# 12. Wörterbücher

Wörterbuch, Selbstandornung, Implementation Wörterbuch mit Array / Liste / Skipliste. [Ottman/Widmayer, Kap. 3.3,1.7, Cormen et al, Kap. Problem 17-5]

# Wörterbuch (Dictionary)

ADT zur Verwaltung von Schlüsseln aus $\mathcal{K}$ mit Operationen

- `insert`$(k, D)$: Hinzufügen von $k \in \mathcal{K}$ in Wörterbuch $D$. Bereits vorhanden $\Rightarrow$ Fehlermeldung.
- `delete`$(k, D)$: Löschen von $k$ aus dem Wörterbuch $D$. Nicht vorhanden $\Rightarrow$ Fehlermeldung.
- `search`$(k, D)$: Liefert `true` wenn $k \in D$, sonst `false`.

# Idee

Implementiere Wörterbuch als sortiertes Array.

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

Suchen
Einfügen
Löschen

# Idee

Implementiere Wörterbuch als sortiertes Array.

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

| | |
|---|---|
| Suchen | $\mathcal{O}(\log n)$ ☺ |
| Einfügen | |
| Löschen | |

# Idee

Implementiere Wörterbuch als sortiertes Array.

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

| | |
|---|---|
| Suchen | $\mathcal{O}(\log n)$ ☺ |
| Einfügen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |
| Löschen | |

# Idee

Implementiere Wörterbuch als sortiertes Array.

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

| | |
|---|---|
| Suchen | $\mathcal{O}(\log n)$ ☺ |
| Einfügen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |
| Löschen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |

# Andere Idee

Implementiere Wörterbuch als verkettete Liste

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

Suchen
Einfügen
Löschen

[13] Unter der Voraussetzung, dass wir die Existenz nicht prüfen wollen.

# Andere Idee

Implementiere Wörterbuch als verkettete Liste

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

| | |
|---|---|
| Suchen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |
| Einfügen | |
| Löschen | |

[13] Unter der Voraussetzung, dass wir die Existenz nicht prüfen wollen.

# Andere Idee

Implementiere Wörterbuch als verkettete Liste

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

| | |
|---|---|
| Suchen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |
| Einfügen | $\mathcal{O}(1)$[13] ☺ |
| Löschen | |

[13] Unter der Voraussetzung, dass wir die Existenz nicht prüfen wollen.

# Andere Idee

Implementiere Wörterbuch als verkettete Liste

Anzahl Elementaroperationen im schlechtesten Fall

| | |
|---|---|
| Suchen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |
| Einfügen | $\mathcal{O}(1)$[13] ☺ |
| Löschen | $\mathcal{O}(n)$ ☹ |

[13] Unter der Voraussetzung, dass wir die Existenz nicht prüfen wollen.

# Selbstanordnung

Problematisch bei der Verwendung verketteter Listen: lineare Suchzeit

*Idee:* Versuche, die Listenelemente so anzuordnen, dass Zugriffe über die Zeit hinweg schneller möglich sind

Zum Beispiel

- Transpose: Bei jedem Zugriff auf einen Schlüssel wird dieser um eine Position nach vorne bewegt.
- Move-to-Front (MTF): Bei jedem Zugriff auf einen Schlüssel wird dieser ganz nach vorne bewegt.

# Transpose

Transpose:


Worst case: $n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$.

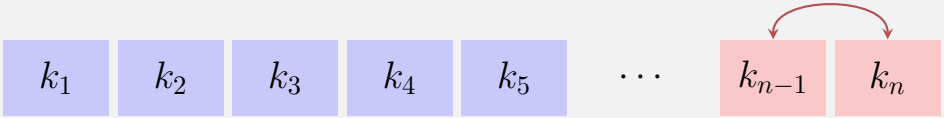
# Transpose

Transpose:


Worst case: $n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$.

# Transpose

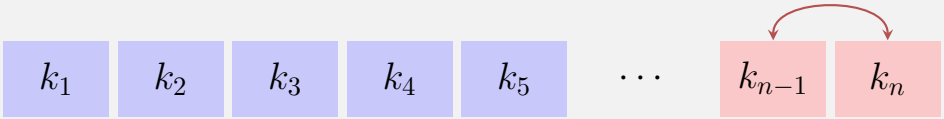
Transpose:




Worst case: $n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$.

# Transpose

Transpose:




Worst case: $n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$. Laufzeit: $\Theta(n^2)$

# Move-to-Front

Move-to-Front:


$n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$.

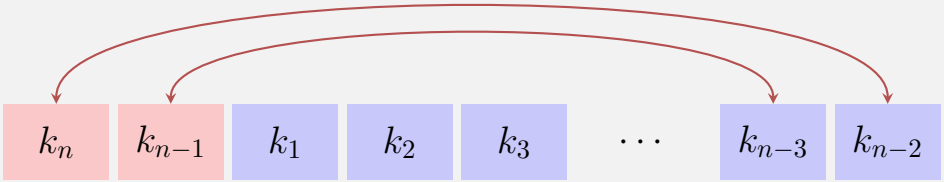
# Move-to-Front

Move-to-Front:


$n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$.

