

Informatik I

2. Erste Schritte in Scheme

Jan-Georg Smaus

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

21. Oktober 2010

Erste Schritte in Scheme

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Allgemeines
Ausdrücke

Programme

Ada, Basic, C, C++, C#, Cobol, Curry, Fortran, Go, Gödel, HAL, Haskell, Java, Lisp, Lua, Mercury, Miranda, ML, OCaml, Pascal, Perl, PHP, Python, Prolog, Ruby, OCaml, Scheme, Shakespeare, Smalltalk, Visual Basic, u.v.m.

Ada, Basic, C, C++, C#, Cobol, Curry, Fortran, Go, Gödel, HAL, Haskell, Java, Lisp, Lua, Mercury, Miranda, ML, OCaml, Pascal, Perl, PHP, Python, Prolog, Ruby, OCaml, Scheme, Shakespeare, Smalltalk, Visual Basic, u.v.m.

Wir lernen hier **Scheme**, einen Dialekt von Lisp. Genauer gesagt lernen wir einen speziell für die Lehre entwickelten Dialekt von Scheme.

Ada, Basic, C, C++, C#, Cobol, Curry, Fortran, Go, Gödel, HAL, Haskell, Java, Lisp, Lua, Mercury, Miranda, ML, OCaml, Pascal, Perl, PHP, Python, Prolog, Ruby, OCaml, Scheme, Shakespeare, Smalltalk, Visual Basic, u.v.m.

Wir lernen hier **Scheme**, einen Dialekt von Lisp. Genauer gesagt lernen wir einen speziell für die Lehre entwickelten Dialekt von Scheme.

Später lernen wir noch **Python** (es sei denn zwischenzeitlich bebt es erd und flutet es sint).

Die Programmiersprache Scheme ...

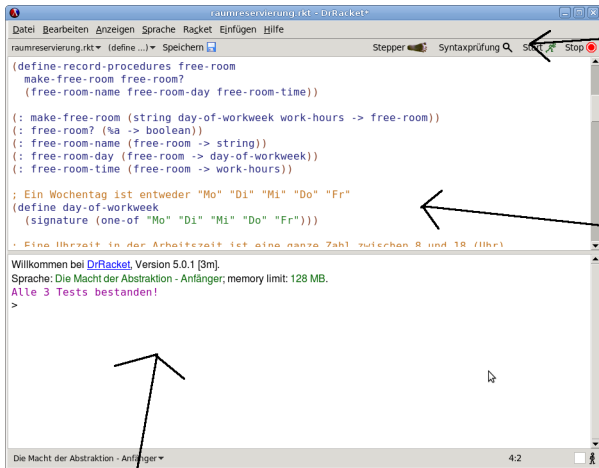
- ... wurde 1975 von Gerald Jay Sussman and Guy Lewis Steele Jr. am Massachusetts Institute of Technology entwickelt.
- Die aktuelle (September 2007) Beschreibung ist: R6RS *Revised⁶ Report on the Algorithmic Language Scheme*.

Scheme ist besonders geeignet zur Ausbildung, denn

- Scheme ist einfach: einmal gelernt, nie wieder vergessen.
- Scheme ist klein: die Sprachdefinition umfasst 90+70 Seiten.
- Scheme ist mächtig: alle Programmierkonzepte lassen sich in Scheme demonstrieren (manche besser, andere schlechter).

DrRacket: Die Programmierumgebung

<http://www.racket-lang.org/>



Laden eines
Programms

Programmeditor
(Definitionen)

Evaluationsfenster
(REPL: read-eval-print-loop)

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Allgemeines
Ausdrücke

Programme

Erinnerung:

- Es gibt verschiedene Programmiersprachen, aber sie alle sind **formale** Sprachen, d.h., sie sind exakt, durch strikte Regeln, definiert. Das unterscheidet sie von natürlichen Sprachen wie Deutsch oder Italienisch.
- So wie **Sätze** in natürlicher Sprache aus **Wörtern** und **Satzzeichen** gemäß einer bestimmten **Grammatik** zusammengefügt werden, so werden **Programme** in einer Programmiersprache aus **Grundbausteinen** unter Verwendung von **Kombinationsmitteln** zusammengefügt.

