

# Algorithmen 1

**Sortieren: Bucketsort, Radixsort, Word-RAM**



# Überblick

## Letztes Mal gesehen

- Sortieralgorithmen mit Laufzeit  $O(n \log n)$  (Mergesort, Quicksort)
- wir müssen Elemente nur vergleichen können und sonst nichts über sie wissen
- vergleichsbasiert  $\rightarrow$  die Algorithmen sind universell einsetzbar
- untere Schranke: jeder vergleichsbasierte Sortieralgo benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche

# Überblick

## Letztes Mal gesehen

- Sortieralgorithmen mit Laufzeit  $O(n \log n)$  (Mergesort, Quicksort)
- wir müssen Elemente nur vergleichen können und sonst nichts über sie wissen
- vergleichsbasiert  $\rightarrow$  die Algorithmen sind universell einsetzbar
- untere Schranke: jeder vergleichsbasierte Sortieralgo benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche

## Plan für heute

- sortieren von Zahlen in  $O(n)$ : Bucketsort, Radixsort
- unter gewissen Annahmen an die Größe der Zahlen

# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen (wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen (wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$

$\langle 3, 7, 9, 3, 5, 1, 0, 1 \rangle$

# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen (wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$

$\langle 3, 7, 9, 3, 5, 1, 0, 1 \rangle$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

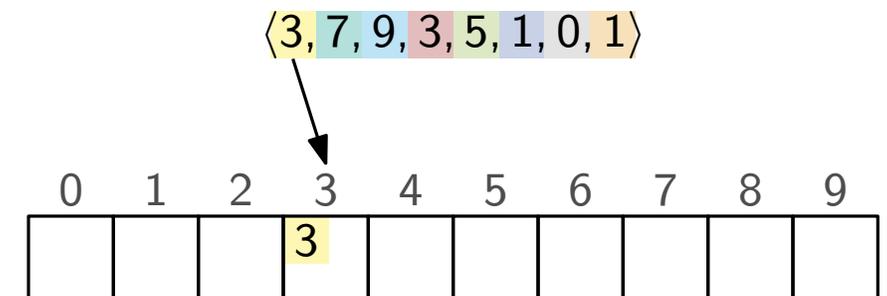
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

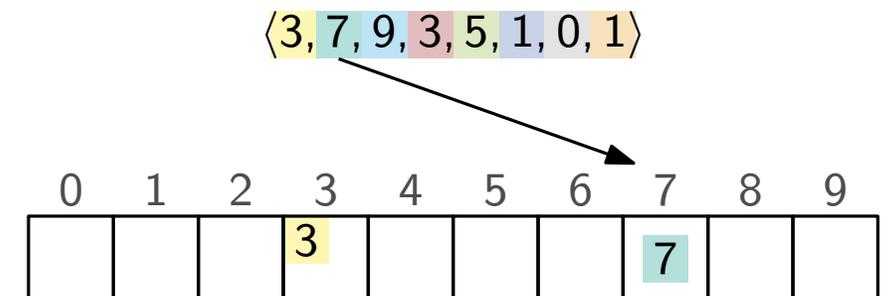
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

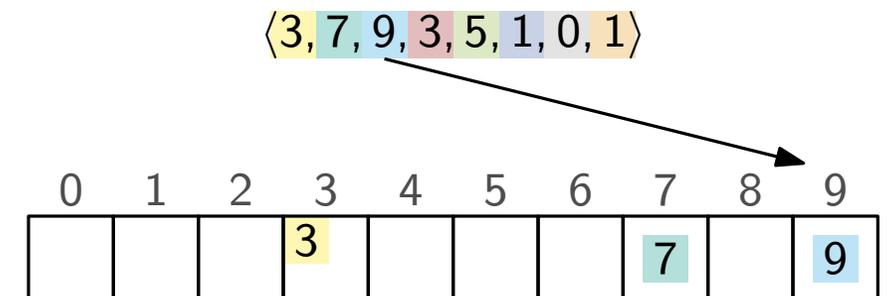
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

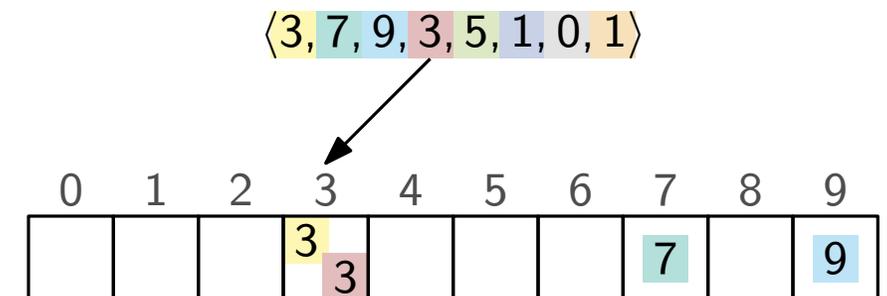
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

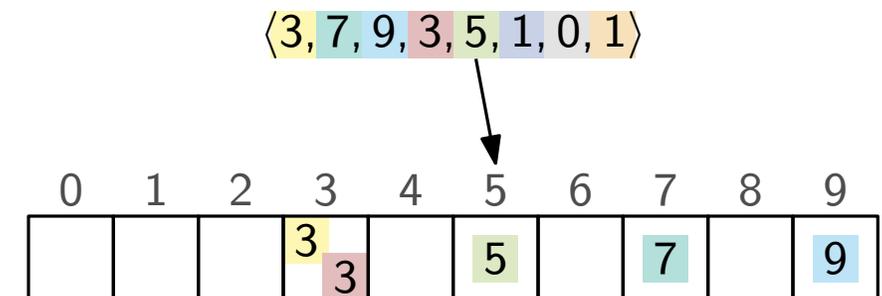
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

