R. Harper: *The Definition of Standard ML*, MIT Press, 1990
- erste (bedeutende) funktionale Sprache mit **strenger statischer Typbindung**,  
Hindley/Milner **Typsystem mit parametrischer Polymorphie**
- **Typinferenz**
- **statische Namensbindung**
- **HOF und Currying uneingeschränkt**
- **strikte Aufruf-Semantik (call-by-value)**
- **abstrakte Datentypen, Module, Funktoren**
- **Ausnahmebehandlung**
- **getypte Referenzen** (imperative Aspekte)

## Funktionale Sprachen: Miranda, Haskell

### Miranda™

- Turner 1985; kommerziell vertrieben
- nicht-strikt (lazy), polymorphe Typen, implementiert mit SKI-Reduktion
- ungewöhnliche Syntax, keine Lambda-Ausdrücke

### Haskell

- Entwicklung begann 1987
- **Stand der Technik** in den funktionalen Sprachen
- **statisches Typsystem mit parametrischer Polymorphie und Überladung durch Typklassen, Typinferenz**
- **statische Namensbindung**
- **nicht-strikte Aufruf-Semantik (call-by-need)**
- **HOF und Currying uneingeschränkt**
- voll ausgebautes **Modulsystem**, auch mit **separater Übersetzung**
- **rein-funktionale (Seiten-effektfreie) E/A**: Ströme, Continuations, Monaden
- Syntax für **kompakte Notation**

## Scala: objektorientierte und funktionale Sprache

Scala: Objektorientierte Sprache (wie Java, in kompakterer Notation) ergänzt um funktionale Konstrukte (wie in SML); objektorientiertes Ausführungsmodell (Java)

### funktionale Konstrukte:

- geschachtelte Funktionen, Funktionen höherer Ordnung, Currying, Fallunterscheidung durch Pattern Matching
- Funktionen über Listen, Ströme, ..., in der umfangreichen Sprachbibliothek
- parametrische Polymorphie, eingeschränkte, lokale Typinferenz

### objektorientierte Konstrukte:

- Klassen definieren alle Typen (Typen konsequent oo - auch Grundtypen), Subtyping, beschränkbare Typparameter, Case-Klassen zur Fallunterscheidung
- objektorientierte Mixins (Traits)

### Allgemeines:

- statische Typisierung, parametrische Polymorphie und Subtyping-Polymorphie
- sehr kompakte funktionale Notation
- komplexe Sprache und recht komplexe Sprachbeschreibungen
- übersetzbar und ausführbar zusammen mit Java-Klassen
- seit 2003, Martin Odersky, [www.scala.org](http://www.scala.org)

## Übersetzung und Ausführung: Scala und Java

FP-9.3b

- **Reines Scala-Programm:**  
ein Programm bestehend aus einigen Dateien `a.scala`, `b.scala`, ... mit Klassen- oder Objekt-Deklarationen in Scala, eine davon hat eine `main`-Funktion;

```
// Klassendeklarationen
object MainKlasse {
// Funktionsdeklarationen
    def main(args: Array[String]) {
// Ein- und Ausgabe, Aufrufe
    }
}
```

übersetzt mit `scalac *.scala`  
ausgeführt mit `scala MainKlasse`

- **Java- und Scala-Programm:**  
ein Programm bestehend aus Scala-Dateien `a.scala`, `b.scala`, ... und Java-Dateien `j.java`, `k.java`, ...; eine Java-Klasse hat eine `main`-Funktion;

übersetzt mit `scalac *.scala *.java`  
dann mit `javac *.scala *.java`  
(Pfad zur Bibliothek angeben)  
ausgeführt mit `java MainKlasse`

- **Reines Scala-Programm interaktiv:**  
(siehe Übungen)

© 2014 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

## Benutzung von Listen

FP-9.3c

Die abstrakte **Bibliotheksklasse** `List[+A]` definiert Konstruktoren und Funktionen über **homogene Listen**

```
val li1 = List(1,2,3,4,5)
```

```
val li2 = 2 :: 4 :: -1 :: Nil
```

