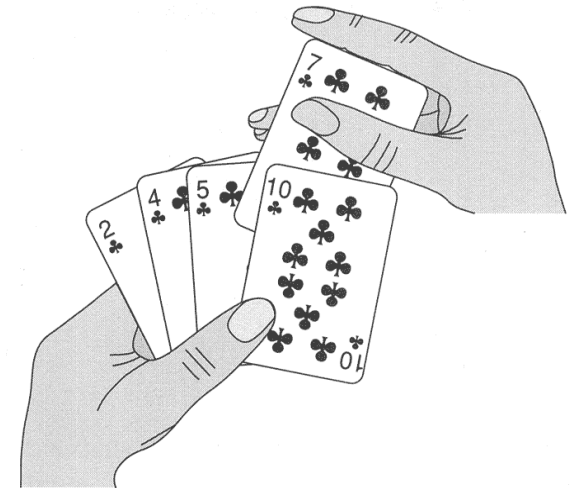
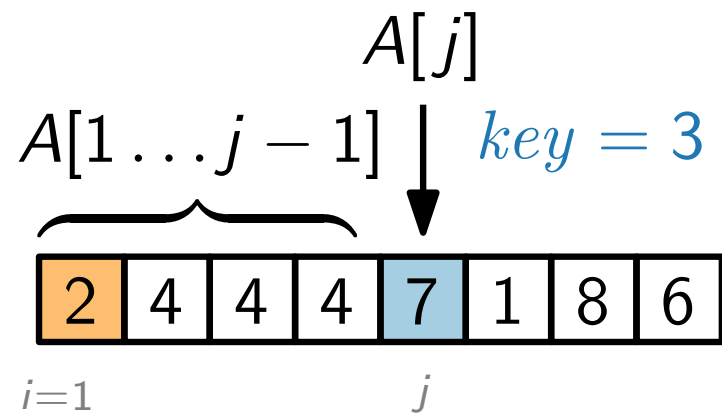


Algorithmen und Datenstrukturen

Vorlesung 1: Sortieren



Das Problem

Gegeben. eine Folge $A = \langle a_1, a_2, \dots, a_n \rangle$ von n Zahlen

Eingabe

↓ **Algorithmus**

Gesucht. eine **Permutation** $\langle a'_1, a'_2, \dots, a'_n \rangle$ von A , so dass $a'_1 \leq a'_2 \leq \dots \leq a'_n$

Umordnung

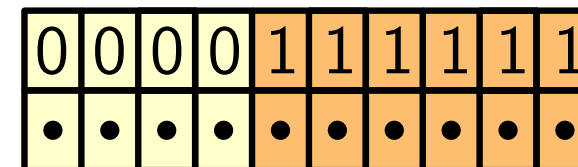
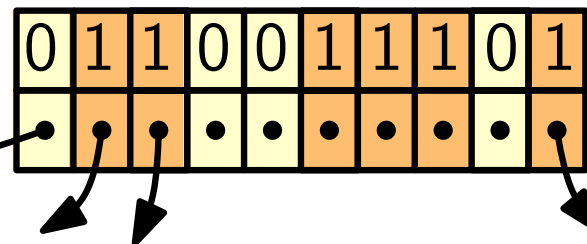
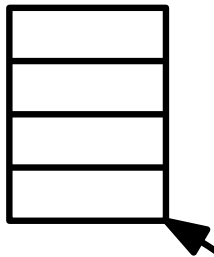
Ausgabe

Beachte. Computerinterne Zahlendarstellung hier unwichtig!

Wichtig:

- Je zwei Zahlen lassen sich vergleichen.
- Ein Vergleich dauert **konstante Zeit**, d.h. die Dauer ist unabhängig von n .