# Move-to-Front

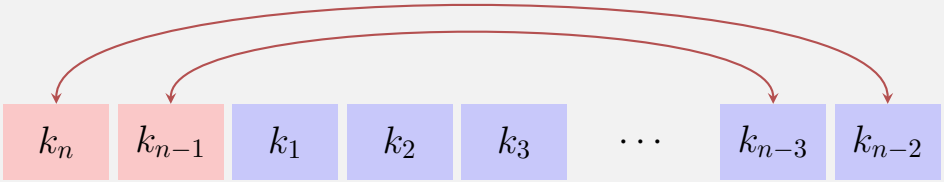
Move-to-Front:




$n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$.

# Move-to-Front

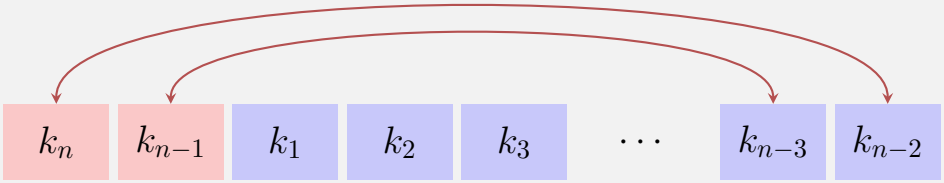
Move-to-Front:




$n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$. Laufzeit: $\Theta(n)$

# Move-to-Front

Move-to-Front:




$n$ Wechselnde Zugriffe auf $k_{n-1}$ und $k_n$. Laufzeit: $\Theta(n)$

Man kann auch hier Folge mit quadratischer Laufzeit angeben, z.B. immer das letzte Element. Aber dafür ist keine offensichtliche Strategie bekannt, die viel besser sein könnte als MTF.

# Analyse

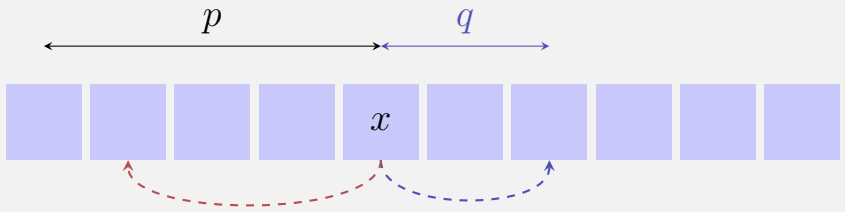
Vergleichen MTF mit dem bestmöglichen Konkurrenten (Algorithmus) A. Wie viel besser kann A sein?

Annahme: MTF und A dürfen jeweils nur das zugegriffene Element $x$ verschieben. MTF und A starten mit derselben Liste. $M_k$ und $A_k$ bezeichnen die Liste nach dem $k$-ten Schritt. $M_0 = A_0$.

# Analyse

Kosten:

- Zugriff auf $x$: Position $p$ von $x$ in der Liste.
- Keine weiteren Kosten, wenn $x$ vor $p$ verschoben wird.
- Weitere Kosten $q$ für jedes Element, das $x$ von $p$ aus nach hinten verschoben wird.



# Amortisierte Analyse

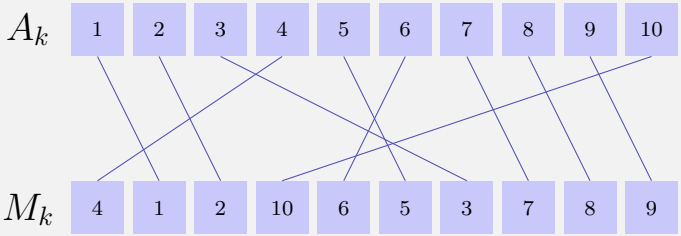
Sei eine beliebige Folge von Suchanfragen gegeben und seien $G_k^{(M)}$ und $G_k^{(A)}$ jeweils die Kosten im Schritt $k$ für Move-to-Front und A. Suchen Abschätzung für $\sum_k G_k^{(M)}$ im Vergleich zu $\sum_k G_k^{(A)}$.

$\Rightarrow$ Amortisierte Analyse mit Potentialfunktion $\Phi$.

# Potentialfunktion

Potentialfunktion $\Phi =$ Anzahl der Inversionen von A gegen MTF.

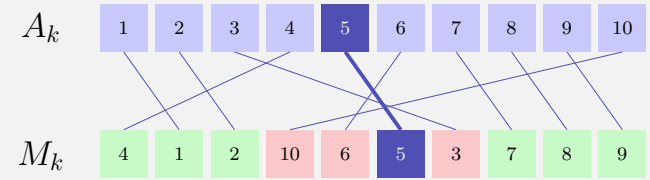
Inversion = Paar $x$, $y$ so dass für die Positionen von $x$ und $y$
$p^{(A)}(x) < p^{(A)}(y) \wedge p^{(M)}(x) > p^{(M)}(x)$ oder
$p^{(A)}(x) > p^{(A)}(y) \wedge p^{(M)}(x) < p^{(M)}(x)$




