

Informatik I: Einführung in die Programmierung

15. Rekursion, Endrekursion, Iteration

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



Prof. Dr. Peter Thiemann

7. Januar 2026

1 Rekursion



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Definition

Eine Funktion f ist **rekursiv**, wenn der Funktionsrumpf einen Aufruf von f enthält.

Beispiel (Fibonacci, naiv)

```
def fib (n : int) -> int:
  if n < 2:
    return 1
  else:
    return fib (n-2) + fib (n-1)
```

- Problem: Termination (vgl. while Schleife)
- Bekannt von Funktionen auf Bäumen: rekursive Aufrufe nur auf Teilbaum \Rightarrow Termination.
- Allgemein müssen die Argumente eines rekursiven Aufrufs “kleiner” sein als die Argumente der Funktion \Rightarrow Termination.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme



- Bäume sind induktiv definiert:
 - Ein Baum ist entweder leer \square oder
 - ein Knoten mit einer Markierung und einer Liste von Teilbäumen.
- Schema für Funktionen F auf Bäumen, die natürlich rekursiv sind:

- $F(\square) = A$

- $F \left(\begin{array}{c} \text{mark} \\ \swarrow \quad \downarrow \quad \searrow \\ t_0 \quad \dots \quad t_{n-1} \end{array} \right) = B(\text{mark}, F(t_0), \dots, F(t_{n-1}))$

- B ist ein Programmstück, das die Markierung der Wurzel, sowie die Ergebnisse der **Funktionsaufrufe von F auf den Teilbäumen** verwenden darf.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
@dataclass
class Node:
    mark : Any
    children : list['Tree']
type Tree = Optional[Node]
def tree_skeleton (tree : Tree) -> Any:
    match tree:
        case None:
            return "A" # result for empty tree
        case Node (mark, children):
            # compute B from
            # - mark
            # - tree_skeleton(children[0])
            # - ...
            # - tree_skeleton(children[n-1])
            # where n = len (children)
            return "B"
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

2 Binäre Suche



Rekursion

**Binäre
Suche**

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Jede Rekursion folgt einer Baumstruktur

Binäre Suche — Spezifikation

- Eingabe
 - `lst : list[T]` streng aufsteigend sortierte Liste
 - `key : T` Suchbegriff
- Ausgabe
 - `i` sodass `lst[i] == key`, falls `key in lst`
 - andernfalls: `None`

Idee

- Betrachte die Liste wie einen binären Suchbaum
- Wähle ein beliebiges Element als Wurzel und vergleiche mit `key`:
alle Elemente links davon sind kleiner, rechts davon größer
- Suche weiter im rechten oder linken Listensegment
- Optimize die Effizienz durch geschickte Wahl der Wurzel (in der Mitte)

Rekursion

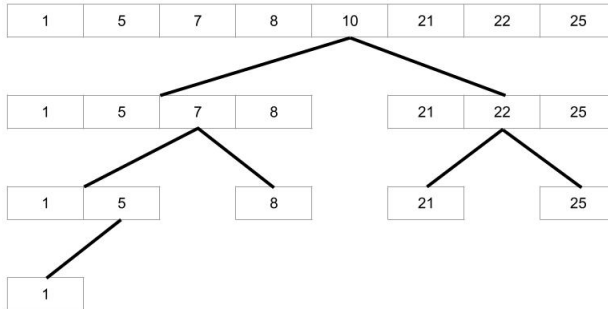
Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme



Rekursion

Binäre
Suche

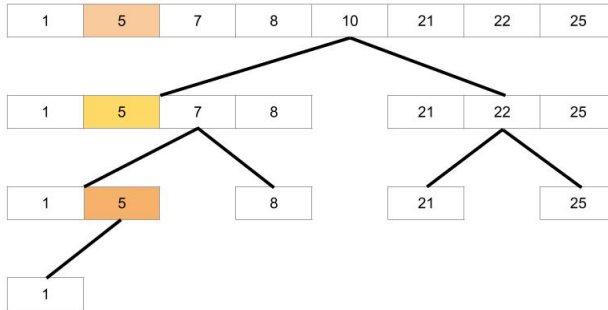
Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Binäre Suche (5) = 1



