

# Algorithmen 1

## Übung 3 Sortieren, Hashing



# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
    - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln
- ⟨ ⟩

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
    - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln
- ⟨ ⟩



# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 23 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 23 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 23 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 23 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 23, 38 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 23, 38 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 23, 38 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 23, 38 \rangle$



# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

$\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

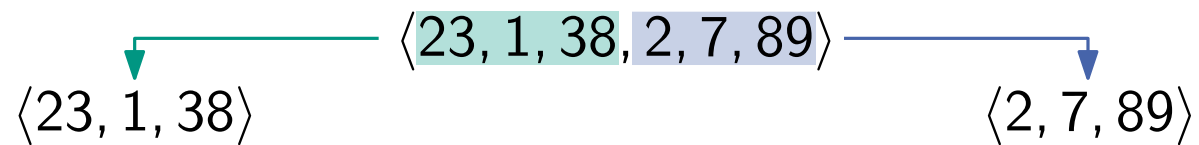
$\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$

# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

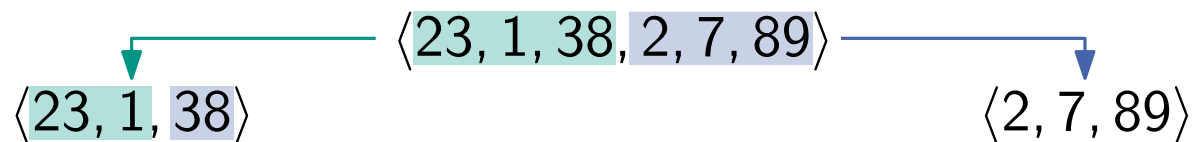


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden



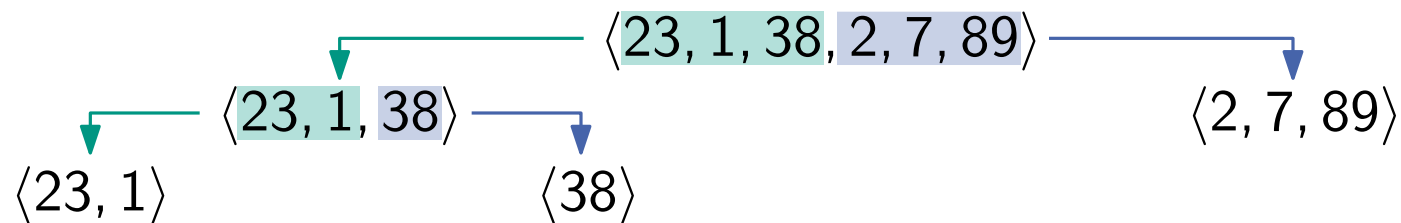


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

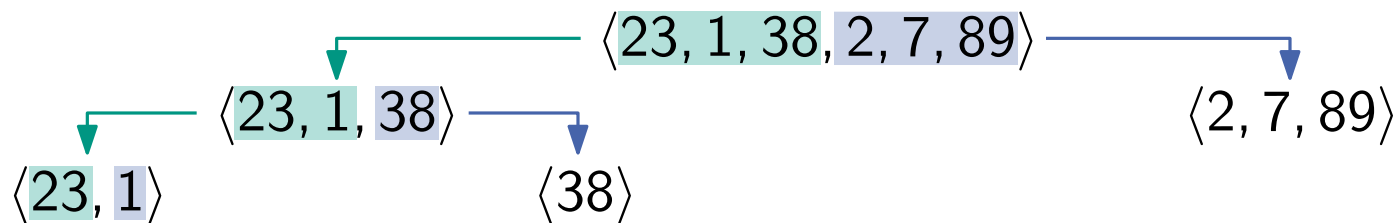


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

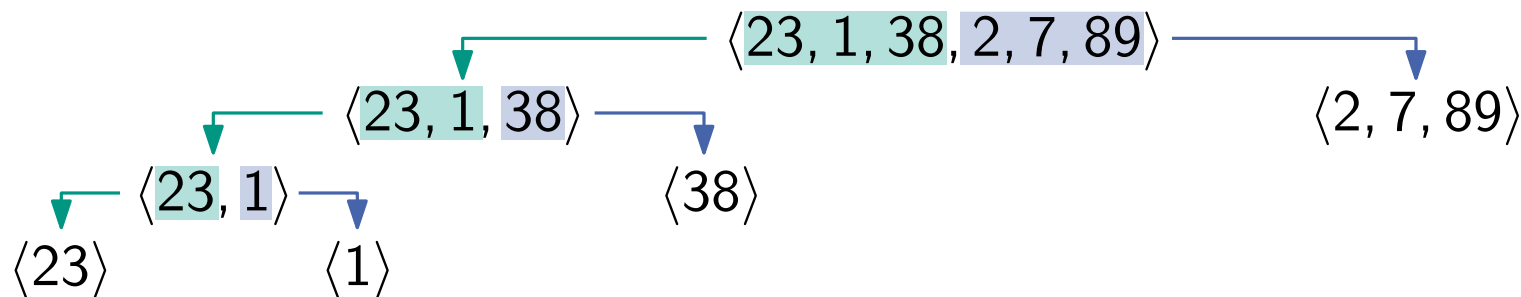


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

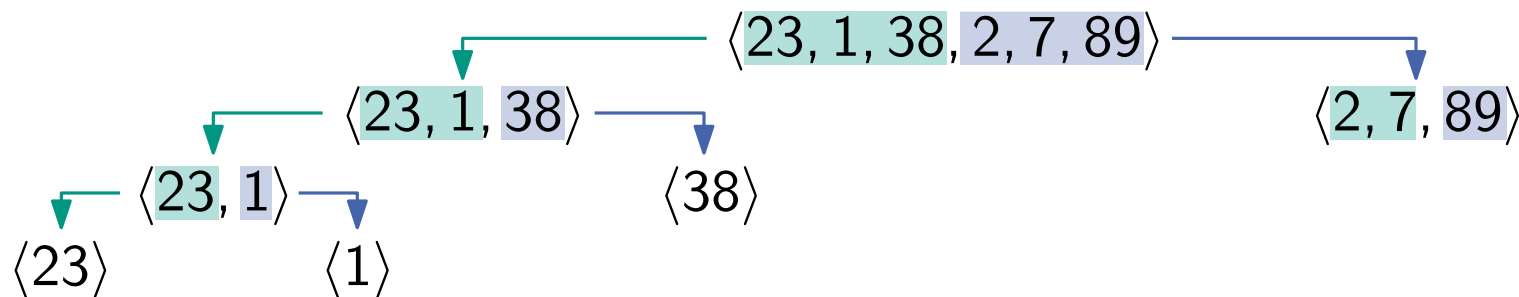


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

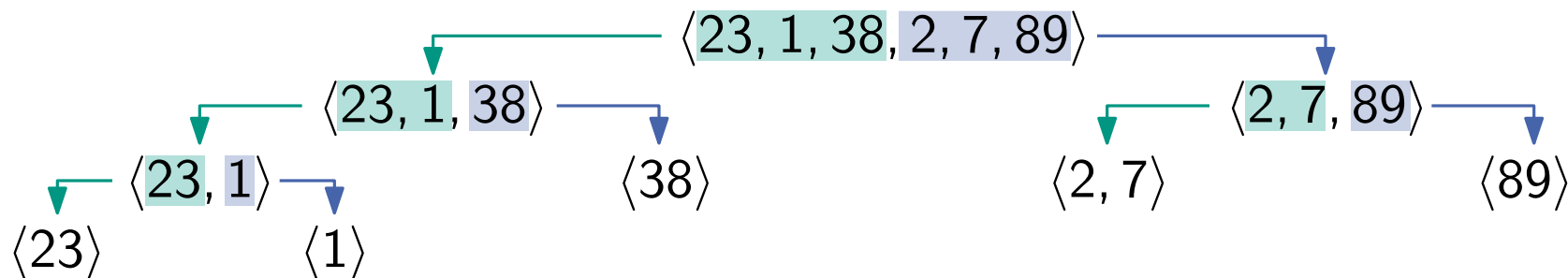


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

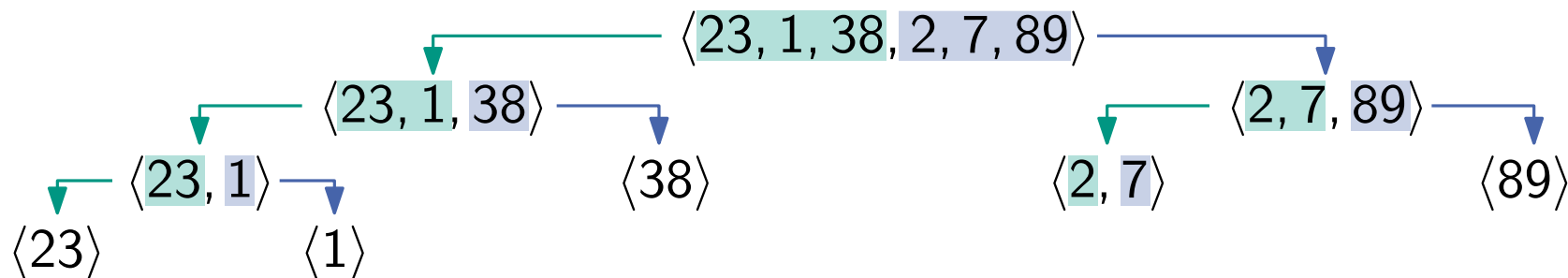


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

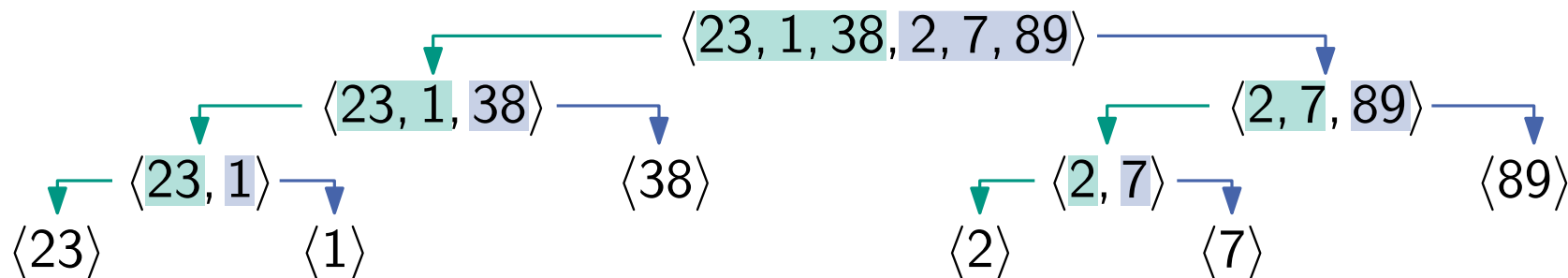


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

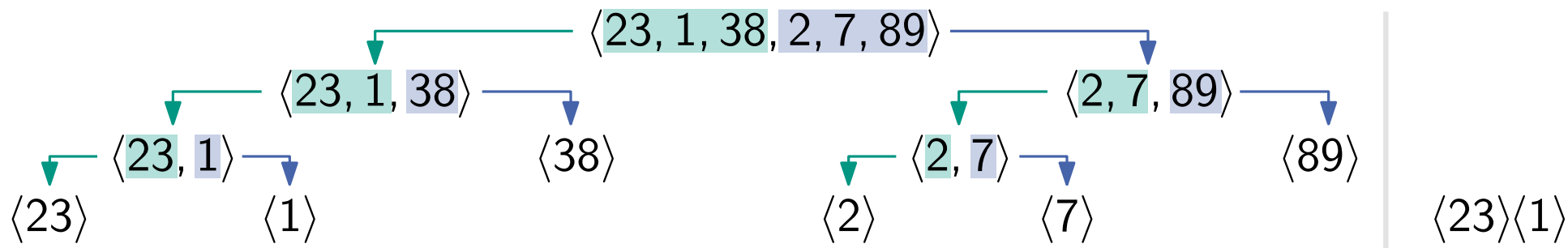


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden



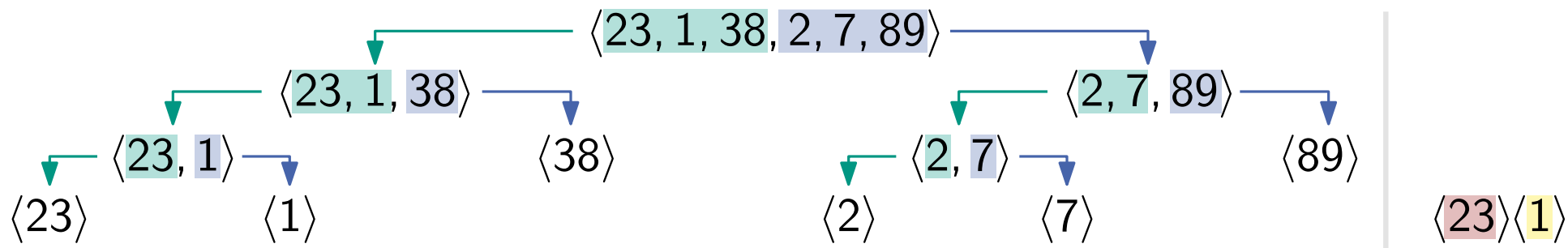


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

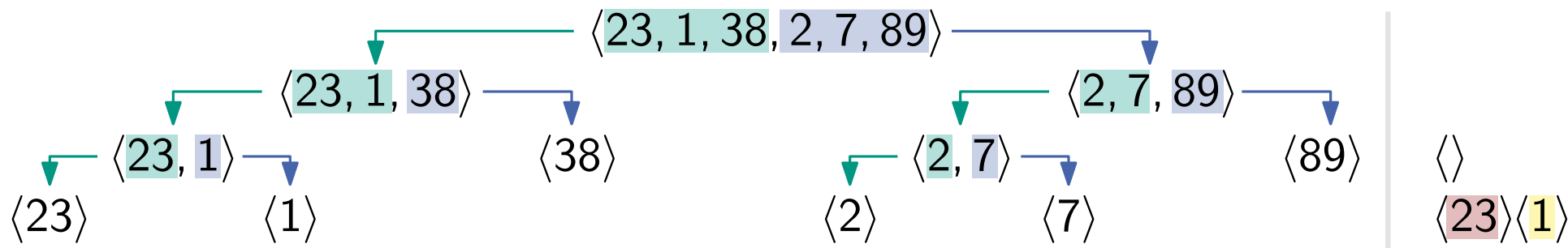


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

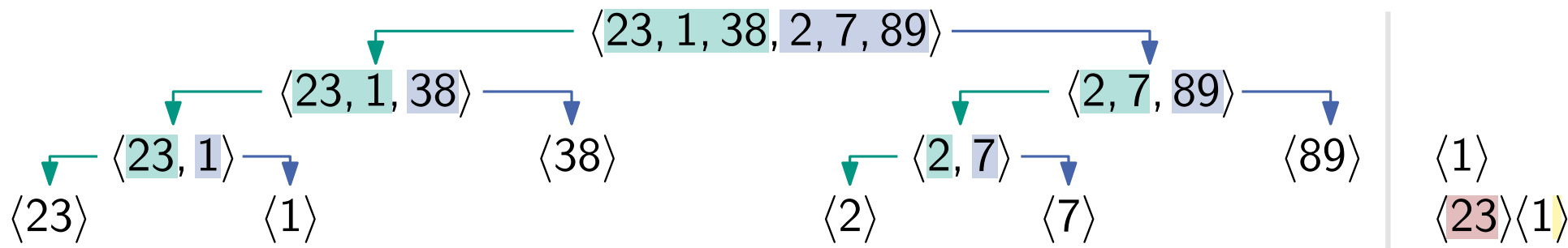


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

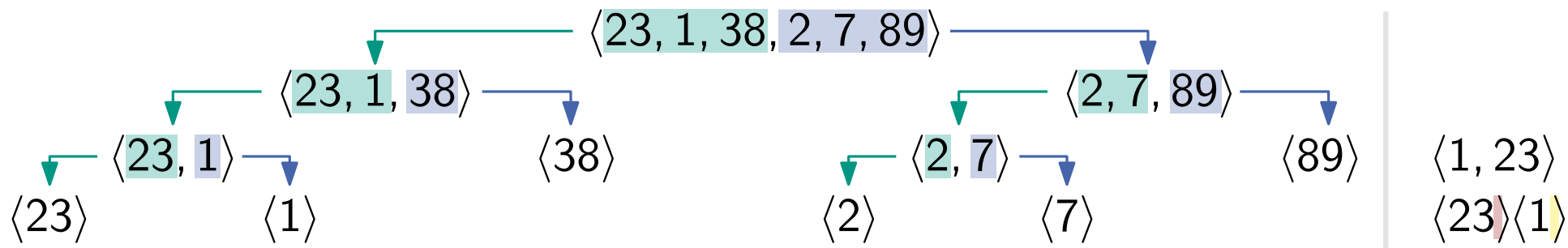


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

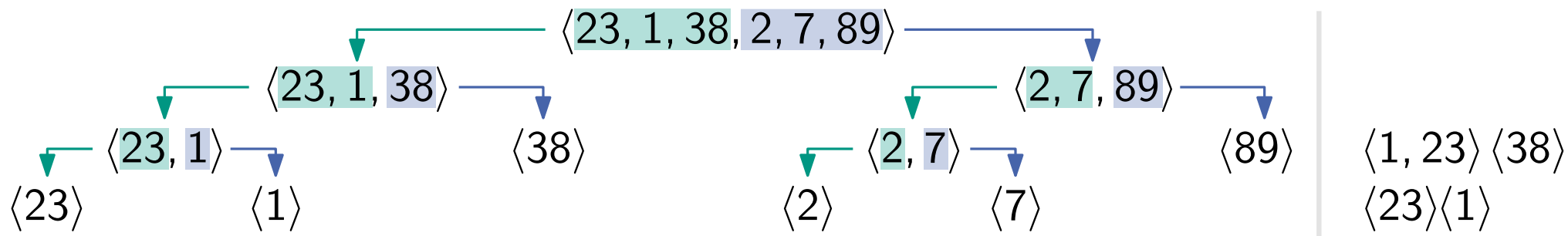


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

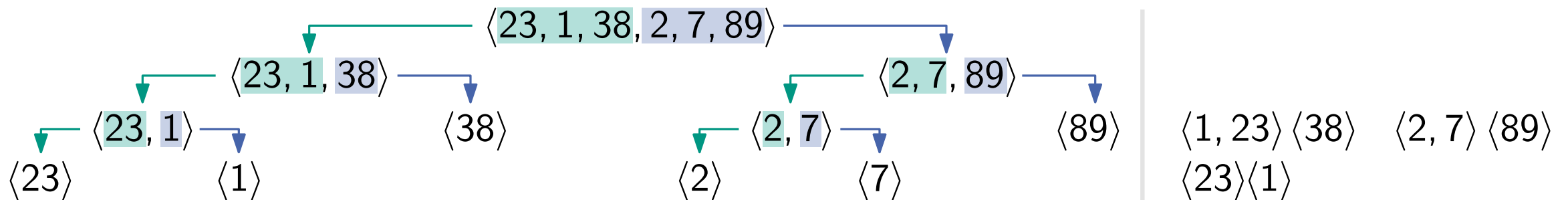


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

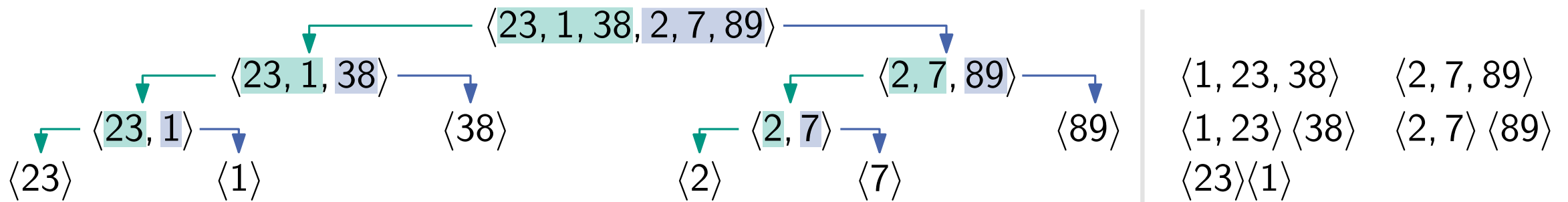


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

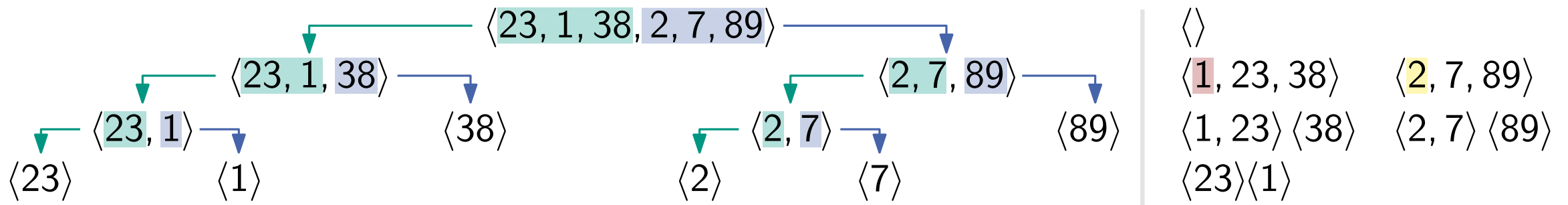


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden



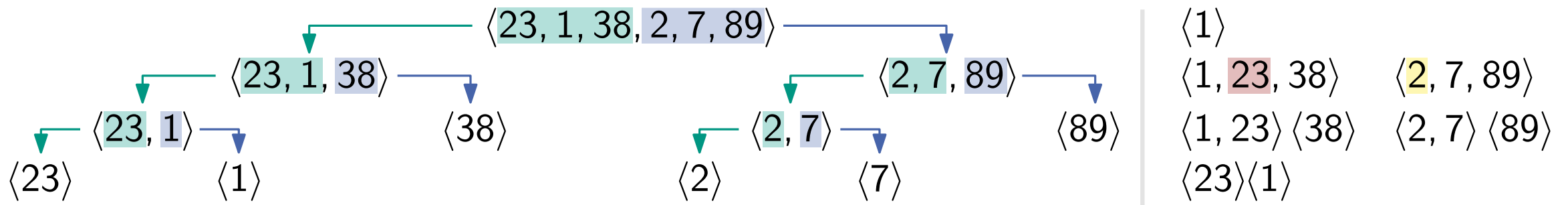


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

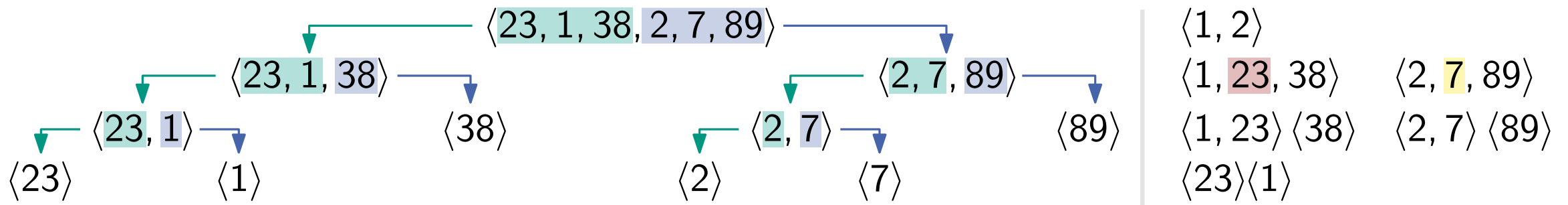


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

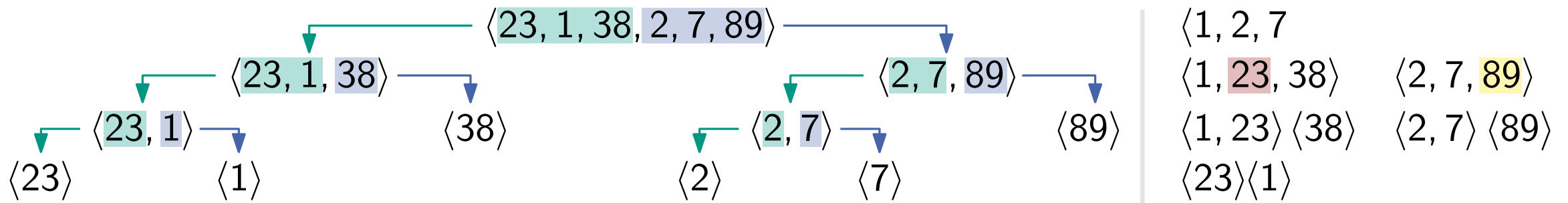


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

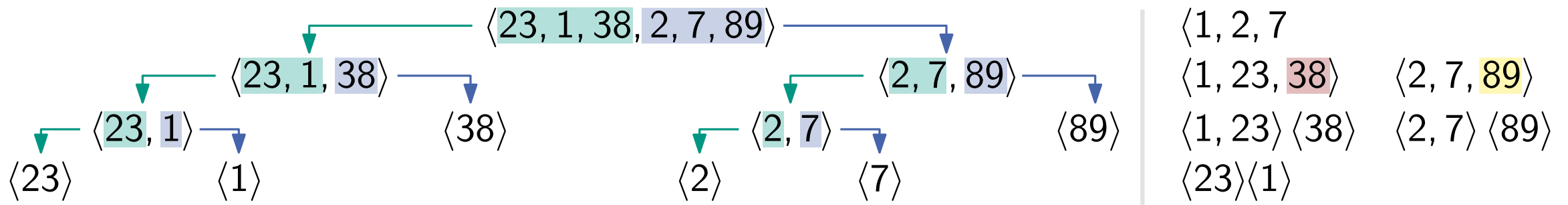


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

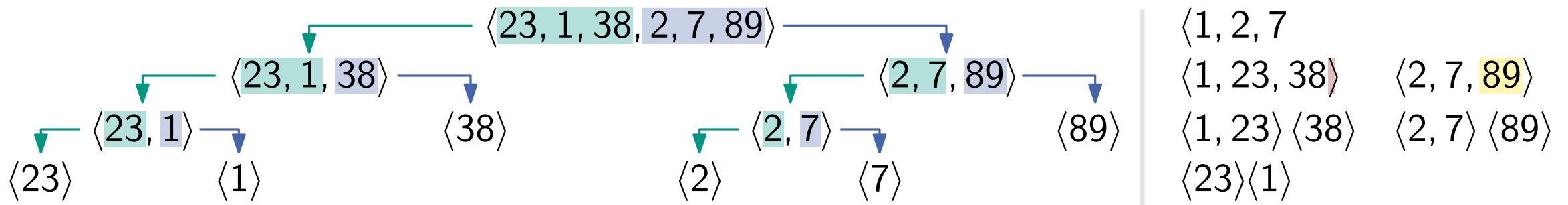


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden

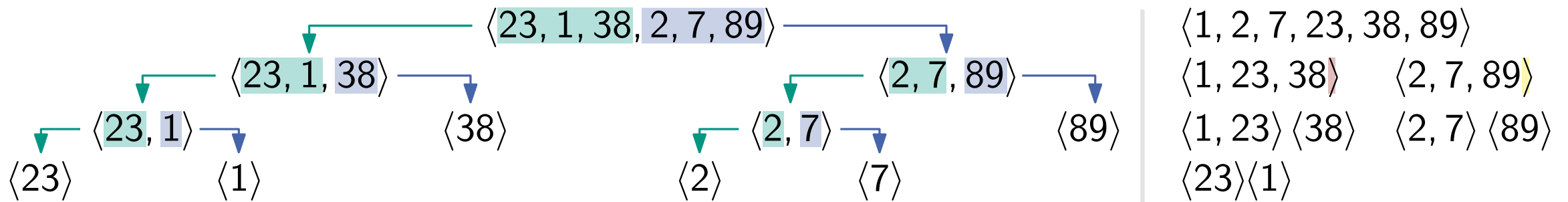


# Sortieren

- Gegeben:  $n$  Elemente aus einer geordneten Menge (z.B.: Zahlen)  $\langle 23, 1, 38, 2, 7, 89 \rangle$
- Gesucht: sortierte Folge dieser Elemente  $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$

## Algorithmen

- InsertionSort ( $\Theta(n^2)$ )
  - Position jeden Elements durch binäre Suche im bisher sortierten Teil ermitteln  
 $\langle 1, 2, 7, 23, 38, 89 \rangle$
- MergeSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv in zwei Hälften, welche wieder zusammengeführt werden



# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines Pivots in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente kleiner bzw. größer dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

# Sortieren

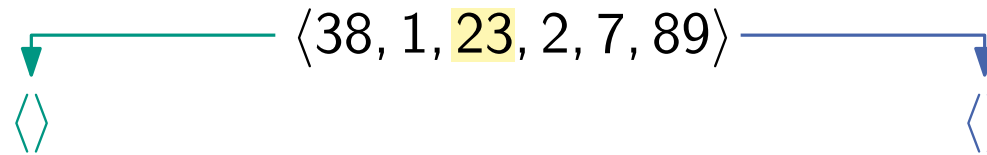
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente kleiner bzw. größer dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$



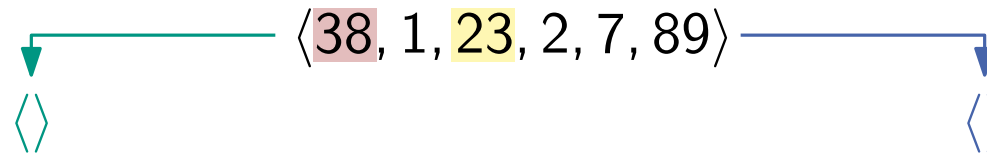
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



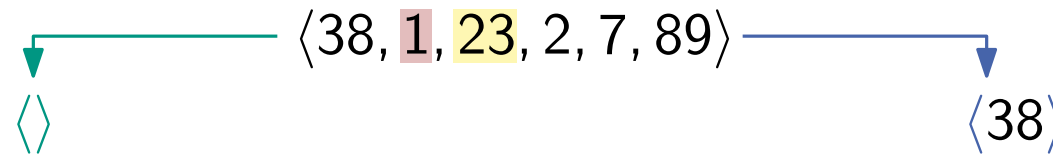
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



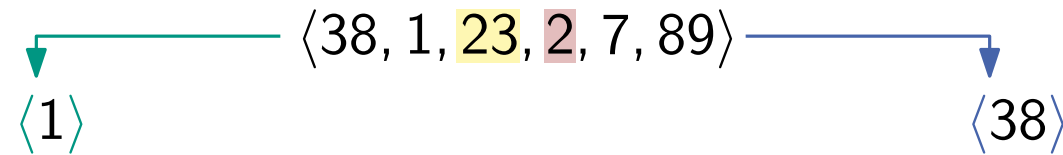
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