Hier geht es um **Syntax**, ein Hauptaspekt **jeglicher** Sprache, ob natürliche Sprache, Programmiersprache, Musiknotation etc. In der Informatik spricht man sehr viel von Syntax!

Über Algorithmen hieß es:

- Die Bedeutung jedes Einzelschritts ist eindeutig festgelegt.

Ich sagte: „... wie auch immer er notiert sein mag“. Jetzt, da wir uns mit der Notation konkret beschäftigen, gilt die Aussage unvermindert.

Hier geht es um **Semantik**, ebenfalls ein Hauptaspekt **jeglicher** Sprache.

Von Semantik wird in der Informatik ebenfalls viel gesprochen!
Semantik ist oft schwierig zu fassen.

Zeichen mit fester Bedeutung

- **Literale (Konstanten)**, z.B. für Zahlen oder Strings:
42 -17 2/3 3.1415926535 "Banane"
- **Vordefinierte Namen (primitive Operatoren)**, z.B. für arithmetische Operationen:
+ - * /

Zeichen mit frei wählbarer Bedeutung

Namen (Bezeichner, Identifier, Variablen)

x y banane

Aus diesen bilden wir **Ausdrücke**.

- Ein Literal ist ein Ausdruck.
- Eine Variable ist ein Ausdruck.
- Die **(Funktions-)Anwendung, Applikation** eines vordefinierten Namens auf Ausdrücke (**Operanden**) ist ein Ausdruck:

$(\langle operator \rangle \langle operand \rangle \dots \langle operand \rangle)$

$(+ 17 4)$

$(* x (+ 17 4))$

- Ausdrücke ($\langle expression \rangle$) haben einen **Wert**, sie können **ausgewertet** werden.
- Jeder Ausdruck beschreibt einen **Berechnungsprozess** zur Ermittlung seines Wertes (Auswertung). Start der Auswertung durch Eingabe in das REPL-Fenster.

Auswertung: Beispiele

Konstante

42

Berechnung von $2 \cdot (17 + 4)$

$(* 2 (+ 17 4))$

$\Rightarrow (* 2 21)$

$\Rightarrow 42$

Berechnung von $3 + 13 \cdot 3$

$(+ 3 (* 13 3))$

$\Rightarrow (+ 3 39)$

$\Rightarrow 42$

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Allgemeines
Ausdrücke

Programme

Auswertung: Beispiele (Forts.)

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Allgemeines
Ausdrücke

Programme

Berechnung von $(2 + 2) \cdot (((3 + 5) \cdot (30/10))/2)$

(***** **(+ 2 2)** (**/** (***** **(+ 3 5)** (**/** 30 10)) 2))

=> (***** 4 (**/** (***** **(+ 3 5)** (**/** 30 10)) 2))

=> (***** 4 (**/** (***** 8 (**/** 30 10)) 2))

=> (***** 4 (**/** (***** 8 3) 2))

=> (***** 4 (**/** 24 2))

=> (***** 4 12)

=> 48

Programme

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme

Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Wieso kamen bei den Beispielen für Auswertung keine Variablen vor? Bevor wir diese Frage beantworten, gehen wir nochmals eine Stufe höher.

Programme

Wieso kamen bei den Beispielen für Auswertung keine Variablen vor? Bevor wir diese Frage beantworten, gehen wir nochmals eine Stufe höher.

Programm

Ein **Programm** ist eine Folge von **Formen**. Formen können sein

- **Definitionen**
- **Ausdrücke**

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme

Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Wieso kamen bei den Beispielen für Auswertung keine Variablen vor? Bevor wir diese Frage beantworten, gehen wir nochmals eine Stufe höher.

Programm

Ein **Programm** ist eine Folge von **Formen**. Formen können sein

- **Definitionen**
- **Ausdrücke**

Bemerkungen:

- Ich verwende das Wort „Form“ trotzdem weiter auch in seiner allgemeinsprachlichen Bedeutung.
- Ein **Kommentar** beginnt mit dem Zeichen ; und endet mit dem Zeilenende.
- Leerzeichen, Zeilenumbrüche und Kommentare sind Trennzeichen ohne Bedeutung.