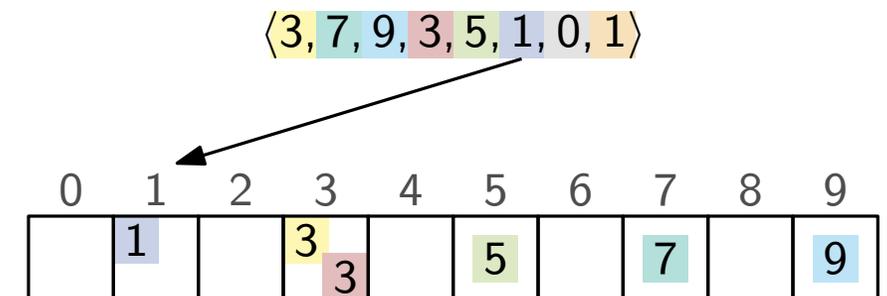
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

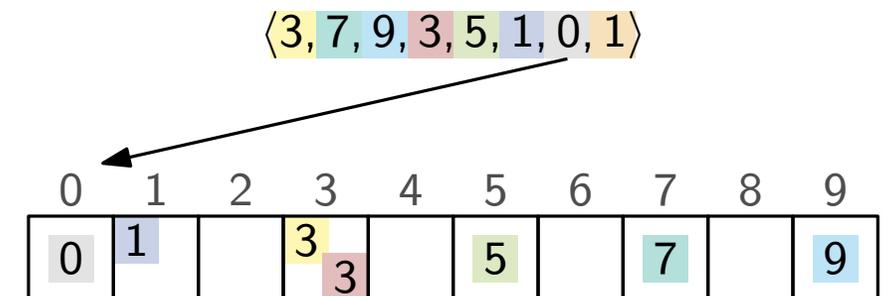
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

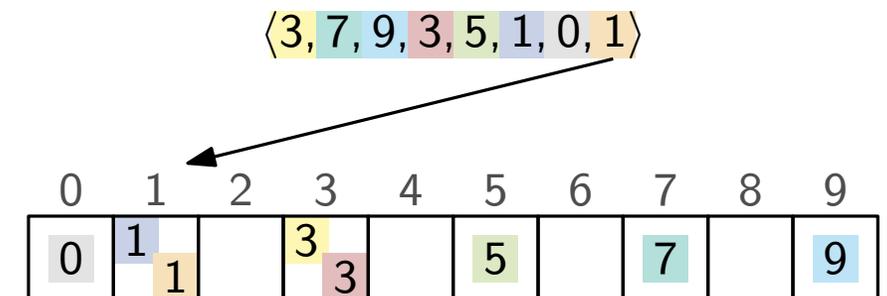
## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$



# Bucketsort

## Theorem

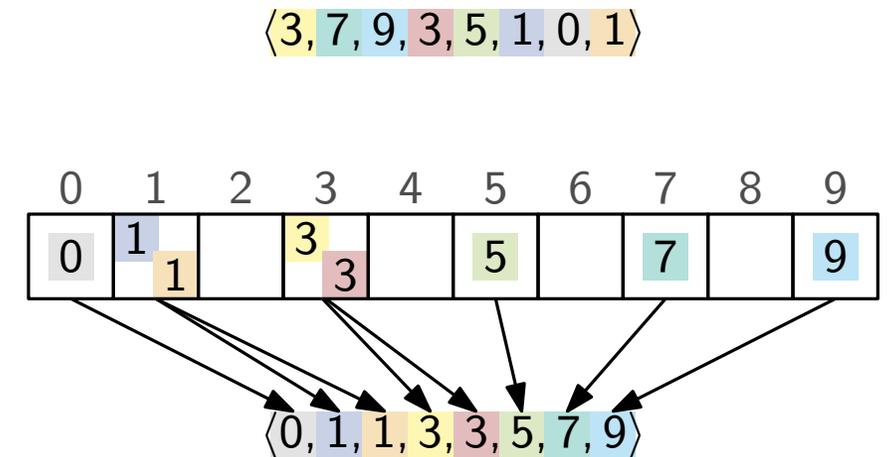
Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen (wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$
- lies sortierte Folge aus  $B$  ab





# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

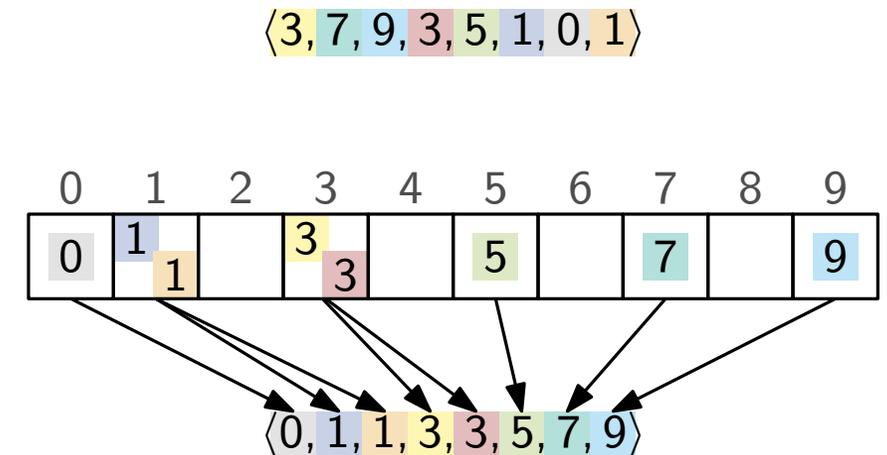
- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$
- lies sortierte Folge aus  $B$  ab

**Was ist die Laufzeit?**



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

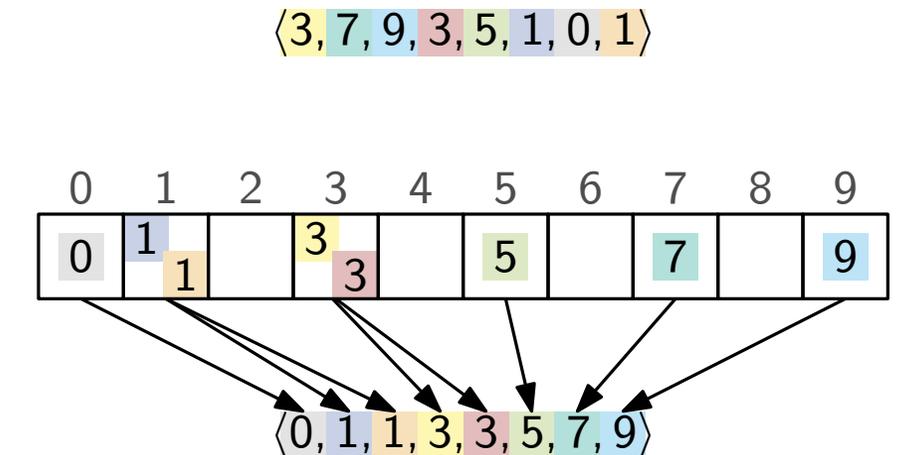
- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$
- lies sortierte Folge aus  $B$  ab