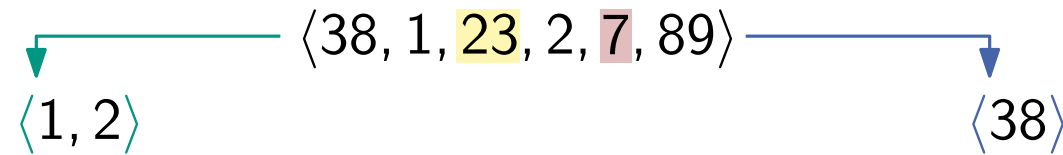
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



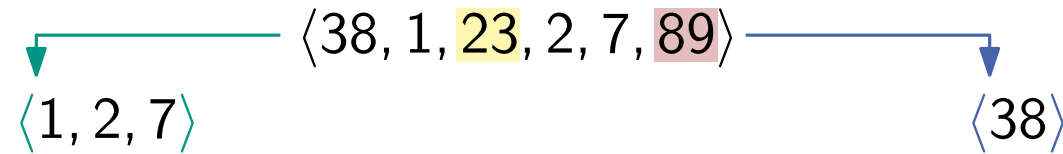
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



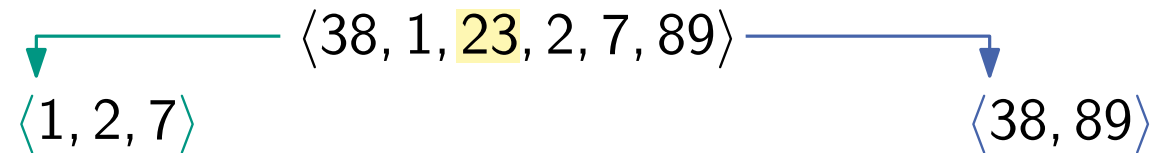
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



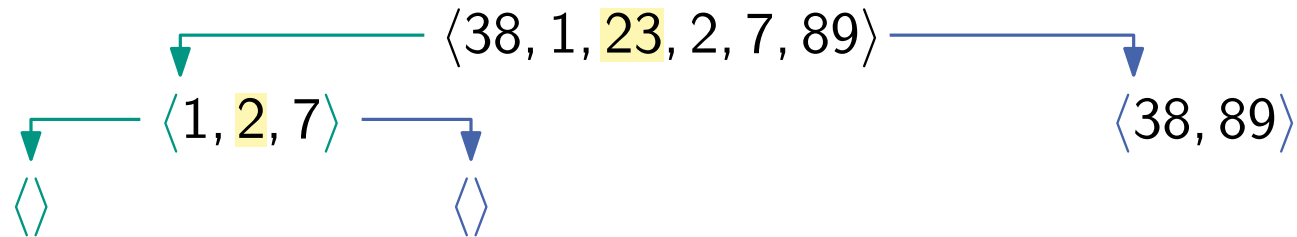
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



# Sortieren

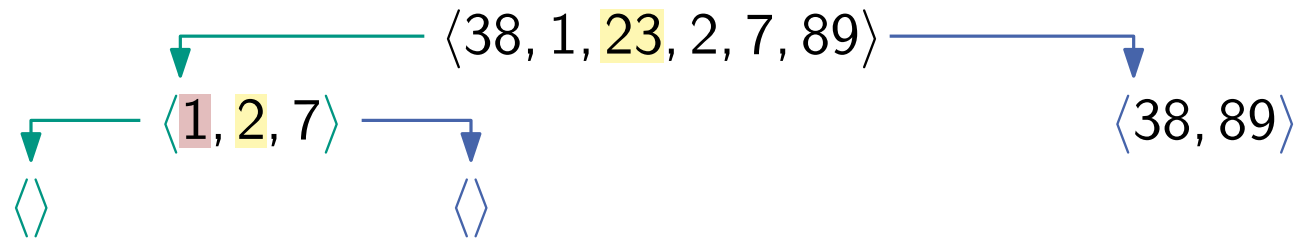
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten





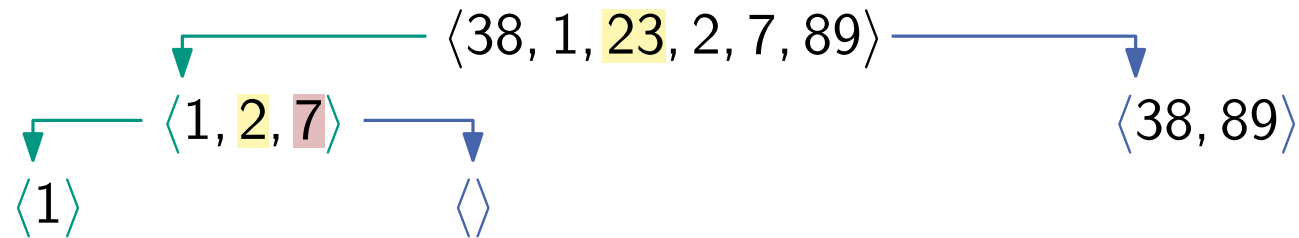
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



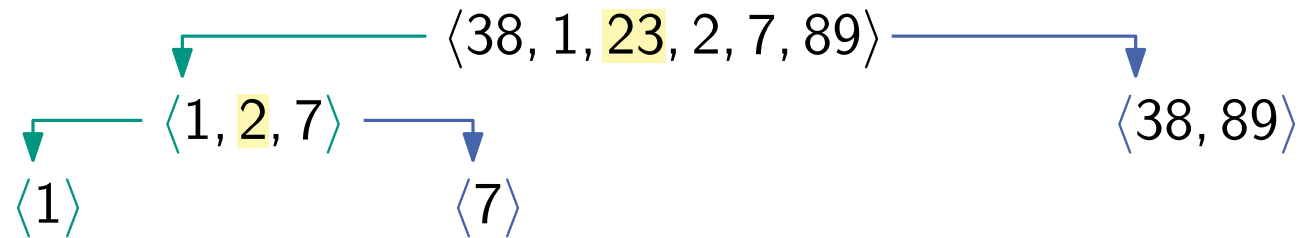
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



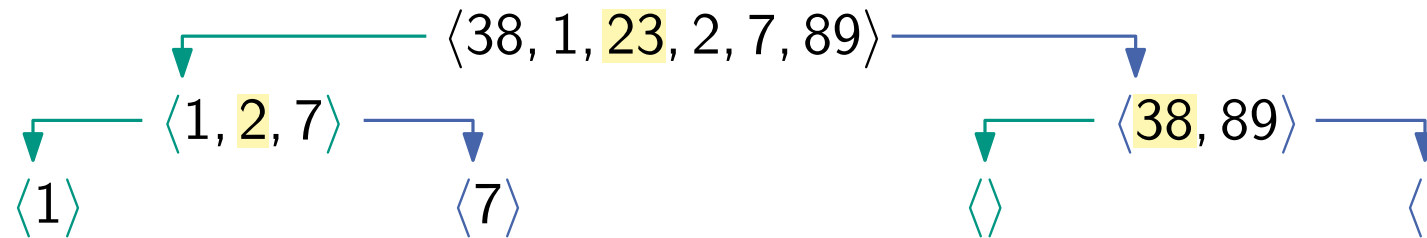
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



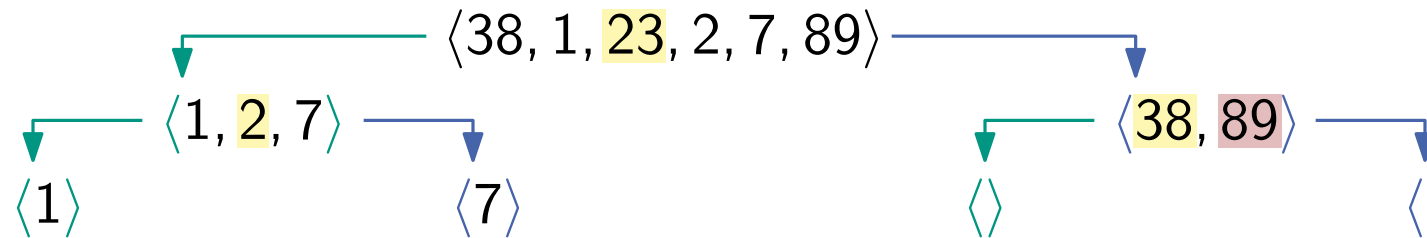
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



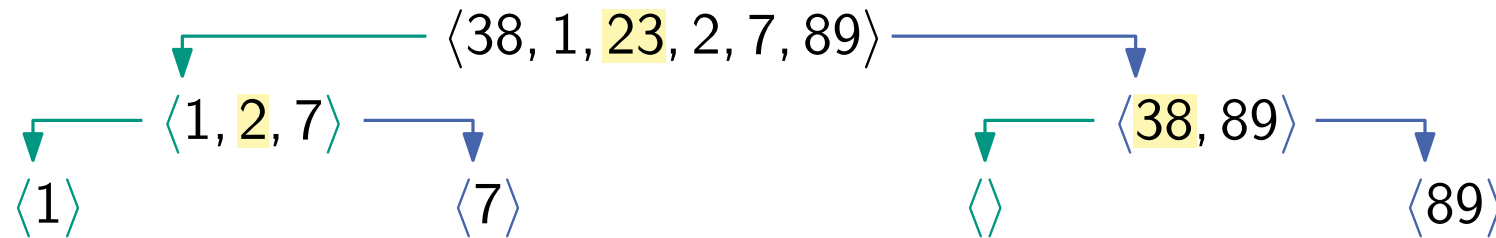
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



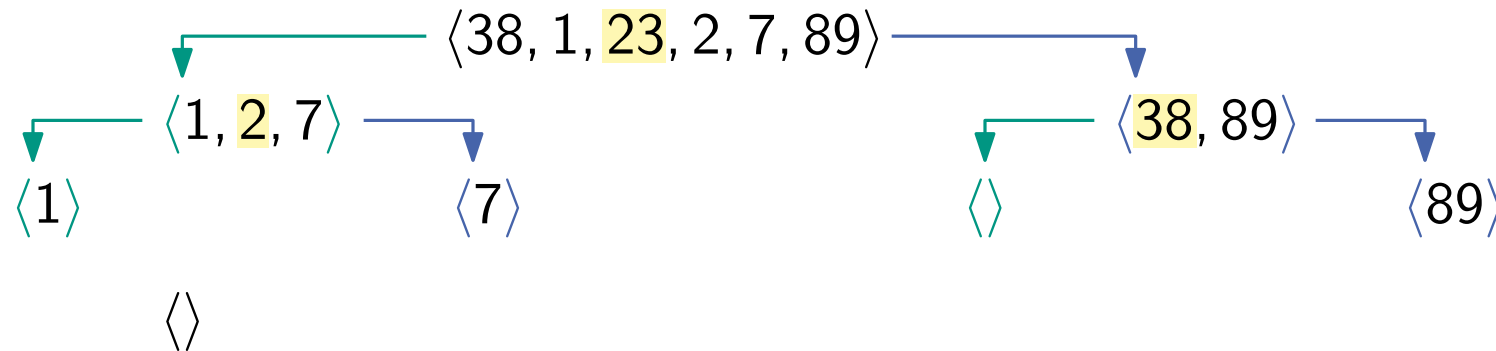
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



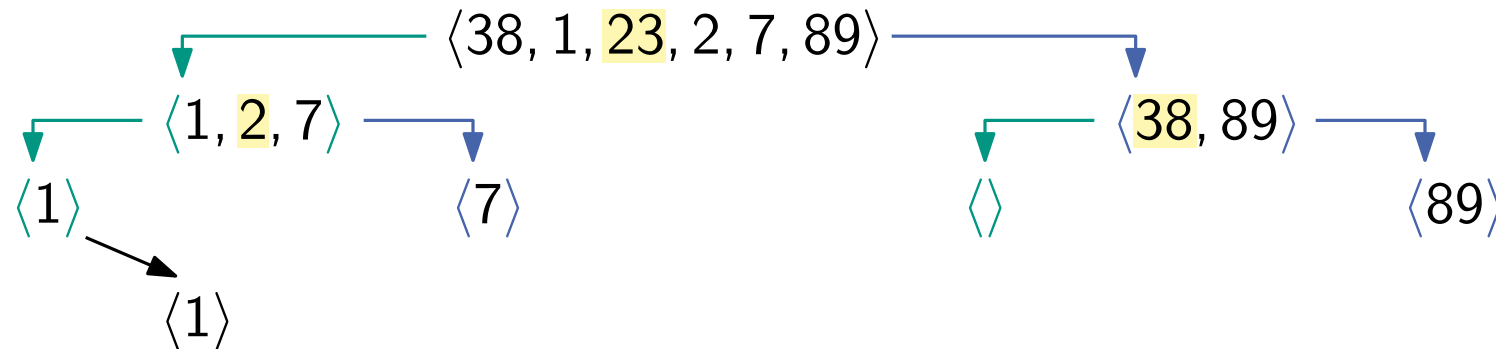
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



# Sortieren

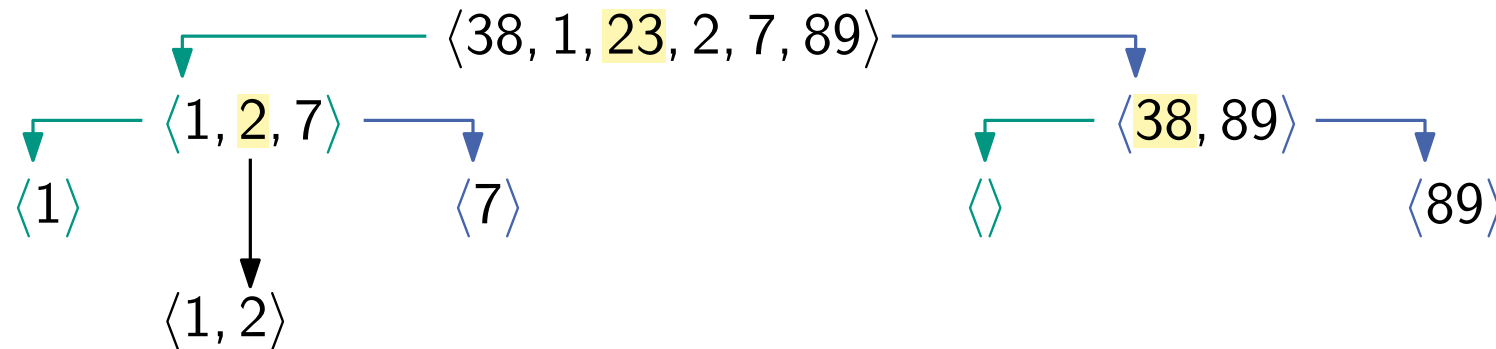
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten





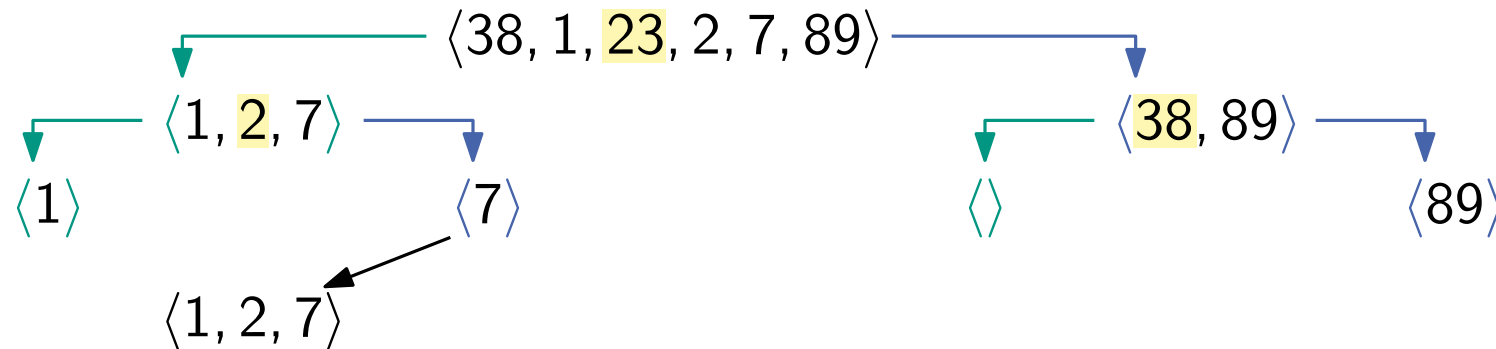
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



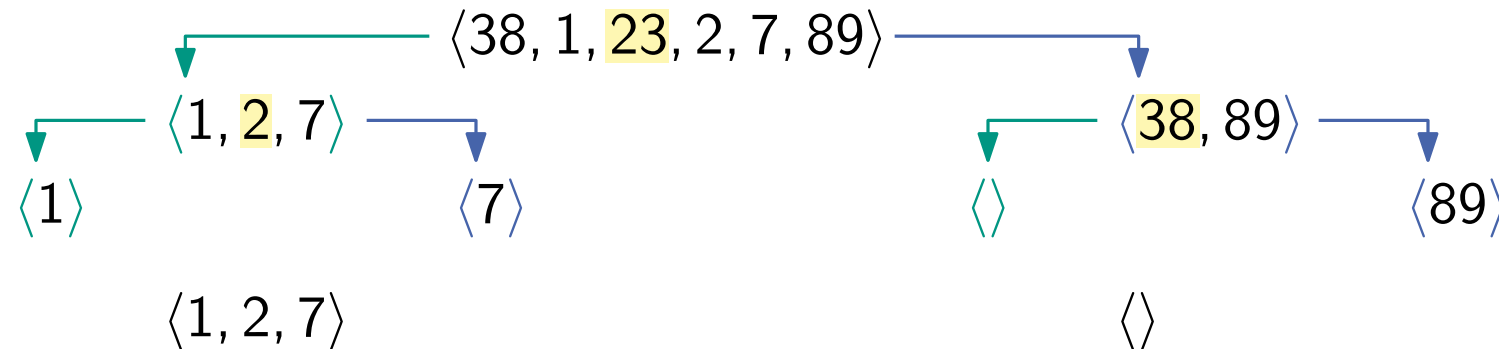
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



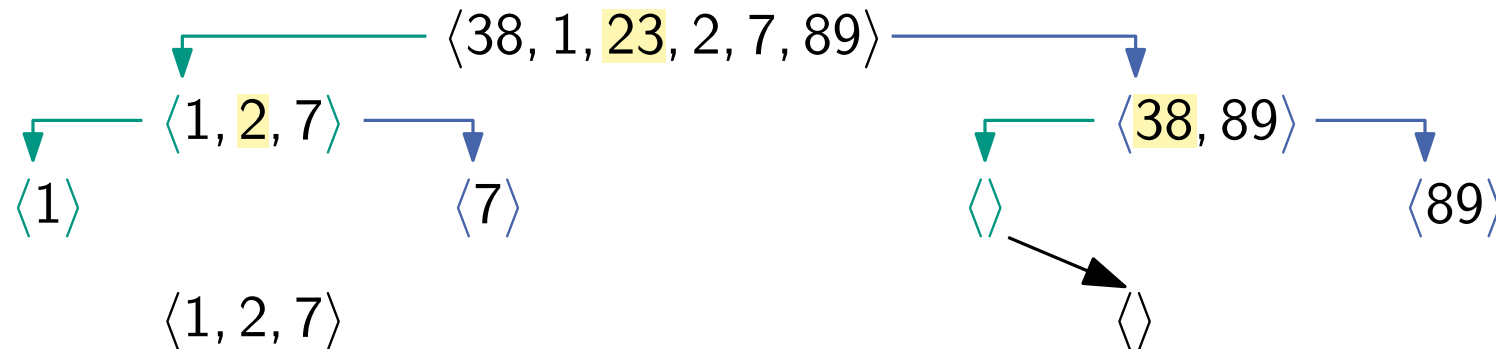
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



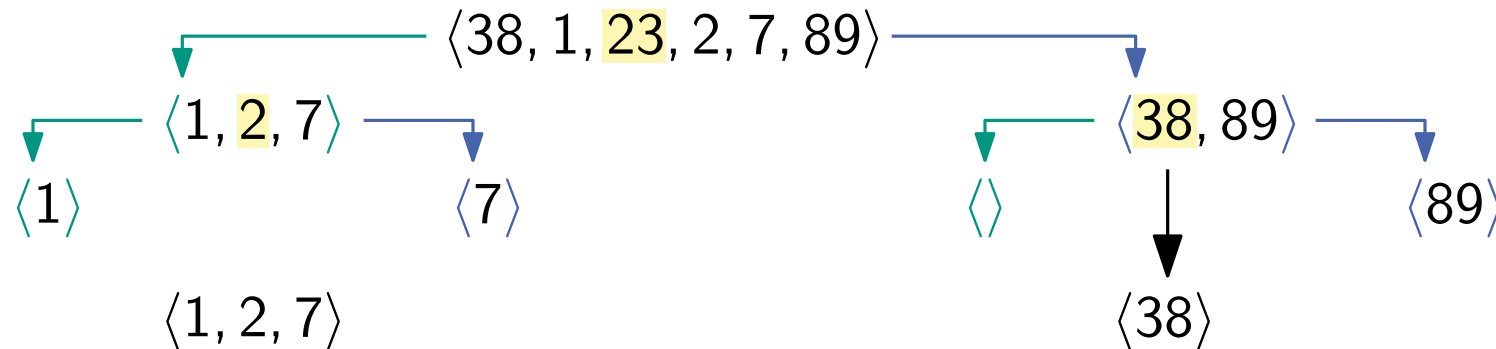
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



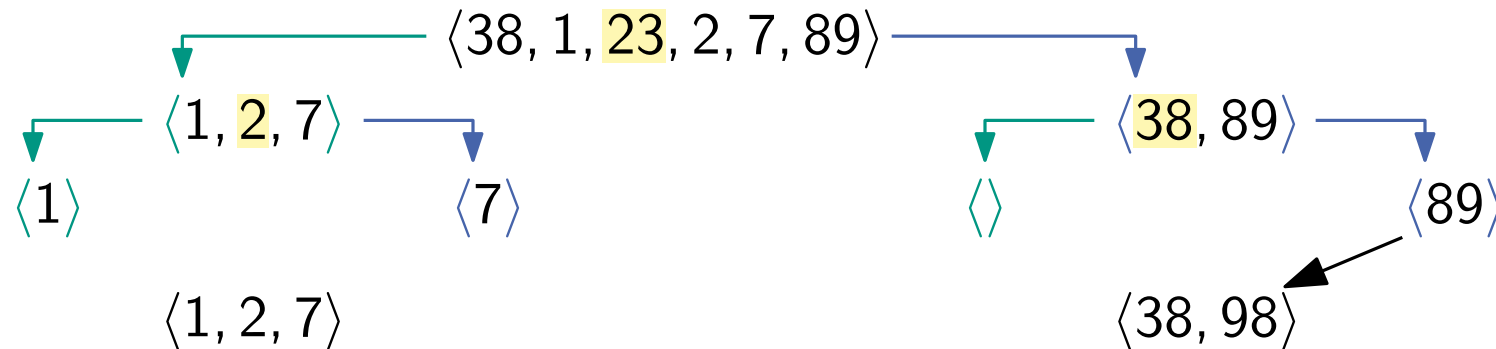
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



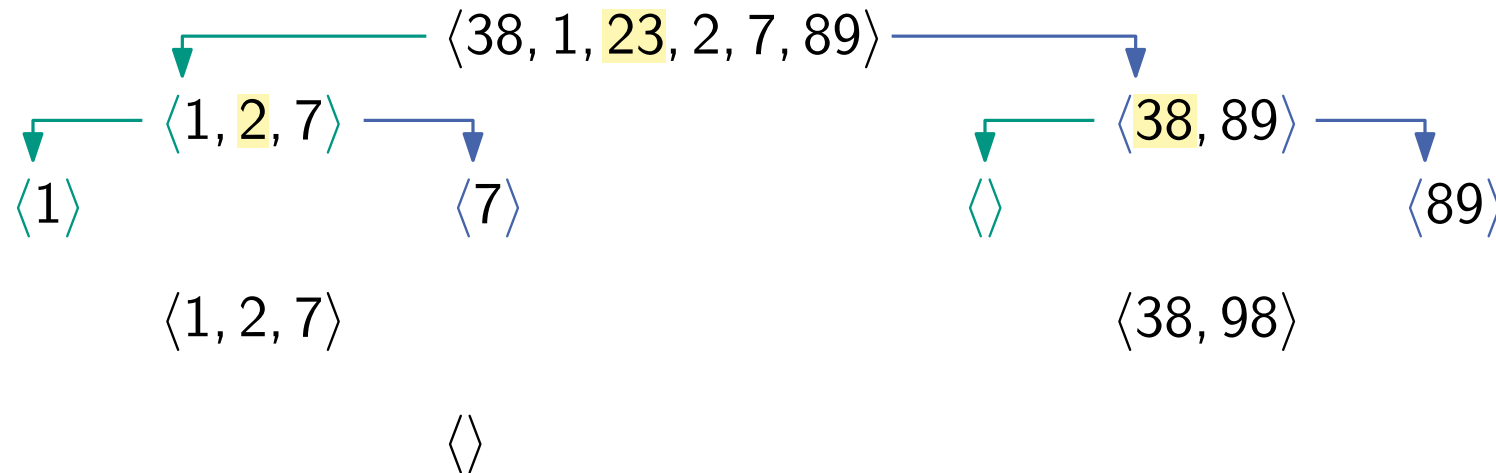
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



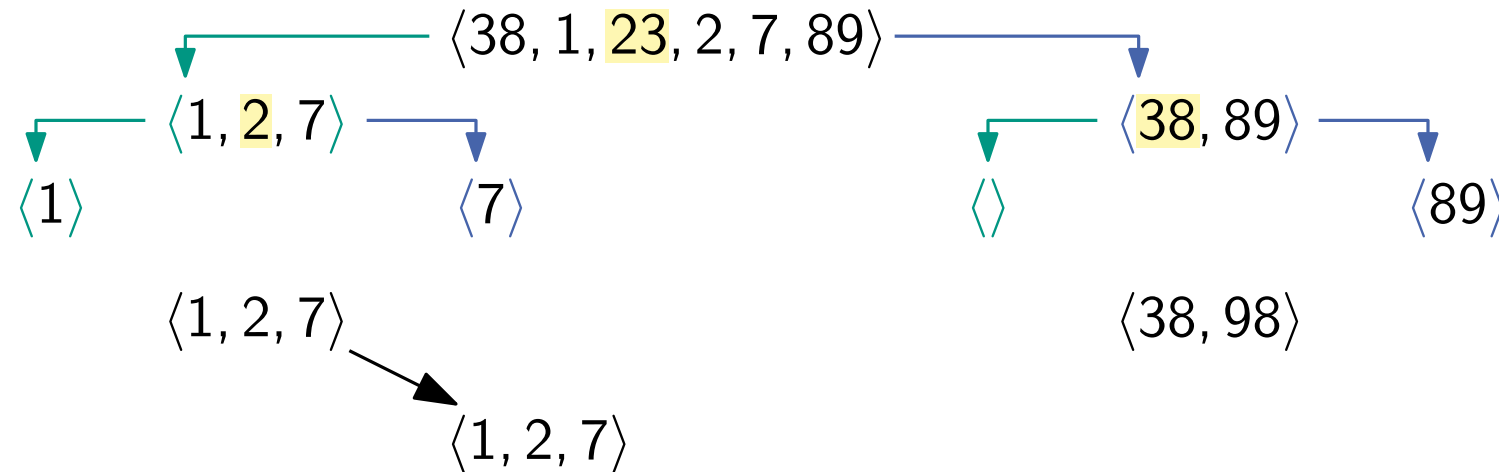
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



# Sortieren

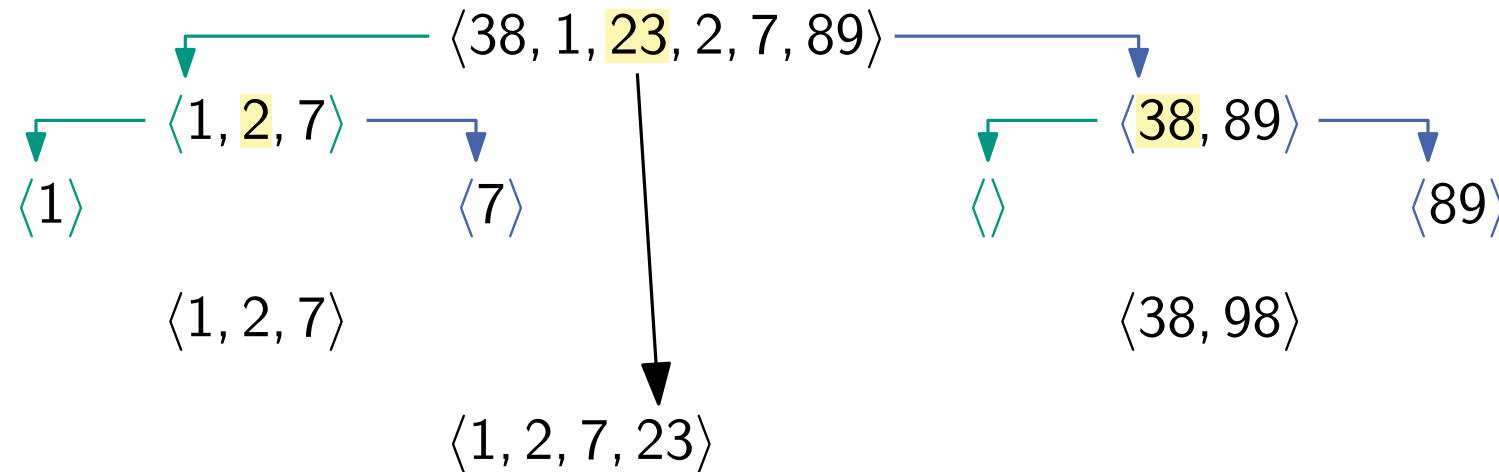
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten





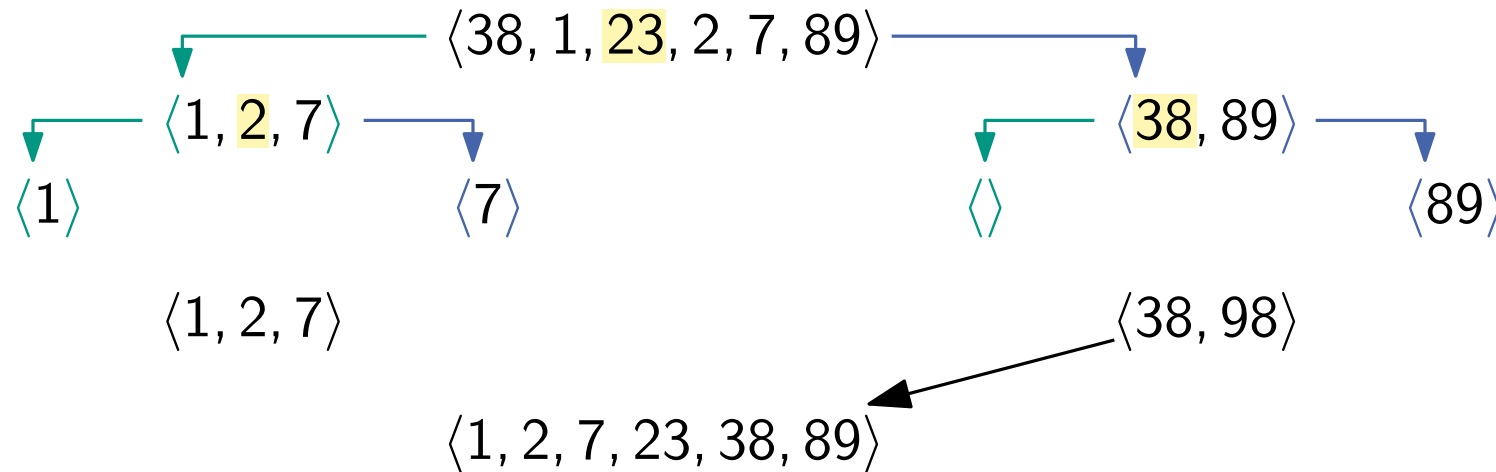
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



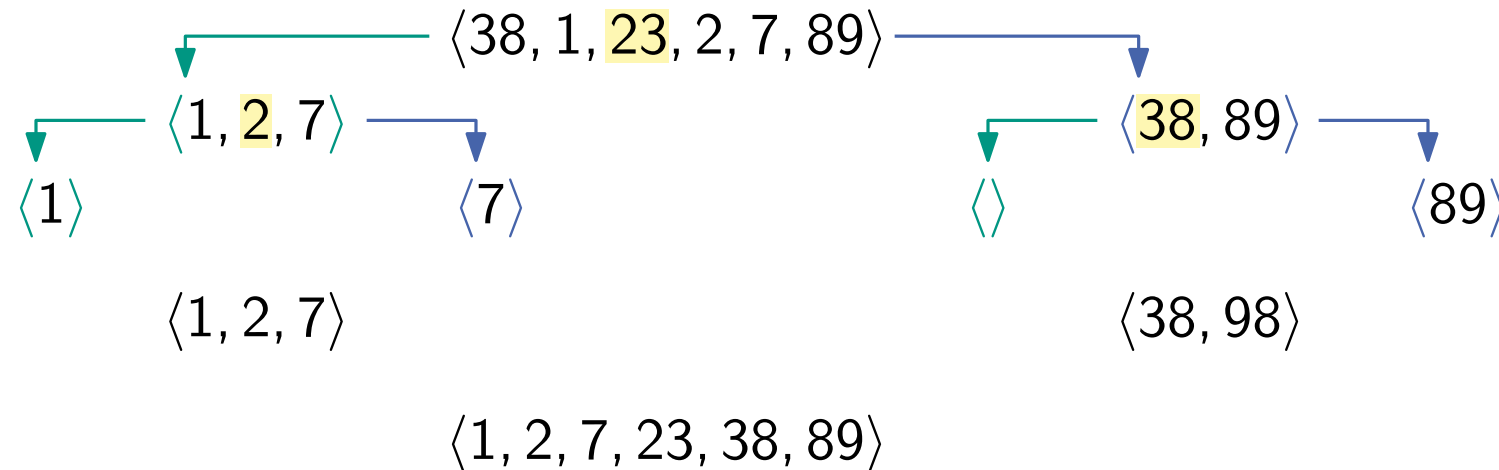
# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



# Sortieren

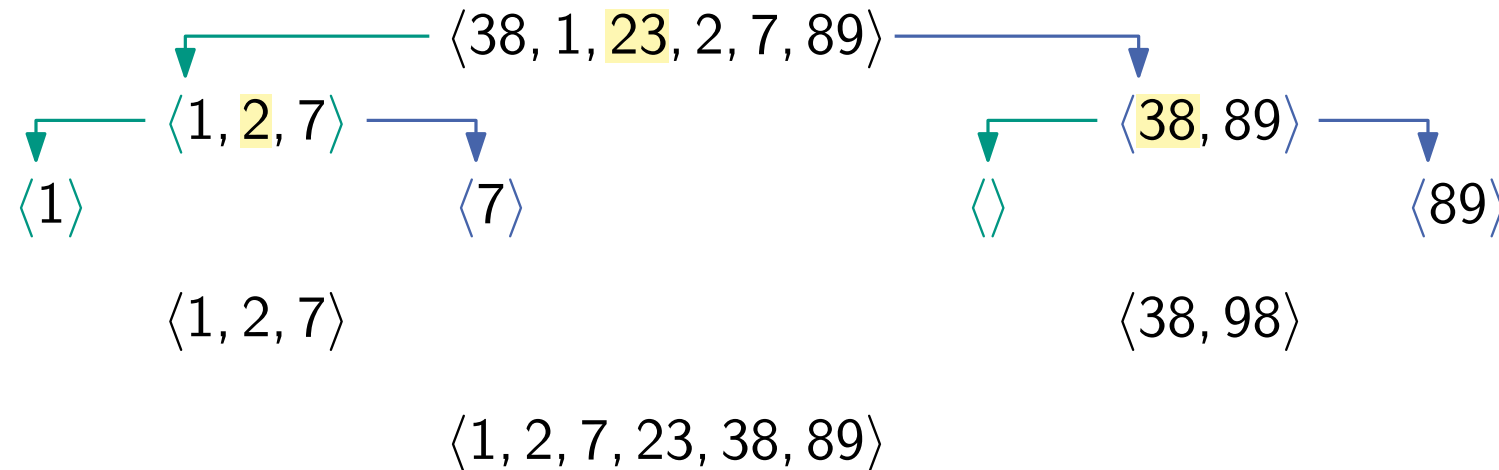
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



- Die Wahl des Pivots beeinflusst die Laufzeit

# Sortieren

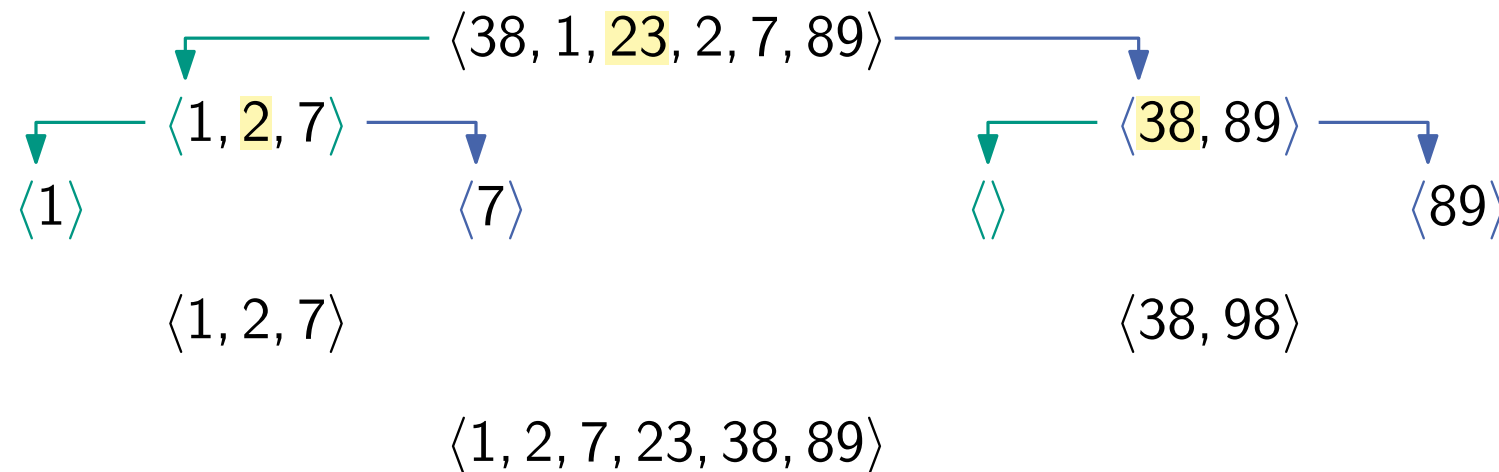
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



- Die Wahl des Pivots beeinflusst die Laufzeit
- Bereits gesehen
  - Worst Case  $\rightarrow$  Pivot ist immer kleinstes oder größtes Element

# Sortieren

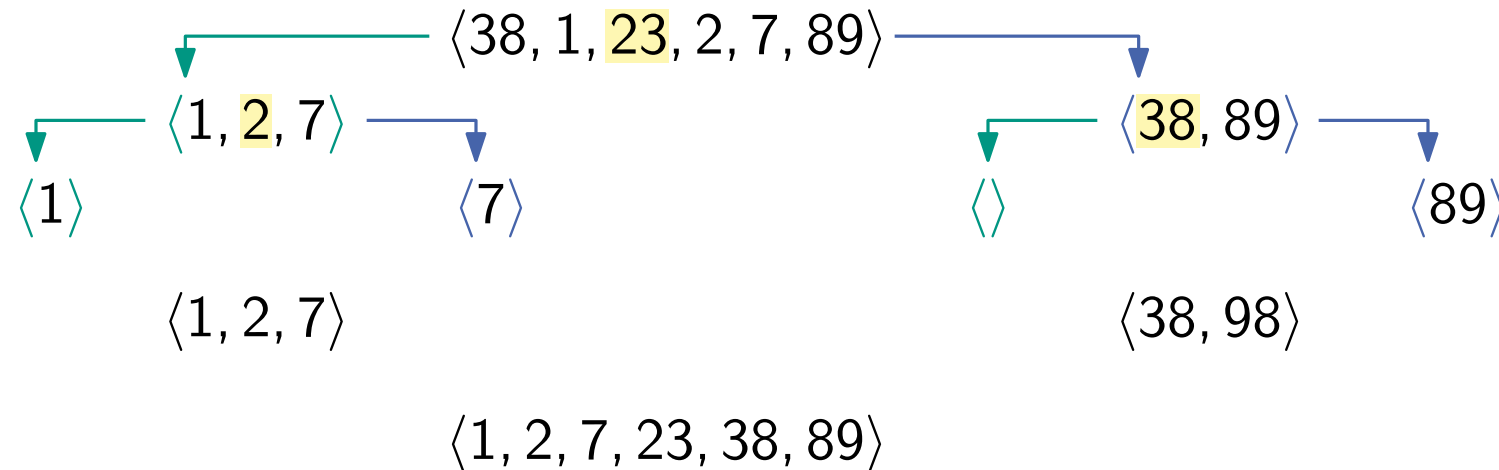
- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



- Die Wahl des Pivots beeinflusst die Laufzeit
- Bereits gesehen
  - Worst Case  $\rightarrow$  Pivot ist immer kleinstes oder größtes Element
  - Mittels zufällig gewähltem Pivot kommt man nah an den Best Case

# Sortieren

- QuickSort ( $\Theta(n \log(n))$ )
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten



- Die Wahl des Pivots beeinflusst die Laufzeit
- Bereits gesehen
  - Worst Case  $\rightarrow$  Pivot ist immer kleinstes oder größtes Element
  - Mittels zufällig gewähltem Pivot kommt man nah an den Best Case

**Warum?**

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines Pivots in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente kleiner bzw. größer dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein



# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines Pivots in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente kleiner bzw. größer dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

⟨38, 1, 23, 2, 7, 89⟩

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?
- Auftritt: Adversary



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

⟨38, 1, 23, 2, 7, 89⟩

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?
- Auftritt: Adversary
  - kennt den Algorithmus



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

⟨38, 1, 23, 2, 7, 89⟩

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?
- Auftritt: Adversary
  - kennt den Algorithmus
  - baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?
- Auftritt: Adversary  $\langle 1, 2, 3, 4, \dots, n \rangle$ 
  - kennt den Algorithmus
  - baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

⟨38, 1, 23, 2, 7, 89⟩

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?
- Auftritt: Adversary  $\langle 1, 2, 3, 4, \dots, n \rangle$ 
  - kennt den Algorithmus
  - baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

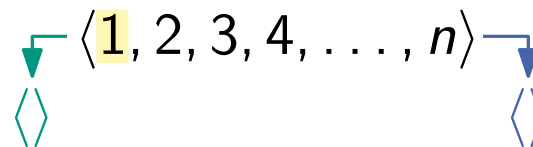
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>



# QuickSort – Pivots

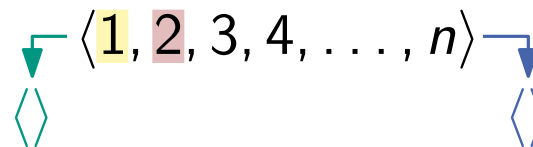
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

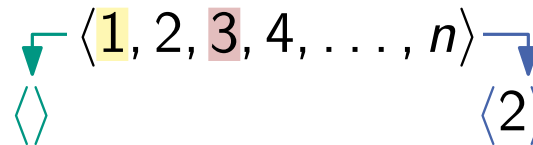
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

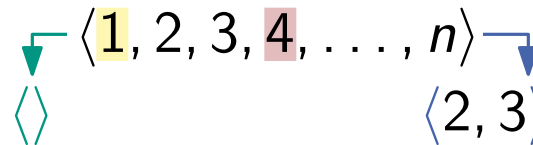
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

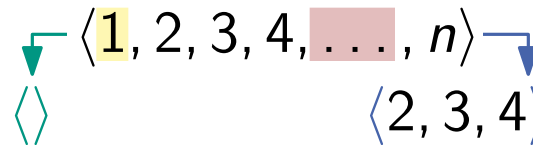
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

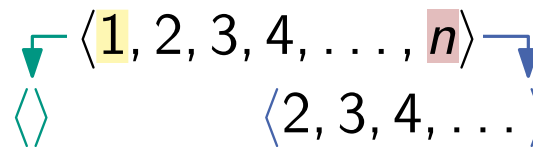
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

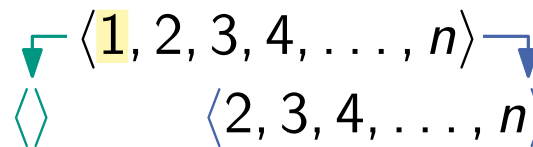
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

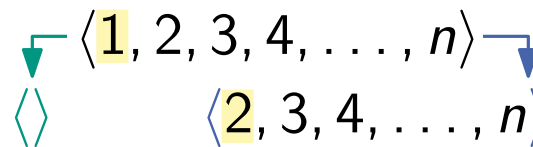
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## ■ Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

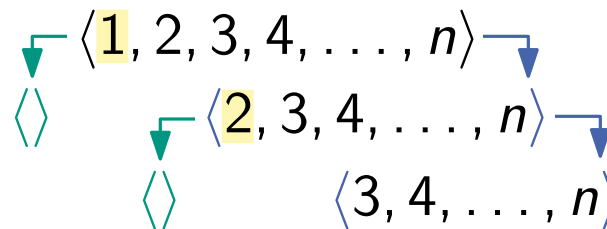
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>



# QuickSort – Pivots

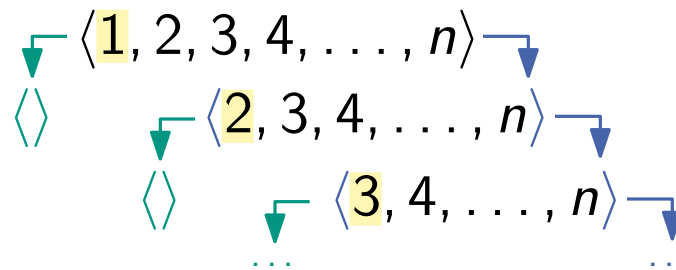
- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array
  - Was kann schlimmsten Falls passieren?

## Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>



# QuickSort – Pivots

- Worst Case vs. Average Case – Adversary Sichtweise
  - Teile ein Array rekursiv anhand eines **Pivots** in zwei Teile, welche jeweils alle Elemente **kleiner** bzw. **größer** dem Pivot enthalten

$\langle 38, 1, 23, 2, 7, 89 \rangle$

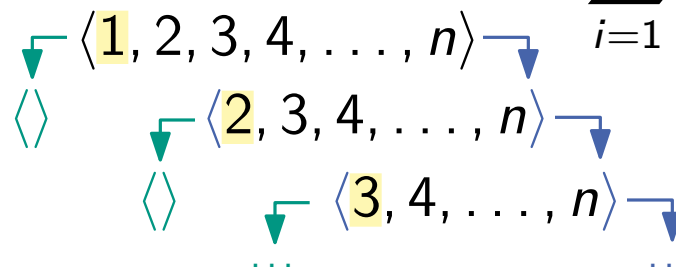
- Wenn wir nichts über die Eingabe wissen, kann jeder Eintrag im Array ein gutes oder schlechtes Pivot-Element sein
  - wähle irgendein Element als Pivot → Beispiel: Pivot ist immer der erste Eintrag im Array

- Was kann schlimmsten Falls passieren?

$$\sum_{i=1}^n i = \Theta(n^2)$$

- Auftritt: Adversary

- kennt den Algorithmus
- baut eine Instanz die für schlechte Laufzeit sorgt



Adapted from <https://scryfall.com/card/mid/129/bloodthirsty-adversary>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir Quicksort Adversary die Tour vermässeln?

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir Quicksort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir Quicksort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann

**Zufall!**



Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.

**Zufall!**



Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**



Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>



# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

$\langle 1, 2, 3, 4, 5, 6 \rangle$



Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

Wähle unter allen Permutationen zufällig gleich verteilt eine aus.

$\langle 1, 2, 3, 4, 5, 6 \rangle$   
 $\langle 4, 3, 1, 6, 5, 2 \rangle$



Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

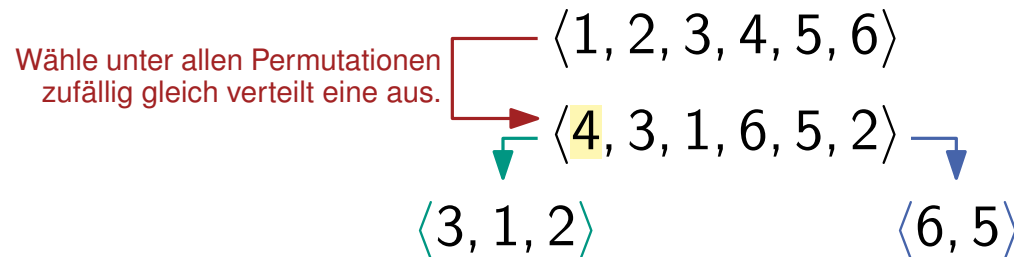


Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

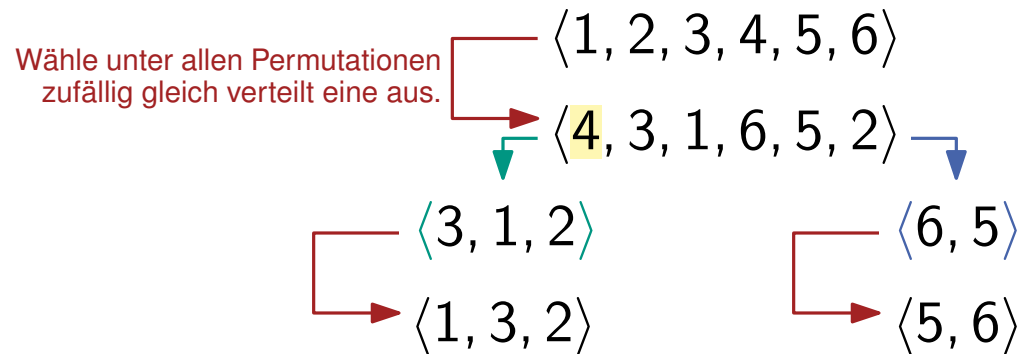


Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

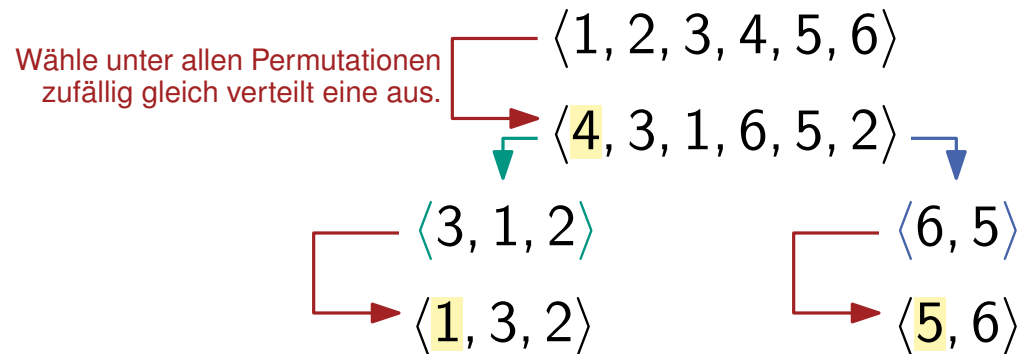


Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

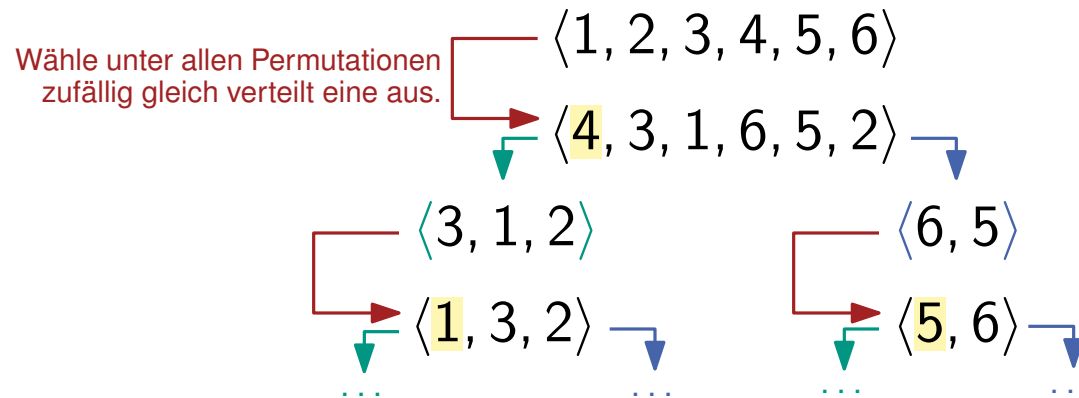


Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**

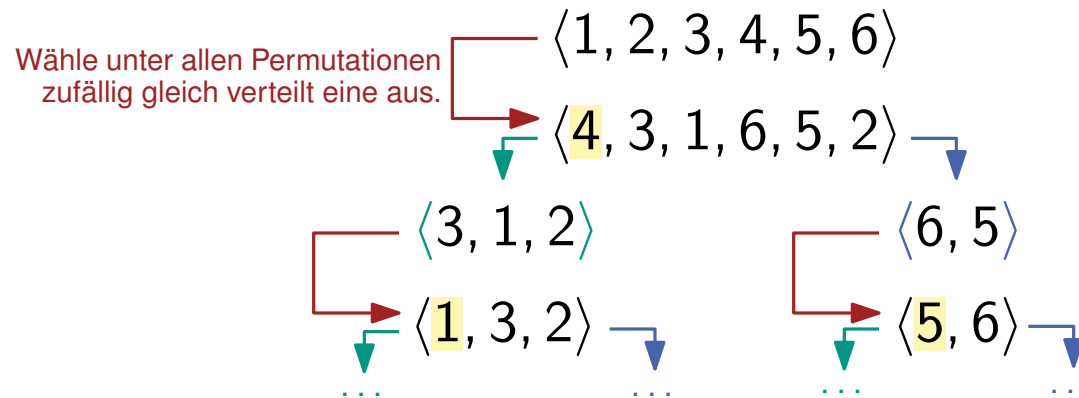


Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**



- Problem:
  - Extra Aufwand (um sortieren zu können, wird erstmal gemischt)



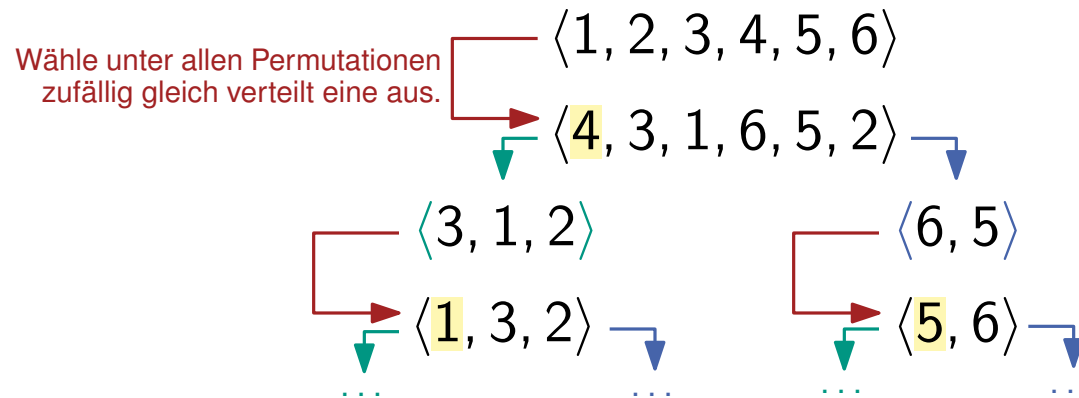
Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>



# QuickSort – Pivots

- Wie können wir QuickSort Adversary die Tour vermässeln?
  - ... selbst wenn sie den Algorithmus kennt?
  - ... unser Algo braucht eine Komponente die sie nicht vorhersehen kann
- Idee: Bevor wir das Pivot-Element wählen, wird die Eingabe zufällig gemischt.
  - Die Wahl von QuickSort Adversary wird irrelevant!

**Zufall!**



- Problem:
  - Extra Aufwand (um sortieren zu können, wird erstmal gemischt)
  - Wird die Laufzeit dadurch wirklich besser?



Adapted from <https://scryfall.com/card/afr/79/tricksters-talisman>

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?
- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?
- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?
  - Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?
- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?
  - Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.
    - Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?
      - Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?
- $\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle \square, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$
- Für Index **0**: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle \square, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$

- Für Index **0**: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt **eins** aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt **eins** aus



# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.  
?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus

- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_, \_ \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
- ...
- Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
- ...
- Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
- ...
- Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus

- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus

...

- Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.
  - Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?
    - Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?
   
 $\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$
    - Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
    - Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
    - ...
    - Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Das Pivot-Element wird nur von der ersten zufälligen Wahl beeinflusst

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir das erste Element als Pivot.
    - **Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?**
      - Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?
- $\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$
- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
  - Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
  - ...
  - Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Das Pivot-Element wird nur von der ersten zufälligen Wahl beeinflusst
  - Die Sortierung der restlichen Elemente ist irrelevant



# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir **das erste Element als Pivot.**

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
- ...
- Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Das Pivot-Element wird nur von der ersten zufälligen Wahl beeinflusst
- Die Sortierung der restlichen Elemente ist irrelevant
- Demzufolge kann als Pivot auch einfach direkt ein *zufälliges* Element gewählt werden

# QuickSort – Pivots

- Nach dem zufälligen Mischen des Arrays wählen wir **das erste Element als Pivot.**

?

- Welches Element landet beim Mischen an erster Stelle?

- Wie kommt die zufällige **Permutation** zustande?

$\langle a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9 \rangle \longrightarrow \langle a_5, a_1, a_7, a_6, a_3, a_9, a_4, a_2, a_0, a_8 \rangle$

- Für Index 0: Wähle aus  $n$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Für Index 1: Wähle aus  $n - 1$  Elementen gleich verteilt eins aus
- ...
- Für Index  $i$ : Wähle aus  $n - i$  Elementen gleich verteilt eins aus
- Das Pivot-Element wird nur von der ersten zufälligen Wahl beeinflusst
- Die Sortierung der restlichen Elemente ist irrelevant
- Demzufolge kann als Pivot auch einfach direkt ein *zufälliges* Element gewählt werden

Bei einem beliebigen aber **festen Pivot** kann Quicksort Adversary eine schlechte Laufzeit erzwingen.  
 Bei einem **zufällig gewählten Pivot** kann Quicksort Adversary die Laufzeit nicht beeinflussen.

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?



# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij}$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij}$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij}$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij}$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij}$$



# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij}$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**
  - Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis

- Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
- Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
- Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
- Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!

**Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$



# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

Dank der Linearität von  $\mathbb{E}$  können wir die  $X_{ij}$  einzeln betrachten, anstatt alle auf einmal!

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

Dank der Linearität von  $\mathbb{E}$  können wir die  $X_{ij}$  einzeln betrachten, anstatt alle auf einmal!

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

Indikatorvariable  $Y$ :  $\mathbb{E}[Y] = 0 \cdot \Pr[Y = 0] + 1 \cdot \Pr[Y = 1]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

Dank der Linearität von  $\mathbb{E}$  können wir die  $X_{ij}$  einzeln betrachten, anstatt alle auf einmal!

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

Indikatorvariable  $Y$ :  $\mathbb{E}[Y] = 0 \cdot \Pr[Y = 0] + 1 \cdot \Pr[Y = 1]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

Dank der Linearität von  $\mathbb{E}$  können wir die  $X_{ij}$  einzeln betrachten, anstatt alle auf einmal!

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

Indikatorvariable  $Y$ :  $\mathbb{E}[Y] = 0 \cdot \Pr[Y = 0] + 1 \cdot \Pr[Y = 1]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?  $O(n \log(n))$  (siehe VL)
- Jetzt: Alternativer Beweis

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

- Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
- Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
- Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
- Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden! **Zufall!**

- Indikatorzufallsvariable  $X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } a_i \text{ und } a_j \text{ verglichen werden} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$

Dank der Linearität von  $\mathbb{E}$  können wir die  $X_{ij}$  einzeln betrachten, anstatt alle auf einmal!

$$X = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \rightarrow \mathbb{E}[X] = \mathbb{E} \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \mathbb{E} \left[ \sum_{j=i+1}^n X_{ij} \right] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \mathbb{E}[X_{ij}] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

Linearität von  $\mathbb{E}$ :  $\mathbb{E}[c \cdot Y + d \cdot Z] = c \cdot \mathbb{E}[Y] + d \cdot \mathbb{E}[Z]$

Indikatorvariable  $Y$ :  $\mathbb{E}[Y] = 0 \cdot \Pr[Y = 0] + 1 \cdot \Pr[Y = 1]$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das **Pivot** ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$



# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das **Pivot** ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das **Pivot** ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das **Pivot** ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das **Pivot** ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das **Pivot** ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das Pivot ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray
  - Fall 2: Das **Pivot** ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das Pivot ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray
  - Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.
- Welche Laufzeit können wir erwarten?
- Jetzt: Alternativer Beweis
  - Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
  - Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
  - Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
  - Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
  - Fall 1: Das Pivot ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray
  - Fall 2: Das **Pivot** ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
    - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$



# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.