Eine Definition ist eine **Spezialform** eingeleitet durch das **Schlüsselwort** `define`:

`(define <variable> <expression>)`

- Erster Operand: Name einer **Variablen**.
- Zweiter Operand: ein Ausdruck.
- Diese **Bindung** bindet den Namen der Variable an den **Wert des Ausdrucks**. Nun steht der Name der Variable für den Wert. Die Berechnung wird nicht wiederholt.
- Literale können keine Variablennamen sein.
- Variablennamen können keine Trennzeichen enthalten.

Eine Definition ist eine **Spezialform** eingeleitet durch das **Schlüsselwort** `define`:

`(define <variable> <expression>)`

- Erster Operand: Name einer **Variablen**.
- Zweiter Operand: ein Ausdruck.
- Diese **Bindung** bindet den Namen der Variable an den **Wert des Ausdrucks**. Nun steht der Name der Variable für den Wert. Die Berechnung wird nicht wiederholt.
- Literale können keine Variablennamen sein.
- Variablennamen können keine Trennzeichen enthalten.

Bemerkung: Dies war die Definition von „Definition“. Ich verwende das Wort „Definition“ trotzdem weiter auch in seiner allgemeinsprachlichen Bedeutung.

Definitionen: Beispiele

```
> (define answer 42)
> answer
42
> (define pi (* 4 (atan 1)))
> pi
3.141592653589793
```

Variablen in Ausdrücken

Wie könnte der Wert eines Ausdrucks definiert sein, in dem eine Variable vorkommt?

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme

Definitionen

Abstraktionen

Anleitungen

Formale
Semantik

Variablen in Ausdrücken

Wie könnte der Wert eines Ausdrucks definiert sein, in dem eine Variable vorkommt? Wenn die Variable vorher **definiert** wurde, ist das nicht sehr schwierig. Z.B.:

Quadrieren

```
(define x 4)
(* x x)
=> (* 4 x)
=> (* 4 4)
=> 16
```

Man sagt: Ausdruck `(* x x)` enthält die **freie Variable** `x` (die im Programm definiert ist).

Variablen in Ausdrücken

Wie könnte der Wert eines Ausdrucks definiert sein, in dem eine Variable vorkommt? Wenn die Variable vorher **definiert** wurde, ist das nicht sehr schwierig. Z.B.:

Quadrieren

```
(define x 4)
(* x x)
=> (* 4 x)
=> (* 4 4)
=> 16
```

Man sagt: Ausdruck $(* x x)$ enthält die **freie Variable** x (die im Programm definiert ist).

Aber irgendwie ist das noch nicht befriedigend. Man müsste doch sagen können: „Für **beliebiges** x , gib mir $(* x x)$.“
Schließlich soll x **veränderlich** sein.

Abstraktion von x führt zu dem **Lambda-Ausdruck**
(**Abstraktion**, **Prozedur**, **Funktion**)

$(\text{lambda } (x) (* x x))$

- Man sagt: eine Abstraktion ist ein **parametrisierter** Ausdruck. Die Variable x ist die **gebundene Variable** des Lambda-Ausdrucks.
- Der Ausdruck $(* x x)$ ist der **Rumpf** des Lambda-Ausdrucks.

Was tut man mit einem Lambda-Ausdruck?

So wie einen vordefinierten Namen (z.B. +) auch, kann man einen Lambda-Ausdruck **anwenden** (**applizieren**). Die Applikation setzt den Operanden für die gebundene Variable ein:

```
((lambda (x) (* x x)) 4) ; Einsetzen von 4 für x
=> (* 4 4)                ; Regel für *
=> 16
```

Was tut man mit einem Lambda-Ausdruck? (Forts.)

Ein Lambda-Ausdruck ist ein Ausdruck. Deshalb kann man selbstverständlich einen **Namen** als den Lambda-Ausdruck **definieren**:

```
(define square  
  (lambda (x)  
    (* x x)))
```

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Was tut man mit einem Lambda-Ausdruck? (Forts.)