## Laufzeit

$$\Theta(m)$$

$$\Theta(n)$$

$$\Theta(n + m)$$



# Bucketsort

## Theorem

Jeder vergleichsbasierte Sortieralgorithmus benötigt  $\Omega(n \log n)$  Vergleiche um eine Folge von  $n$  Elementen zu sortieren.

## Was können wir mit Zahlen tun?

- vergleichen  $\rightarrow$  hilft hier nicht
- Array-Zellen adressieren  $\rightarrow$  das können wir nutzen

(wenn die Zahlen nicht zu groß sind)

## Bucketsort

- zu sortieren:  $n$  Zahlen aus  $[0, m)$
- erstelle Buckets: Array  $B$  der Größe  $m$
- für jede Zahl  $x$ : speichere  $x$  in  $B[x]$
- lies sortierte Folge aus  $B$  ab

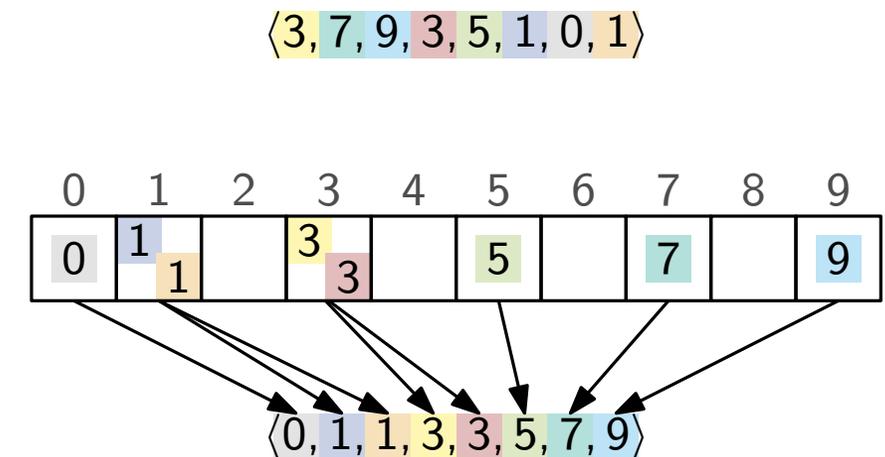
## Laufzeit

$$\Theta(m)$$

$$\Theta(n)$$

$$\Theta(n + m)$$

Laufzeit  $\Theta(n + m) = \Theta(n)$ , wenn  $m \in O(n)$



# Zahlen als Schlüssel

## Mehr als nur Zahlen

- oft will man nicht tatsächlich Zahlen sortieren
- sondern komplexere Objekte bezüglich einer Kennzahl
- diese Kennzahl nennt man auch **Schlüssel (Key)**

# Zahlen als Schlüssel

## Mehr als nur Zahlen

- oft will man nicht tatsächlich Zahlen sortieren
- sondern komplexere Objekte bezüglich einer Kennzahl
- diese Kennzahl nennt man auch **Schlüssel (Key)**

## Beispiel 1: Personen nach Alter in Jahren

- Eingabe: Tabelle mit Personendaten ( $n$  Zeilen)
- maximales Alter ist typischerweise klein (in  $O(n)$ )
- Bucketsort hat Laufzeit  $\Theta(n)$

<u>Name</u>	<u>Alter</u>
Peter Arbeitsloser	26
Martyn Vorstand	38
Henryk Ingenieur	45
Kiki Unbekannt	28
Der Alte	92

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

# Zahlen als Schlüssel

## Mehr als nur Zahlen

- oft will man nicht tatsächlich Zahlen sortieren
- sondern komplexere Objekte bezüglich einer Kennzahl
- diese Kennzahl nennt man auch **Schlüssel (Key)**

## Beispiel 1: Personen nach Alter in Jahren

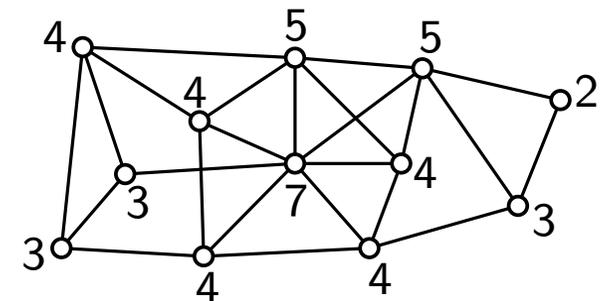
- Eingabe: Tabelle mit Personendaten ( $n$  Zeilen)
- maximales Alter ist typischerweise klein (in  $O(n)$ )
- Bucketsort hat Laufzeit  $\Theta(n)$

Name	Alter
Peter Arbeitsloser	26
Martyn Vorstand	38
Henryk Ingenieur	45
Kiki Unbekannt	28
Der Alte	92

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

## Beispiel 2: Knoten eines Graphen nach Grad (#Nachbarn)

- Eingabe: Graph mit  $n$  Knoten
- Grad jedes Knotens ist kleiner  $n$
- Bucketsort hat Laufzeit  $\Theta(n)$



# Bucketsort: Implementierung

## Bucketsort(input)

$m :=$  largest key in the input + 1

$Array\langle Array \rangle$  buckets := array of size  $m$  of empty arrays

**for** obj **in** input **do**

    buckets[obj.key].pushBack(obj)