Rekursion

Binäre
Suche

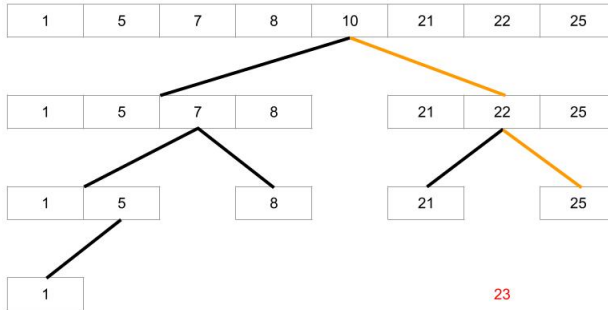
Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Binäre Suche (23) = None



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Binäre Suche

Elementtyp `int`

```
def bsearch (lst : list[int], key : int) -> Optional[int]:  
    n = len (lst)  
    if n == 0:  
        return None # key not in empty list  
    m = n//2           # position of root  
    if lst[m] == key:  
        return m  
    elif lst[m] > key:  
        return bsearch (lst[:m], key)  
    else: # lst[m] < key  
        r = bsearch (lst[m+1:], key)  
        return None if r is None else r+m+1
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- Funktioniert ..., aber `lst[:m]` und `lst[m+1:]` erzeugen jeweils **Kopien** der halben Liste (\rightarrow ineffizient!)
- Alternative: Suche jeweils zwischen Startpunkt und Endpunkt in `lst`
- Der rekursive Aufruf muss nur den Start- bzw. Endpunkt verschieben

```
def bsearch (lst : list[int], key : int) -> Optional[int]:  
    return bsearch2 (lst, key, 0, len (lst))
```

```
def bsearch2 (lst : list[int], key : int,  
              low : int, high : int) -> Optional[int]:  
    """ search for key in lst between low  
        (inclusive) and high (exclusive)  
        assumes low <= high """  
    ...
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Binäre Suche ohne Kopieren



```
def bsearch2 (lst : list[int], key : int, lo:int, hi:int) -> Optional[int]:
    n = hi - lo      # length of list segment
    if n == 0:
        return None # key not in empty segment
    m = lo + n//2    # position of root
    if lst[m] == key:
        return m
    elif lst[m] > key:
        return bsearch2 (lst, key, lo, m)
    else: # lst[m] < key
        return bsearch2 (lst, key, m+1, hi)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Beobachtungen

- Der Test $n == 0$ entspricht $hi - lo == 0$ und damit $lo == hi$
- $lo + (hi - lo) // 2 == (lo + hi) // 2$

Binäre Suche ohne Kopieren, vereinfacht



```
def bsearch2 (lst : list[int], key : int, lo:int, hi:int) -> Optional[int]:
    if lo == hi:
        return None # key not in empty segment
    m = (lo + hi)//2 # position of root
    if lst[m] == key:
        return m
    elif lst[m] > key:
        return bsearch2 (lst, key, lo, m)
    else: # lst[m] < key
        return bsearch2 (lst, key, m+1, hi)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Beobachtungen

- Jeder rekursive Aufruf von `bsearch2` erfolgt in einer `return` Anweisung.
- Solche Aufrufe heißen **endrekursiv**.

Definition

Eine Funktion heißt **endrekursiv**, falls alle rekursiven Aufrufe endrekursiv sind.

Jede endrekursive Funktion kann durch eine `while`-Schleife (**Iteration**) implementiert werden.

Elimination von Endrekursion durch Iteration

- Die **Abbruchbedingung** der Rekursion wird **negiert zur Bedingung** der `while`-Schleife.
- Der Rest des Funktionsrumpfs wird zum Rumpf der `while`-Schleife.
- Die **endrekursiven Aufrufe** werden zu **Zuweisungen an die Parameter**.

Warum? In Python sind `while`-Schleifen effizienter als rekursive Funktionen.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Beispiel: bsearch2 ist endrekursive Funktion

Abbruchbedingung der Rekursion

```
if lo == hi:  
    return None
```

wird negiert zur Bedingung der while-Schleife

```
while lo != hi:  
    ...  
else:  
    return None
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Beispiel: bsearch2 ist endrekursive Funktion

Endrekursive Aufrufe

```
return bsearch2 (lst, key, lo, m)
```

werden zu Zuweisungen an die Parameter