Ein Lambda-Ausdruck ist ein Ausdruck. Deshalb kann man selbstverständlich einen **Namen** als den Lambda-Ausdruck **definieren**:

```
(define square
  (lambda (x)
    (* x x)))
(square 13) ; Einsetzen für square
=> ((lambda (x) (* x x)) 13) ; Einsetzen von 13 für x
=> (* 13 13) ; Regel für *
=> 169
```

```
(square 4)
=> ...
=> 16
```

Auswertung der Funktionsanwendung

Zur Auswertung von

$\langle \langle operator \rangle \langle operand \rangle_1 \dots \langle operand \rangle_n \rangle$

wird zuerst der Wert v_0 von $\langle operator \rangle$, sowie die Werte v_1, \dots, v_n der Operanden bestimmt. Dies sind die **Argumente** der Funktionsanwendung.

Der **Rückgabewert** bestimmt sich wie folgt:

- 1 Ist v_0 primitiver Operator, so wird er auf v_1, \dots, v_n angewendet.
- 2 Ist $v_0 = (\text{lambda } (x_1 \dots x_n) e)$, so wird in e jedes freie Vorkommen von x_1 durch v_1 , x_2 durch v_2 usw. ersetzt und der Wert des entstehenden Ausdrucks ermittelt.

Fläche eines Kreises

Aufgabe: Fläche eines Kreises

Eingabe: Radius r des Kreises ($r \geq 0$)

Ausgabe: Fläche πr^2 des Kreises

Definiere hierfür eine Prozedur.

Wir haben oben schon `pi` und `square` definiert.

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Fläche eines Kreises II

Eingabe und Ausgabe sind Zahlen, d.h. ihre **Sorte** ist **number**.
Der Vorspann der Prozedurdefinition besteht aus
Kurzbeschreibung und **Signatur**:

```
; Fläche eines Kreises berechnen  
(: circle-area (number -> number))
```

Daraus ergibt sich folgendes **Gerüst** für die Definition:

```
(define circle-area  
  (lambda (radius)  
    ...))
```

Testfälle:

```
(check-expect (circle-area 0) 0)  
(check-within (circle-area 1) 3.14159 1e-5)  
(check-within (circle-area 2) 12.56637 1e-5)
```

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Fläche eines Kreises III

Nun vervollständigen wir das Gerüst unter Verwendung von pi und square:

```
; Fläche eines Kreises berechnen
(: circle-area (number -> number))
(define circle-area
  (lambda (radius)
    (* pi (square radius))))
; Testfälle
(check-expect (circle-area 0) 0)
(check-within (circle-area 1) 3.14159 1e-5)
(check-within (circle-area 2) 12.56637 1e-5)
```

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Das Parkplatzproblem

Eingabe: $n, r \in \mathbb{N}$, r gerade, $2n \leq r \leq 4n$

Ausgabe: $P(n, r) = r/2 - n$

Signatur und sich daraus ergebendes **Gerüst**:

```
; Parkplatzproblem lösen
(: cars-in-parking-lot (natural natural -> natural))
(define cars-in-parking-lot
  (lambda (nr-of-vehicles nr-of-wheels)
    ...))
```

Testfälle:

```
(check-expect (cars-in-parking-lot 0 0) 0)
(check-expect (cars-in-parking-lot 1 4) 1)
(check-expect (cars-in-parking-lot 2 4) 0)
```

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

Das Parkplatzproblem II

Eingabe: $n, r \in \mathbb{N}$, r gerade, $2n \leq r \leq 4n$

Ausgabe: $P(n, r) = r/2 - n$

Fertiges Programm durch Einsetzen der Formel

```
; Parkplatzproblem lösen
(: cars-in-parking-lot (natural natural -> natural))
(define cars-in-parking-lot
  (lambda (nr-of-vehicles nr-of-wheels)
    (- (/ nr-of-wheels 2) nr-of-vehicles)))
; Testfälle
(check-expect (cars-in-parking-lot 0 0) 0)
(check-expect (cars-in-parking-lot 1 4) 1)
(check-expect (cars-in-parking-lot 2 4) 0)
```