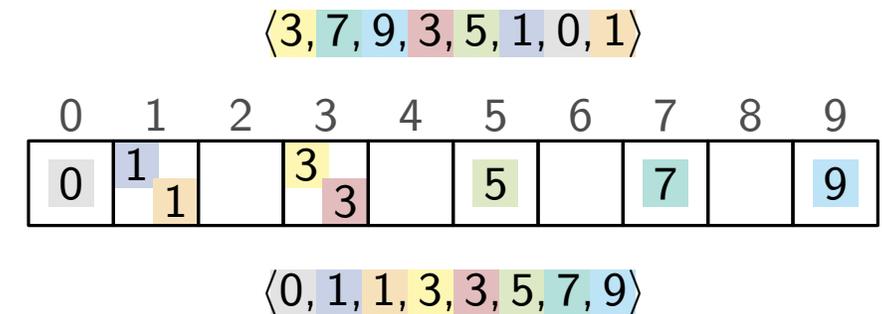
Array  $A :=$  empty array

**for** bucket **in** buckets **do**

**for** obj **in** bucket **do**

        A.pushBack(obj)

**return** A



# Bucketsort: Implementierung

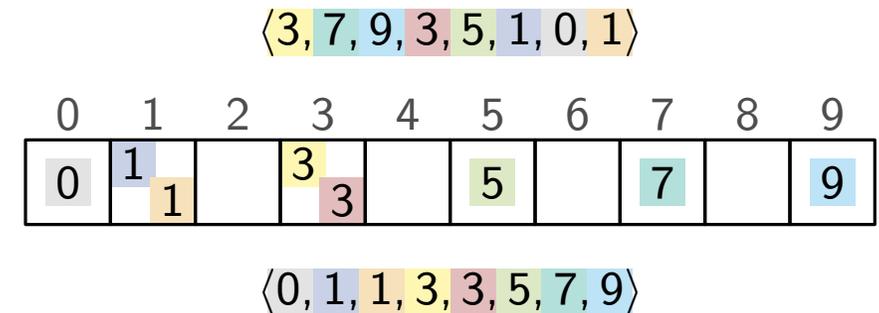
## Bucketsort(input)

```

m := largest key in the input + 1
Array⟨Array⟩ buckets := array of size m of empty arrays
for obj in input do
  | buckets[obj.key].pushBack(obj)
Array A := empty array
for bucket in buckets do // m buckets
  | for obj in bucket do // n objects
    | A.pushBack(obj)
return A
  
```

## Anmerkung

- verschachtelte Schleifen  
→ Laufzeit  $\Theta(m \cdot n)$ ?



# Bucketsort: Implementierung

## Bucketsort(input)

$m :=$  largest key in the input + 1

$Array\langle Array \rangle$  buckets := array of size  $m$  of empty arrays

**for** obj **in** input **do**

  buckets[obj.key].pushBack(obj)

Array  $A :=$  empty array

**for** bucket **in** buckets **do** //  $m$  buckets

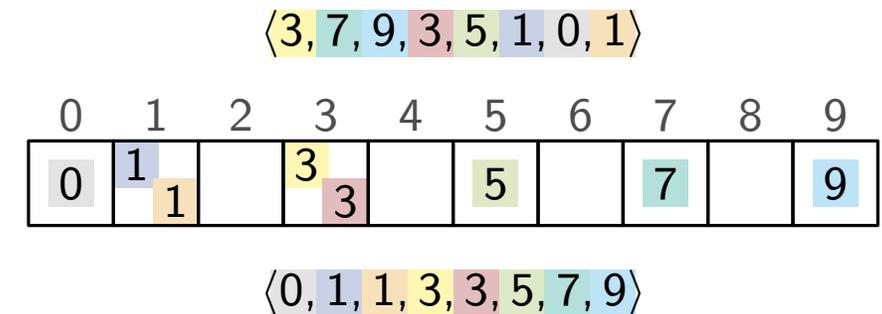
**for** obj **in** bucket **do** //  $n$  objects

    A.pushBack(obj)

**return** A

## Anmerkung

- verschachtelte Schleifen  
→ Laufzeit  $\Theta(m \cdot n)$ ?
- jedes Objekt liegt in nur einem Bucket
- daher:  $\Theta(m + n)$



# Bucketsort: Implementierung

## Bucketsort(input)

$m :=$  largest key in the input + 1

$Array\langle Array \rangle$  buckets := array of size  $m$  of empty arrays

**for** obj **in** input **do**

  buckets[obj.key].pushBack(obj)

Array  $A :=$  empty array

**for** bucket **in** buckets **do** //  $m$  buckets

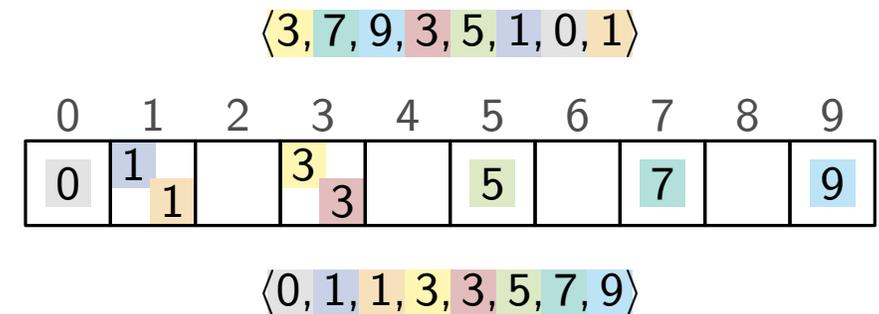
**for** obj **in** bucket **do** //  $n$  objects

$A$ .pushBack(obj)

**return**  $A$

## Anmerkung

- verschachtelte Schleifen  
→ Laufzeit  $\Theta(m \cdot n)$ ?
- jedes Objekt liegt in nur einem Bucket
- daher:  $\Theta(m + n)$



## Theorem

Mit Bucketsort können wir  $n$  natürliche Zahlen in  $\Theta(n)$  Zeit sortieren, wenn die Größe der Zahlen in  $O(n)$  liegt.