```
lst, key, lo, hi = lst, key, lo, m
```

bzw. hier reicht

```
hi = m
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
def bsearch2 (  
    lst : list[int], key : int, lo:int, hi:int) -> Optional[int]:  
    while lo != hi:  
        m = (lo + hi)//2  
        if lst[m] == key:  
            return m  
        elif lst[m] > key:  
            hi = m      # bsearch2 (lst, key, lo, m)  
        else: # lst[m] < key  
            lo = m+1    # bsearch2 (lst, key, m+1, hi)  
    else:  
        return None
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Erinnerung: Suche im binären Suchbaum

Ebenfalls endrekursiv



```
def search(tree : Optional[Node], item : Any) -> bool:
    if tree is None:
        return False
    elif tree.mark == item:
        return True
    elif tree.mark > item:
        return search(tree.left, item)
    else:
        return search(tree.right, item)
```

■ Gleiches Muster ... nicht überraschend

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Suche im binären Suchbaum

Iterativ, umgewandelt gemäß Schema



```
def search(tree : Optional[Node], item : Any) -> bool:
    while tree is not None:
        if tree.mark == item:
            return True
        elif tree.mark > item:
            tree = tree.left
        else:
            tree = tree.right
    else:
        return False
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

3 Potenzieren



■ Rekursive Definition

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Rekursive
Definition

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- Mathematische Definition: $x^0 = 1$ $x^{n+1} = x \cdot x^n$
- Die selben Gleichungen in Python-Syntax hingeschrieben

```
power (x, 0) == 1
```

```
power (x, n+1) == x * power (x, n)
```

- Wo ist da der Baum?
- Erinnerung: Induktive Definition der natürlichen Zahlen
 - Eine natürliche Zahl ist entweder 0 oder
 - der Nachfolger $1 + (n)$ einer natürlichen Zahl n .

■ Als Baum:

$$\begin{array}{c} 0 \qquad 1+ \\ \qquad \quad | \\ \qquad \quad n \end{array}$$

- Daraus ergibt sich das folgende Codegerüst.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Rekursive
Definition

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
def power (x : float, n : int) -> float:
    """ x ** n for n >= 0 """
    if n == 0:
        return 1
    else: # n = 1+n'
        return x * power (x, n-1)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Rekursive
Definition

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

■ Was passiert genau?

Aufrufsequenz

- `power(2,3)` wählt else-Zweig und ruft auf:
 - `power(2,2)` wählt else-Zweig und ruft auf:
 - `power(2,1)` wählt else-Zweig und ruft auf:
 - `power(2,0)` wählt if-Zweig und:
 - ← `power(2,0)` gibt 1 zurück
 - ← `power(2,1)` gibt $(2 \times 1) = 2$ zurück
 - ← `power(2,2)` gibt $(2 \times 2) = 4$ zurück
 - ← `power(2,3)` gibt $(2 \times 4) = 8$ zurück

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren
Rekursive
Definition

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Power ist **nicht** endrekursiv



```
def power (x : float, n : int) -> float:
  if n==0:
    return 1
  else:
    return x * power (x, n-1)
```

- Aber wir könnten das Ergebnis auch in einem **akkumulierenden Argument** berechnen.

```
def power_acc (x : float, n : int, acc : float = 1) -> float:
  if n==0:
    return acc
  else:
    return power_acc (x, n-1, acc * x)
```

- Aufruf mit `power_acc (x, n)`; die Funktion `power_acc` ist endrekursiv ...

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Rekursive
Definition

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

■ Schematische Transformation in Iteration

```
def power_it (x : float, n : int, acc : float = 1):  
    while n != 0:  
        n, acc = n-1, acc*x  
    else:  
        return acc
```

- Startwert `acc = 1` im Funktionskopf definiert.
- Jeder Aufruf `power_it (x, n)` verwendet `acc=1`.
- Ein Aufruf (z.B.) `power_it (x, n, 42)` startet mit `acc=42`.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Rekursive
Definition

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

4 Schneller Potenzieren



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

**Schneller
Potenzieren**

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
def power_it (x : float, n : int, acc : float=1):  
    while n != 0:  
        n, acc = n-1, acc*x  
    else:  
        return acc
```

Wieviele Multiplikationen braucht es zur Berechnung von

- `power (x, 0)?` 0
- `power (x, 1)?` 1
- `power (x, 2)?` 2
- `power (x, n)?` n

Mehr Multiplikationen als unbedingt notwendig!