- Welche Laufzeit können wir erwarten?

- Jetzt: Alternativer Beweis

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

- Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$
- Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
- Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?
- Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!
- Fall 1: Das Pivot ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray
- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.

- Welche Laufzeit können wir erwarten?

- Jetzt: Alternativer Beweis

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

- Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$

- Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?

- Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!

- Fall 1: Das Pivot ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

- $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

- $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays

- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Mit zufälliger Wahl des Pivots ist es unwahrscheinlicher, dass wir den Worst Case treffen.

- Welche Laufzeit können wir erwarten?

- Jetzt: Alternativer Beweis

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

- Laufzeit ist bestimmt durch die Anzahl der Vergleiche  $X$

- Betrachte die Elemente in sortierter Reihenfolge  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Betrachte jedes Paar  $a_i, a_j$  von Elementen und frage: Werden  $a_i$  und  $a_j$  verglichen?

- Das hängt davon ab, welche Elemente als Pivots gewählt werden!

- Fall 1: Das Pivot ist links von  $a_i$  oder rechts von  $a_j$

Dieses Pivot hat keinen Einfluss darauf ob  $a_i$  und  $a_j$  verglichen werden!

- $a_i$  und  $a_j$  kommen in das gleiche Teilarray

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

- $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays

- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$



# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$



- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

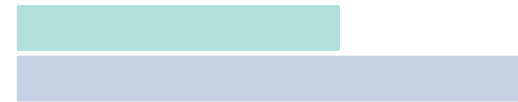
$X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$



- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

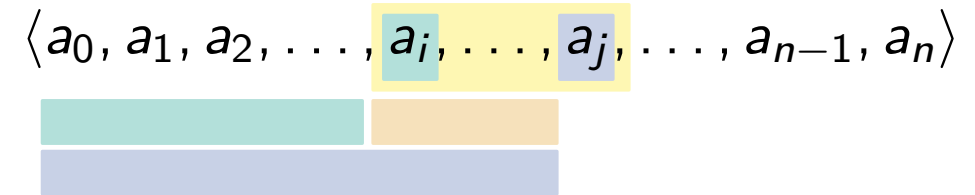
Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$



- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

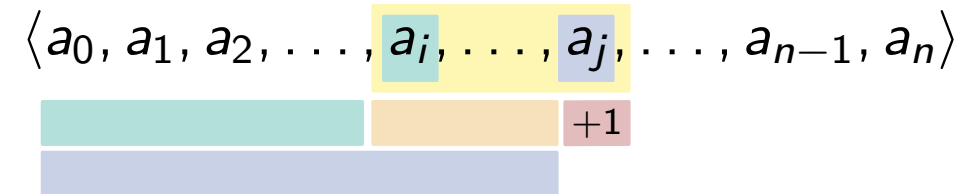
Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$



- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$X_{ij} = 0$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente
- Wie wahrscheinlich ist es, dass  $X_{ij} = 1$  gilt, wenn wir schon wissen, dass das Pivot in diesem Bereich ist?

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!  $X_{ij} = 0$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!  $X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
- Wie wahrscheinlich ist es, dass  $X_{ij} = 1$  gilt, wenn wir schon wissen, dass das Pivot in diesem Bereich ist?

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!  $X_{ij} = 0$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!  $X_{ij} = 1$

# QuickSort – Pivots

- Betrachte die Pivots die zufällig gewählt werden
- Pivots außerhalb von  $\{a_i, \dots, a_j\}$  interessieren uns nicht
- Das Schicksal von  $X_{ij}$  wird besiegelt wenn das erste Pivot in  $\{a_i, \dots, a_j\}$  fällt
- Dieser Bereich enthält  $j - i + 1$  Elemente  $\langle a_0, a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_j, \dots, a_{n-1}, a_n \rangle$
- Wie wahrscheinlich ist es, dass  $X_{ij} = 1$  gilt, wenn wir schon wissen, dass das Pivot in diesem Bereich ist?

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

- Fall 2: Das Pivot ist zwischen  $a_i$  und  $a_j$ 
  - $a_i$  und  $a_j$  kommen in verschiedene Teilarrays
- Fall 3: Das Pivot ist  $a_i$  oder  $a_j$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  niemals verglichen!

$$X_{ij} = 0$$

Mit diesem Pivot werden  $a_i$  und  $a_j$  auf jeden Fall verglichen!

$$X_{ij} = 1$$



# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}\mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}\end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$j = i+1 \rightarrow j-i+1 = i+1-i+1 = 2$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}
 \end{aligned}$$

$j = i+2 \rightarrow j-i+1 = i+2-i+1 = 3$   
 $j = i+1 \rightarrow j-i+1 = i+1-i+1 = 2$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$\begin{array}{lll}
 j = n & \rightarrow j-i+1 = & n-i+1 \\
 \dots & \dots & \dots \\
 j = i+2 & \rightarrow j-i+1 = i+2-i+1 = & 3 \\
 j = i+1 & \rightarrow j-i+1 = i+1-i+1 = & 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$\begin{array}{lll}
 j = n & \rightarrow j-i+1 = & n-i+1 \\
 \dots & \dots & \dots \\
 j = i+2 & \rightarrow j-i+1 = i+2-i+1 = & 3 \\
 j = i+1 & \rightarrow j-i+1 = i+1-i+1 = & 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$\begin{array}{l}
 j = n \quad \rightarrow j-i+1 = \quad \quad \quad n-i+1 \\
 \dots \quad \quad \quad \dots \quad \quad \quad \dots \\
 j = i+2 \rightarrow j-i+1 = i+2-i+1 = 3 \\
 j = i+1 \rightarrow j-i+1 = i+1-i+1 = 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$



# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$\begin{array}{l}
 j = n \rightarrow j - i + 1 = n - i + 1 \\
 \dots \quad \dots \\
 j = i + 2 \rightarrow j - i + 1 = i + 2 - i + 1 = 3 \\
 j = i + 1 \rightarrow j - i + 1 = i + 1 - i + 1 = 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k}$$

$$\begin{array}{l}
 j = n \rightarrow j - i + 1 = n - i + 1 \\
 \dots \quad \dots \\
 j = i + 2 \rightarrow j - i + 1 = i + 2 - i + 1 = 3 \\
 j = i + 1 \rightarrow j - i + 1 = i + 1 - i + 1 = 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k}$$

$$\begin{array}{l}
 j = n \quad \rightarrow \quad j - i + 1 = \quad \quad \quad n - i + 1 \\
 \dots \quad \quad \quad \dots \quad \quad \quad \dots \\
 j = i + 2 \rightarrow j - i + 1 = i + 2 - i + 1 = 3 \\
 j = i + 1 \rightarrow j - i + 1 = i + 1 - i + 1 = 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1}$$

$$= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k}$$

$$\begin{array}{l}
 j = n \rightarrow j - i + 1 = \dots \quad n - i + 1 \\
 \dots \quad \dots \quad \dots \\
 j = i + 2 \rightarrow j - i + 1 = i + 2 - i + 1 = 3 \\
 j = i + 1 \rightarrow j - i + 1 = i + 1 - i + 1 = 2
 \end{array}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j - i + 1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 j = n &\rightarrow j-i+1 = n-i+1 \\
 \dots &\dots \\
 j = i+2 &\rightarrow j-i+1 = i+2-i+1 = 3 \\
 j = i+1 &\rightarrow j-i+1 = i+1-i+1 = 2
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k}
 \end{aligned}$$

$\frac{2}{k} > 0$ , mehr Summanden machen die Summe größer

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$



# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

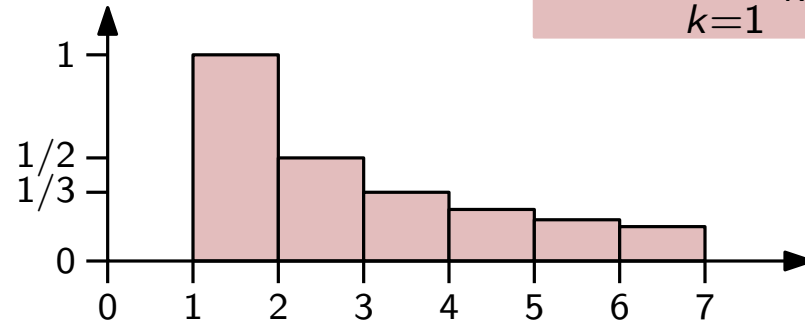
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

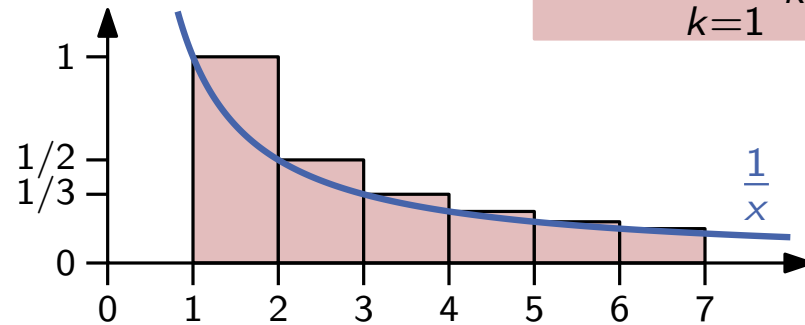
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

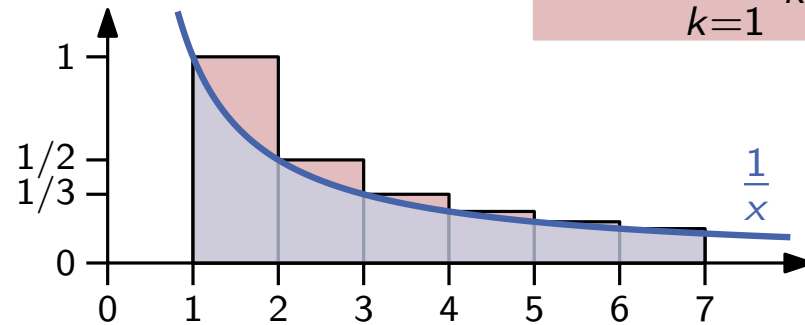
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\int_1^n \frac{1}{x} dx \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

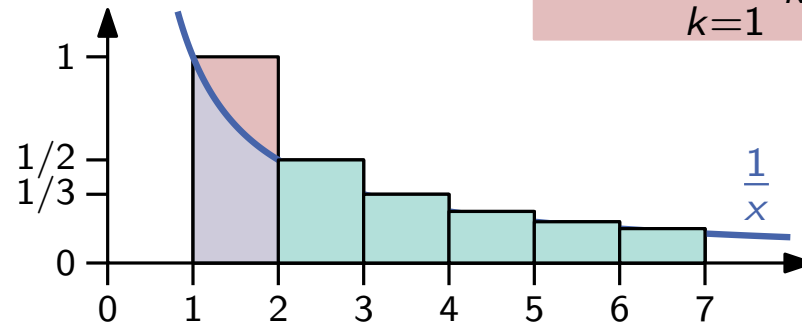
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\int_1^n \frac{1}{x} dx \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n$$

$$= H_n - 1$$

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

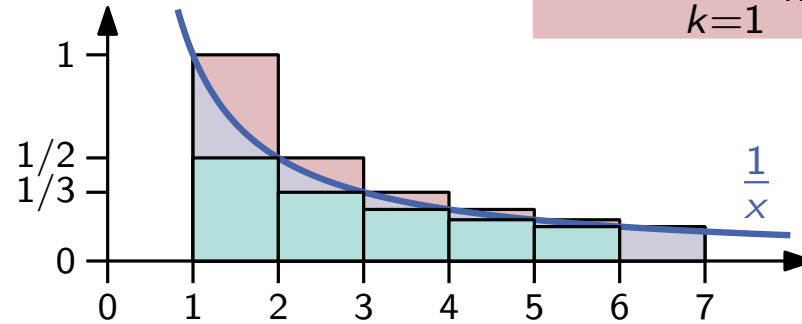
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\int_1^n \frac{1}{x} dx \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n$$

$= H_n - 1$

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

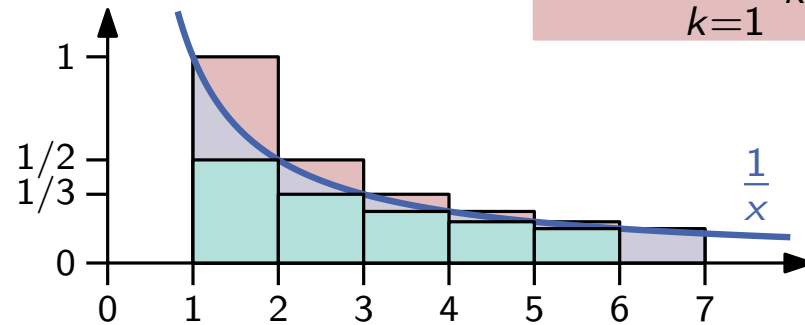
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\int_1^n \frac{1}{x} dx \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n$$

$$= H_n - 1$$

$$\sum_{k=2}^n \frac{1}{k} = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k+1}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

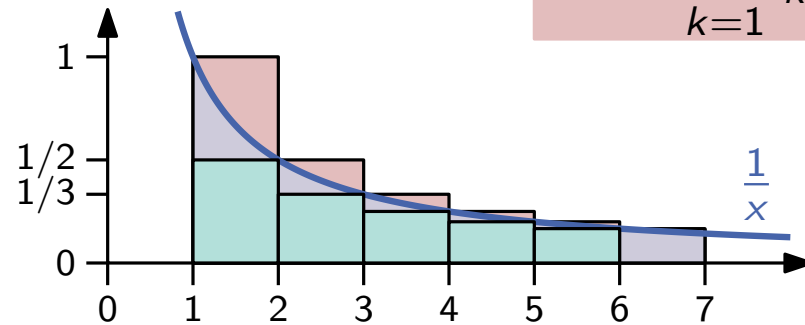


# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\int_1^n \frac{1}{x} dx \leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n$$

↓

$$= H_n - 1 \quad \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} \leq \int_1^n \frac{1}{x} dx$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

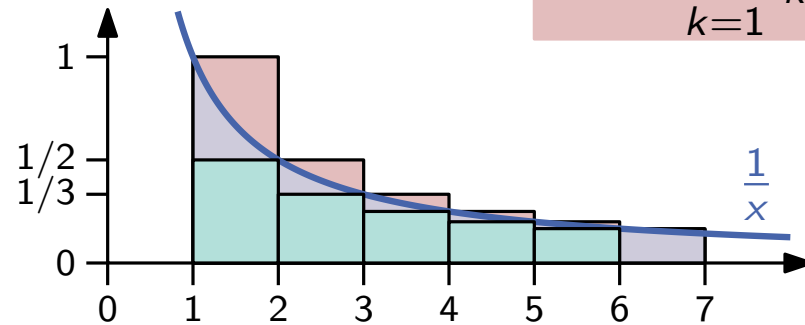
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k}$



$$\begin{aligned}
 \int_1^n \frac{1}{x} dx &\leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n \\
 &= H_n - 1 \\
 \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} &\leq \int_1^n \frac{1}{x} dx = [\ln(x)]_1^n = \ln(n)
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

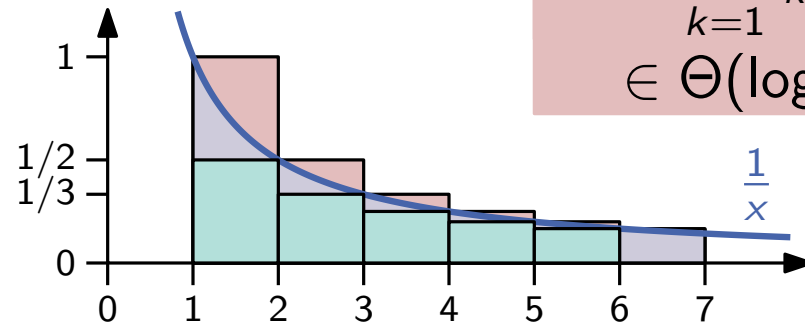
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \in \Theta(\log(n))$



$$\begin{aligned}
 \int_1^n \frac{1}{x} dx &\leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n \\
 &= H_n - 1 \\
 \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} &\leq \int_1^n \frac{1}{x} dx = [\ln(x)]_1^n = \ln(n)
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

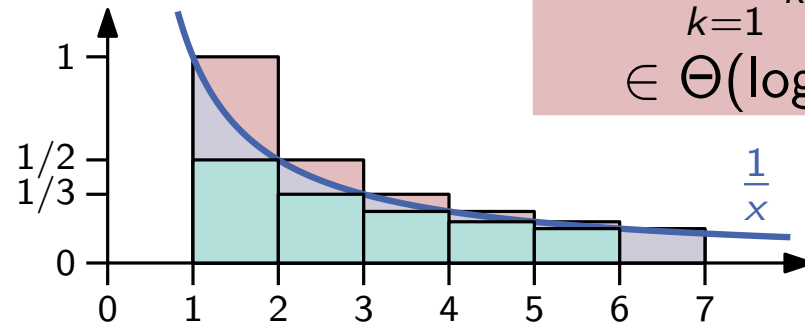
$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

# QuickSort – Pivots

$$\begin{aligned}
 \mathbb{E}[X] &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1] \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \frac{2}{j-i+1} \\
 &= \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^{n-i+1} \frac{2}{k} \\
 &\leq \sum_{i=1}^n \sum_{k=2}^n \frac{2}{k} \\
 &= n \cdot 2 \cdot \sum_{k=2}^n \frac{1}{k}
 \end{aligned}$$

## Harmonische Summe

■ Harmonische Zahl  $H_n = \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} \in \Theta(\log(n))$



$$\begin{aligned}
 \int_1^n \frac{1}{x} dx &\leq \sum_{k=1}^n \frac{1}{k} = H_n \\
 &= H_n - 1 \\
 \sum_{k=2}^n \frac{1}{k} &\leq \int_1^n \frac{1}{x} dx = [\ln(x)]_1^n = \ln(n)
 \end{aligned}$$

$$\mathbb{E}[X] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \Pr[X_{ij} = 1]$$

$$\Pr[X_{ij} = 1] = \frac{2}{j-i+1}$$

### Theorem

Auf jeder Eingabe der Länge  $n$  benötigt QuickSort mit zufälligen Pivots erwartet  $\leq 2n \ln(n)$  Vergleiche.

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen **Schlüssel**: Was ist der zugehörige **Wert**?

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Password** auch zu dem **Nutzer** gehört.

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<u>Nutzername</u>	<u>Passwort</u>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort



# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<u>Nutzername</u>	<u>Passwort</u>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer `PickleRick` versucht sich mit dem Passwort `dieNutella` einzuloggen

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer **PickleRick** versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer **PickleRick** versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer **PickleRick** versucht sich mit dem Passwort **dieNutella** einzuloggen

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<u>Nutzername</u>	<u>Passwort</u>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$



# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer **PickleRick** versucht sich mit dem Passwort `dieNutella` einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer **PickleRick** versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

Nutzername	Passwort
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer **PickleRick** versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	b@n@n@
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$



# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkee	b@n@n@
<b>e10nMarsk</b>	B1GR0CK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	b@n@n@
8	
9	
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	b@n@n@
8	
9	B1GROCK3T
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
Stewdent23	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	b@n@n@
8	
9	B1GROCK3T
10	dasNutella
⋮	

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hashing

- Wir haben eine Menge von Paaren bestehend aus **Schlüsseln** und **Werten**
- Gegeben einen Schlüssel: Was ist der zugehörige Wert?
- Beispiel: Wenn sich ein Nutzer zum Online-Banking einloggen will, muss geprüft werden, ob das eingegebene **Passwort** auch zu dem **Nutzer** gehört.

<b>Nutzername</b>	<b>Passwort</b>
PickleRick	dasNutella
Monkeee	b@n@n@
e10nMarsk	B1GROCK3T
<b>Stewdent23</b>	hunter2
ProfB	passwort
12345678910	

- Nutzer PickleRick versucht sich mit dem Passwort dieNutella einzuloggen
- Datenstruktur: **Hashtabelle**
  - **Array** hält die Werte (die Einträge heißen **Buckets**)
  - **Hashfunktion**  $h$  bildet Schlüssel auf Arrayindex ab
- Idee:  $h$  bildet Nutzernamen auf Länge des Namens ab

0	
1	
⋮	
7	b@n@n@
8	
9	B1GROCK3T
10	dasNutella
⋮	

**Hash-Kollision!**  
 $h(x) = h(y)$  obwohl  $x \neq y$

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$



# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)  
Aber bitte nicht alle!

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)
  - **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)
  - **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!
    - Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)
  - **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!
    - Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit
    - unabhängig von vorher eingefügten Schlüsseln

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann **mehrere** Werte halten (Liste oder Array)
  - **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!
    - Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit
    - unabhängig von vorher eingefügten Schlüsseln

Ist die Anzahl eingefügter (Key, Value)-Paare linear in  $m$ , landen davon *erwartet* nur konstant viele in einem Bucket.

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen
  - **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)
  - **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!
    - Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit
    - unabhängig von vorher eingefügten Schlüsseln

Ist die Anzahl eingefügter (Key, Value)-Paare linear in  $m$ , landen davon *erwartet* nur konstant viele in einem Bucket.

Was wenn mehr eingefügt werden?

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen

- **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)

- **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!

- Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit

- unabhängig von vorher eingefügten Schlüsseln

Ist die Anzahl eingefügter (Key, Value)-Paare linear in  $m$ , landen davon *erwartet* nur konstant viele in einem Bucket.

Was wenn mehr eingefügt werden?

- **dynamisch wachsende Hashtabelle**: Wenn mehr als  $m$  Elemente eingefügt wurden, verdopple die Arraygröße

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $h: U \rightarrow [0, m)$

- $m$ : Größe des Arrays
- $|U| \gg m$

# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen

- **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)

- **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!

- Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit
    - unabhängig von vorher eingefügten Schlüsseln

Ist die Anzahl eingefügter (Key, Value)-Paare linear in  $m$ , landen davon *erwartet* nur konstant viele in einem Bucket.

Was wenn mehr eingefügt werden?

- **dynamisch wachsende Hashtabelle**: Wenn mehr als  $m$  Elemente eingefügt wurden, verdopple die Arraygröße

- **Random Choice**: Bei Verdopplung wird zufällig eine neue Hashfunktion gewählt

Adversary die Tour vermasseln

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$



# Hash-Kollisionen

- Es existiert keine Hash-Funktion die im Worst Case gut ist
- Adversary: Baut Instanz wo  $|U|/m$  Schlüssel auf den selben Bucket abgebildet werden
- Idee: Kollisionen in Kauf nehmen

- **Chaining**: Bucket kann mehrere Werte halten (Liste oder Array)

- **Simple Uniform Hashing Assumption** ← Aber bitte nicht alle!

- Jeder Schlüssel landet in jedem der Buckets mit der gleichen Wahrscheinlichkeit

- unabhängig von vorher eingefügten Schlüsseln

Ist die Anzahl eingefügter (Key, Value)-Paare linear in  $m$ , landen davon *erwartet* nur konstant viele in einem Bucket.

Was wenn mehr eingefügt werden?

- **dynamisch wachsende Hashtabelle**: Wenn mehr als  $m$  Elemente eingefügt wurden, verdopple die Arraygröße

- **Random Choice**: Bei Verdopplung wird zufällig eine neue Hashfunktion gewählt

Adversary die Tour vermasseln

## Woher?

### Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in erwartet und amortisiert konstanter Zeit ausführen.

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in erwartet und **amortisiert** konstanter Zeit ausführen. (bezüglich Folge ausgeführter Operationen)

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in erwartet und amortisiert konstanter Zeit ausführen. (bezüglich Folge ausgeführter Operationen)

## Key Takeaways

### Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in erwartet und amortisiert konstanter Zeit ausführen. (bezüglich Folge ausgeführter Operationen)

## Key🤔 Takeaways

### Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in **erwartet** und **amortisiert** konstanter Zeit ausführen. (bezüglich Folge ausgeführter Operationen)

## Key🤔 Takeaways

- **ERWARTET**

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$



# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in **erwartet** und **amortisiert** konstanter Zeit ausführen. (bezüglich Folge ausgeführter Operationen)

## Key🤔 Takeaways

- **ERWARTET**
- funktioniert in der Praxis richtig gut

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

# Universelle Hashfamilie

- Menge  $H$  von Hashfunktionen bei der für alle  $k_1 \neq k_2 \in U$  und ein zufälliges  $h \in H$  gilt:  
 $\Pr[h(k_1) = h(k_2)] \leq 1/m$
- $\Rightarrow$  Mit zufällig gewähltem  $h \in H$  kollidieren zwei Schlüssel höchstens mit Wahrscheinlichkeit  $1/m$ .

## Theorem

Eine Hashtabelle kann die Operationen Einfügen, Suchen und Löschen in **erwartet** und **amortisiert** konstanter Zeit ausführen. (bezüglich Folge ausgeführter Operationen)

## Key🤔 Takeaways

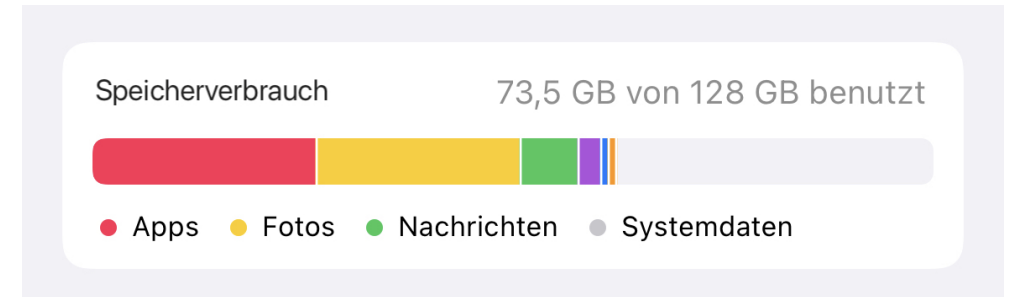
- **ERWARTET**
- funktioniert in der Praxis richtig gut
- selbst eine Hashfunktion zu entwerfen ist typischerweise keine gute Idee...

## Notation

- $U$ : Universum möglicher Schlüssel
- $m$ : Größe des Arrays
- $h: U \rightarrow [0, m)$
- $|U| \gg m$

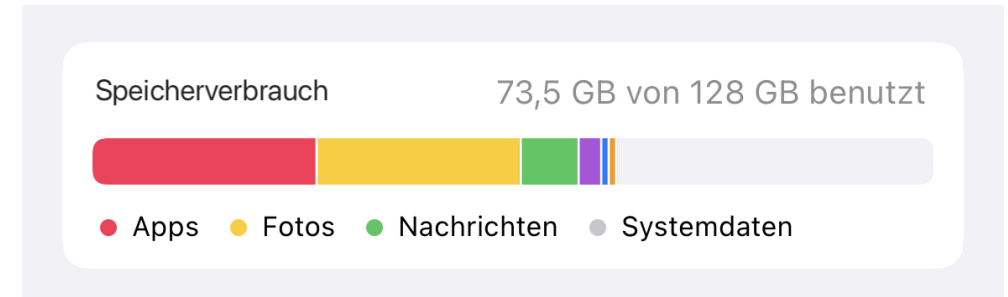
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp



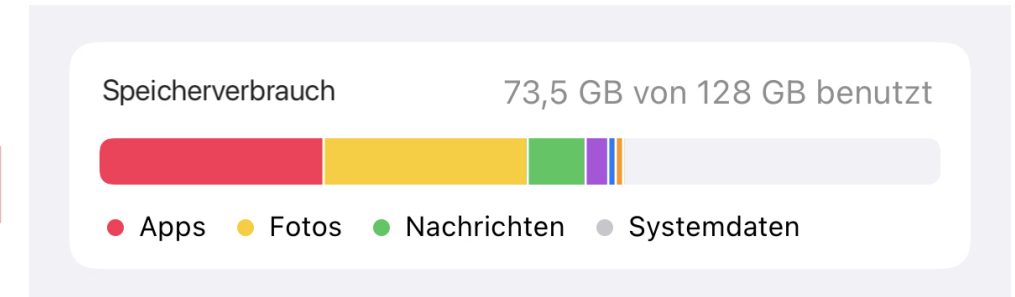
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein



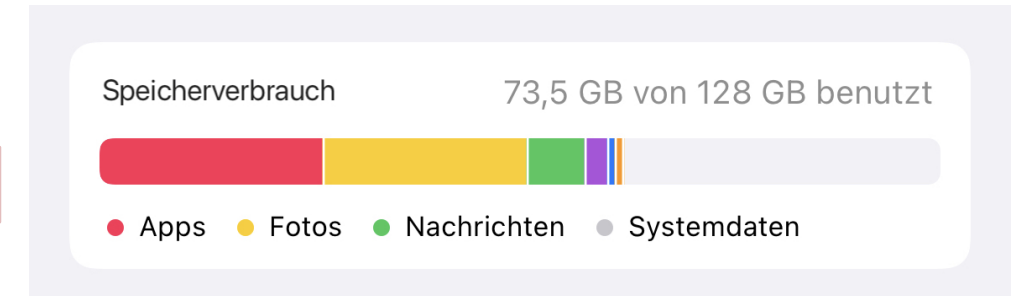
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**



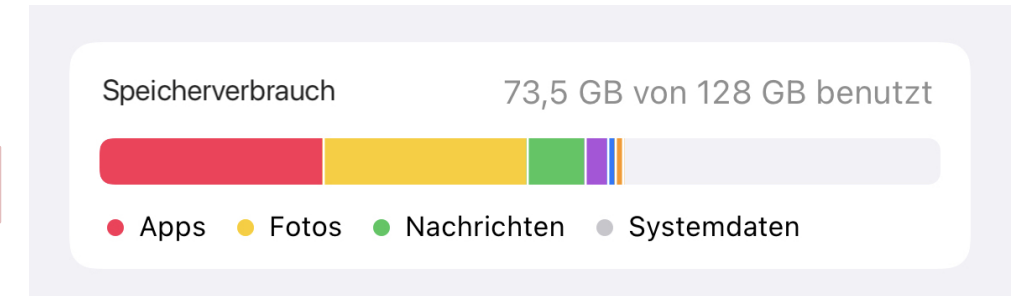
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?