# Stabiles Sortieren und lexikographische Ordnungen

## Beobachtung: Bucketsort ist **stabil**

Wenn Objekt  $X$  in der Eingabe vor Objekt  $Y$  steht und  $X.\text{key} = Y.\text{key}$ , dann steht  $X$  in der Ausgabe vor  $Y$ .

## Bucketsort(input)

$m :=$  largest key in the input + 1

*Array* $\langle$ *Array* $\rangle$  buckets := array of size  $m$  of empty arrays

**for** obj **in** input **do**

    buckets[obj.key].pushBack(obj)

*Array*  $A :=$  empty array

**for** bucket **in** buckets **do**

**for** obj **in** bucket **do**

        A.pushBack(Obj)

**return**  $A$

# Stabiles Sortieren und lexikographische Ordnungen

## Beobachtung: Bucketsort ist **stabil**

Wenn Objekt  $X$  in der Eingabe vor Objekt  $Y$  steht und  $X.\text{key} = Y.\text{key}$ , dann steht  $X$  in der Ausgabe vor  $Y$ .

## Lexikographische Ordnung auf den Nationen

- ordne nach Anzahl Goldmedaillen
- bei gleicher Anzahl Gold: nach Silbermedaillen
- bei gleicher Anzahl Gold und Silber: nach Bronze

## Medaillenspiegel Olympia 2018

Nation	Gold	Silber	Bronze
 NOR	14	14	11
 GER	14	10	7
 CAN	11	8	10
 USA	9	8	6
 SUI	5	6	4
 FRA	5	4	6
 GBR	1	0	4
 POL	1	0	1
 UKR	1	0	0



# Stabiles Sortieren und lexikographische Ordnungen

## Beobachtung: Bucketsort ist **stabil**

Wenn Objekt  $X$  in der Eingabe vor Objekt  $Y$  steht und  $X.\text{key} = Y.\text{key}$ , dann steht  $X$  in der Ausgabe vor  $Y$ .

## Lexikographische Ordnung auf den Nationen

- ordne nach Anzahl Goldmedaillen
- bei gleicher Anzahl Gold: nach Silbermedaillen
- bei gleicher Anzahl Gold und Silber: nach Bronze

Wie können wir mit Bucketsort lexikographisch sortieren?

## Medaillenspiegel Olympia 2018

Nation	Gold	Silber	Bronze
 NOR	14	14	11
 GER	14	10	7
 CAN	11	8	10
 USA	9	8	6
 SUI	5	6	4
 FRA	5	4	6
 GBR	1	0	4
 POL	1	0	1
 UKR	1	0	0

# Stabiles Sortieren und lexikographische Ordnungen

## Beobachtung: Bucketsort ist **stabil**

Wenn Objekt  $X$  in der Eingabe vor Objekt  $Y$  steht und  $X.\text{key} = Y.\text{key}$ , dann steht  $X$  in der Ausgabe vor  $Y$ .

## Lexikographische Ordnung auf den Nationen

- ordne nach Anzahl Goldmedaillen
- bei gleicher Anzahl Gold: nach Silbermedaillen
- bei gleicher Anzahl Gold und Silber: nach Bronze

## Sortieralgorithmus

- sortiere drei Mal, jeweils mit stabilem Sortieralgorithmus: erst nach Bronze, dann nach Silber, dann nach Gold
- letzte Sortierung nach Gold: mehr Gold  $\Rightarrow$  weiter oben
- bei gleicher Anzahl Gold: vorherige Sortierung nach (Silber, Bronze) bleibt erhalten

## Medaillenspiegel Olympia 2018

Nation	Gold	Silber	Bronze
 NOR	14	14	11
 GER	14	10	7
 CAN	11	8	10
 USA	9	8	6
 SUI	5	6	4
 FRA	5	4	6
 GBR	1	0	4
 POL	1	0	1
 UKR	1	0	0

# Und was ist mit größeren Zahlen?

## Problem

- die Zahlen sind möglicherweise signifikant größer als die Anzahl zu sortierender Objekte
- zu viele Buckets → kostet Speicher und Laufzeit

<u>Name</u>	<u>Einkommen</u>
Peter Arbeitsloser	35 211
Martyn Vorstand	783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	46 823
Der Alte	46 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

# Und was ist mit größeren Zahlen?

## Problem

- die Zahlen sind möglicherweise signifikant größer als die Anzahl zu sortierender Objekte
- zu viele Buckets → kostet Speicher und Laufzeit

## Idee für das Beispiel: dreistufiges Verfahren

- ordne lexikographisch nach (Ziffern 1–3, Ziffern 4–6, Ziffern 7–9)
- vorher: Bucketsort mit  $10^9$  Buckets
- jetzt: 3 Mal Bucketsort mit  $10^3$  Buckets

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	35 211
Martyn Vorstand	783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	46 823
Der Alte	46 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	000 035 211
Martyn Vorstand	000 783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	000 046 823
Der Alte	000 046 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

# Und was ist mit größeren Zahlen?

## Problem

- die Zahlen sind möglicherweise signifikant größer als die Anzahl zu sortierender Objekte
- zu viele Buckets → kostet Speicher und Laufzeit

## Idee für das Beispiel: dreistufiges Verfahren

- ordne lexikographisch nach (Ziffern 1–3, Ziffern 4–6, Ziffern 7–9)
- vorher: Bucketsort mit  $10^9$  Buckets
- jetzt: 3 Mal Bucketsort mit  $10^3$  Buckets

## Allgemein: asymptotische Verbesserung?

- Eingabe:  $n$  Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Anzahl Ziffern:  $\log(n^c) = c \cdot \log n$

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	35 211
Martyn Vorstand	783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	46 823
Der Alte	46 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	000 035 211
Martyn Vorstand	000 783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	000 046 823
Der Alte	000 046 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling



# Und was ist mit größeren Zahlen?

## Problem

- die Zahlen sind möglicherweise signifikant größer als die Anzahl zu sortierender Objekte
- zu viele Buckets → kostet Speicher und Laufzeit