### Verfügbare Funktionen:

`head`, `tail`, `isEmpty`, `map`, `filter`, `forall`, `exist`, `range`, `foldLeft`, `foldRight`, `range`, `take`, `reverse`, `:::` (`append`)

### zwei Formen für Aufrufe:

```
li1.map (x=>x*x)// qualifizierter Bezeichner map
```

```
li1 map (x=>x*x)// infix-Operator map
```

### Funktionsdefinitionen mit Fallunterscheidung:

```
def isort(xs: List[Int]): List[Int] = xs match {
  case List() => List()
  case x :: xs1 => insert(x, isort(xs1))
}
```

```
def insert(x: Int, xs: List[Int]): List[Int] = xs match {
  case List() => List(x)
  case y :: ys => if (x <= y) x :: xs else y :: insert(x, ys)
}
```

© 2014 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

## Case-Klassen: Typkonstruktoren mit Pattern Matching

FP-9.3d

Klassen können **Parameter** haben. Sie sind Instanzvariable der Klasse und Parameter des Konstruktors.

Die **Konstruktoren von Case-Klassen** können zur **Fallunterscheidung** und zum **Binden der Werte** dieser Instanzvariablen verwendet werden. Objekte können ohne `new` gebildet werden; Methoden für strukturellen Vergleich (`==`) und `toString` werden erzeugt.

```
abstract class Person
case class King () extends Person
case class Peer (degr: String, terr: String, number: Int )
    extends Person
case class Knight (name: String) extends Person
case class Peasant (name: String) extends Person
```

```
val guestList =
  Peer ("Earl", "Carlisle", 7) :: King () ::
  Knight ("Gawain") :: Peasant ("Jack Cade") :: Nil
```

```
def title (p: Person): String = p match {
  case King () => "His Majesty the King"
  case Peer (d, t, n) => "The " + d + " of " + t
  case Knight (n) => "Sir " + n
  case Peasant(n) => n }

```

```
println ( guestList map title )
```

```
List(His Majesty the King, The Earl of Carlisle, Sir Gawain, Jack Cade)
```

© 2014 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

## Definition polymorpher Typen

FP-9.3e

Polymorphe Typen werden durch **Klassen mit Typparameter** definiert, z.B. Container-Klassen.

**Alternative Konstruktoren** werden durch **Case-Klassen** formuliert, z.B. Binärbäume.

```
abstract class BinTree[A]
case class Lf[A] () extends BinTree[A]
case class Br[A] (v: A, left: BinTree[A], right: BinTree[A])
    extends BinTree[A]
```

### Funktionen über Binärbäume:

```
def preorder[A] (p: BinTree[A]): List[A] = p match {
  case Lf() => Nil
  case Br(v,tl,tr) => v :: preorder (tl) :: preorder (tr)
}
```

```
val tr: BinTree[Int] =
  Br (2, Br (1, Lf(), Lf()), Br (3, Lf(), Lf()))
```

```
println ( preorder (tr) )
```

© 2014 bei Prof. Dr. Uwe Kastens

## Funktionen höherer Ordnung und Lambda-Ausdrücke

Ausdrucksmöglichkeiten in Scala entsprechen etwa denen in SML, aber die **Typinferenz polymorpher Signaturen** benötigt an vielen Stellen **explizite Typangaben**

**Funktion höherer Ordnung:** Faltung für Binärbäume

```
def treeFold[A,B] (f: (A, B, B)=>B, e: B, t: BinTree[A]): B =
  t match {
    case Lf () => e
    case Br (u,t1,tr) =>
      f (u, treeFold (f, e, t1), treeFold (f, e, tr))
  }
```

**Lambda-Ausdrücke:**

```
11.map ( x=>x*x )           Quadrat-Funktion
13.map ( _ => 5 )           konstante Funktion
12.map ( Math.sin _ )       Sinus-Funktion
14.map ( _ % 2 == 0 )       Modulo-Funktion
treefold ( ((_: Int, c1: Int, c2: Int) => 1 + c1 + c2) , 0, t)
```