#Inversionen = #Kreuzungen

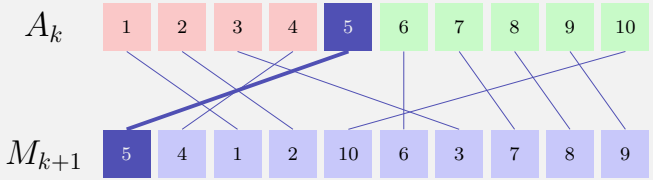
# Abschätzung der Potentialfunktion: MTF

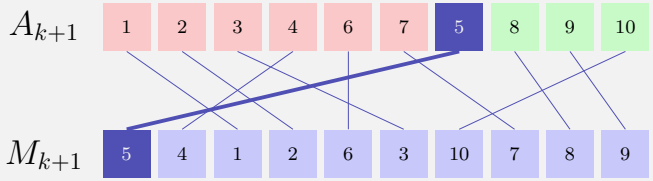
- Element $i$ an Position $p_i := p^{(M)}(i)$.
- Zugriffskosten $C_k^{(M)} = p_i$.
- $x_i$: Anzahl Elemente, die in M vor $p_i$ und in A nach $i$ stehen.
- MTF löst $x_i$ Inversionen auf.
- $p_i - x_i - 1$: Anzahl Elemente, die in M vor $p_i$ und in A vor $i$ stehen.
- MTF erzeugt $p_i - 1 - x_i$ Inversionen.



# Abschätzung der Potentialfunktion: A

- (oBdA) Element $i$ an Position $i$.
- $X_k^{(A)}$: Anzahl Verschiebungen nach hinten (sonst 0).
- Zugriffskosten für $i$: $C_k^{(A)} = i$
- A erhöht die Anzahl Inversionen um $X_k^{(A)}$.



# Abschätzung

$$\Phi_{k+1} - \Phi_k =\leq -x_i + (p_i - 1 - x_i) + X_k^{(A)}$$

Amortisierte Kosten von MTF im $k$-ten Schritt:

$$\begin{aligned} a_k^{(M)} &= C_k^{(M)} + \Phi_{k+1} - \Phi_k \\ &\leq p_i - x_i + (p_i - 1 - x_i) + X_k^{(A)} \\ &= (p_i - x_i) + (p_i - x_i) - 1 + X_k^{(A)} \\ &\leq C_k^{(A)} + C_k^{(A)} - 1 + X_k^{(A)}. \end{aligned}$$

# Abschätzung

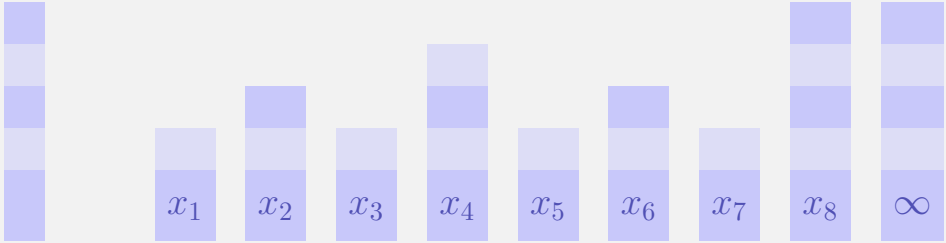
Kosten Summiert

$$\begin{aligned}\sum_k G_k^{(M)} = \sum_k C_k^{(M)} &\leq \sum_k a_k^{(M)} \leq \sum_k 2 \cdot C_k^{(A)} - 1 + X_k^{(A)} \\ &\leq \sum_k 2 \cdot C_k^{(A)} + X_k^{(A)} \leq 2 \cdot \sum_k C_k^{(A)} + X_k^{(A)} \\ &= 2 \cdot \sum_k G_k^{(A)}\end{aligned}$$

MTF führt im schlechtesten Fall höchstens doppelt so viele Operationen aus wie eine optimale Strategie.