## Idee für das Beispiel: dreistufiges Verfahren

- ordne lexikographisch nach (Ziffern 1–3, Ziffern 4–6, Ziffern 7–9)
- vorher: Bucketsort mit  $10^9$  Buckets
- jetzt: 3 Mal Bucketsort mit  $10^3$  Buckets

## Allgemein: asymptotische Verbesserung?

- Eingabe:  $n$  Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Anzahl Ziffern:  $\log(n^c) = c \cdot \log n$

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	35 211
Martyn Vorstand	783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	46 823
Der Alte	46 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	000 035 211
Martyn Vorstand	000 783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	000 046 823
Der Alte	000 046 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

**Bei Aufspaltung in  $c$  Blöcke mit je  $\log n$  Ziffern:  
Wie groß werden die Zahlen pro Block? Welche Laufzeit erhalten wir?**

# Und was ist mit größeren Zahlen?

## Problem

- die Zahlen sind möglicherweise signifikant größer als die Anzahl zu sortierender Objekte
- zu viele Buckets  $\rightarrow$  kostet Speicher und Laufzeit

## Idee für das Beispiel: dreistufiges Verfahren

- ordne lexikographisch nach (Ziffern 1–3, Ziffern 4–6, Ziffern 7–9)
- vorher: Bucketsort mit  $10^9$  Buckets
- jetzt: 3 Mal Bucketsort mit  $10^3$  Buckets

## Allgemein: asymptotische Verbesserung?

- Eingabe:  $n$  Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Anzahl Ziffern:  $\log(n^c) = c \cdot \log n$
- aufspalten in  $c$  Blöcke mit je  $\log n$  Ziffern  $\rightarrow$  Zahlen im Intervall  $[0, n)$
- also:  $c$  mal Bucketsort mit Laufzeit je  $\Theta(n) \Rightarrow$  Gesamtlaufzeit  $\Theta(c \cdot n)$

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	35 211
Martyn Vorstand	783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	46 823
Der Alte	46 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

Name	Einkommen
Peter Arbeitsloser	000 035 211
Martyn Vorstand	000 783 491
Henryk Ingenieur	123 456 789
Kiki Unbekannt	000 046 823
Der Alte	000 046 129

Personen aus: Qualityland, Marc-Uwe Kling

# Sortieren polynomiell großer Zahlen

## Gerade gesehen

- $n$  Zahlen aus dem Intervall  $[0, n^c) \rightarrow c$  mal Bucketsort mit Zahlen aus dem Intervall  $[0, n)$
- Laufzeit  $\Theta(cn) \rightarrow \Theta(n)$ , wenn  $c$  konstant
- den Algorithmus nennt man auch **Radixsort** (bzw. LSD Radixsort)

### Theorem

Mit Radixsort können wir  $n$  natürliche Zahlen in  $\Theta(n)$  Zeit sortieren, wenn die Größe der Zahlen in  $n^{O(1)}$  liegt, also polynomiell in  $n$  ist.

# Sortieren polynomiell großer Zahlen

## Gerade gesehen

- $n$  Zahlen aus dem Intervall  $[0, n^c) \rightarrow c$  mal Bucketsort mit Zahlen aus dem Intervall  $[0, n)$
- Laufzeit  $\Theta(cn) \rightarrow \Theta(n)$ , wenn  $c$  konstant
- den Algorithmus nennt man auch **Radixsort** (bzw. LSD Radixsort)

### Theorem

Mit Radixsort können wir  $n$  natürliche Zahlen in  $\Theta(n)$  Zeit sortieren, wenn die Größe der Zahlen in  $n^{O(1)}$  liegt, also polynomiell in  $n$  ist.

## Was jetzt?

- explizitere Formulierung des Algorithmus  $\rightarrow$  erster Schritt Richtung Implementierung
- Korrektheit und Laufzeit nochmal klar machen
- Erklärung des Namens

# Radixsort

## Algorithmus

- Eingabe:  $n$  ganze Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Darstellung jeder Zahl  $x$  zu einer Basis  $b$ :  

$$x_k \cdot b^k + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0 \quad (k = \lfloor \log_b n^c \rfloor)$$

**Beispiel von vorhin:**  $b = 1000$

$$\begin{array}{l}
 000\ 035\ 211 = 000 \cdot 1000^2 + 035 \cdot 1000^1 + 211 \cdot 1000^0 \\
 000\ 783\ 491 = 000 \cdot 1000^2 + 783 \cdot 1000^1 + 491 \cdot 1000^0 \\
 123\ 456\ 789 = 123 \cdot 1000^2 + 456 \cdot 1000^1 + 789 \cdot 1000^0
 \end{array}$$

# Radixsort

## Algorithmus

- Eingabe:  $n$  ganze Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Darstellung jeder Zahl  $x$  zu einer Basis  $b$ :  

$$x_k \cdot b^k + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0 \quad (k = \lfloor \log_b n^c \rfloor)$$
- sortiere die Zahlen erst bzgl.  $x_0$
- sortiere dann stabil bzgl.  $x_1$
- dann bzgl.  $x_2$  und so weiter

**Beispiel von vorhin:**  $b = 1000$

$$\begin{array}{l}
 000\ 035\ 211 = 000 \cdot 1000^2 + 035 \cdot 1000^1 + 211 \cdot 1000^0 \\
 000\ 783\ 491 = 000 \cdot 1000^2 + 783 \cdot 1000^1 + 491 \cdot 1000^0 \\
 123\ 456\ 789 = 123 \cdot 1000^2 + 456 \cdot 1000^1 + 789 \cdot 1000^0
 \end{array}$$

# Radixsort

## Algorithmus

- Eingabe:  $n$  ganze Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Darstellung jeder Zahl  $x$  zu einer Basis  $b$ :  
 $x_k \cdot b^k + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0$  ( $k = \lfloor \log_b n^c \rfloor$ )
- sortiere die Zahlen erst bzgl.  $x_0$
- sortiere dann stabil bzgl.  $x_1$
- dann bzgl.  $x_2$  und so weiter