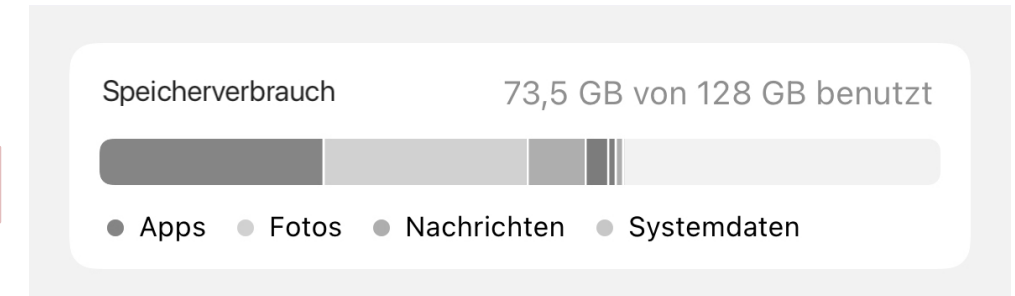
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen

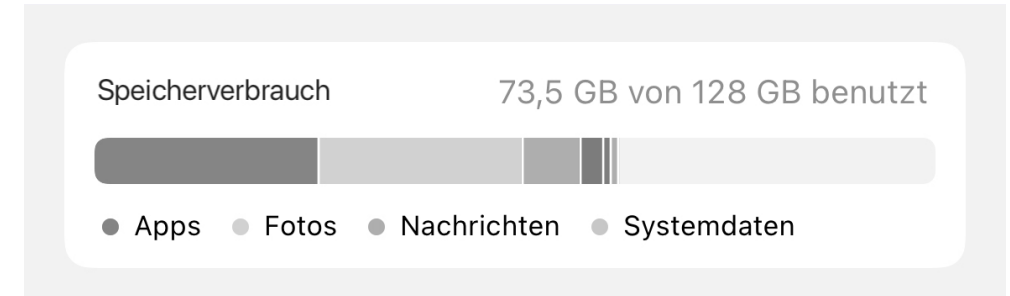




# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$

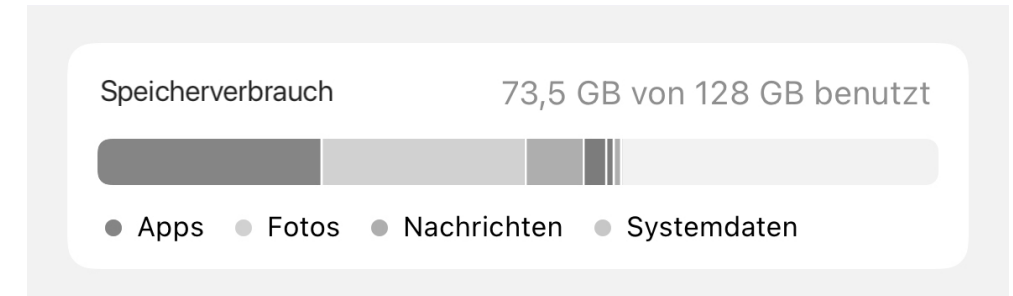
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array

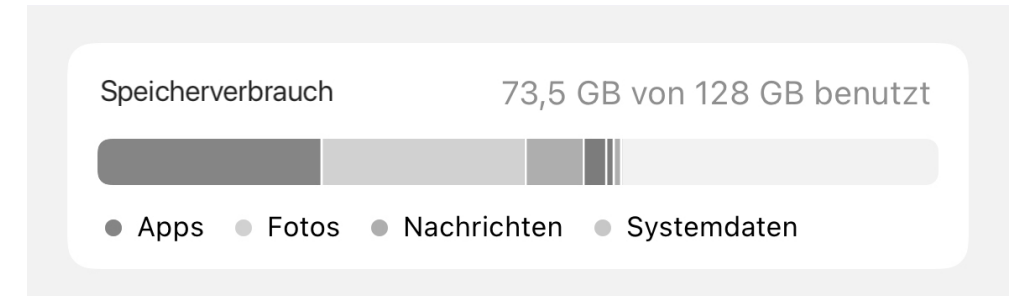
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

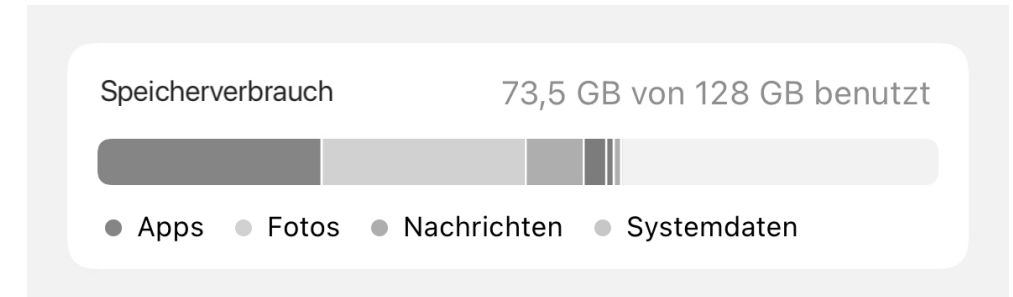
- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



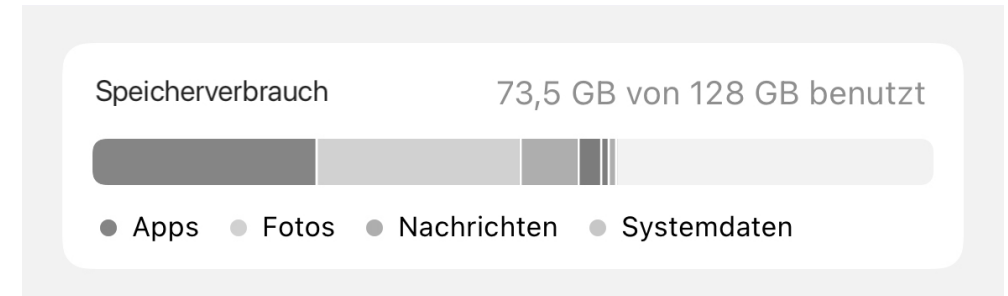
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



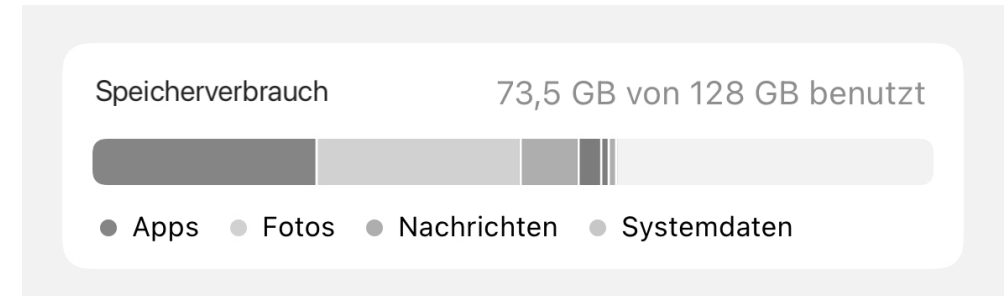
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



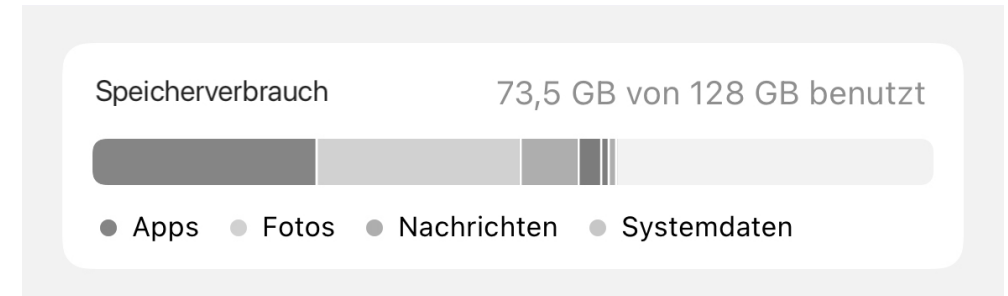
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



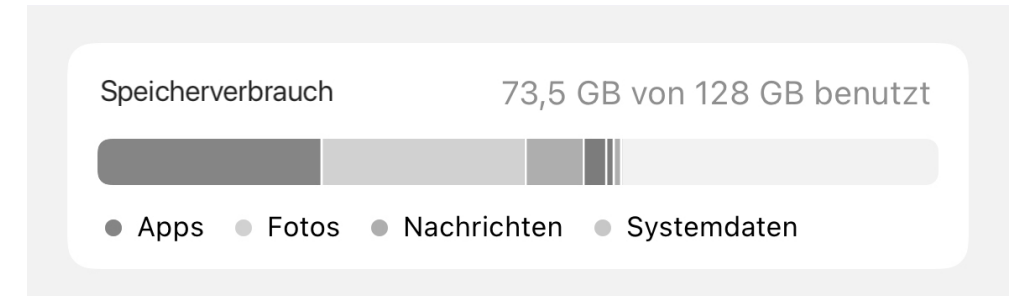
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

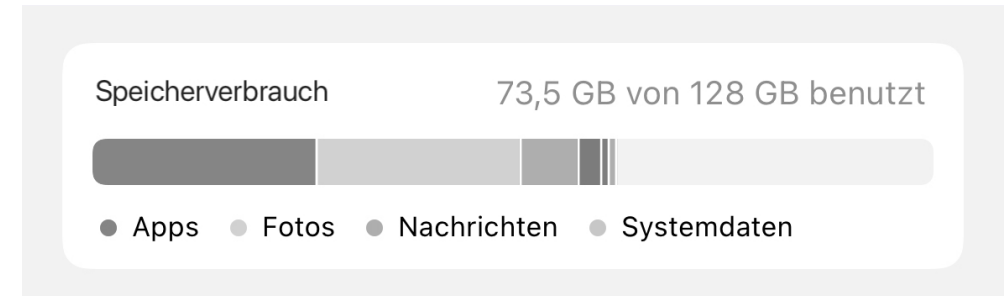
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57





# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



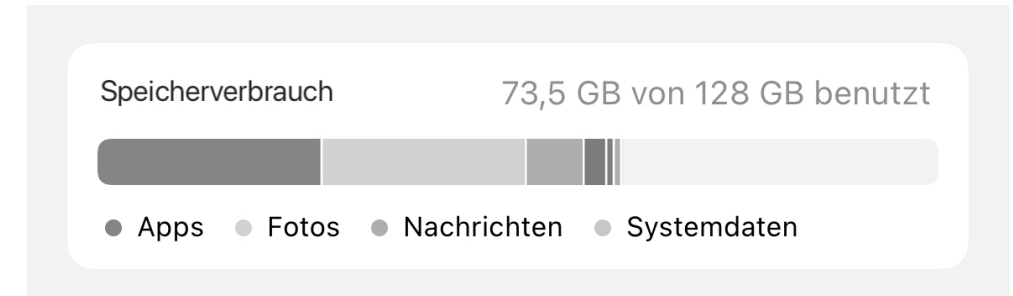
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit



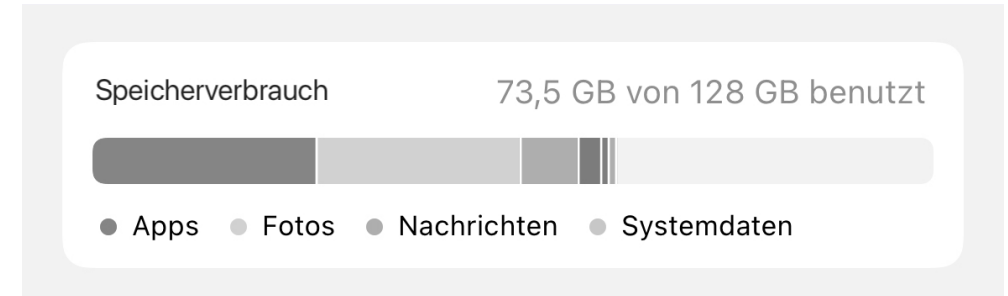
57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit
- Nicht billig, aber nehmen wir in Kauf



57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

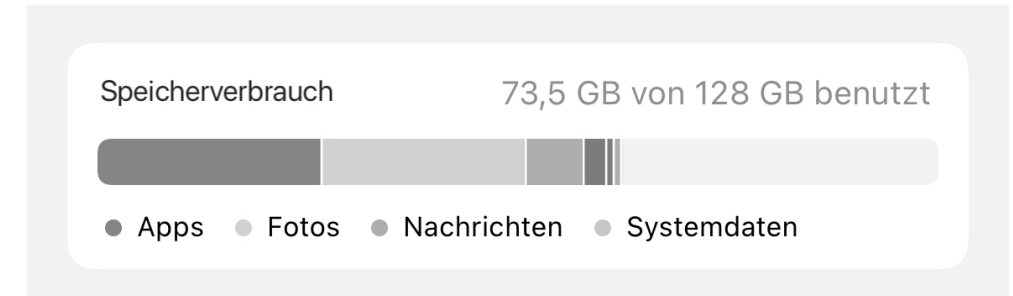


# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit
- Nicht billig, aber nehmen wir in Kauf

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



■ Sei  $n$  die Anzahl der Bilder

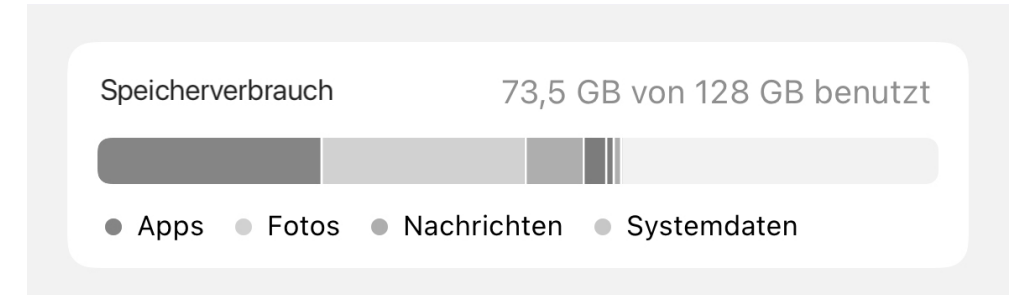
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit
- Nicht billig, aber nehmen wir in Kauf

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



- Sei  $n$  die Anzahl der Bilder
- Vergleiche jedes Bild mit jedem anderen

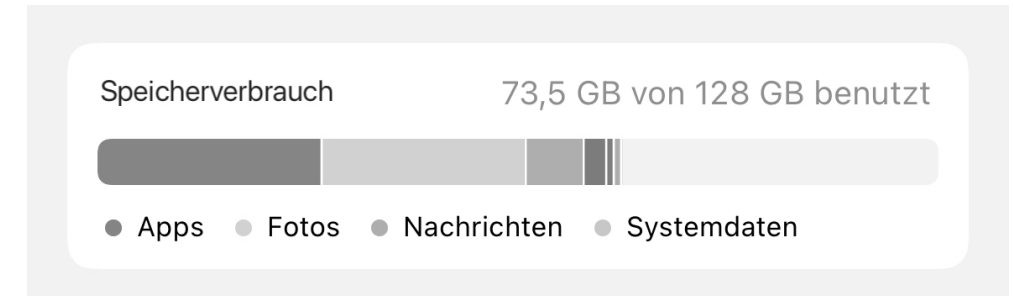
# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit
- Nicht billig, aber nehmen wir in Kauf

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



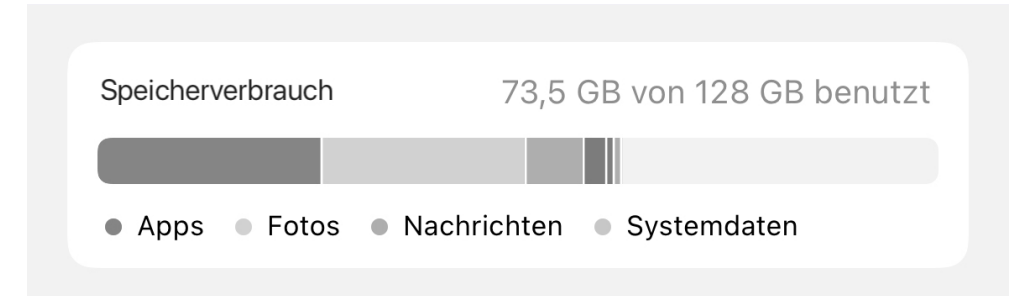
- Sei  $n$  die Anzahl der Bilder
- Vergleiche jedes Bild mit jedem anderen
- $\Theta(n^2)$  nicht-billige Vergleiche...

# Platz sparen

- Problem: Smartphone-Speicher ist knapp
  - Fotos nehmen einen Großteil ein
- Idee: Platz sparen durch Löschen von **Duplikaten**
- Wie finden wir Duplikate?
- Annahme: Smartphone aus dem 18. Jhr.
  - Fotos in Graustufen
  - Wert eines Pixels in  $\{0, \dots, 255\}$
  - Ein Foto ist ein 2D Array
  - Duplikat: Arraywerte sind gleich
- Für zwei Fotos: Iteriere Pixel und überprüfe auf Gleichheit
- Nicht billig, aber nehmen wir in Kauf

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



- Sei  $n$  die Anzahl der Bilder
- Vergleiche jedes Bild mit jedem anderen
- $\Theta(n^2)$  nicht-billige Vergleiche...

**Das muss besser gehen...**

# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos

$$h(\quad)$$



# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets

$h( \quad )$

⋮	
⋮	

# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets

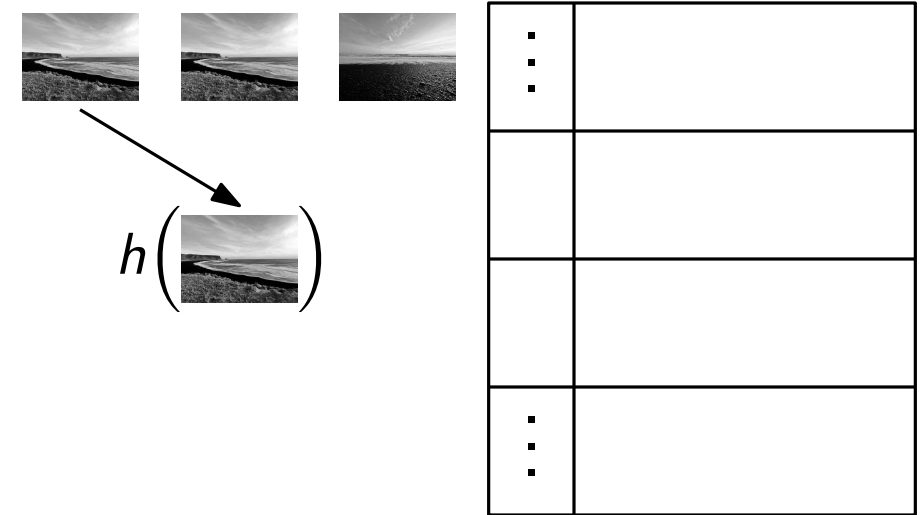


$$h(\quad)$$

⋮	
⋮	

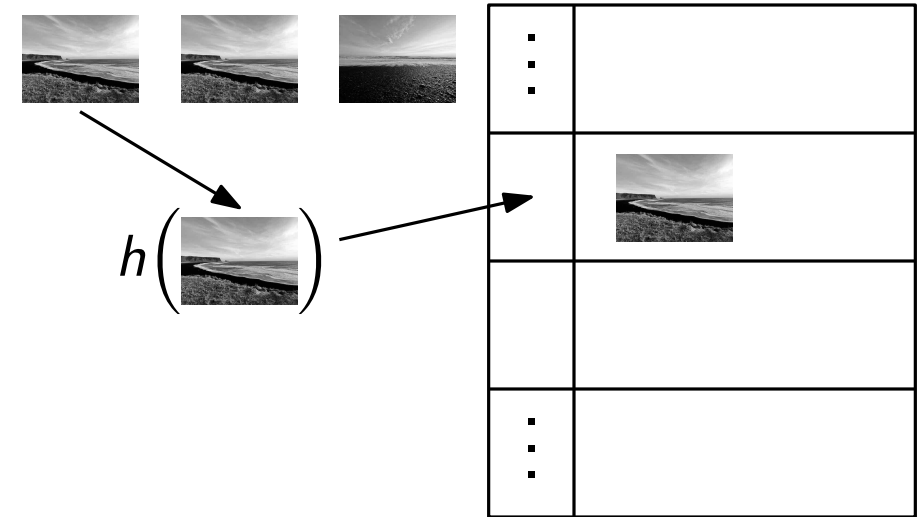
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets



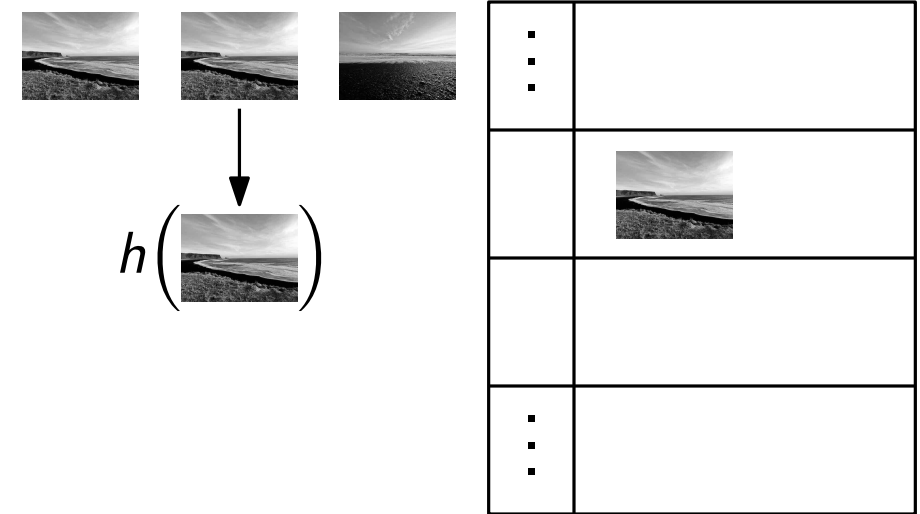
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets



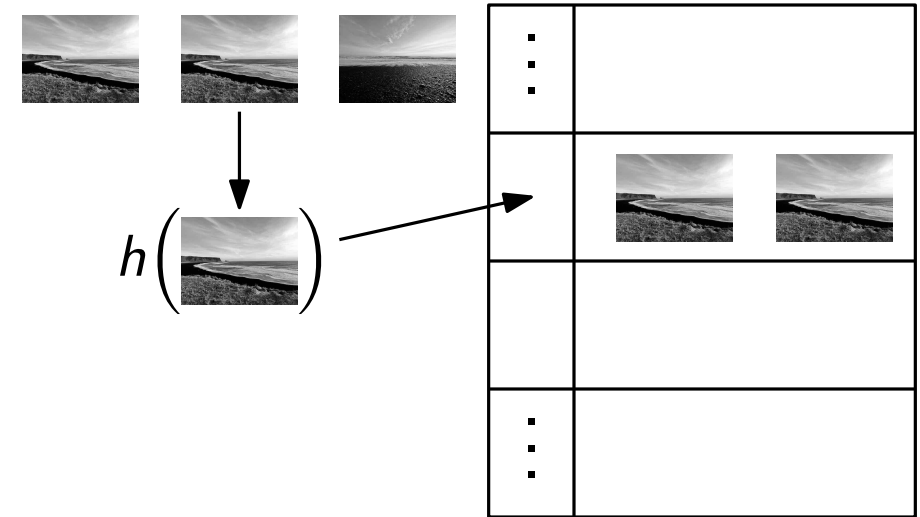
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets



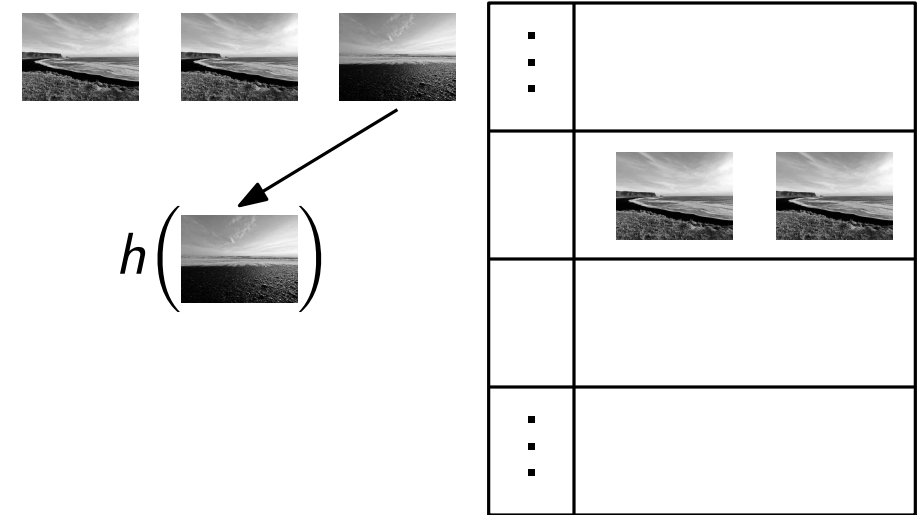
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets



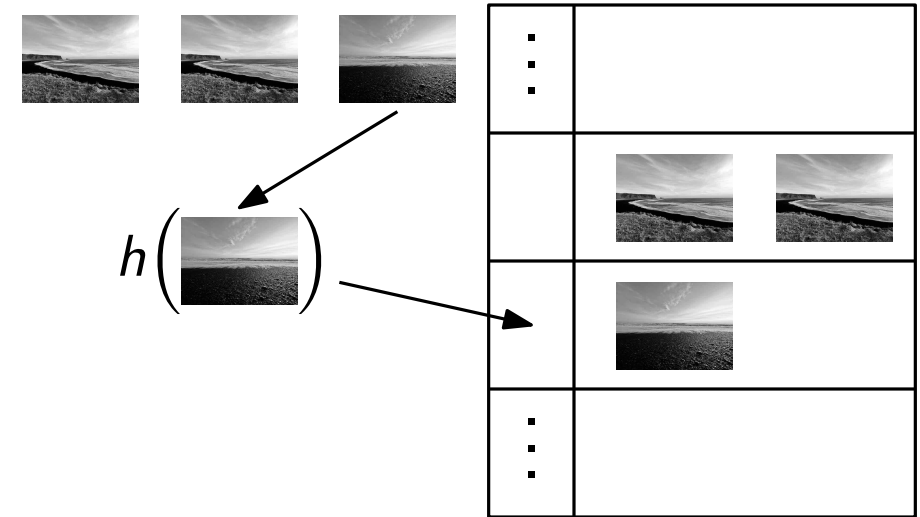
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets



# Fotos hashen

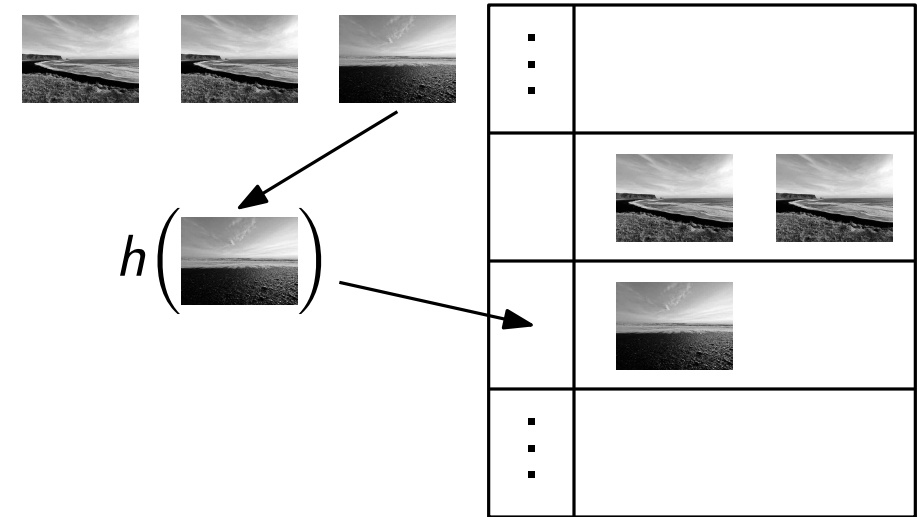
- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket





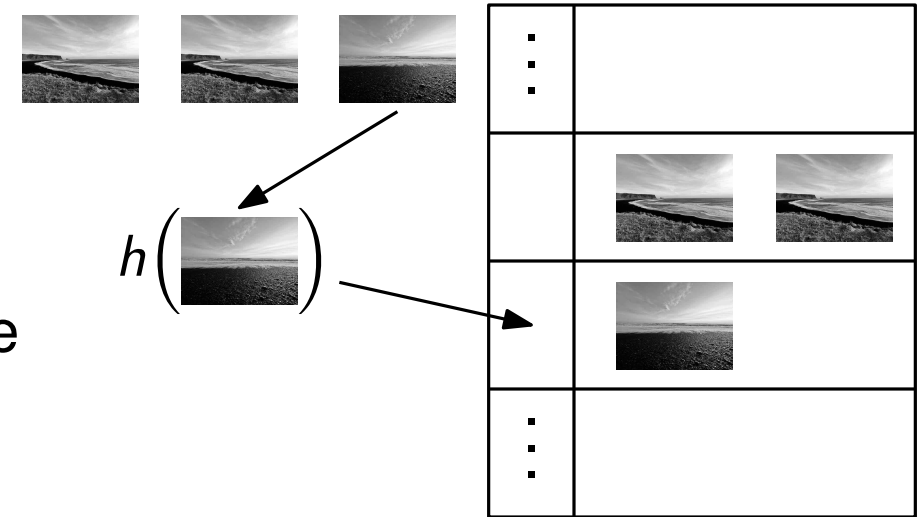
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?