# *Coole* Idee: Skiplisten

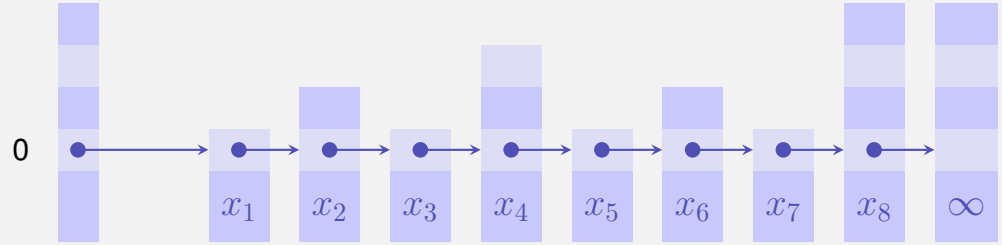
Skipliste




$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9.$

# *Coole* Idee: Skiplisten

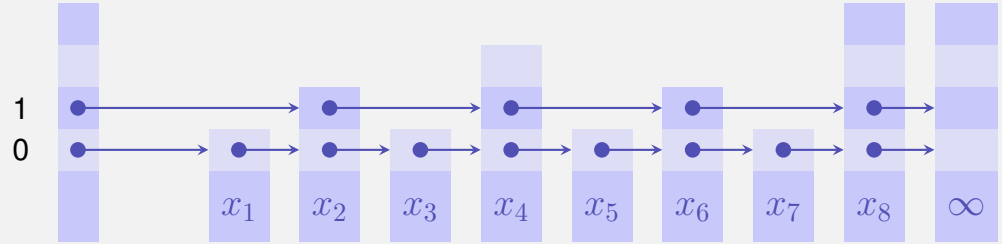
Skipliste




$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9.$

# *Coole* Idee: Skiplisten

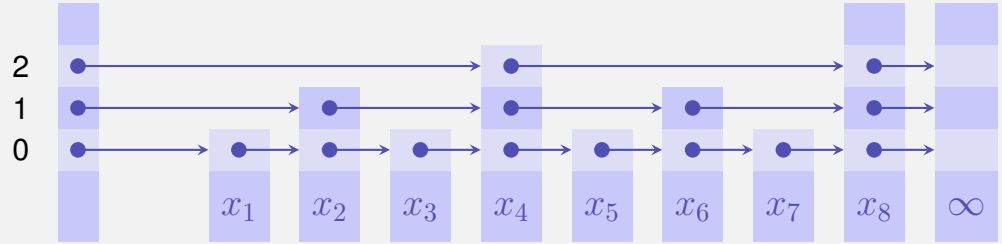
Skipliste




$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9.$

# *Coole* Idee: Skiplisten

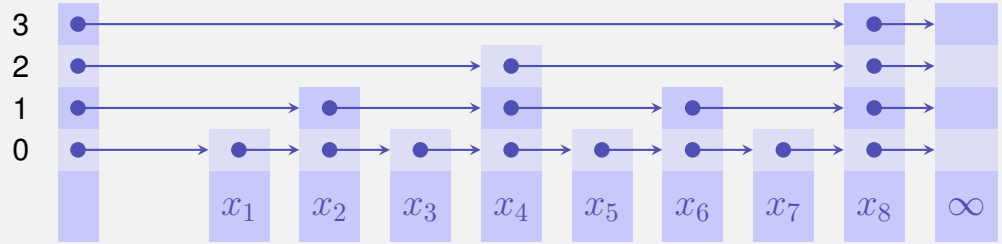
Skipliste




$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9.$

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

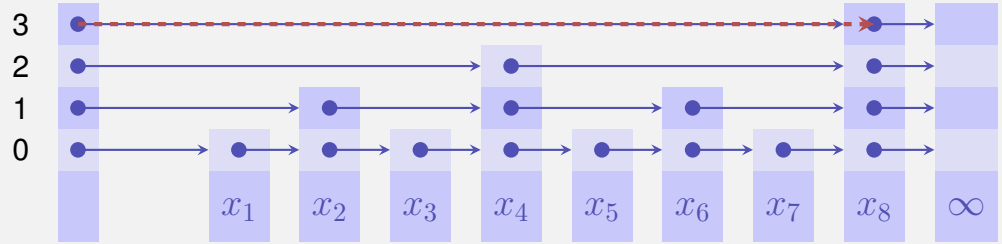



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

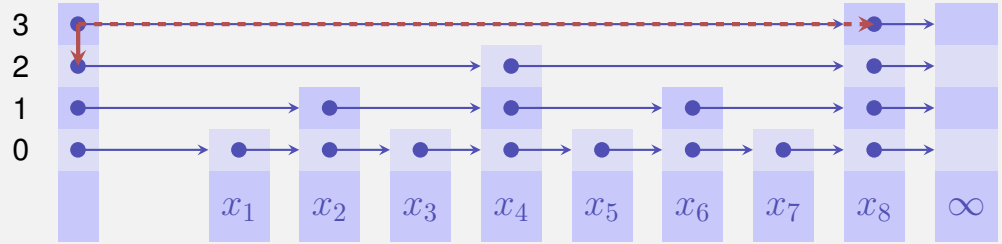



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

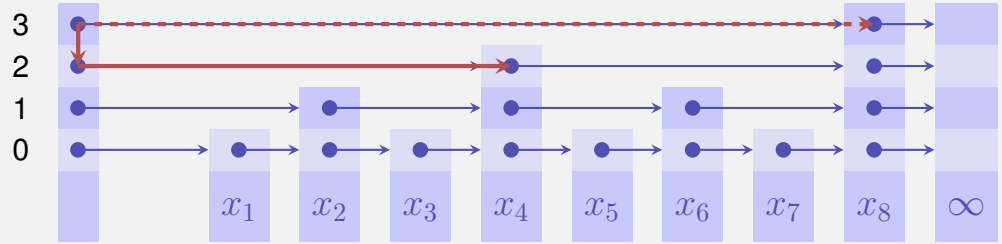



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