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
power(x, 0)      == 1
power(x, 2*n)    == power(x*x, n)      # n>0
power(x, 2*n+1) == x * power(x*x, n)  # n>=0
```

- Alternative Aufteilung der natürlichen Zahlen.
- Jede natürliche Zahl ungleich 0 ist entweder gerade oder ungerade.
- In jedem Fall können wir die Berechnung von `power` entweder sofort abbrechen oder auf die `power` mit einem **echt kleineren** Exponenten `n` zurückführen.

Rekursion

Binäre

Suche

Potenzieren

Schneller

Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer

Systeme

Schnelle Exponentiation



```
def fast_power (x : float, n : int) -> float:
    if n == 0:
        return 1
    elif n % 2 == 0:
        return fast_power (x*x, n//2)
    else: # n % 2 == 1
        return x * fast_power (x*x, n//2)
```

- Multiplikationen für $n = 1$? 2
- Multiplikationen für $n = 2$? 3
- Multiplikationen für $n = 4$? 4
- Multiplikationen für $n = 2^k$? $k+2$
- Multiplikationen für $n < 2^k$: höchstens $2k \approx 2 \log_2 n$.
- Schneller als die `power` Funktion: logarithmisch viele Multiplikationen!
- Berechnung von $n//2$ und $n\%2$ ist billig. Warum?

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Schnelle Exponentiation, iterativ?



```
def fast_power (x : float, n : int) -> float:
    if n == 0:
        return 1
    elif n % 2 == 0:
        return fast_power (x*x, n//2)
    else: # n % 2 == 1
        return x * fast_power (x*x, n//2)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- Nicht endrekursiv!
- Aber es kann wieder ein akkumulierender Parameter eingeführt werden, **der die äußeren Multiplikationen mit dem x durchführt.**

Schnelle Exponentiation, endrekursiv!

```
def fast_power_acc (
    x : float, n : int, acc : float = 1) -> float:
    if n == 0:
        return acc
    elif n % 2 == 0:
        return fast_power_acc(x*x, n//2, acc)
    else: # n % 2 == 1
        return fast_power_acc(x*x, n//2, acc*x)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Schnelle Exponentiation, iterativ!

Schematische Transformation liefert

```
def fast_power_it (
    x : float, n : int, acc : float = 1) -> float:
    while n != 0:
        if n % 2 == 0:
            x, n, acc = (x*x, n//2, acc)
        else: # n % 2 == 1
            x, n, acc = (x*x, n//2, acc*x)
    else:
        return acc
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

5 Sortieren



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Sortieren

- Eingabe
 - Liste `lst : list[T]`
 - (Ordnung \leq auf den Listenelementen vom Typ `T`)
- Ausgabe
 - aufsteigend sortierte Liste (gemäß \leq)
 - jedes Element muss in der Ausgabe genauso oft vorkommen wie in der Eingabe

Sortieren durch Partitionieren

- Quicksort
- Erdacht von Sir C.A.R. Hoare um 1960
- Lange Zeit einer der schnellsten Sortieralgorithmen

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Vorgehensweise

- Falls `lst` leer ist, so ist die Ausgabe die leere Liste.
- Sonst wähle und entferne ein beliebiges Element `p` aus `lst`.
- Sei `lst_lo` die Liste der Elemente aus `lst`, die $\leq p$ sind.
- Sei `lst_hi` die Liste der Elemente aus `lst`, die nicht $\leq p$ sind.
- Sortiere `lst_lo` und `lst_hi` mit Ergebnissen `sort_lo` und `sort_hi`.
- Dann ist `sort_lo + [p] + sort_hi` eine sortierte Version von `lst`.

Rekursion

Binäre
Suche

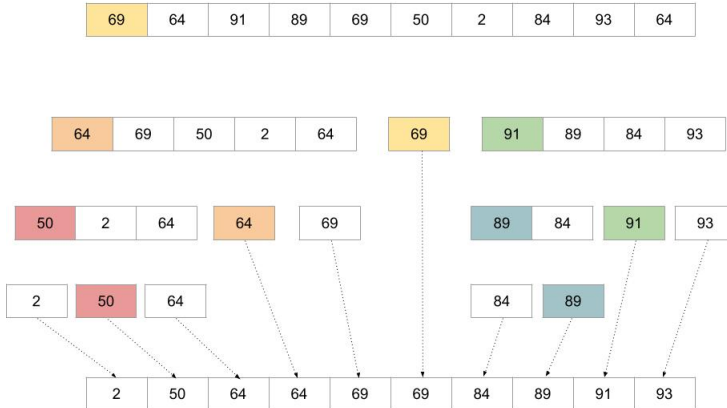
Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Quicksort Beispiel