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

- Ein Testfall besteht aus der Anwendung der zu schreibenden Prozedur auf gewisse Eingaben, sowie der erwarteten Ausgabe. DrRacket unterstützt Testfälle durch `(check-expect <expression> <expression>)`
- Die Ausgabe **soll** „von Hand“ separat berechnet werden! Das geht natürlich nur für kleine Eingaben, und manchmal auch nur ungefähr. Deshalb bietet DrRacket folgendes an: `(check-within <expression> <expression> <expression>)`
Damit kann getestet werden, ob der Wert eines Ausdrucks in einem bestimmten Bereich liegt.
- Es **sollten** Testfälle bereitgestellt werden für
 - Randfälle (im Parkplatzproblem $r = 2n$ und $r = 4n$);
 - Standardfälle;
 - Fehlerfälle.

- Ein nicht bestandener Test **soll** folgende Konsequenzen haben:
 - Korrektur des Programms;
 - ggf. Korrektur des Testfalls nach gründlichem Nachdenken.
- Er **sollte keinesfalls** folgende Konsequenzen haben:
 - Entfernen des Testfalls;
 - einfache Anpassung des Testfalls an die tatsächlich berechnete Ausgabe.

Konstruktionsanleitung 1 (Konstruktion von Prozeduren)

(Erste Annäherung)

Kurzbeschreibung Schreibe eine einzeilige Kurzbeschreibung.

Signatur Wähle einen Namen und schreibe die Signatur für die Prozedur. Verwende dafür die Form
(: $\langle name \rangle$ $\langle signature \rangle$).

Gerüst Leite aus der Signatur das Gerüst der Prozedur her.

Testfälle Schreibe einige sinnvolle Testfälle.

Rumpf Vervollständige den Rumpf der Prozedur.

Test Prüfe, dass alle Testfälle erfolgreich ablaufen.

...

MANTRA #1 (Signatur vor Ausführung)

Schreibe — vor der Programmierung des Prozedurrumpfes — eine Kurzbeschreibung der Aufgabe als Kommentar, sowie eine Signatur ins Programm.

MANTRA #2 (Testfälle)

Schreibe Testfälle **vor** dem Schreiben der Definition.

Aufgabe: Rauminhalt eines Zylinders

Eingabe: Radius r und Höhe h eines Zylinders

Ausgabe: Rauminhalt des Zylinders = Grundfläche * Höhe

```
; Rauminhalt eines Zylinders berechnen
(: cylinder-volume (number number -> number))
(define cylinder-volume
  (lambda (radius height)
    (* (circle-area radius) height)))
; Testfall
(check-within (cylinder-volume 1 1) 3.14159 1e-5)
(check-within (cylinder-volume 2 1) 12,56636 1e-4)
(check-within (cylinder-volume 1 4) 12,56636 1e-4)
```

Berechnungsprozess zu cylinder-volume

```
(cylinder-volume 5 4)
=> ((lambda (radius height)
      (* (circle-area radius) height)) 5 4)
=> (* (circle-area 5) 4)
=> (* ((lambda (radius) (* pi (square radius))) 5) 4)
=> (* (* pi (square 5)) 4)
=> (* (* 3.141... ((lambda (x) (* x x)) 5)) 4)
=> (* (* 3.141... (* 5 5)) 4)
=> (* (* 3.141... 25) 4)
=> (* 78.53... 4)
=> 314.1...
```

Informatik I

Jan-Georg
Smaus

Erste Schritte
in Scheme

Programme
Definitionen
Abstraktionen
Anleitungen
Formale
Semantik

MANTRA #3 (Strukturerhaltung)

Versuche, das Programm wie das Problem zu strukturieren.

„Untermantras“:

MANTRA #4 (Abstraktion)

Schreibe eine Abstraktion für jedes Unterproblem.

MANTRA #5 (Namen)

Definiere Namen für häufig benutzte Konstanten und verwende diese Namen anstelle der Konstanten, für die sie stehen.

Formale Definition des Berechnungsprozesses eines Programms:

- Rechenschritt im Substitutionsmodell: **Reduktionsschritt**.
- Berechnungsprozess: **Reduktionssequenz**, d.h. Folge von Ausdrücken, wobei aufeinanderfolgende Ausdrücke durch einen Reduktionsschritt ineinander übergeführt werden.
- Definition der Semantik: Lege zu jeder Form fest, ob sie
 - ein Wert ist (d.h., ein Ergebnis) oder ob
 - ein Reduktionsschritt anwendbar ist
 - Wenn ja, wo in der Form?