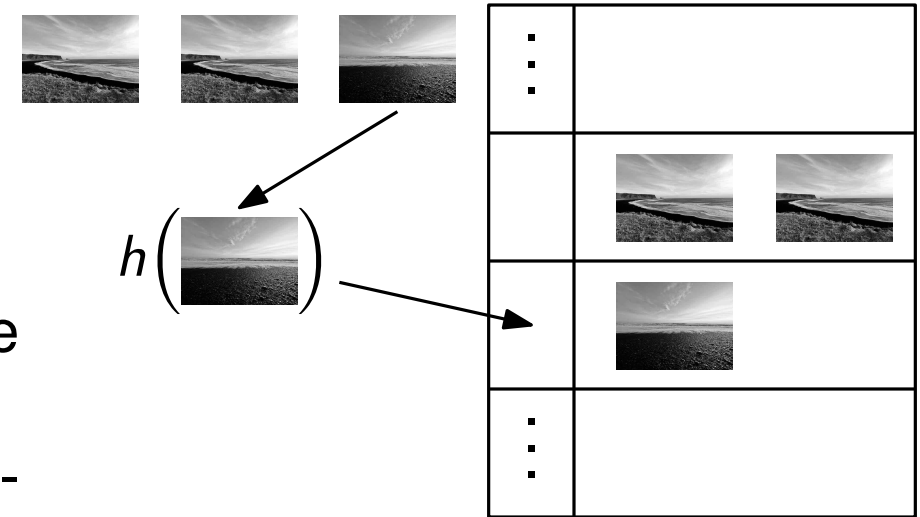
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben



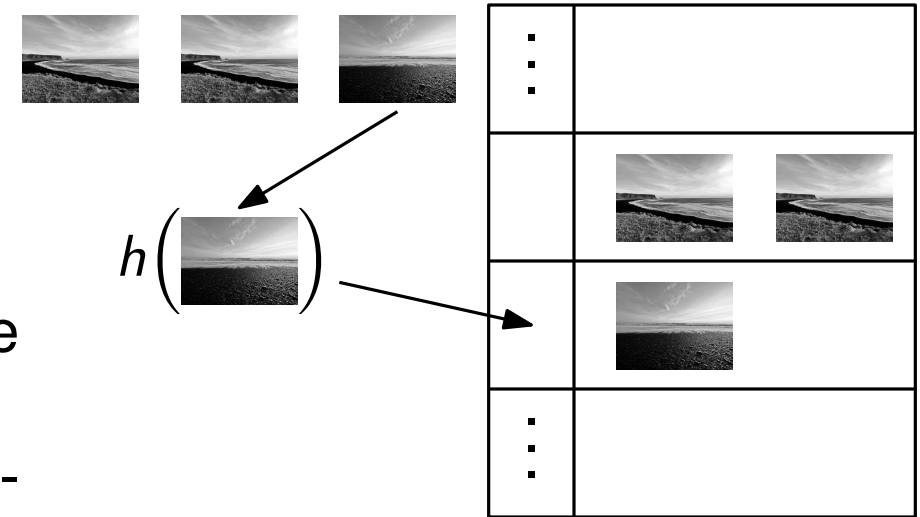
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos



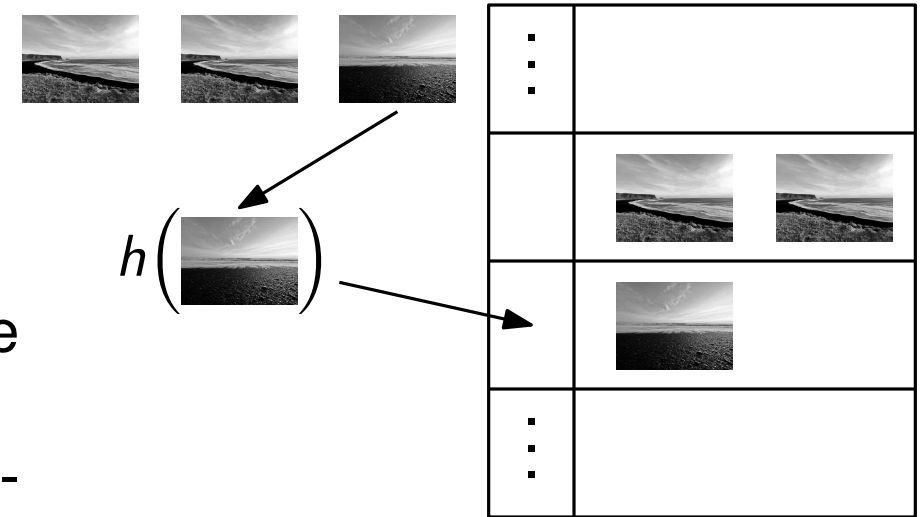
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!



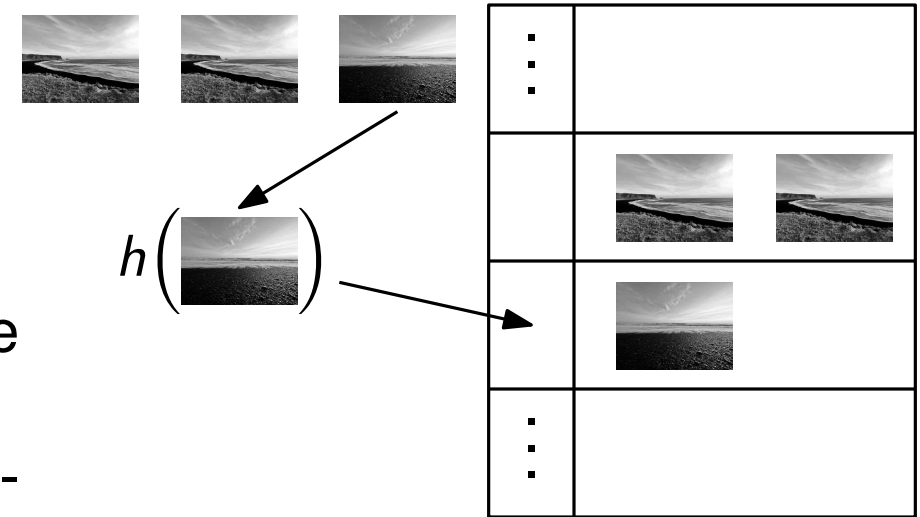
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!
- **Problem:** Wie hashen wir ein Foto?



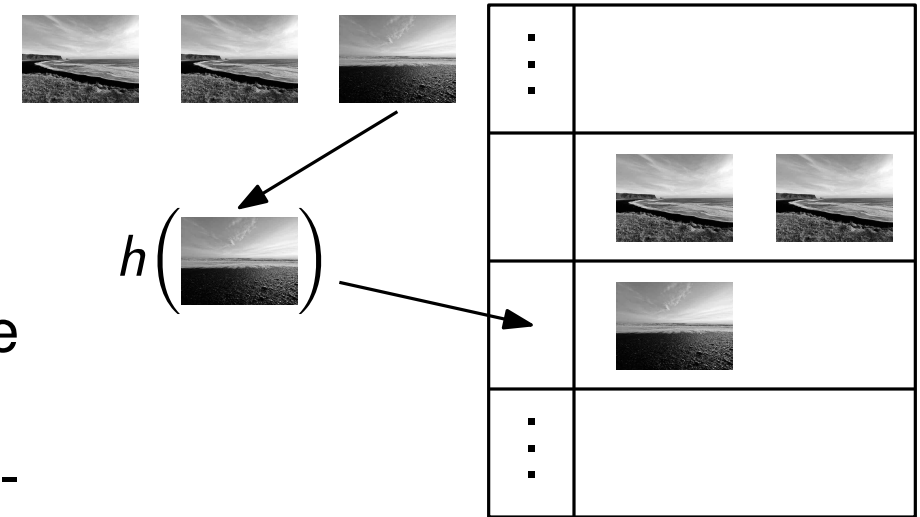
# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!
- **Problem:** Wie hashen wir ein Foto?
- **Idee:** Summe der Pixelwerte



# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!
- **Problem:** Wie hashen wir ein Foto?
- **Idee:** Summe der Pixelwerte

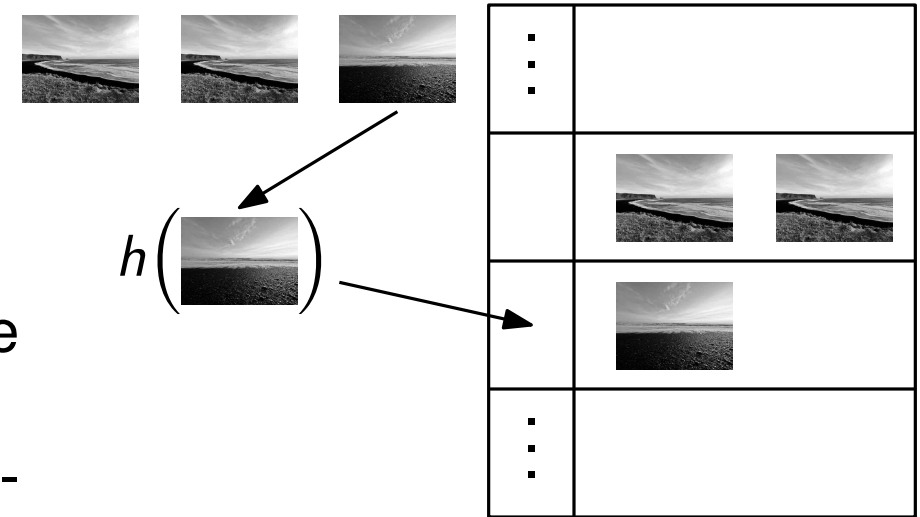


$$h\left(\text{Foto}\right) = 57 + 57 + 111 + 217 + \dots$$

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!
- **Problem:** Wie hashen wir ein Foto?
- **Idee:** Summe der Pixelwerte
  - zwei Mal das gleiche Foto gibt den gleichen Wert



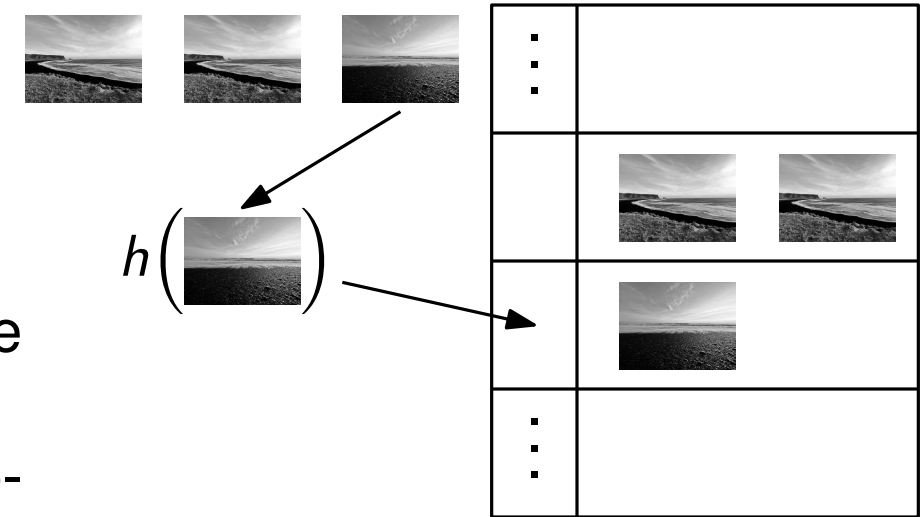
$$h\left(\text{Foto}\right) = 57 + 57 + 111 + 217 + \dots$$

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57



# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!
- **Problem:** Wie hashen wir ein Foto?
- **Idee:** Summe der Pixelwerte
  - zwei Mal das gleiche Foto gibt den gleichen Wert
  - Duplikate landen im gleichen Bucket

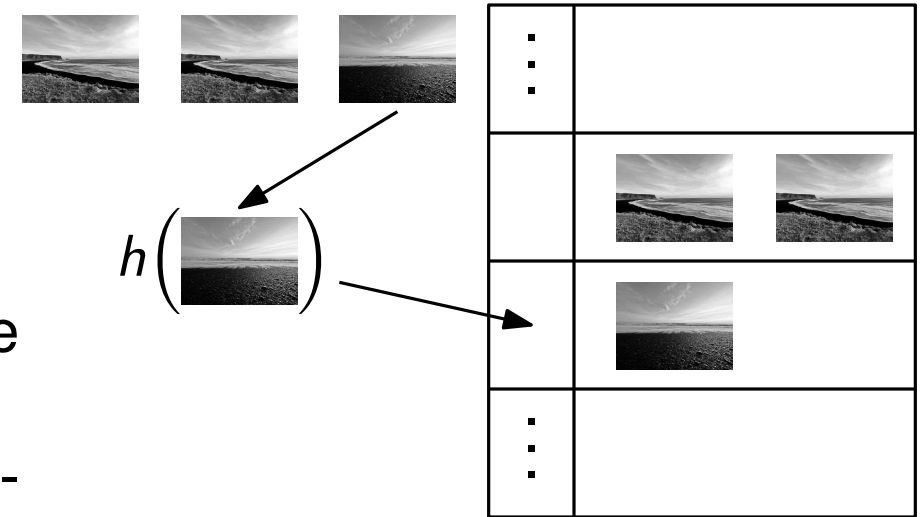


$$h\left(\text{Foto}\right) = 57 + 57 + 111 + 217 + \dots$$

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

# Fotos hashen

- Definiere eine Hashfunktion  $h$  für Fotos
- Packe Fotos in Array von Buckets
- Vergleiche nur Fotos im selben Bucket
- Hash-Kollisionen?
  - Kein Problem, solange wir erwartet konstant viele Fotos pro Bucket haben
- Vergleiche jedes der  $n$  Fotos mit erwartet konstant vielen anderen Fotos
- Erwartete Laufzeit linear anstatt quadratisch!
- **Problem:** Wie hashen wir ein Foto?
- **Idee:** Summe der Pixelwerte
  - zwei Mal das gleiche Foto gibt den gleichen Wert
  - Duplikate landen im gleichen Bucket
  - $h$  bildet auf große Wert ab  $\rightarrow$  benutze zweite Hashfunktion um Indizes zu erhalten



$$h\left(\text{Foto}\right) = 57 + 57 + 111 + 217 + \dots$$

57	57	111	217	111
57	111	217	111	57
111	111	217	111	57
111	217	217	111	57
111	217	217	111	57

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ...

# Fotos hashen

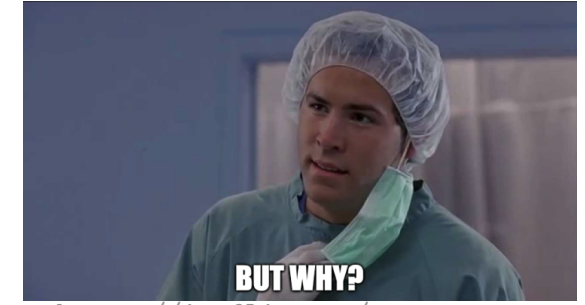
- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



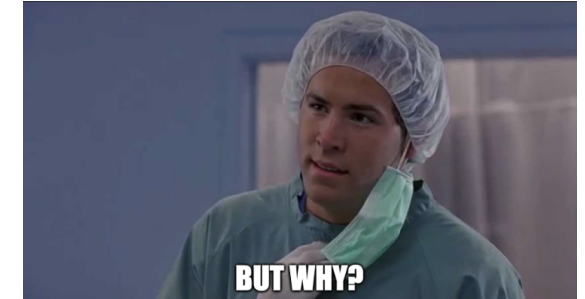
<https://imgflip.com/memegenerator>

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

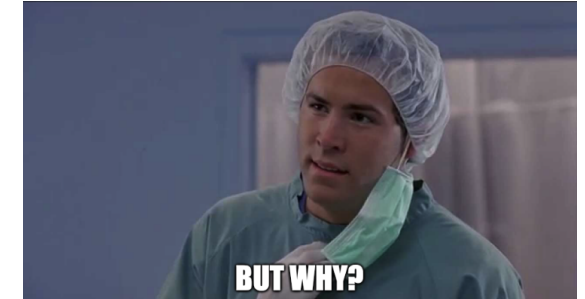
# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>



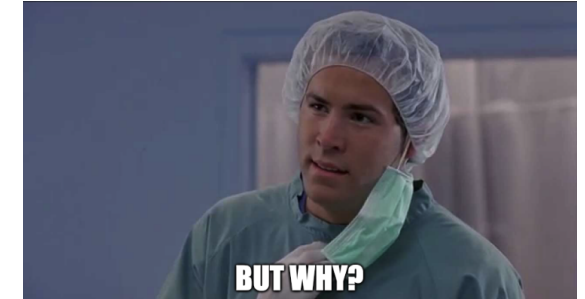
# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

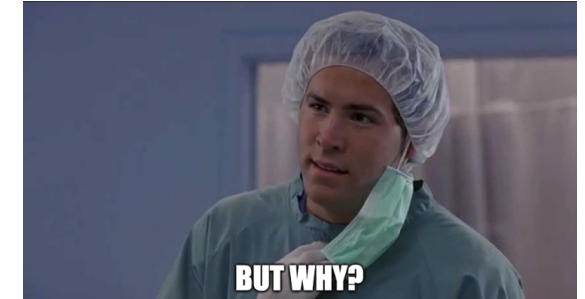
# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

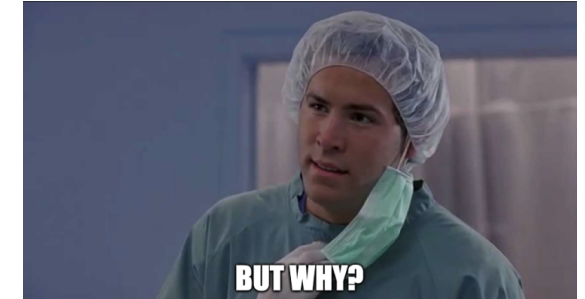
# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

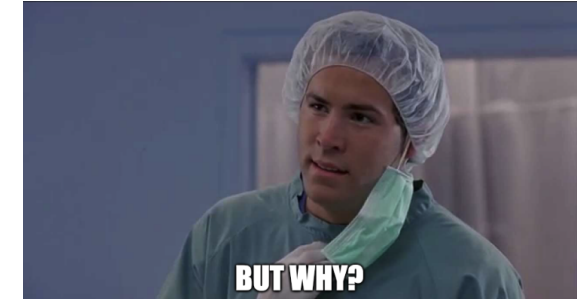
# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>

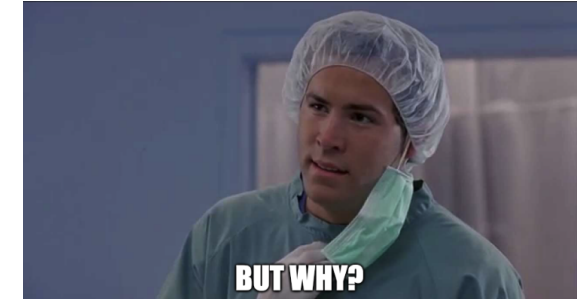


<https://imgflip.com/memegenerator>

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

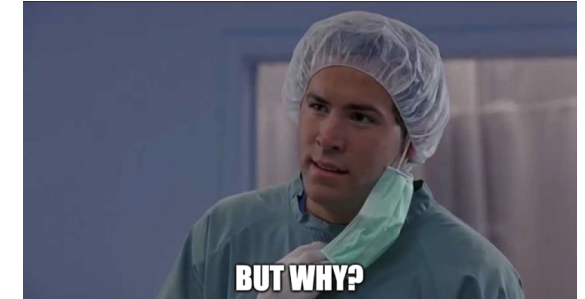
- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

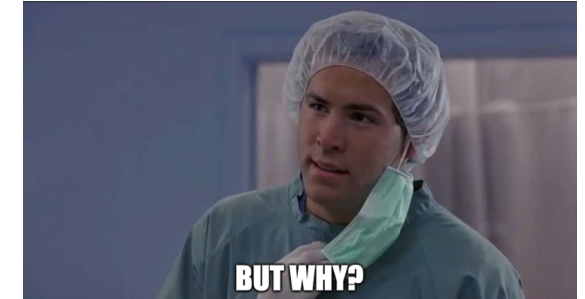
- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i \quad \left| \quad \begin{array}{l} \text{Verteilung} \\ \text{von } X \end{array} \right.$$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

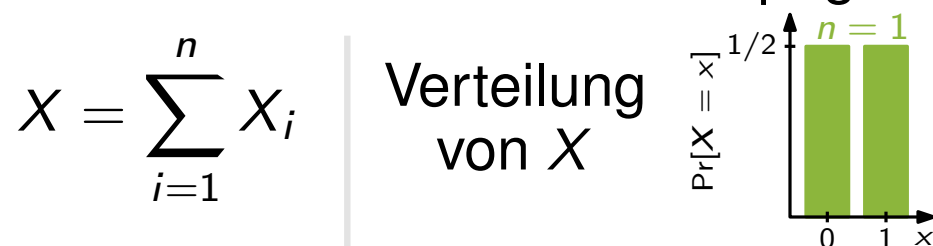
<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

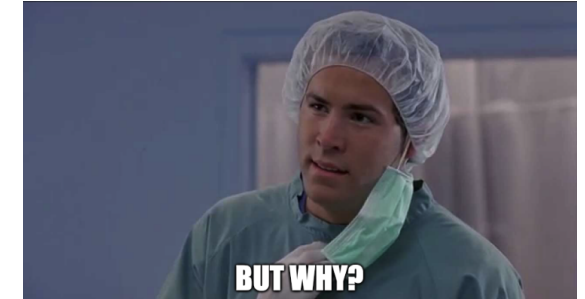
- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?



# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



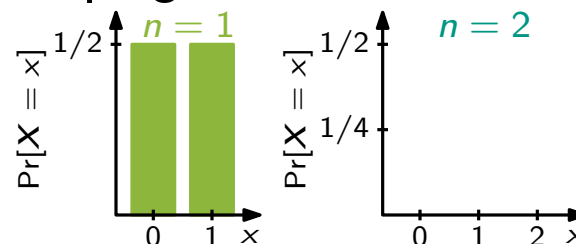
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

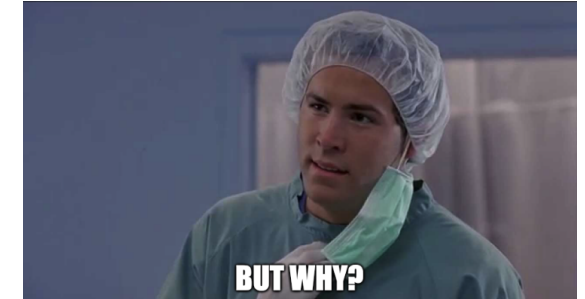




# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



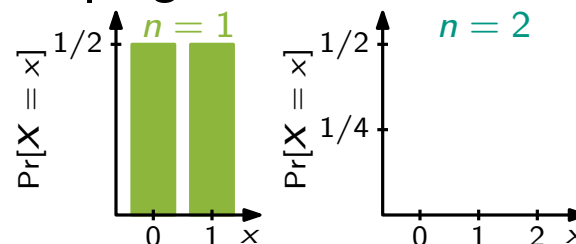
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

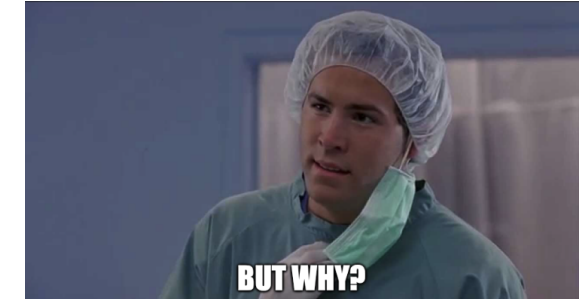


$$X_1 = 0, X_2 = 0 \Rightarrow X = 0$$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



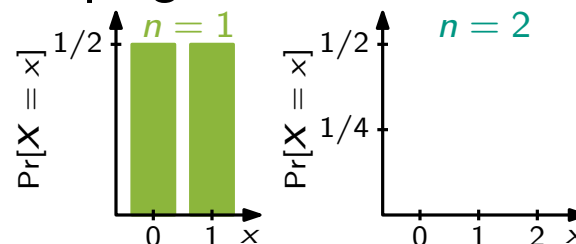
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$



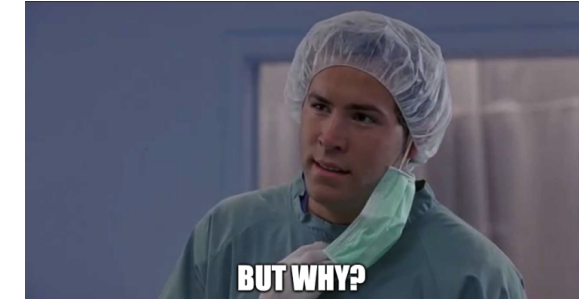
$$X_1 = 0, X_2 = 0 \Rightarrow X = 0$$

$$X_1 = 0, X_2 = 1 \Rightarrow X = 1$$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



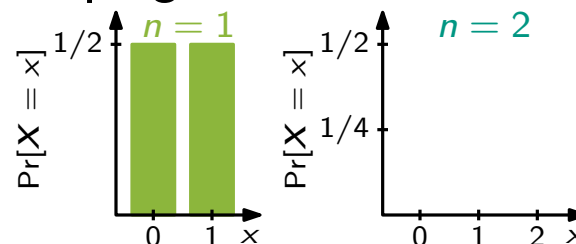
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

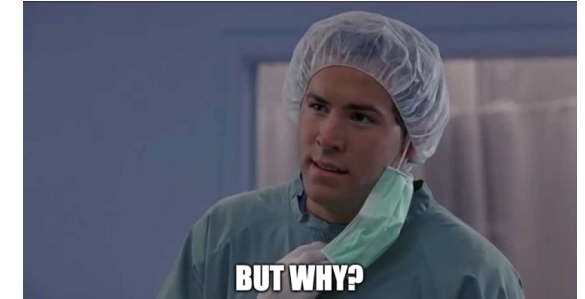


$$\begin{array}{l} X_1 = 0, X_2 = 0 \Rightarrow X = 0 \\ X_1 = 0, X_2 = 1 \Rightarrow X = 1 \\ X_1 = 1, X_2 = 0 \Rightarrow X = 1 \end{array}$$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



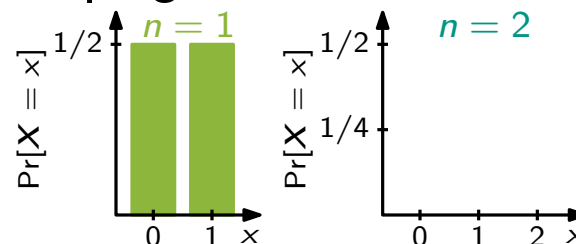
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

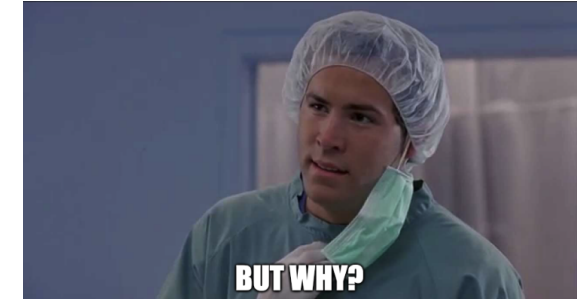


$X_1 = 0$	$X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 0$
$X_1 = 0$	$X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1$	$X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1$	$X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 2$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



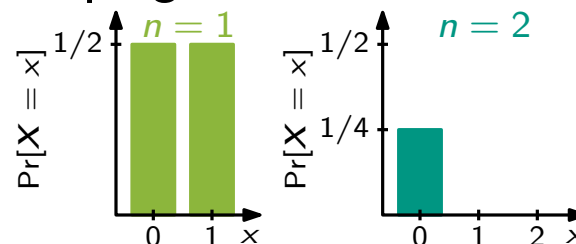
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

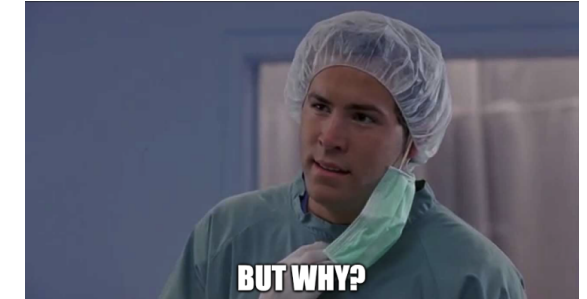


$X_1 = 0$	$X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 0$
$X_1 = 0$	$X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1$	$X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1$	$X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 2$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



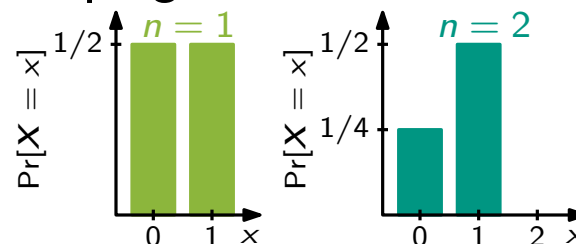
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

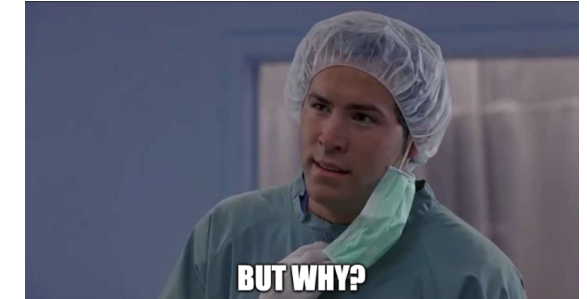


$X_1 = 0, X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 0$
$X_1 = 0, X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1, X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1, X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 2$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



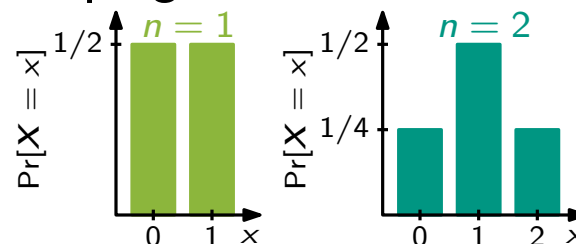
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

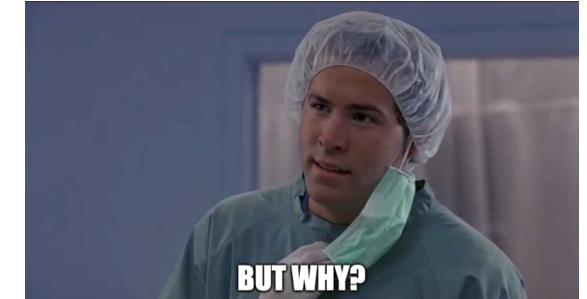


$X_1 = 0$	$X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 0$
$X_1 = 0$	$X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1$	$X_2 = 0$	$\Rightarrow X = 1$
$X_1 = 1$	$X_2 = 1$	$\Rightarrow X = 2$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



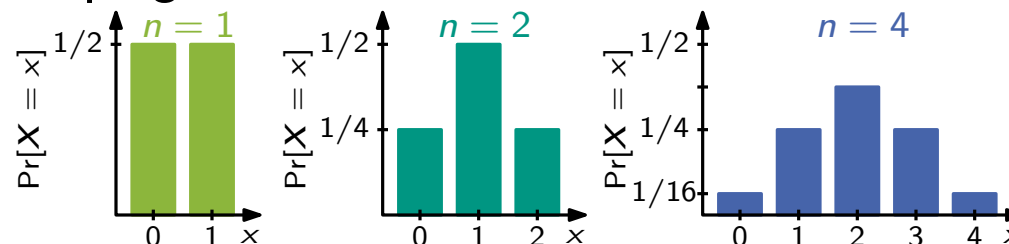
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

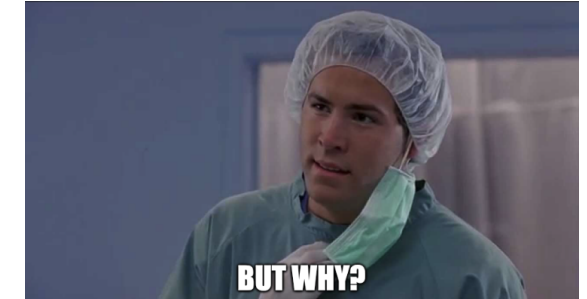




# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



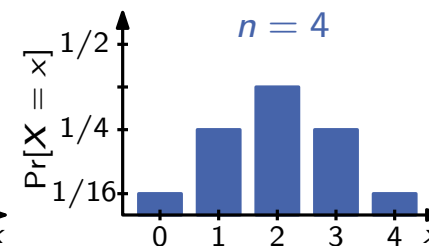
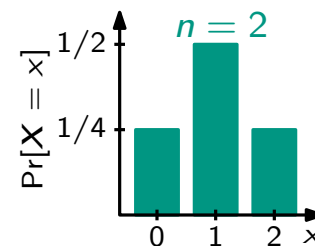
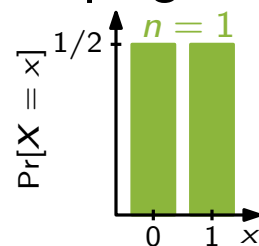
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

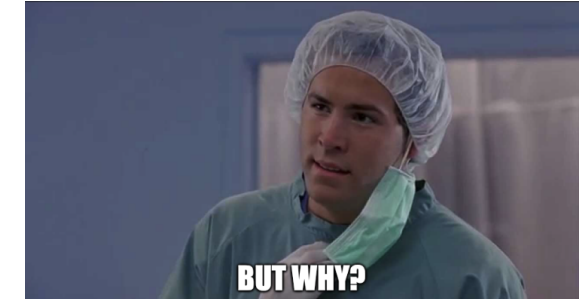


$$Pr[X = x] =$$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



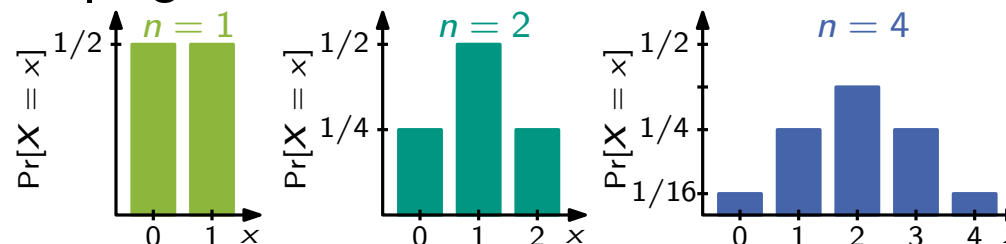
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$

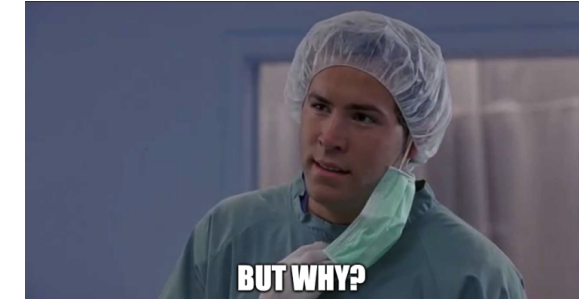


$Pr[X = x] =$   
Wie viele Bit-Strings der Länge  $n$   $2^n$   
gibt es?