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
def quicksort (lst : list[int]) -> list[int]:  
    if len (lst) <= 1:  
        return lst  
    else:  
        p, lst_lo, lst_hi = partition (lst)  
        return (quicksort (lst_lo) + [p] + quicksort (lst_hi))
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Wunschdenken

Annahme: `partition (lst)` liefert für `len (lst) >= 1` ein 3-Tupel `(p, lst_lo, lst_hi)`, sodass

- `p` ist ein Element von `lst`
- `lst_lo` enthält die Elemente `z` von `lst` mit `z <= p`
- `lst_hi` enthält die Elemente `z` von `lst` mit `z > p`

```
def partition (lst : list[int]) -> tuple[int, list[int], list[int]]:
    """ assume len (lst) >= 1 """
    p = lst[0]
    lst_lo = []
    lst_hi = []
    for x in lst[1:]:
        if x <= p:
            lst_lo += [x]
        else:
            lst_hi += [x]
    return p, lst_lo, lst_hi
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- Codegerüst für Listenverarbeitung
- Zwei Akkumulatoren `lst_lo` und `lst_hi`

- Der rekursive Algorithmus ist die einfachste Beschreibung von Quicksort.
- Eine iterative Implementierung ist möglich.
- Diese ist aber deutlich schwieriger zu verstehen.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

6 Lindenmayer Systeme



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Wikipedia

Bei den Lindenmayer- oder L-Systemen handelt es sich um einen mathematischen Formalismus, der 1968 von dem ungarischen theoretischen Biologen Aristid Lindenmayer als Grundlage einer axiomatischen Theorie biologischer Entwicklung vorgeschlagen wurde. In jüngerer Zeit fanden L-Systeme **Anwendung in der Computergrafik bei der Erzeugung von Fraktalen** und in der realitätsnahen Modellierung von Pflanzen.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Definition

Ein **0L-System** ist ein Tupel $G = (V, \omega, P)$. Dabei ist

- V eine Menge von Symbolen (Alphabet),
- $\omega \in V^*$ ein String von Symbolen und
- $P \subseteq V \times V^*$ eine Menge von **Produktionen**, sodass zu jedem $A \in V$ mindestens eine Produktion $(A, w) \in P$ existiert.

Beispiel (Lindenmayer): 0L-System für Algenwachstum

- $V = \{A, B\}$
- $\omega = A$
- $P = \{A \rightarrow BA, B \rightarrow A\}$

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Wie rechnet ein 0L-System?

Definition (Berechnungsrelation eines 0L-Systems)

Sei $G = (V, \omega, P)$ ein 0L-System.

Sei $A_1 A_2 \dots A_n$ ein String über Symbolen aus V (also $A_i \in V$).

Ein **Rechenschritt von G** ersetzt **jedes** Symbol durch eine zugehörige rechte Produktionsseite:

$$A_1 A_2 \dots A_n \Rightarrow w_1 w_2 \dots w_n$$

wobei $(A_i, w_i) \in P$, für $1 \leq i \leq n$.

Die **Sprache von G** besteht aus allen Strings, die aus ω durch endlich viele \Rightarrow -Schritte erzeugt werden können.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Beispiel: Algenwachstum

$$V = \{A, B\}, \quad \omega = A, \quad P = \{A \rightarrow BA, B \rightarrow A\}$$

- 1 A
- 2 BA
- 3 ABA
- 4 $BAABA$
- 5 $ABABAABA$
- 6 $BAABAABABAABA$
- 7 $ABABAABABAABAABABAABA$
- 8 usw

Rekursion

Binäre
Suche

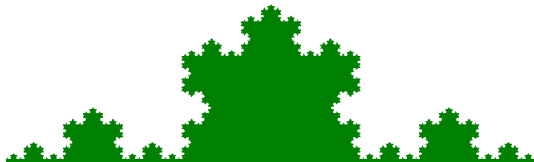
Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- Die **Kochkurve** ist ein **Fraktal**.
- D.h. eine selbstähnliche Kurve mit rekursiver Beschreibung und weiteren spannenden Eigenschaften.



<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kochkurve.png>

- Sie kann durch ein 0L-System beschrieben werden.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

0L-System für die Kochkurve

- $V = \{F, +, -\}$
- $\omega = F$
- $P = \{F \mapsto F + F - F + F\}$ sowie $+ \mapsto +$ und $- \mapsto -$

Interpretation der Symbole als Zeichenoperationen

- F Strecke vorwärts zeichnen
- $+$ um 60° nach links abbiegen
- $-$ um 120° nach rechts abbiegen

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Idee der “Schildkrötengrafik”

Eine Schildkröte sitzt auf einer Zeichenfläche. Sie kann eine bestimmte Strecke geradeaus gehen oder abbiegen. Sie kann den Hintern heben und absenken. Wenn ihr Hintern dabei über den Boden schleift, hinterläßt sie einen geraden Strich.

Befehle an die Schildkröte