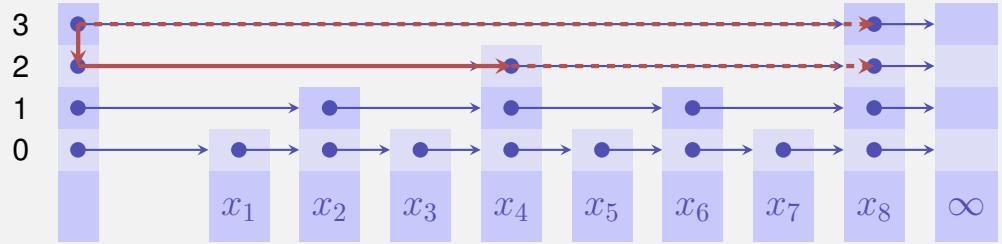



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

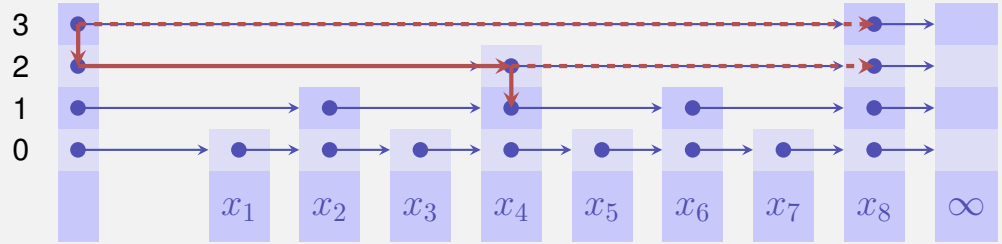



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

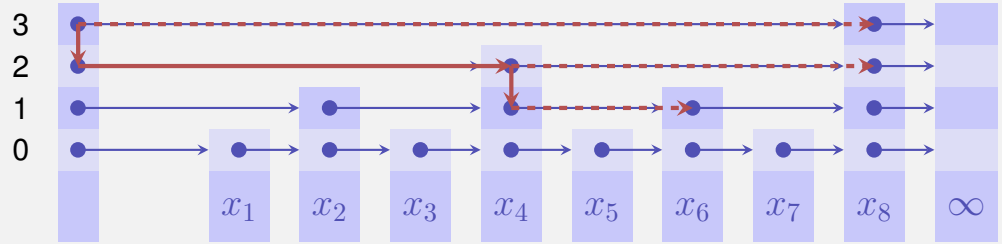



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

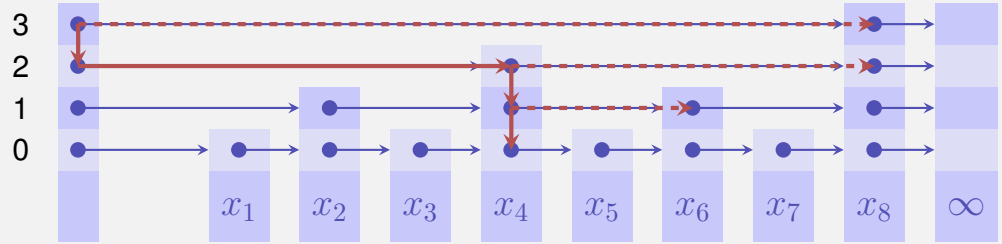



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

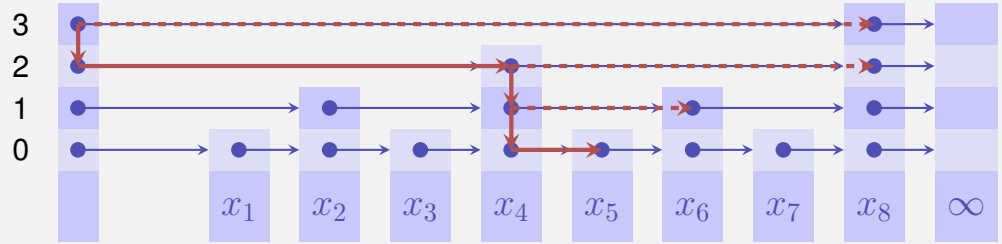



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste

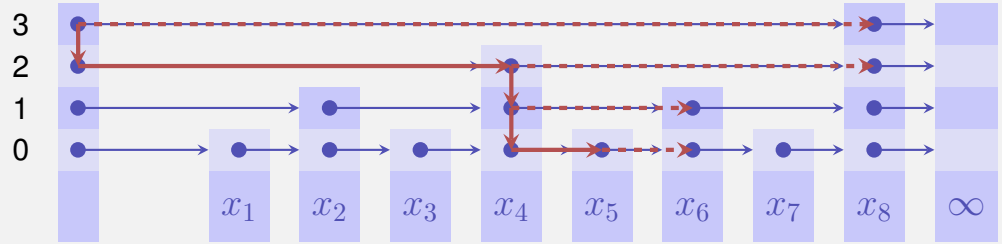



$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# *Coole* Idee: Skiplisten

Perfekte Skipliste




$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \cdots \leq x_9$.

Beispiel: Suche nach einem Schlüssel $x$ mit $x_5 < x < x_6$.

# Analyse Perfekte Skipliste (schlechtester Fall)

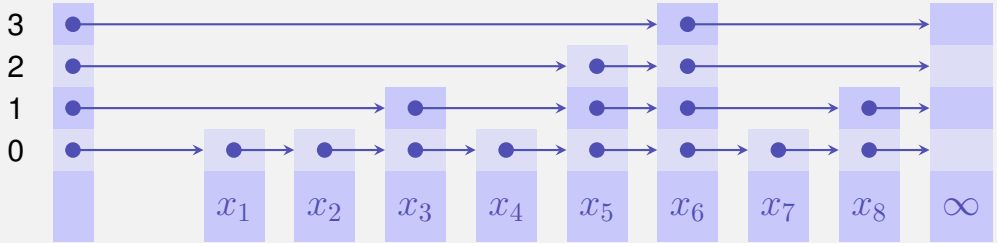
Suchen in $\mathcal{O}(\log n)$. Einfügen in $\mathcal{O}(n)$.