Freie, gebundene, und bindende Variablen

- Ein Vorkommen einer Variable in einem Ausdruck heißt **frei**, falls keine umschließende Bindung existiert. Beispiele:

x

`(* x 5)`

`(+ 17 (- x y))`

`((lambda (x) (+ x 1)) (* x x))`

- Ein Vorkommen einer Variable in einem Ausdruck heißt **gebunden**, falls eine umschließende Bindung existiert. Beispiele:

`((lambda (x) x) (+ y 212))`

`((lambda (x) (+ x 1)) (* x x))`

`(lambda (y) (lambda (x) y))`

- Andernfalls, d.h., wenn das Vorkommen direkt hinter dem `lambda` steht, heißt das Vorkommen **bindend**.

Lexikalische Bindung

- Im Folgenden kennzeichnen wir Vorkommen durch Superskripte:

```
((lambda (x1)  
  (+ ((lambda (x2) (* x3 3)) 3)  
     (* x4 2))) 14)
```

Die Vorkommen ¹ und ² von x sind **bindend**, und die Vorkommen, ³ und ⁴ sind **gebunden**.

- Doch welches gebundene Vorkommen bezieht sich auf welche Bindung?

- Im Folgenden kennzeichnen wir Vorkommen durch Superskripte:

$$\begin{aligned} & ((\text{lambda } (x^1) \\ & \quad (+ ((\text{lambda } (x^2) (* x^3 3)) 3) \\ & \quad \quad (* x^4 2))) 14) \end{aligned}$$

Die Vorkommen ¹ und ² von x sind **bindend**, und die Vorkommen, ³ und ⁴ sind **gebunden**.

- Doch welches gebundene Vorkommen bezieht sich auf welche Bindung?

Es gilt die **lexikalische Bindung**: Eine gebundenes Vorkommen bezieht sich immer auf das bindende Vorkommen der innersten textlich umschließenden Abstraktion. D.h. ³ bezieht sich auf ² und ⁴ bezieht sich auf ¹ (Knopf „Syntaxprüfung“).

- Äquivalenter Ausdruck durch **konsistente Umbenennung** eines bindenden Vorkommens und aller gebundenen Vorkommen zu dieser Bindung:

```
((lambda (x1)  
  (+ ((lambda (x2) (* x3 3)) 3)  
     (* x4 2))) 14)
```

wird zu

```
((lambda (x1)  
  (+ ((lambda (y2) (* y3 3)) 3)  
     (* x4 2))) 14)
```

Berechnungsregeln des Substitutionsmodells

- Ein Literal ist ein Wert.
- Ein Lambda-Ausdruck ist ein Wert.
- Eine freie Variable wird durch ihre `define`-Bindung (einen Wert) ersetzt.
- Zur Berechnung des Wertes einer Applikation

$\langle \langle operator \rangle \langle operand \rangle_1 \dots \langle operand \rangle_n \rangle$

werden zuerst der Wert v_0 von $\langle operator \rangle$, sowie die Werte v_1, \dots, v_n der Operanden bestimmt.

- 1 Ist v_0 primitiver Operator, so wird er auf v_1, \dots, v_n angewendet.
- 2 Ist $v_0 = (\text{lambda } (x_1 \dots x_n) e)$, so wird in e jedes freie Vorkommen von x_1 durch v_1 , x_2 durch v_2 usw. ersetzt und der Wert des entstehenden Ausdrucks ermittelt.
- 3 Andernfalls: Laufzeitfehler!

- Stepper in DrRacket (Barfußknopf).
- Benutzung
 - Programm im Editierfenster
 - Stepper wertet den letzten Ausdruck im Editierfenster Schritt für Schritt aus.

- Ausdrücke und ihre Auswertung (Substitutionsmodell)
- Programme
- Sorten und Signaturen
- Testfälle
- Konstruktionsanleitung für Prozeduren
- Lexikalische Bindung