## Currying

Funktionen in **Curry-Form** werden durch mehrere **aufeinanderfolgende Parameterlisten** definiert:

```
def secl[A,B,C] (x: A) (f: (A, B) => C) (y: B) = f (x, y);
def secr[A,B,C] (f: (A, B) => C) (y: B) (x: A) = f (x, y);
def power (x: Int, k: Int): Int =
  if (k == 1) x else
  if (k%2 == 0) power (x*x, k/2) else
  x * power (x*x, k/2);
```

Im Aufruf einer Curry-Funktion müssen **weggelassene Parameter** durch **\_** angegeben werden:

```
def twoPow = secl (2) (power) _ ; Funktion, die 2er-Potenzen berechnet
def pow3 = secr (power) (3) _ ; Funktion, die Kubik-Zahlen berechnet

println ( twoPow (6) )
println ( pow3 (5) )
println ( secl (2) (power) (3) )
```

## Ströme in Scala

In Scala werden **Ströme** in der Klasse `Stream[A]` definiert. Besonderheit: Der **zweite Parameter der cons-Funktion** ist als **lazy** definiert, d.h. ein aktueller **Parameter Ausdruck** dazu wird erst ausgewertet, wenn er benutzt wird, d.h. der Parameterausdruck wird in eine **parameterlose Funktion** umgewandelt und so übergeben. Diese Technik kann allgemein für Scala-Parameter angewandt werden.

```
def iterates[A] (f: A => A) (x: A): Stream[A] =
  Stream.cons(x, iterates (f) (f (x)))

def smap[A] (sq: Stream[A]) (f: A => A): Stream[A] =
  Stream.cons(f (sq.head), smap[A] (sq.tail) (f) )

val from = iterates[Int] (_ + 1) _
val sq = from (1)
val even = sq filter (_ % 2 == 0)
val ssq = from (7)
val msq = smap (ssq) (x=>x*x)

println( msq.take(10).mkString(",") )
```

## Objektorientierte Mixins

**Mixin** ist ein Konzept in objektorientierten Sprachen: Kleine Einheiten von implementierter Funktionalität können Klassen zugeordnet werden (spezielle Form der Vererbung). Sie definieren nicht selbst einen Typ und liegen neben der Klassenhierarchie.

```
abstract class Bird { protected val name: String }
```

Verschiedene Verhaltensweisen werden hier als **trait** definiert:

```
trait Flying extends Bird {
  protected val flyMessage: String
  def fly() = println(flyMessage)
}
trait Swimming extends Bird {
  def swim() = println(name+" is swimming")
}
```

```
class Frigatebird extends Bird with Flying {
  val name = "Frigatebird"
  val flyMessage = name + " is a great flyer"
}
class Hawk extends Bird with Flying with Swimming {
  val name = "Hawk"
  val flyMessage = name + " is flying around"
}

val hawk = (new Hawk).fly(); hawk.swim(); (new Frigatebird).fly();
```

## Beispiele für Anwendungen funktionaler Sprachen

aus Peter Thiemann: *Grundlagen der Funktionalen Programmierung*, Teubner, 1994

- Programmierausbildung für Anfänger (z. B. Scheme, Gofer)
- Computeralgebrasysteme wie MACSYMA in Lisp implementiert
- Editor EMACS in Lisp implementiert
- Beweissysteme ISABELLE, LCF, Termesetzung REVE in ML implementiert
- Übersetzer und Interpretierer: SML, Lazy-ML, Glasgow Haskell C. in ML implementiert, Yale Haskell C. in Lisp implementiert
- Firma Ericsson eigene funktionale Sprache Erlang für Software im Echtzeiteinsatz, Telekommunikation, Netzwerkmonitore, grafische Bedienoberflächen

aus J. Launchbury, E. Meijer, Tim Sheard (Eds.): *Advanced Functional Programming*, Springer, 1996:

- Haggis: System zur Entwicklung grafischer Bedienoberflächen (S. Finne, S. Peyton Jones)
- Haskore Music Tutorial (Paul Hudak)
- Implementing Threads in Standard ML
- Deterministic, Error-Correcting Combinator Parsers (S. D. Swierstra, L. Duponcheel)

## Verständnisfragen (1)

### 1. Einführung

1. Charakterisieren Sie funktionale gegenüber imperativen Sprachen; was bedeutet applikativ?

### 2. Lisp: FP Grundlagen

2. Charakteristische Eigenschaften von Lisp und seine Grundfunktionen.
3. Programm und Daten in Lisp; Bedeutung der `quote`-Funktion.
4. Funktion definieren und aufrufen
5. Dynamische Bindung im Gegensatz zu statischer Bindung.
6. Erklären Sie den Begriff Closure; Zusammenhang zum Laufzeitkeller.

### 3. Grundlagen von SML

7. Typinferenz: Aufgabe und Verfahren am Beispiel, mit polymorphen Typen.
8. Aufrufsemantik erklärt durch Substitution; call-by-value, call-by-name, call-by-need.
9. Muster zur Fallunterscheidung: Notation, Auswertung; Vergleich mit Prolog.
10. Bindungsregeln in SML (`val`, `and`, `let`, `local`, `abstype`, `struct`).

## Verständnisfragen (2)

### 4. Programmierparadigmen zu Listen

11. Anwendungen für Listen von Paaren, Listen von Listen; Funktionen `zip` und `unzip`.
12. Matrizen transponieren, verknüpfen; applikativ und funktional.
13. Lösungsraumsuche für Münzwechsel: Signatur erläutern; Listen und Ströme.
14. Polynom-Multiplikation: Darstellungen, Halbierungsverfahren.

### 5. Module Typen

15. `datatype`-Definitionen: vielfältige Ausdrucksmöglichkeiten.
16. Gekapselte Typen (`abstype`) erläutern.
17. Ausnahmen: 3 Sprachkonstrukte; Einbettung in funktionale Sprache.
18. Modul-Varianten (`structure`), Schnittstellen.
19. Generische Module (`functor`) erläutern.

## Verständnisfragen (3)

### 6. Funktionen als Daten

20. Wo kommen Funktionen als Daten vor? Beispiele angeben.
21. Currying: Prinzip und Anwendungen
22. Funktionale `sec1`, `seccr`: Definition, Signatur und Anwendungen
23. Weitere allgemeine Funktionale (`o`, `iterate`, `s k I`)
24. Funktionale für Listen: `map` (1-, 2-stufig), `filter`, `take`, `drop` (`-while`)
25. Quantoren: Definition, Anwendung z.B. für disjunkte Listen
26. `foldl`, `foldr`, `treefold` erläutern

### 7. Unendliche Listen (Ströme)

27. Ströme: Konzept, Implementierung, Anwendungen
28. `datatype` für Ströme und Varianten dazu
29. Stromfunktionen, Stromfunktionale
30. Beispiel: Konvergente Folge
31. Ströme rekursiv zusammengesetzt (Sieb des Eratosthenes)
32. Strom aller Lösungen im Lösungsbaum (Signatur der Funktion)
33. Tiefensuche - Breitensuche im Lösungsbaum, 3 Abstraktionen

## Verständnisfragen (4)

### 8. Lazy Evaluation

- 34. Paradigma lazy: Bedeutung in Sprachkonstrukten, im Vergleich zu eager
- 35. Lazy Semantik in Haskell, Beispiele für Aufrufe, Listen, Funktionen
- 36. Listen als Ströme; Vergleich zu Programmierung in SML; Fibonacci als Daten
- 37. Beispiel Hamming-Folge

### 9. Funktionale Sprachen

- 38. Eigenschaften von Lisp zusammenfassen
- 39. Eigenschaften von SML zusammenfassen
- 40. Eigenschaften von Haskell zusammenfassen