# Randomisierte Skipliste

Idee: Füge jeweils einen Knoten mit zufälliger Höhe $H$ ein, wobei $\mathbb{P}(H = i) = \frac{1}{2^{i+1}}$.

# Randomisierte Skipliste

Idee: Füge jeweils einen Knoten mit zufälliger Höhe $H$ ein, wobei $\mathbb{P}(H = i) = \frac{1}{2^{i+1}}$.



# Analyse Randomisierte Skipliste

**Theorem**

*Die Anzahl an erwarteten Elementaroperationen für Suchen, Einfügen und Löschen eines Elements in einer randomisierten Skipliste ist $\mathcal{O}(\log n)$.*

Der längliche Beweis, welcher im Rahmen dieser Vorlesung nicht geführt wird, betrachtet die Länge eines Weges von einem gesuchten Knoten zurück zum Startpunkt im höchsten Level.

# 13. C++ vertieft (III): Funktoren und Lambda

# 13.1 Nachträge zum vorigen C++ Kapitel

# Nachtrag zur Move-Semantik

```
// nonsense implementation of a "vector" for demonstration purposes
class vec{
public:
  vec () {
        std::cout << "default constructor\n";}
  vec (const vec&) {
        std::cout << "copy constructor\n";}
  vec& operator = (const vec&) {
        std::cout << "copy assignment\n"; return *this;}
  ~vec() {}
};
```

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (const vec& a, const vec& b){
    vec tmp = a;
    // add b to tmp
    return tmp;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (const vec& a, const vec& b){
    vec tmp = a;
    // add b to tmp
    return tmp;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

Ausgabe

default constructor
copy constructor
copy constructor
copy constructor
copy assignment

4 Kopien des Vektors

# Nachtrag zur Move-Semantik

```
// nonsense implementation of a "vector" for demonstration purposes
class vec{
public:
  vec () { std::cout << "default constructor\n";}
  vec (const vec&) { std::cout << "copy constructor\n";}
  vec& operator = (const vec&) {
       std::cout << "copy assignment\n"; return *this;}
  ~vec() {}
  // new: move constructor and assignment
  vec (vec&&) {
       std::cout << "move constructor\n";}
  vec& operator = (vec&&) {
       std::cout << "move assignment\n"; return *this;}
};
```

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (const vec& a, const vec& b){
    vec tmp = a;
    // add b to tmp
    return tmp;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (const vec& a, const vec& b){
    vec tmp = a;
    // add b to tmp
    return tmp;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

Ausgabe
default constructor
copy constructor
copy constructor
copy constructor
move assignment

3 Kopien des Vektors

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (vec a, const vec& b){
    // add b to a
    return a;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (vec a, const vec& b){
    // add b to a
    return a;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

Ausgabe
default constructor
copy constructor
move constructor
move constructor
move constructor
move assignment

1 Kopie des Vektors

# Wie viele Kopien?

```
vec operator + (vec a, const vec& b){
    // add b to a
    return a;
}

int main (){
    vec f;
    f = f + f + f + f;
}
```

**Ausgabe**
default constructor
copy constructor
move constructor
move constructor
move constructor
move assignment

1 Kopie des Vektors

Erklärung: Move-Semantik kommt zum Einsatz, wenn ein x-wert (expired) zugewiesen wird. R-Wert-Rückgaben von Funktionen sind x-Werte.

`http://en.cppreference.com/w/cpp/language/value_category`

# Wie viele Kopien

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = a;
    a=b;
    b=tmp;
}

int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

# Wie viele Kopien

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = a;
    a=b;
    b=tmp;
}

int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

Ausgabe
default constructor
default constructor
copy constructor
copy assignment
copy assignment

3 Kopien des Vektors

# X-Werte erzwingen

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = std::move(a);
    a=std::move(b);
    b=std::move(tmp);
}
int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

# X-Werte erzwingen

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = std::move(a);
    a=std::move(b);
    b=std::move(tmp);
}
int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

Ausgabe
default constructor
default constructor
move constructor
move assignment
move assignment

0 Kopien des Vektors

# X-Werte erzwingen

```
void swap(vec& a, vec& b){
    vec tmp = std::move(a);
    a=std::move(b);
    b=std::move(tmp);
}
int main (){
    vec f;
    vec g;
    swap(f,g);
}
```

Ausgabe
default constructor
default constructor
move constructor
move assignment
move assignment

0 Kopien des Vektors

Erklärung: Mit std::move kann man einen L-Wert Ausdruck zu einem X-Wert (genauer: zu einer R-Wert Referenz) machen. Dann kommt wieder Move-Semantik zum Einsatz. http://en.cppreference.com/w/cpp/utility/move