```
from turtle import *  
pencolor('black') #use the force  
pendown()         #let it all hang out  
forward(100)  
left(120)  
forward(100)  
left(120)  
forward(100)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

Schildkröten-Interpretation

Die Operationen

- F forward (size)
- $+$ left (60)
- $-$ right (120)

Die Produktion $F \mapsto F + F - F + F$

```
def koch(size:float, n:int):  
    #...  
    koch(size/3, n-1) #F  
    left(60)          #+  
    koch(size/3, n-1) #F  
    right(120)        #-  
    koch(size/3, n-1) #F  
    left(60)          #+  
    koch(size/3, n-1) #F
```

```
def koch (size:float, n:int):  
    if n == 0:  
        forward(size)  
    else:  
        koch (size/3, n-1)  
        left(60)  
        koch (size/3, n-1)  
        right(120)  
        koch (size/3, n-1)  
        left(60)  
        koch (size/3, n-1)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

0L-System für fraktale Binärbäume

- $V = \{0, 1, [,]\}$
- $\omega = 0$
- $P = \{1 \mapsto 11, 0 \mapsto 1[0]0\}$

Interpretation

- 0 Strecke vorwärts zeichnen mit Blatt am Ende
- 1 Strecke vorwärts zeichnen
- [Position und Richtung merken und um 45° nach links abbiegen
-] Position und Richtung von zugehöriger öffnender Klammer wiederherstellen und um 45° nach rechts abbiegen

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

```
def btree_1 (size:float, n:int):  
    if n == 0:  
        forward (size)  
    else:  
        n = n - 1  
        btree_1 (size/3, n)  
        btree_1 (size/3, n)
```

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- $n=0$: letzte Generation erreicht
- Faktor $1/3$ willkürlich gewählt

Turtle-Graphics Implementierung Teil 0

```
def btree_0 (size:float, n:int):  
    if n == 0:  
        forward(size)           # line segment  
        dot (2, 'green')        # draw leaf  
    else:  
        n = n - 1  
        btree_1 (size/3, n)      # "1"  
        pos = position()         # "["  
        ang = heading()  
        left(45)  
        btree_0 (size/3, n)      # "0"  
        penup()                  # "]"  
        setposition (pos)  
        setheading (ang)  
        pendown()  
        right (45)  
        btree_0 (size/3, n)      # "0"
```

Rekursion

Binäre

Suche

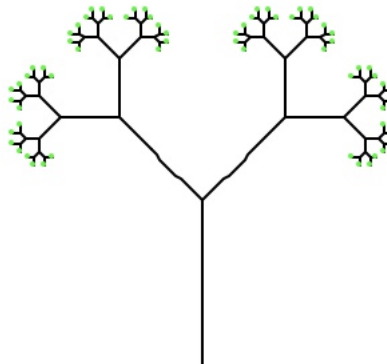
Potenzieren

Schneller

Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme



Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme

- **Induktion** ist eine Definitionstechnik aus der Mathematik.
- Funktionen auf induktiv definierten Daten (d.h. baumartigen Strukturen) sind meist rekursiv.
- Sie terminieren, weil die rekursiven Aufrufe stets auf Teilstrukturen erfolgen.
- In Python ist Rekursion oft nicht die effizienteste Implementierung einer Funktion!
- **Endrekursion** kann schematisch in effiziente **Iteration** umgewandelt werden.
- Jede rekursive Funktion lässt sich schematisch in eine äquivalente endrekursive Funktion umzuwandeln.

Rekursion

Binäre
Suche

Potenzieren

Schneller
Potenzieren

Sortieren

Lindenmayer
Systeme