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



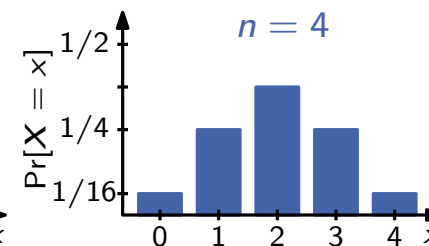
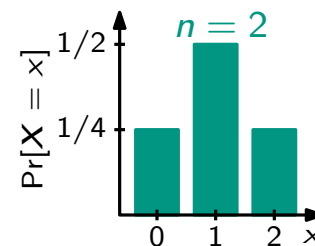
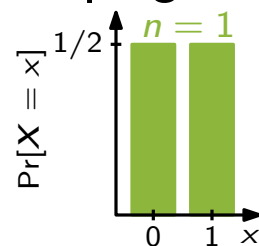
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$



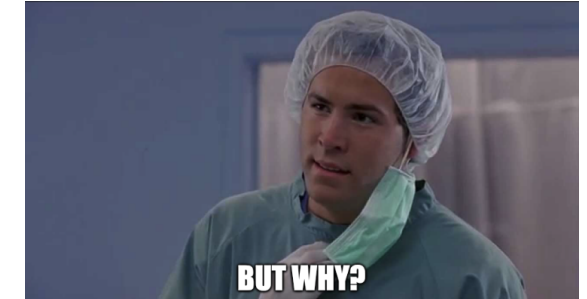
Wie viele Bit-Strings der Länge  $n$  gibt es die  $x$  mal eine 1 enthalten?  $\Pr[X = x] = \frac{\binom{n}{x}}{2^n}$

Wie viele Bit-Strings der Länge  $n$  gibt es?  $2^n$

# Fotos hashen

- Zwei Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet die großen Zahlen auf Buckets ab
- Das hat man tatsächlich gemacht ... und es ging so *richtig* schief!

<https://youtu.be/r-TLSBdHe1A?t=2239>



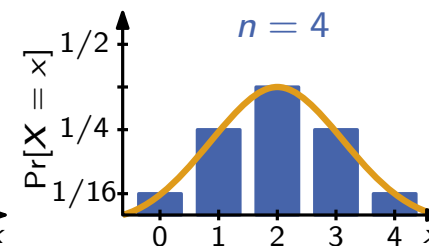
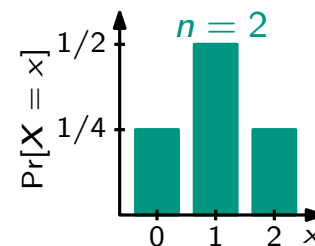
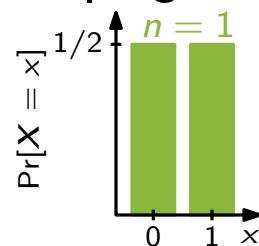
<https://imgflip.com/memegenerator>

## Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Was passiert eigentlich, wenn ich viele Zufallsvariablen aufsummiere?
- Beispiel: Münzwürfe
  - $n$  unabhängige Münzwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Kopf:  $X_i = 1$  mit  $Pr[X_i = 1] = 1/2$ , Zahl:  $X_i = 0$  mit  $Pr[X_i = 0] = 1/2$
  - Wie oft ist die Münze auf Kopf gelandet?

$$X = \sum_{i=1}^n X_i$$

Verteilung  
von  $X$



Wie viele Bit-Strings der Länge  $n$  gibt es die  $x$  mal eine 1 enthalten?  $\Pr[X = x] = \frac{\binom{n}{x}}{2^n}$

Wie viele Bit-Strings der Länge  $n$  gibt es?  $2^n$

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$

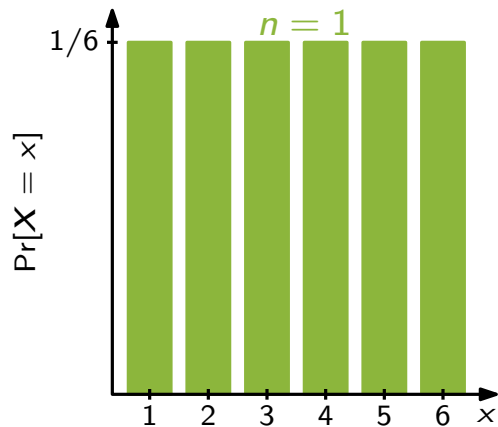
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



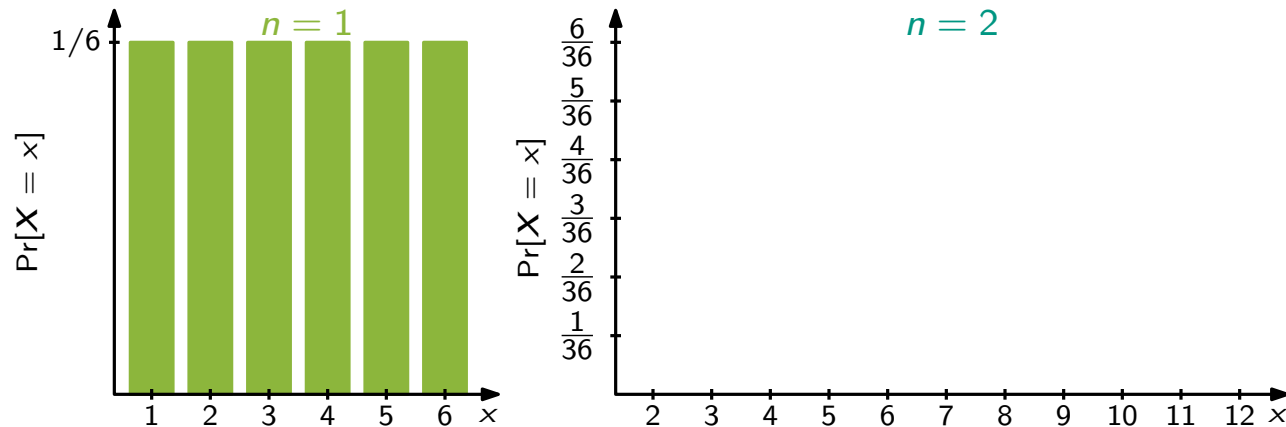
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



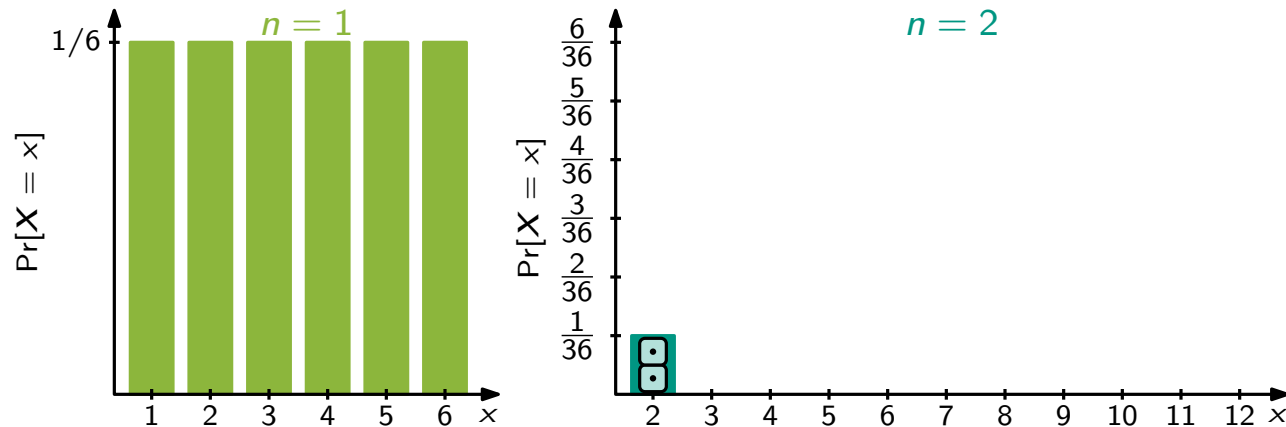
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



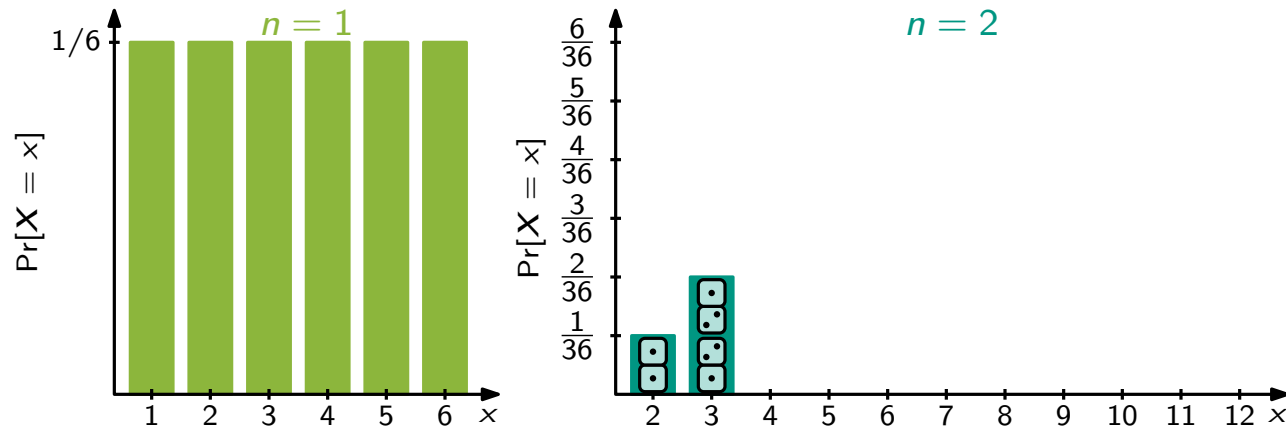
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



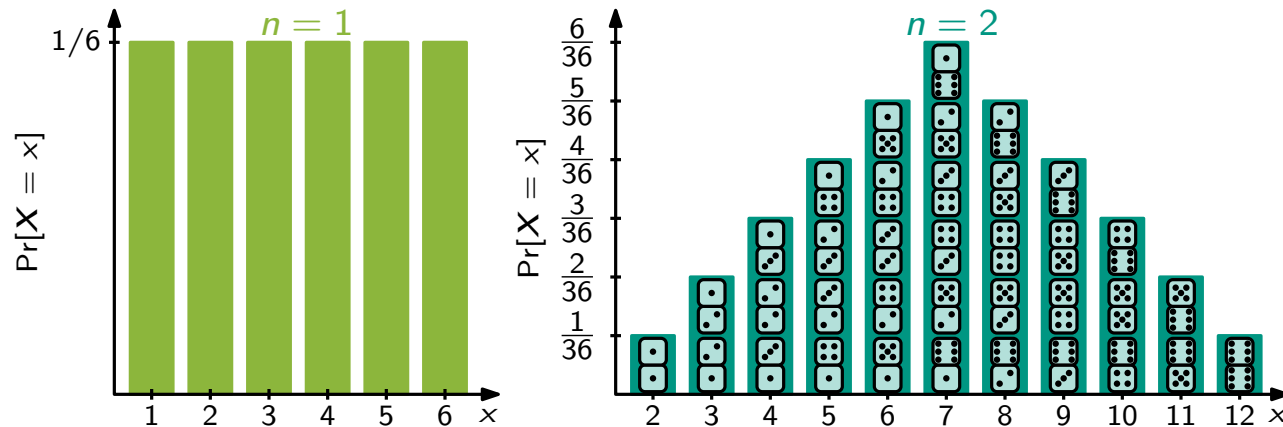
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



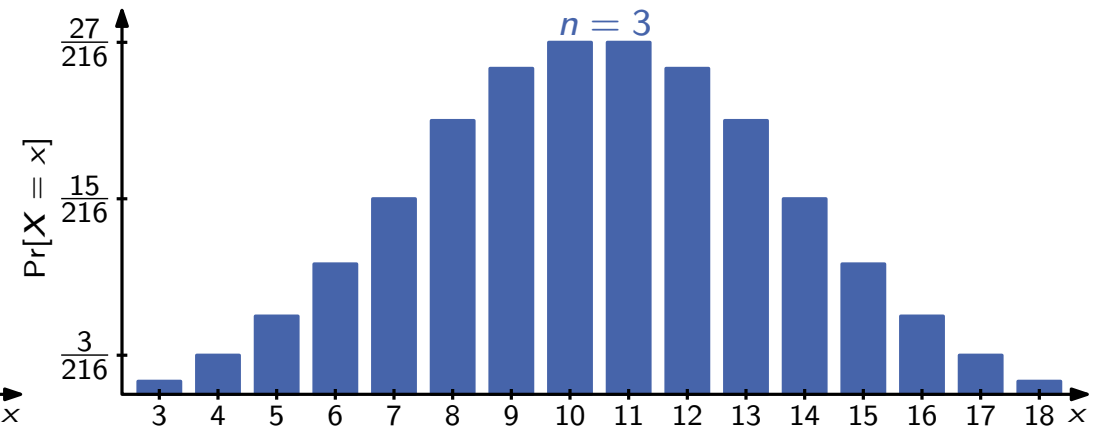
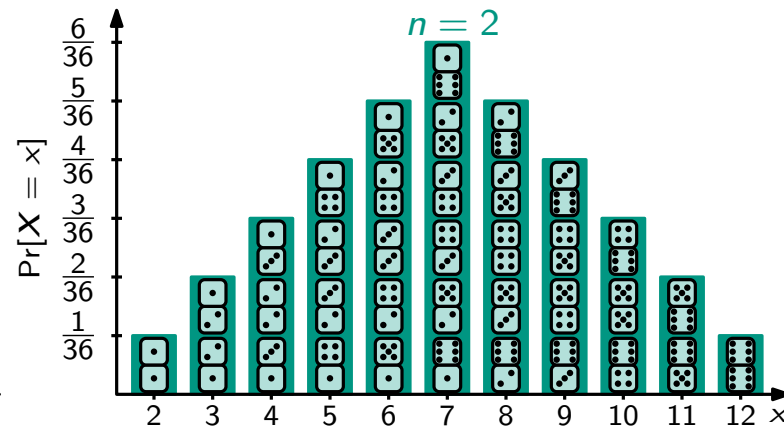
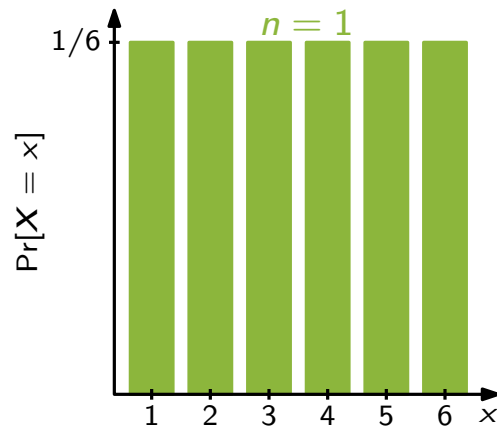
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



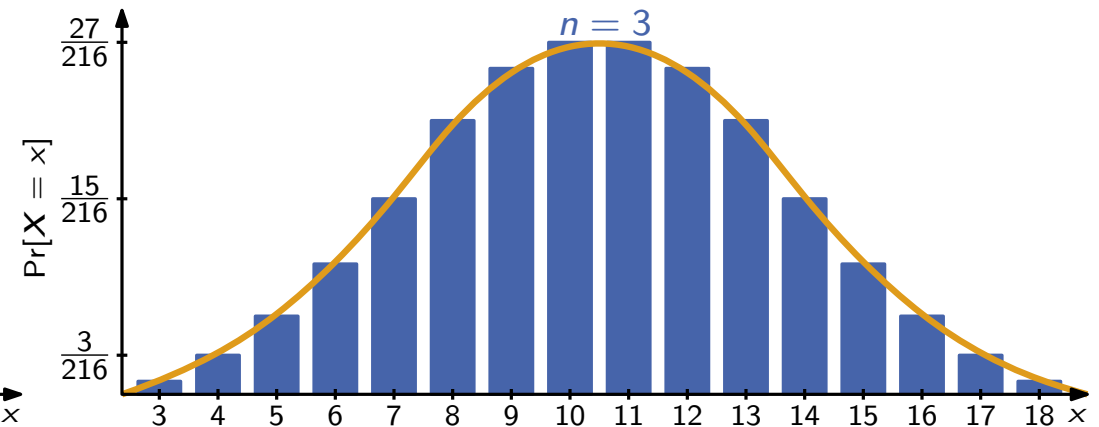
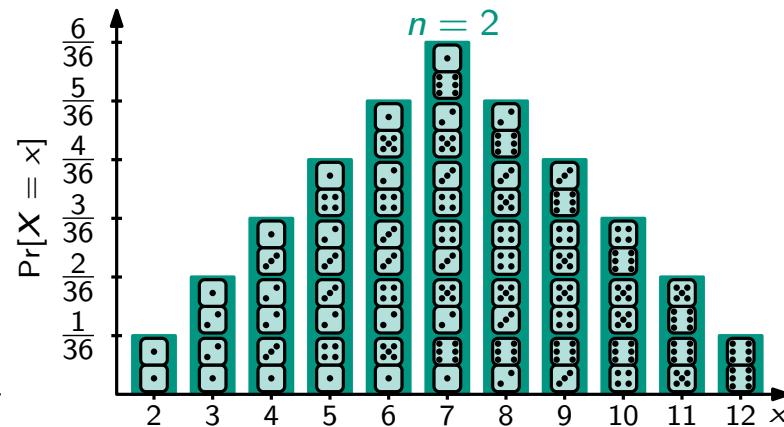
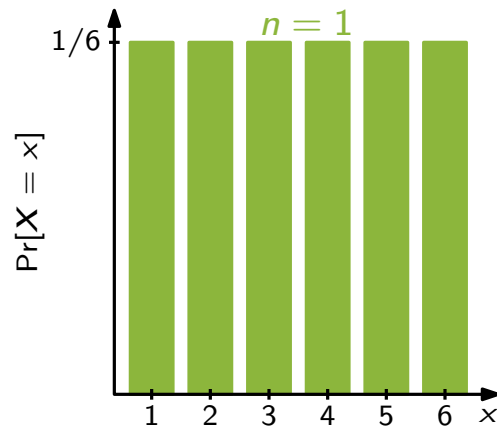
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



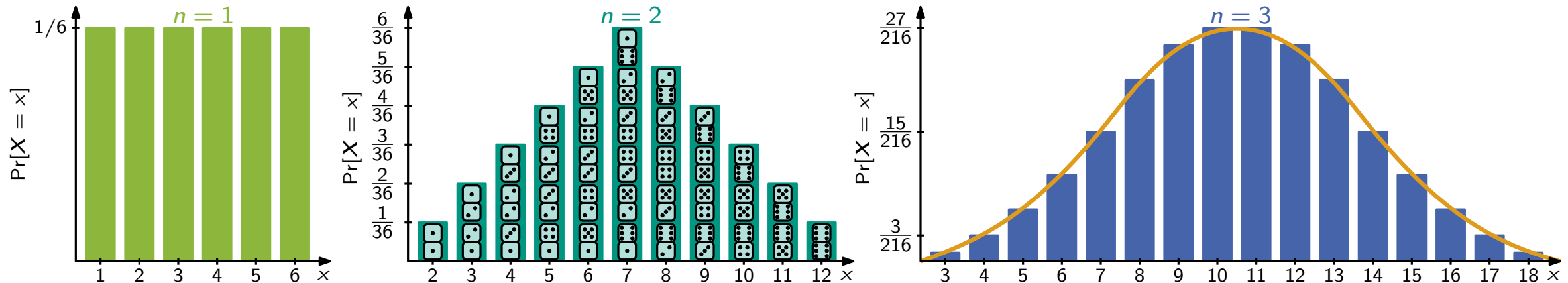
# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



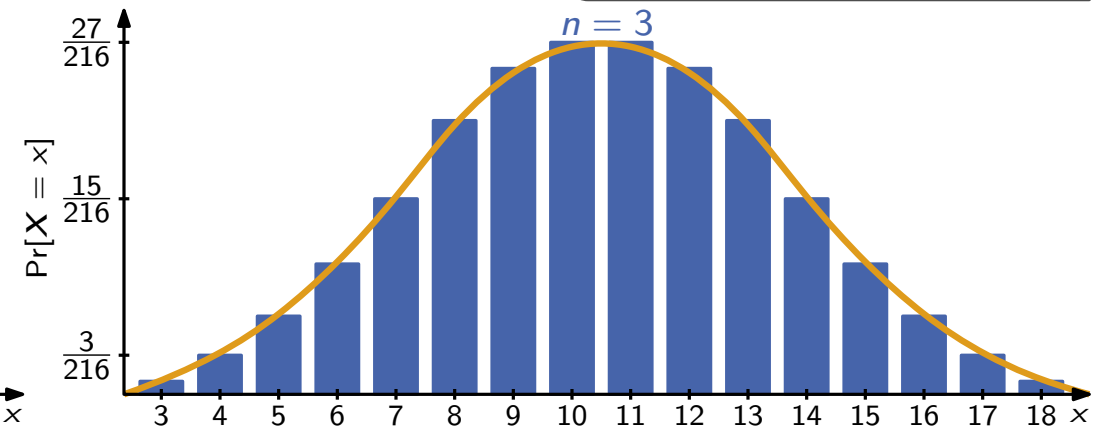
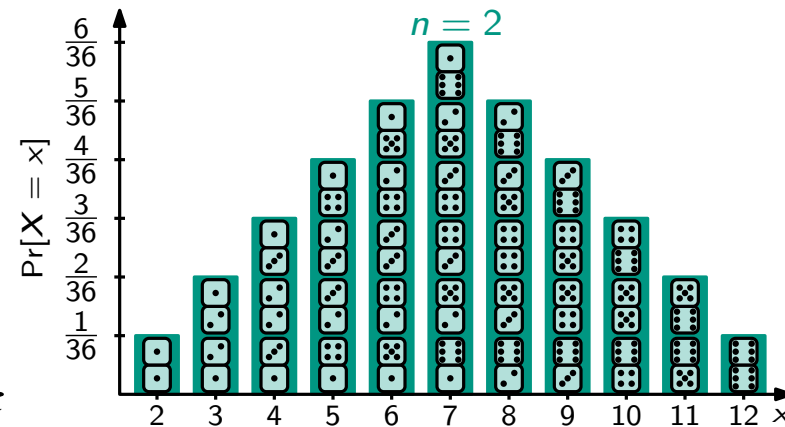
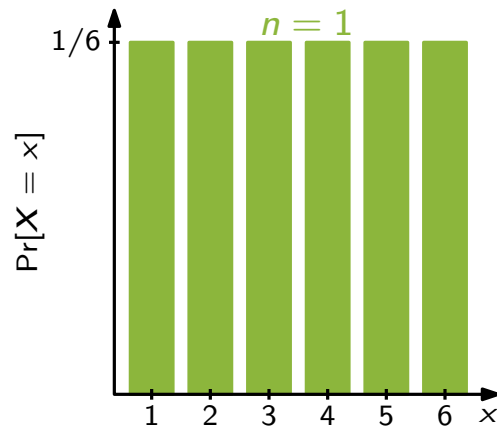
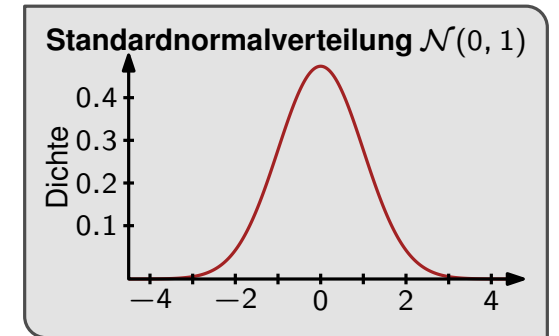
## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .



# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?

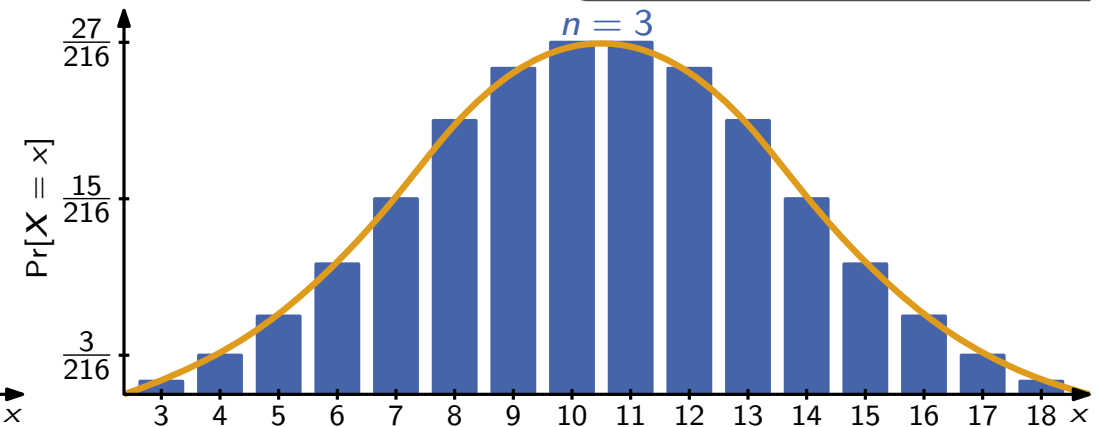
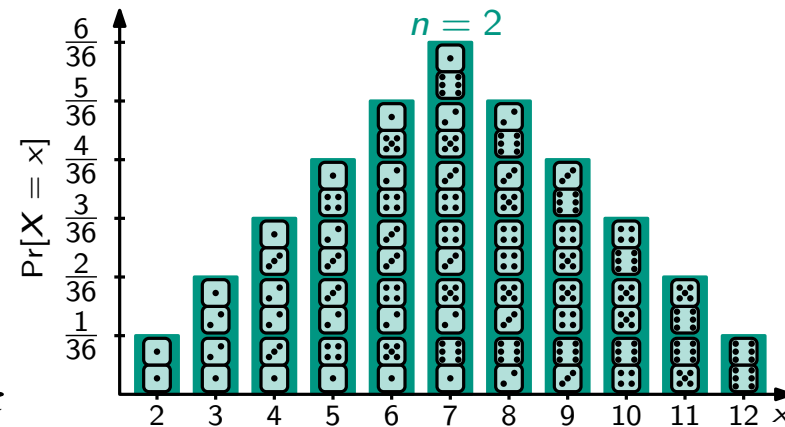
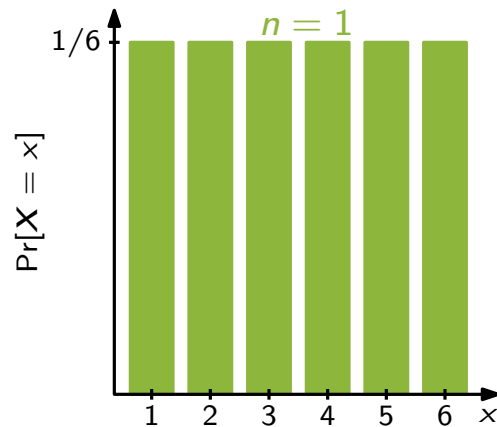
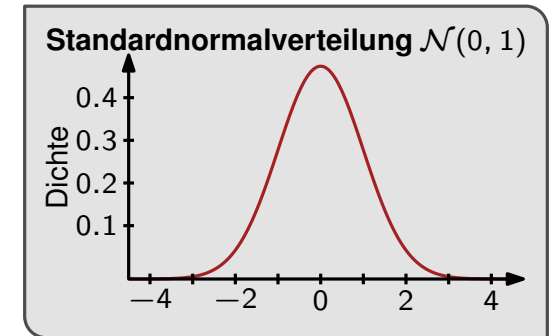


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?