# 13.2 Funktoren und Lambda-Expressions

# Funktoren: Motivierung

Ein simpler Ausgabefilter

```
template <typename T, typename function>
void filter(const T& collection, function f){
    for (const auto& x: collection)
        if (f(x)) std::cout << x << " ";
    std::cout << "\n";
}
```

# Funktoren: Motivierung

```
template <typename T, typename function>
void filter(const T& collection, function f);

template <typename T>
bool even(T x){
    return x % 2 == 0;
}

std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
filter(a,even<int>); // output: 2,4,6,16
```

# Funktor: Objekt mit überladenem Operator ()

```
class LargerThan{
  int value; // state
  public:
  LargerThan(int x):value{x}{};

  bool operator() (int par){
    return par > value;
  }
};
```

Funktor ist ein aufrufbares Objekt. Kann verstanden werden als Funktion mit Zustand.

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int value=8;
filter(a,LargerThan(value)); // 9,11,16,19
```

# Funktor: Objekt mit überladenem Operator ()

```
template <typename T>
class LargerThan{
    T value;
public:
    LargerThan(T x):value{x}{};

    bool operator() (T par){
        return par > value;
    }
};
```

(geht natürlich auch mit Template)

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int value=8;
filter(a,LargerThan<int>(value)); // 9,11,16,19
```

# Dasselbe mit Lambda-Expression

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int value=8;

filter(a, [value](int x) {return x>value;} );
```

# Summe aller Elemente - klassisch

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int sum = 0;
for (auto x: a)
  sum += x;
std::cout << sum << "\n"; // 83
```

# Summe aller Elemente - mit Funktor

```
template <typename T>
struct Sum{
    T & value = 0;
    Sum (T& v): value{v} {}

    void operator() (T par){
        value += par;
    }
};

std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int s=0;
Sum<int> sum(s);
sum = std::for_each(a.begin(), a.end(), sum);
std::cout << s << "\n"; // 83
```

# Summe aller Elemente - mit $\Lambda$

```
std::vector<int> a {1,2,3,4,5,6,7,9,11,16,19};
int s=0;

std::for_each(a.begin(), a.end(), [&s] (int x) {s += x;} );

std::cout << s << "\n";
```

# Sortieren, mal anders

```
// pre: i >= 0
// post: returns sum of digits of i
int q(int i){
    int res =0;
    for(;i>0;i/=10)
        res += i % 10;
    return res;
}

std::vector<int> v {10,12,9,7,28,22,14};
std::sort (v.begin(), v.end(),
  [] (int i, int j) { return q(i) < q(j);}
);
```

# Sortieren, mal anders

```
// pre: i >= 0
// post: returns sum of digits of i
int q(int i){
    int res =0;
    for(;i>0;i/=10)
        res += i % 10;
    return res;
}

std::vector<int> v {10,12,9,7,28,22,14};
std::sort (v.begin(), v.end(),
  [] (int i, int j) { return q(i) < q(j);}
);
```

Jetzt $v =$

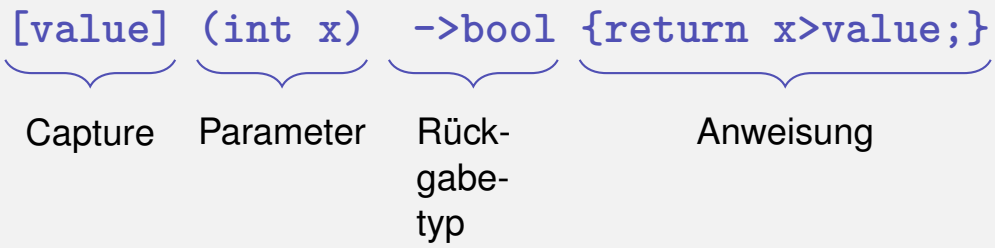
# Sortieren, mal anders

```
// pre: i >= 0
// post: returns sum of digits of i
int q(int i){
    int res =0;
    for(;i>0;i/=10)
        res += i % 10;
    return res;
}

std::vector<int> v {10,12,9,7,28,22,14};
std::sort (v.begin(), v.end(),
  [] (int i, int j) { return q(i) < q(j);}
);
```

Jetzt $v = 10, 12, 22, 14, 7, 9, 28$ (sortiert nach Quersumme)

# Lambda-Expressions im Detail



# Closure

```
[value] (int x) ->bool {return x>value;}
```

- Lambda-Expressions evaluieren zu einem temporären Objekt – einer closure
- Die closure erhält den Ausführungskontext der Funktion, also die captured Objekte.
- Lambda-Expressions können als Funktoren implementiert sein.

# Simple Lambda-Expression

```
[]()->void {std::cout << "Hello World";}
```

# Simple Lambda-Expression

```
[]()->void {std::cout << "Hello World";}
```

Aufruf:

```
[]()->void {std::cout << "Hello World";}();
```

# Minimale Lambda-Expression

```
[]{}
```

- Rückgabetyp kann inferiert werden, wenn kein oder nur ein return:

```
[]() {std::cout << "Hello World";}
```

- Wenn keine Parameter und keine Rückgabe, kann () weggelassen werden

```
[]{std::cout << "Hello World";}
```

- `[...]` kann nie weggelassen werden.