Noch was:



Frage an Alle

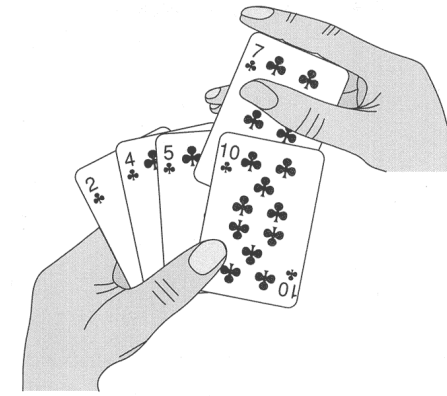
Bild von Kundan Kumar



Wie sortieren Sie Karten?

Mögliche Lösungen

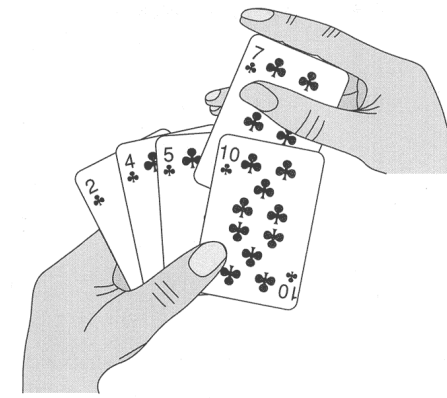
INSERTIONSORT



- Linke Hand anfangs leer. Alle Karten liegen auf dem Tisch.
- Rechte Hand nimmt Karten nacheinander auf und steckt sie (von rechts kommend) an die richtige Position zwischen die Karten in der linken Hand.
- Linke Hand hält **immer eine sortierte Reihenfolge** aufrecht.

Mögliche Lösungen

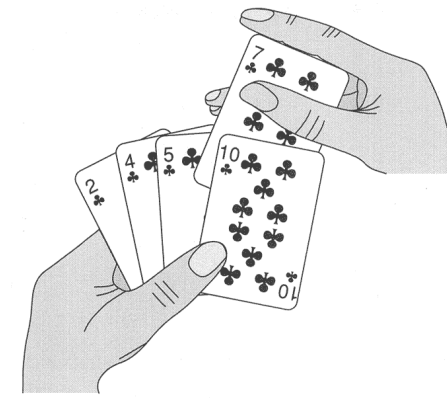
SELECTIONSORT



- Linke Hand anfangs leer. Alle Karten liegen auf dem Tisch.
- Rechte Hand sucht kleinste Karte und nimmt sie in die linke Hand.
- Linke Hand hält **immer eine sortierte Reihenfolge** aufrecht.

Mögliche Lösungen

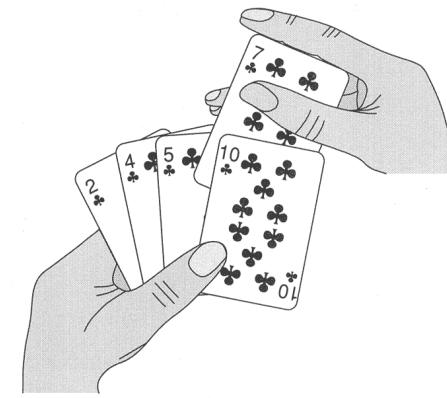
BUBBLESORT



- Linke Hand hält **alle Karten**.
- Vergleiche erste mit zweiter Karte. Wenn erste Karte größer, tausche die Karten.
- Vergleiche nun zweite mit dritter Karte, usw...
- Beginne wieder von vorne und wiederhole, **bis Karten in linker Hand sortiert**.

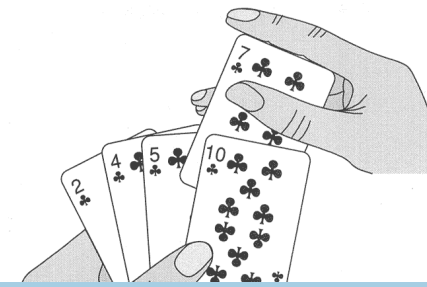
Mögliche Lösungen

BOGOSORT



- Linke Hand hält **alle Karten**.
- Wirf Karten in die Luft und sammle sie in zufälliger Reihenfolge auf.
- Wenn Karten nicht sortiert, beginne wieder von vorne.
- Beginne wieder von vorne und wiederhole, **bis Karten in linker Hand sortiert**.