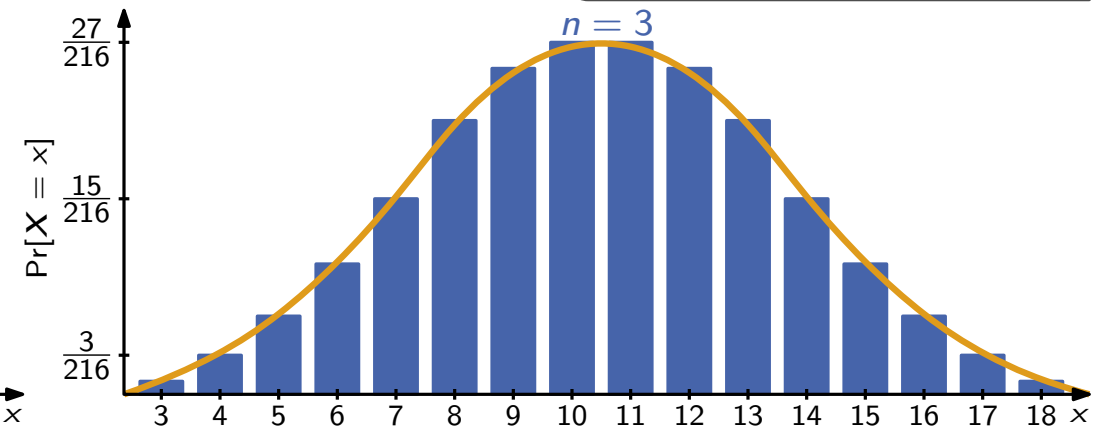
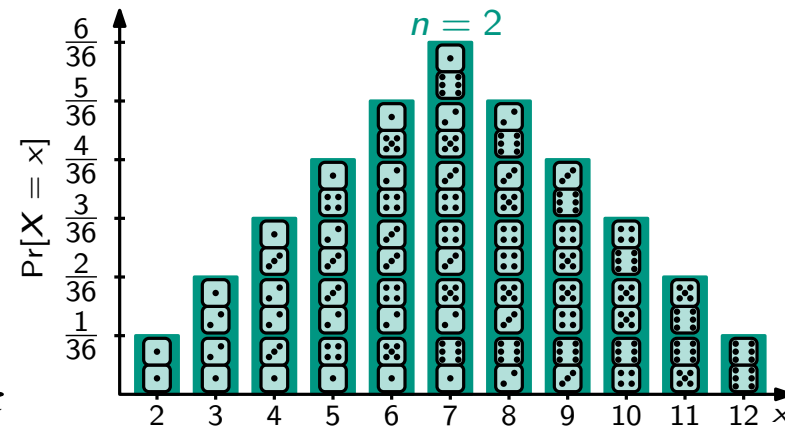
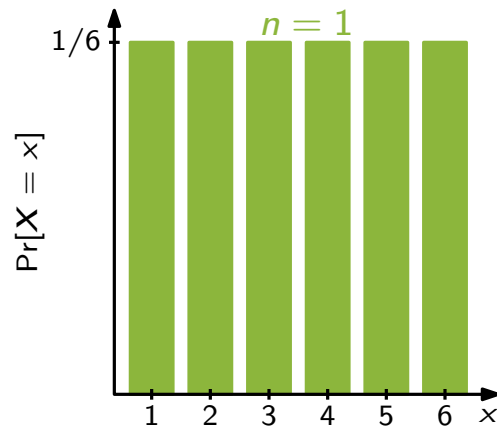
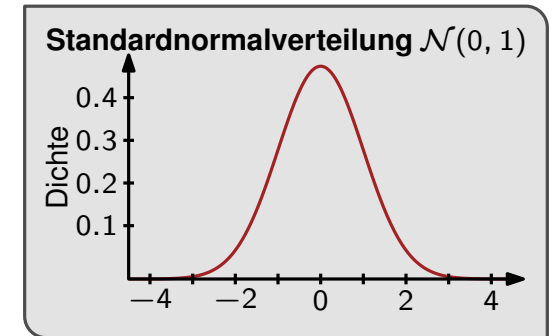


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



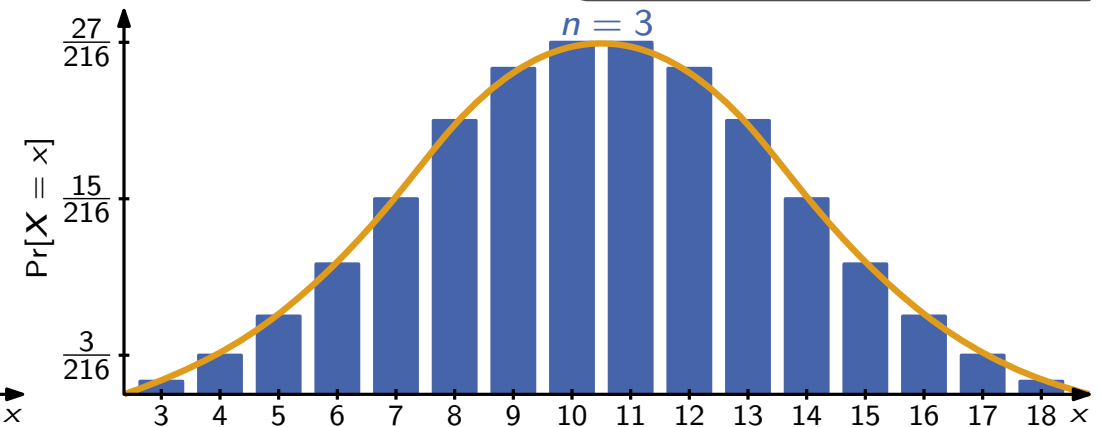
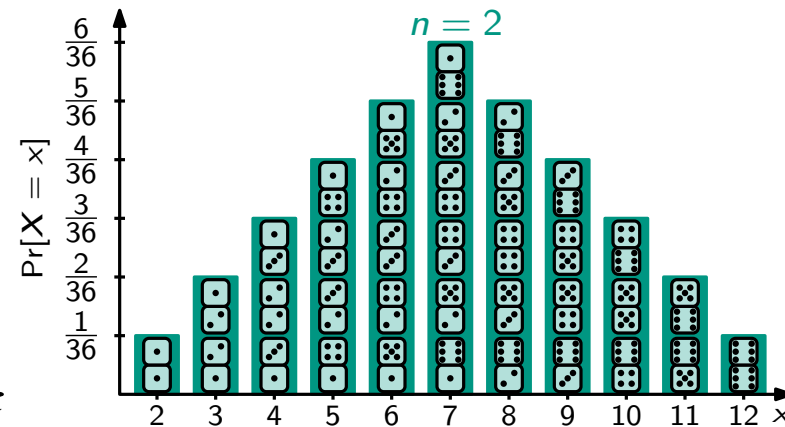
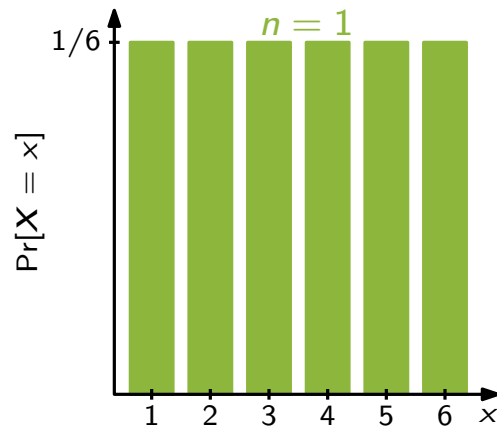
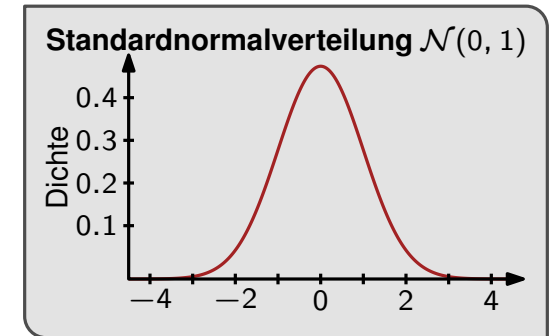
## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu) / (\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

verschieben

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



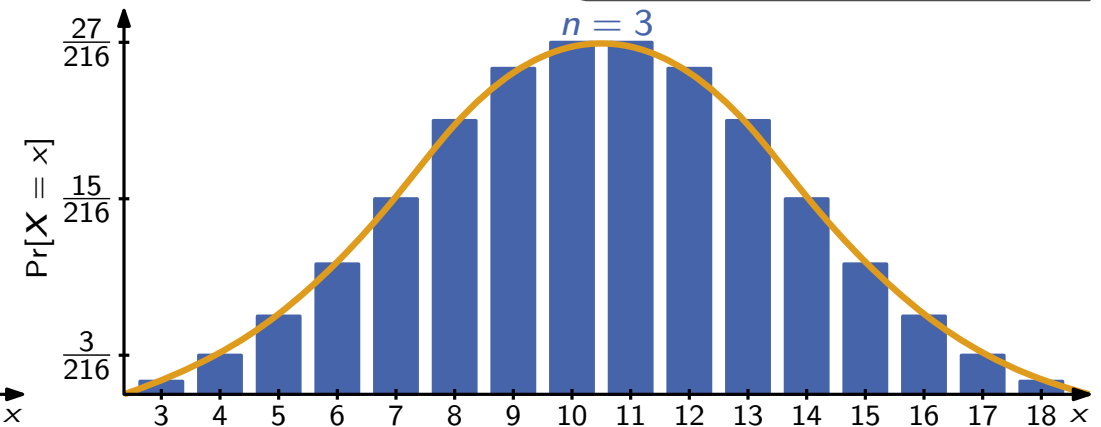
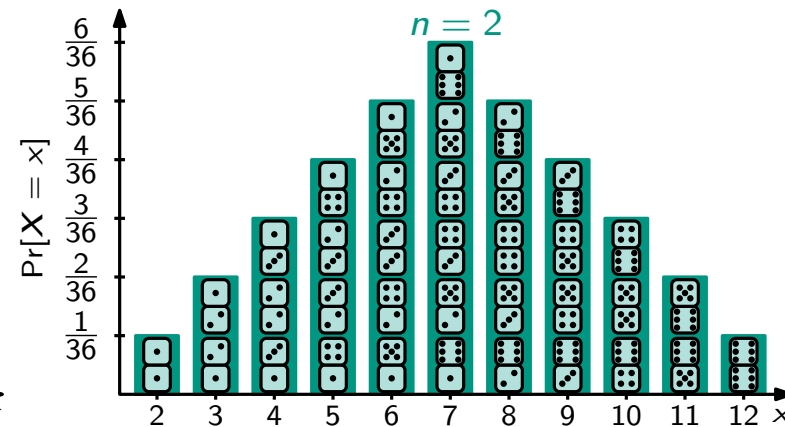
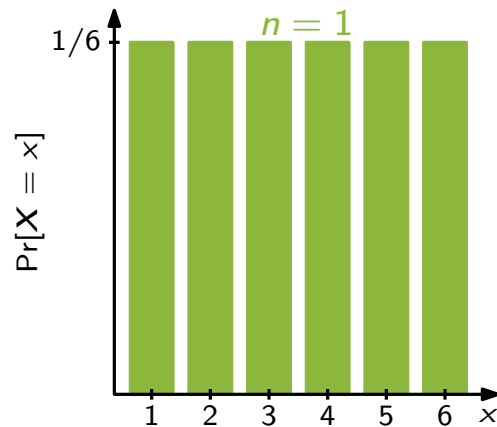
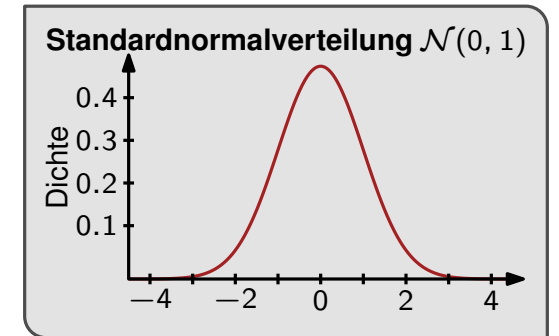
## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = \frac{(S_n - n\mu)}{(\sigma\sqrt{n})}$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

verschieben    stauchen

# Exkurs: Wahrscheinlichkeitstheorie

- Beispiel: 6-seitige Münzen aka Würfel
  - $n$  unabhängige Würfelwürfe  $X_1, X_2, \dots, X_n$
  - Wurf:  $X_i \in \{1, \dots, 6\}$  mit  $Pr[X_i = x] = 1/6$
  - Was ist die Summe der gewürfelten Zahlen?



## Zentraler Grenzwertsatz

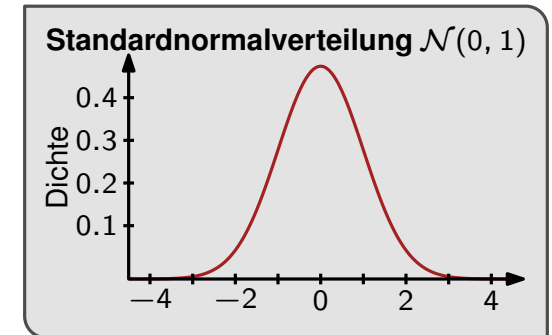
Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu) / (\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

Die ursprüngliche Verteilung spielt keine Rolle!

verschieben    stauchen

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

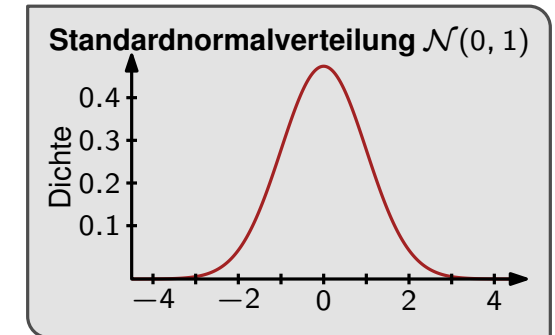


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

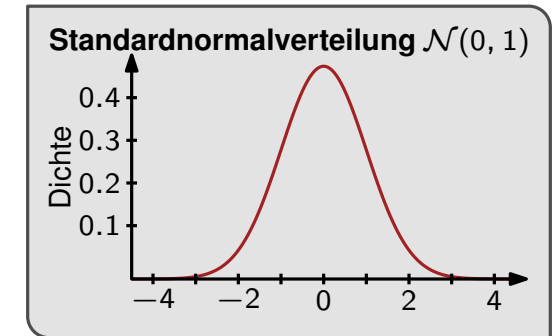


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?



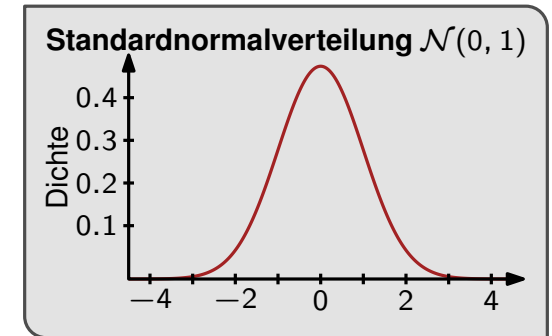
## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .



# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

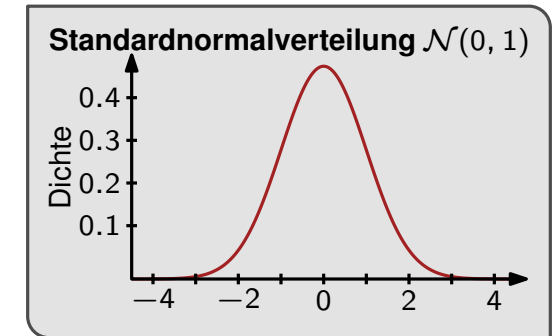


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

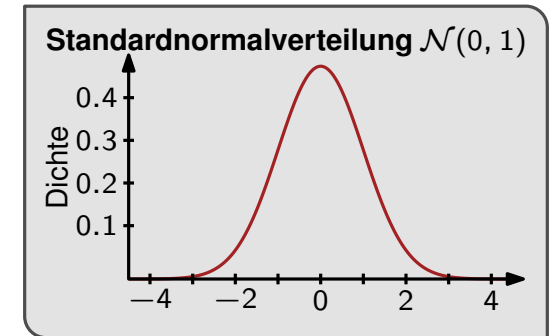


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

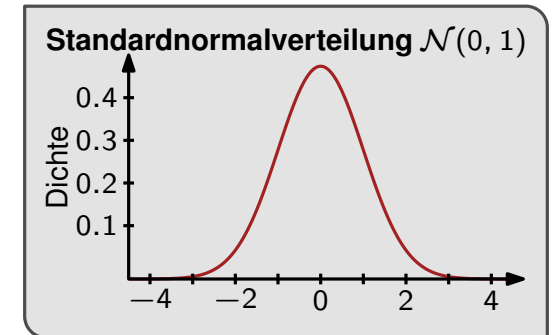
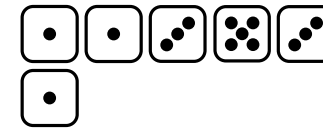


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

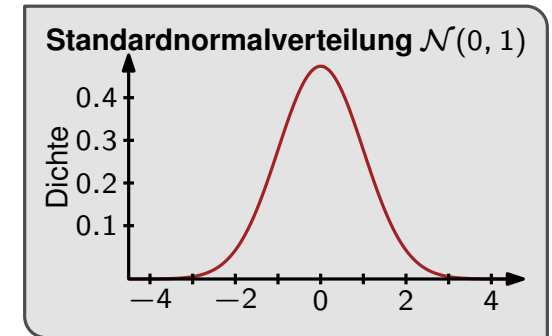
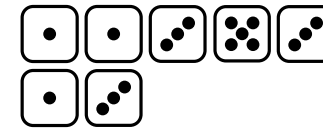


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

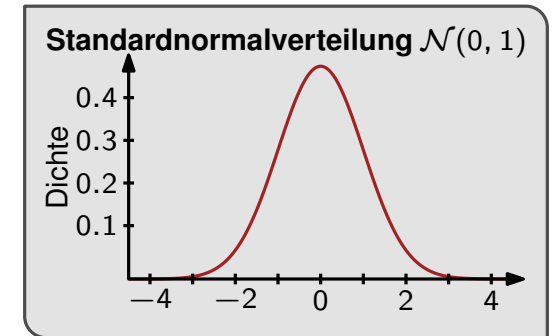
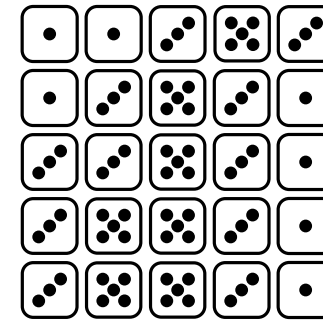


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

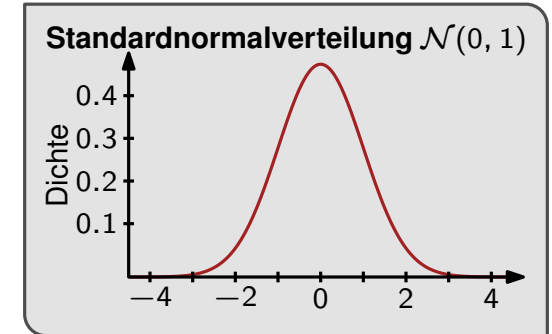
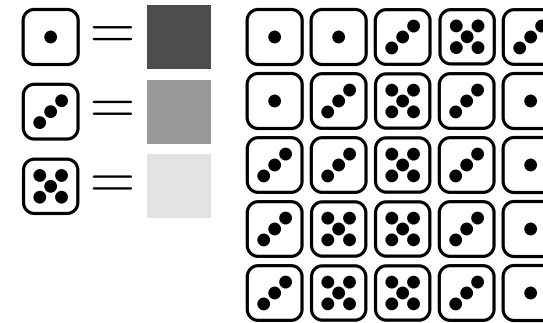


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?

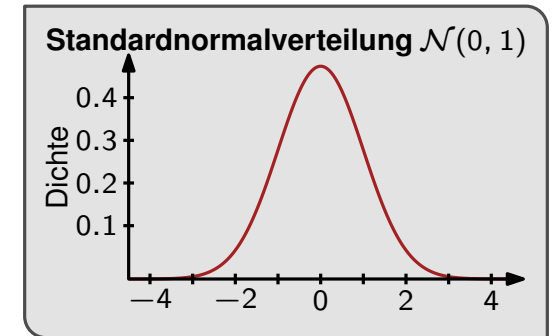
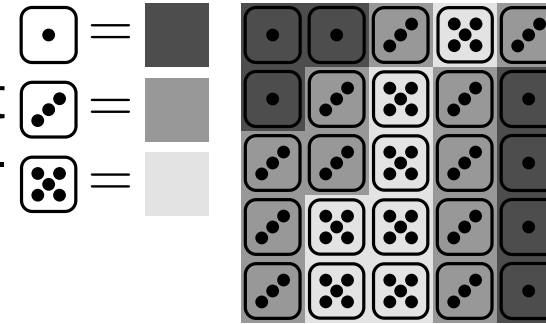


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung



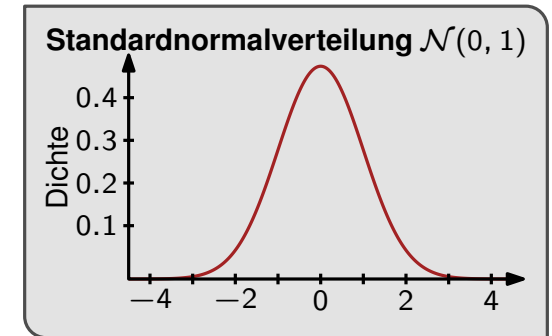
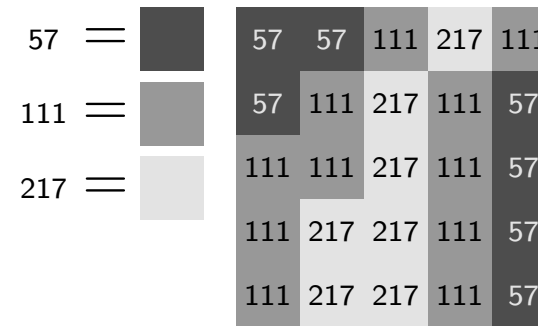
## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .



# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung
- Unsere Pixel sind 256-seitige Würfel  
(wenn auch vermutlich nicht gleich verteilt)

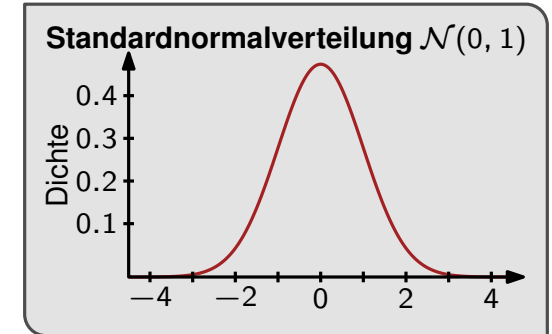
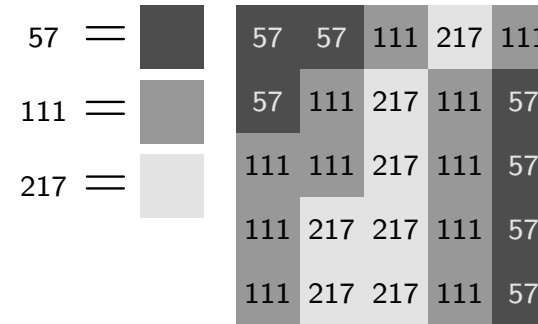


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung
- Unsere Pixel sind 256-seitige Würfel (wenn auch vermutlich nicht gleich verteilt)
- Unsere Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf große Zahlen ab
  - die zweite bildet nun die großen Zahlen auf Buckets ab

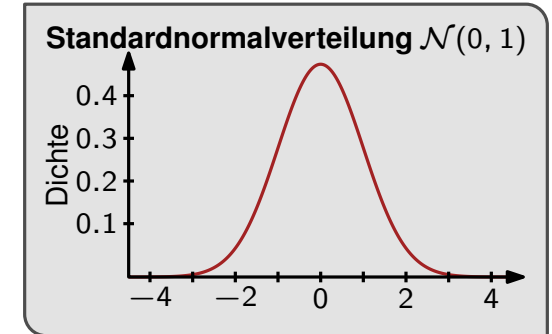
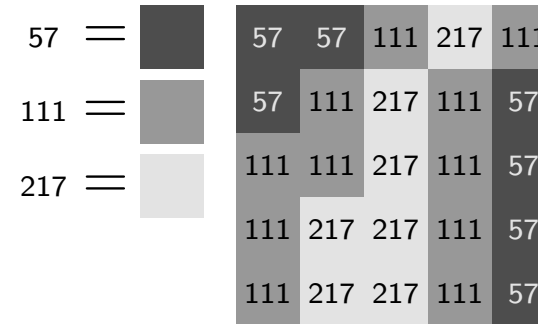


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung
- Unsere Pixel sind 256-seitige Würfel (wenn auch vermutlich nicht gleich verteilt)
- Unsere Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf ~~große~~ Zahlen ab
    - viele* *die gleichen*
  - die zweite bildet nun die großen Zahlen auf Buckets ab



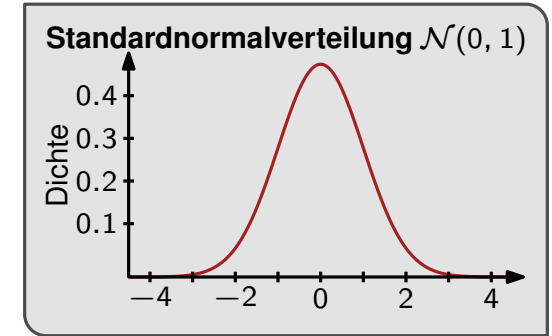
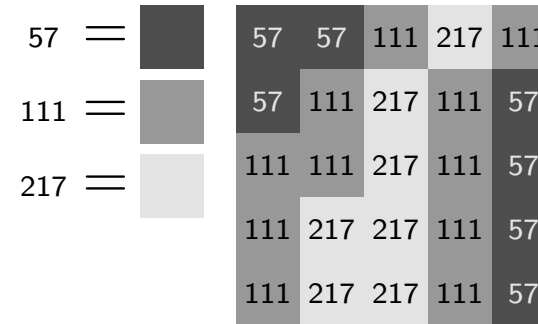
## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung
- Unsere Pixel sind 256-seitige Würfel  
(wenn auch vermutlich nicht gleich verteilt)
- Unsere Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf ~~große~~ Zahlen ab  

{ viele } die gleichen } die gleichen
  - die zweite bildet nun die ~~großen~~ Zahlen auf Buckets ab

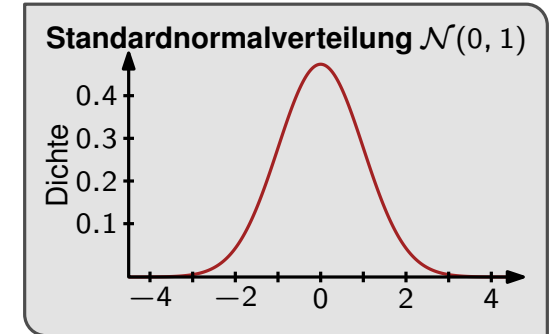
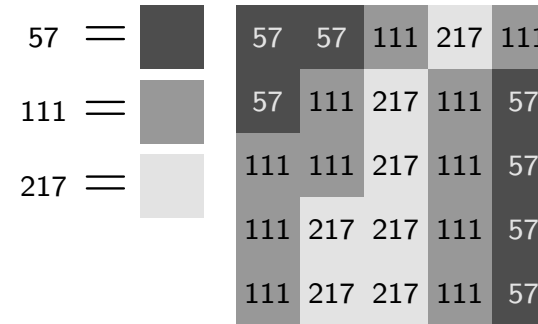


## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung
- Unsere Pixel sind 256-seitige Würfel  
(wenn auch vermutlich nicht gleich verteilt)



- Unsere Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf ~~große~~ Zahlen ab  

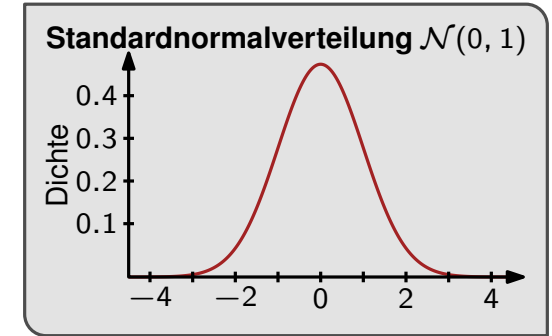
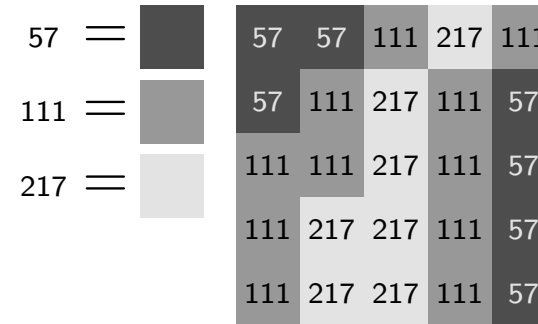
{ viele }
{ die gleichen }
{ die gleichen }
  - die zweite bildet nun die ~~großen~~ Zahlen auf Buckets ab
- Viele Fotos landen in den gleichen Buckets ... Laufzeitreduktion funktioniert nicht

## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .

# Fotos hashen

- Was hat das mit unseren Fotos zu tun?
- Wenn unsere Pixel Würfel sind, konvergiert die Verteilung der Summe der Pixelwerte gegen die Normalverteilung
- Unsere Pixel sind 256-seitige Würfel  
(wenn auch vermutlich nicht gleich verteilt)



- Unsere Hashfunktionen
  - die erste bildet Fotos auf ~~große~~ Zahlen ab  

viele
die gleichen
die gleichen
  - die zweite bildet nun die ~~großen~~ Zahlen auf Buckets ab
- Viele Fotos landen in den gleichen Buckets

**Hashfunktionen besser nicht selbst entwerfen!**

... Laufzeitreduktion funktioniert nicht

## Zentraler Grenzwertsatz

Sei  $X_1, X_2, \dots, X_n, \dots$  eine Folge von unabhängigen Zufallsvariablen mit Erwartungswert  $\mu$  und Varianz  $\sigma^2$  und sei  $S_n = \sum_{i=1}^n X_i$  die  $n$ -te Teilsumme. Dann konvergiert die Zufallsvariable  $Z_n = (S_n - n\mu)/(\sigma\sqrt{n})$  für  $n \rightarrow \infty$  gegen die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung  $\mathcal{N}(0, 1)$ .