## Laufzeit

- $\Theta(k \cdot (n + b))$
- $k$  mal sortieren von  $n$  Zahlen der Größe  $b$

**Beispiel von vorhin:**  $b = 1000$

$$\begin{aligned}
 000\ 035\ 211 &= 000 \cdot 1000^2 + 035 \cdot 1000^1 + 211 \cdot 1000^0 \\
 000\ 783\ 491 &= 000 \cdot 1000^2 + 783 \cdot 1000^1 + 491 \cdot 1000^0 \\
 123\ 456\ 789 &= 123 \cdot 1000^2 + 456 \cdot 1000^1 + 789 \cdot 1000^0
 \end{aligned}$$

# Radixsort

## Algorithmus

- Eingabe:  $n$  ganze Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Darstellung jeder Zahl  $x$  zu einer Basis  $b$ :  

$$x_k \cdot b^k + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0 \quad (k = \lfloor \log_b n^c \rfloor)$$
- sortiere die Zahlen erst bzgl.  $x_0$
- sortiere dann stabil bzgl.  $x_1$
- dann bzgl.  $x_2$  und so weiter

## Laufzeit

- $\Theta(k \cdot (n + b))$
- $k$  mal sortieren von  $n$  Zahlen der Größe  $b$
- für  $b = n$  gilt  $k = \lfloor c \rfloor \Rightarrow \Theta(n)$

**Beispiel von vorhin:**  $b = 1000$

$$\begin{array}{l}
 000\ 035\ 211 = 000 \cdot 1000^2 + 035 \cdot 1000^1 + 211 \cdot 1000^0 \\
 000\ 783\ 491 = 000 \cdot 1000^2 + 783 \cdot 1000^1 + 491 \cdot 1000^0 \\
 123\ 456\ 789 = 123 \cdot 1000^2 + 456 \cdot 1000^1 + 789 \cdot 1000^0
 \end{array}$$

# Radixsort

## Algorithmus

- Eingabe:  $n$  ganze Zahlen aus  $[0, n^c]$
- Darstellung jeder Zahl  $x$  zu einer Basis  $b$ :  

$$x_k \cdot b^k + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0 \quad (k = \lfloor \log_b n^c \rfloor)$$
- sortiere die Zahlen erst bzgl.  $x_0$
- sortiere dann stabil bzgl.  $x_1$
- dann bzgl.  $x_2$  und so weiter

**Beispiel von vorhin:**  $b = 1000$

$$\begin{aligned}
 000\ 035\ 211 &= 000 \cdot 1000^2 + 035 \cdot 1000^1 + 211 \cdot 1000^0 \\
 000\ 783\ 491 &= 000 \cdot 1000^2 + 783 \cdot 1000^1 + 491 \cdot 1000^0 \\
 123\ 456\ 789 &= 123 \cdot 1000^2 + 456 \cdot 1000^1 + 789 \cdot 1000^0
 \end{aligned}$$

## Laufzeit

- $\Theta(k \cdot (n + b))$
- $k$  mal sortieren von  $n$  Zahlen der Größe  $b$
- für  $b = n$  gilt  $k = \lfloor c \rfloor \Rightarrow \Theta(n)$

## Korrektheit

- nach Sortierung bzgl.  $x_i$  gilt: Zahlen sind sortiert bzgl.  $x_i \cdot b^i + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0$
- Beweis: Induktion über  $i$

# Radixsort

## Algorithmus

- Eingabe:  $n$  ganze Zahlen aus  $[0, n^c)$
- Darstellung jeder Zahl  $x$  zu einer Basis  $b$ :  

$$x_k \cdot b^k + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0 \quad (k = \lfloor \log_b n^c \rfloor)$$
- sortiere die Zahlen erst bzgl.  $x_0$
- sortiere dann stabil bzgl.  $x_1$
- dann bzgl.  $x_2$  und so weiter

## Laufzeit

- $\Theta(k \cdot (n + b))$
- $k$  mal sortieren von  $n$  Zahlen der Größe  $b$
- für  $b = n$  gilt  $k = \lfloor c \rfloor \Rightarrow \Theta(n)$

## Korrektheit

- nach Sortierung bzgl.  $x_i$  gilt: Zahlen sind sortiert bzgl.  $x_i \cdot b^i + \dots + x_1 \cdot b^1 + x_0 \cdot b^0$
- Beweis: Induktion über  $i$

**Beispiel von vorhin:**  $b = 1000$

$$\begin{aligned}
 000\ 035\ 211 &= 000 \cdot 1000^2 + 035 \cdot 1000^1 + 211 \cdot 1000^0 \\
 000\ 783\ 491 &= 000 \cdot 1000^2 + 783 \cdot 1000^1 + 491 \cdot 1000^0 \\
 123\ 456\ 789 &= 123 \cdot 1000^2 + 456 \cdot 1000^1 + 789 \cdot 1000^0
 \end{aligned}$$

### Nebenbemerkung

- die Basis in einem Zahlensystem nennt man auch **Radix** (binär  $\rightarrow 2$ , dezimal  $\rightarrow 10$ , etc.)
- daher der Name **Radixsort**

# Das ist doch geschummelt!

## Repräsentation der Zahlen im Computer

- Zahlen die bis zu  $n^c$  groß sind  $\rightarrow \log(n^c) = c \log n$  Bits
- wir machen verschiedene Dinge mit den Zahlen:
  - vergleichen
  - Speicherzellen adressieren
  - rechnen (z.B.  $x_0 := x \bmod n$  um die letzten  $\log n$  Bits von  $x$  zu erhalten)
- bisherige Annahme: das geht alles in konstanter Zeit



# Das ist doch geschummelt!

## Repräsentation der Zahlen im Computer

- Zahlen die bis zu  $n^c$  groß sind  $\rightarrow \log(n^c) = c \log n$  Bits
- wir machen verschiedene Dinge mit den Zahlen:
  - vergleichen
  - Speicherzellen adressieren
  - rechnen (z.B.  $x_0 := x \bmod n$  um die letzten  $\log n$  Bits von  $x$  zu erhalten)
- bisherige Annahme: das geht alles in konstanter Zeit



## Fragen über Fragen

- Sollte man nicht eher von  $\Theta(\log n)$  Zeit pro Operation ausgehen?
- Hat Radixsort damit doch Laufzeit  $\Theta(n \log n)$ ?
- Sorgen die  $\Theta(n \log n)$  Vergleiche bei Merge- und Quicksort dann für Laufzeit  $\Theta(n \log^2 n)$ ?