# Beispiele

```
[](int x, int y) {std::cout << x * y;} (4,5);
```

Output:

# Beispiele

```
[](int x, int y) {std::cout << x * y;} (4,5);
```

Output: 20

# Beispiele

```
int k = 8;
[](int& v) {v += v;} (k);
std::cout << k;
```

Output:

# Beispiele

```
int k = 8;
[](int& v) {v += v;} (k);
std::cout << k;
```

Output: 16

# Beispiele

```
int k = 8;
[](int v) {v += v;} (k);
std::cout << k;
```

Output:

# Beispiele

```
int k = 8;
[](int v) {v += v;} (k);
std::cout << k;
```

Output: 8

# Capture – Lambdas

Für Lambda-Expressions bestimmt die capture-Liste über den zugreifbaren Teil des Kontextes

Syntax:

- `[x]`: Zugriff auf kopierten Wert von x (nur lesend)
- `[&x]`: Zugriff zur Referenz von x
- `[&x,y]`: Zugriff zur Referenz von x und zum kopierten Wert von y
- `[&]`: Default-Referenz-Zugriff auf alle Objekte im Scope der Lambda-Expression
- `[=]`: Default-Werte-Zugriff auf alle Objekte im Kontext der Lambda-Expression

# Capture – Lambdas

```
int elements=0;
int sum=0;
std::for_each(v.begin(), v.end(),
  [&] (int k) {sum += k; elements++;} // capture all by reference
)
```

# Capture – Lambdas

```
template <typename T>
void sequence(vector<int> & v, T done){
  int i=0;
  while (!done()) v.push_back(i++);
}

vector<int> s;
sequence(s, [&] {return s.size() >= 5;} )
```

jetzt v =

# Capture – Lambdas

```
template <typename T>
void sequence(vector<int> & v, T done){
  int i=0;
  while (!done()) v.push_back(i++);
}

vector<int> s;
sequence(s, [&] {return s.size() >= 5;} )
```

jetzt v = 0 1 2 3 4

# Capture – Lambdas

```
template <typename T>
void sequence(vector<int> & v, T done){
  int i=0;
  while (!done()) v.push_back(i++);
}

vector<int> s;
sequence(s, [&] {return s.size() >= 5;} )
```

jetzt v = 0 1 2 3 4

Die capture liste bezieht sich auf den Kontext der Lambda Expression

# Capture – Lambdas

Wann wird der Wert gelesen?

```
int v = 42;
auto func = [=] {std::cout << v << "\n"};
v = 7;
func();
```

Ausgabe:

# Capture – Lambdas

Wann wird der Wert gelesen?

```
int v = 42;
auto func = [=] {std::cout << v << "\n"};
v = 7;
func();
```

Ausgabe: 42

Werte werden bei der Definition der (temporären) Lambda-Expression zugewiesen.

# Capture – Lambdas

(Warum) funktioniert das?

```
class Limited{
  int limit = 10;
 public:
  // count entries smaller than limit
  int count(const std::vector<int>& a){
    int c = 0;
    std::for_each(a.begin(), a.end(),
        [=,&c] (int x) {if (x < limit) c++;}
    );
    return c;
  }
};
```

# Capture – Lambdas

(Warum) funktioniert das?

```
class Limited{
  int limit = 10;
 public:
  // count entries smaller than limit
  int count(const std::vector<int>& a){
    int c = 0;
    std::for_each(a.begin(), a.end(),
        [=,&c] (int x) {if (x < limit) c++;}
    );
    return c;
  }
};
```

Der `this` pointer wird per default implizit kopiert

# Capture – Lambdas

```
struct mutant{
  int i = 0;
  void do(){ [=] {i=42;}();}
};

mutant m;
m.do();
std::cout << m.i;
```

Ausgabe:

# Capture – Lambdas

```
struct mutant{
  int i = 0;
  void do(){ [=] {i=42;}();}
};

mutant m;
m.do();
std::cout << m.i;
```

Ausgabe: 42

Der `this` *pointer* wird per default implizit kopiert

# Lambda Ausdrücke sind Funktoren

```
[x, &y] () {y = x;}
```

kann implementiert werden als

```
unnamed {x,y};
```

mit

```
class unnamed {
  int x; int& y;
  unnamed (int x_, int& y_) : x (x_), y (y_) {}
  void operator () () {y = x;}};
};
```

# Lambda Ausdrücke sind Funktoren

```
[=] () {return x + y;}
```

kann implementiert werden als

```
unnamed {x,y};
```

mit

```
class unnamed {
  int x; int y;
  unnamed (int x_, int y_) : x (x_), y (y_) {}
  int operator () () {return x + y;}
};
```

# Polymorphic Function Wrapper `std::function`

```
#include <functional>

int k= 8;
std::function<int(int)> f;
f = [k](int i){ return i+k; };
std::cout << f(8); // 16
```

Kann verwendet werden, um Lambda-Expressions zu speichern.

Andere Beispiele

`std::function<int(int,int)>`;

`std::function<void(double)>` ...

http://en.cppreference.com/w/cpp/utility/functional/function