### Hier übliche Notation

- $\log^2 n = \log(n) \cdot \log(n)$
- $\log \log n = \log(\log(n))$

# Das ist doch geschummelt!

## Repräsentation der Zahlen im Computer

- Zahlen die bis zu  $n^c$  groß sind  $\rightarrow \log(n^c) = c \log n$  Bits
- wir machen verschiedene Dinge mit den Zahlen:
  - vergleichen
  - Speicherzellen adressieren
  - rechnen (z.B.  $x_0 := x \bmod n$  um die letzten  $\log n$  Bits von  $x$  zu erhalten)
- bisherige Annahme: das geht alles in konstanter Zeit



## Fragen über Fragen

- Sollte man nicht eher von  $\Theta(\log n)$  Zeit pro Operation ausgehen?
- Hat Radixsort damit doch Laufzeit  $\Theta(n \log n)$ ?
- Sorgen die  $\Theta(n \log n)$  Vergleiche bei Merge- und Quicksort dann für Laufzeit  $\Theta(n \log^2 n)$ ?

### Hier übliche Notation

- $\log^2 n = \log(n) \cdot \log(n)$
- $\log \log n = \log(\log(n))$

## Antwort

- nein (zumindest nicht im Word-RAM Modell)

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$

## Welche Annahme treffen wir für $w$ ?

- Möglichkeit 1:  $w$  konstant (typischer Computer:  $w = 64$ )
  - nur endlich viel Speicher adressierbar  $\rightarrow$  theoretisch unschön (endlicher Automat)
  - arithmetische Operationen in  $\Theta(\log n)$   $\rightarrow$  unrealistisch pessimistisch ( $2^{64} > 1,8 \cdot 10^{19}$ )

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$

## Welche Annahme treffen wir für $w$ ?

- Möglichkeit 1:  $w$  konstant (typischer Computer:  $w = 64$ )
  - nur endlich viel Speicher adressierbar  $\rightarrow$  theoretisch unschön (endlicher Automat)
  - arithmetische Operationen in  $\Theta(\log n)$   $\rightarrow$  unrealistisch pessimistisch ( $2^{64} > 1,8 \cdot 10^{19}$ )
- Möglichkeit 2:  $w$  unbeschränkt  $\rightarrow$  zu optimistisch

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$

## Welche Annahme treffen wir für $w$ ?

- Möglichkeit 1:  $w$  konstant (typischer Computer:  $w = 64$ )
  - nur endlich viel Speicher adressierbar  $\rightarrow$  theoretisch unschön (endlicher Automat)
  - arithmetische Operationen in  $\Theta(\log n)$   $\rightarrow$  unrealistisch pessimistisch ( $2^{64} > 1,8 \cdot 10^{19}$ )
- Möglichkeit 2:  $w$  unbeschränkt  $\rightarrow$  zu optimistisch
- Möglichkeit 3:  $w \geq \log n$ 
  - genug Bits um alle benutzten Speicherzellen zu adressieren
  - nicht zu mächtig:  $w \geq \log n$  ist realistisch für echte Computer

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$
  - $w \geq \log n$

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$
  - $w \geq \log n$

## Implikationen fürs Sortieren polynomiell großer Zahlen

- Vergleiche und Operationen laufen in  $O(1)$
- damit: Laufzeiten  $\Theta(n)$  für Radixsort und  $\Theta(n \log n)$  für Merge- oder Quicksort

# Exkurs: Berechnungsmodell

## Berechnungsmodell (informell)

- RAM (random-access machine):  $O(1)$ -Speicherzugriff mittels Adresse
- word RAM
  - jeder Speicherplatz hält ein **Wort** bestehend aus  $w$  Bits  $\rightarrow$  ganze Zahlen in  $[0, 2^w)$
  - arithmetische Operationen und Vergleiche auf Worten in  $\Theta(1)$
  - $w \geq \log n$

## Implikationen fürs Sortieren polynomiell großer Zahlen

- Vergleiche und Operationen laufen in  $O(1)$
- damit: Laufzeiten  $\Theta(n)$  für Radixsort und  $\Theta(n \log n)$  für Merge- oder Quicksort

## Sortieren noch größerer Zahlen

- Annahme: jede Zahl ist weiterhin durch ein Wort repräsentierbar, aber  $w \in \omega(\log n)$
- weiterhin  $O(1)$ -Operationen, aber Radixsort braucht zu viele Sortierschritte
- geht in erwartet  $O(n\sqrt{\log \log n})$  bzw. deterministisch in  $O(n \log \log n)$

# Sortieren von Zahlen

## Sortieren polynomiell großer Zahlen

- nutze aus, dass man mit Zahlen in  $O(1)$  Zeit Speicherzellen adressieren kann (Arrays)
- $\Theta(n)$ -Sortieren von linear großen Zahlen: Bucketsort
- $\Theta(n)$ -Sortieren von polynomiell großen Zahlen: Aufspalten jeder Zahl in konstant viele linear große Zahlen  $\rightarrow$  Radixsort
- wichtiges Konzept in dem Kontext: lexikographische Sortierung

# Sortieren von Zahlen

## Sortieren polynomiell großer Zahlen

- nutze aus, dass man mit Zahlen in  $O(1)$  Zeit Speicherzellen adressieren kann (Arrays)
- $\Theta(n)$ -Sortieren von linear großen Zahlen: Bucketsort
- $\Theta(n)$ -Sortieren von polynomiell großen Zahlen: Aufspalten jeder Zahl in konstant viele linear große Zahlen  $\rightarrow$  Radixsort
- wichtiges Konzept in dem Kontext: lexikographische Sortierung

## Exkurs: Berechnungsmodell word RAM

- verhält sich bei der Algorithmenanalyse meist wie gewünscht
- formale Einführung von Berechnungsmodellen: TGI (nächstes Semester)