Mögliche Lösungen



INSERTIONSORT

- Linke Hand anfangs leer. Alle Karten liegen auf dem Tisch.
- Rechte Hand nimmt Karten nacheinander auf und steckt sie (von rechts kommend) an die richtige Position zwischen die Karten in der linken Hand.
- Linke Hand hält **immer eine sortierte Reihenfolge** aufrecht.

SELECTIONSORT

- Linke Hand anfangs leer. Alle Karten liegen auf dem Tisch.
- Rechte Hand sucht kleinste Karte und nimmt sie in die linke Hand
- Linke Hand hält **immer eine sortierte Reihenfolge** aufrecht.

BUBBLESORT

- Linke Hand hält **alle Karten**
- Vergleiche erste mit zweiter Karte. Wenn erste Karte größer, tausche die Karten.
- Vergleiche nun zweite mit dritter Karte, usw...
- Beginne wieder von vorne und wiederhole, **bis Karten in linker Hand sortiert**.

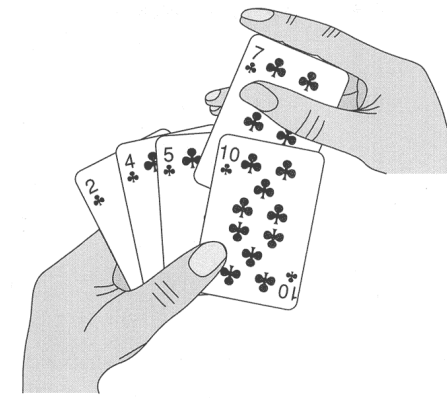
BOGOSORT

- Linke Hand hält **alle Karten**
- Wirf Karten in die Luft und sammle sie in zufälliger Reihenfolge auf.
- Wenn Karten nicht sortiert, beginne wieder von vorne.
- Beginne wieder von vorne und wiederhole, **bis Karten in linker Hand sortiert**.

Inkrementelle Algorithmen

Inkrementeller Algorithmus

INSERTIONSORT



- Linke Hand anfangs leer. Alle Karten liegen auf dem Tisch.
- Rechte Hand nimmt Karten **nacheinander** auf und steckt sie (von rechts kommend) an die richtige **Position zwischen** die Karten in der linken Hand.
- Linke Hand hält **immer eine sortierte Reihenfolge** aufrecht.

Invariante



Korrektheit: am Ende sind alle Karten in der linken Hand – und zwar **sortiert!**

Inkrementeller Algorithmus

// In Pseudocode

INCREMENTALALG(array of ... A)

Name des Alg.

Eingabe

Variable

Typ der Eingabe (hier ein Feld von ...)

Inkrementeller Algorithmus

// In Pseudocode

INCREMENTALALG(array of ... A)

berechne Lösung für Anzahl der Elemente des Feldes A

for $j = 2$ to $A.length$ do // Schleifenkopf

Zuweisungsoperator

- in manchen Sprachen $j := 2$
- in manchen Büchern $j \leftarrow 2$
- in Java $j = 2$

Inkrementeller Algorithmus

// In Pseudocode

INCREMENTALALG(array of ... A)

berechne Lösung für $A[1]$ // Initialisierung

for $j = 2$ **to** $A.length$ **do** // Schleifenkopf

 // Schleifenkörper; wird $(A.length - 1)$ -mal durchlaufen

 berechne Lösung für $A[1 \dots j]$ mithilfe der für $A[1 \dots j - 1]$

Teilarray von A mit den Elementen $A[1], A[2], \dots, A[j]$

return Lösung // Ergebnissrückgabe

Inkrementeller Algorithmus

INSERTIONSORT

```
INCREMENTALALG( array of int A ) // Schreiben wir künftig so: int[] A  
  
  berechne Lösung für A[1] // nix zu tun: A[1 ... 1] ist sortiert  
  
  for j = 2 to A.length do  
    // berechne Lösung für A[1 ... j] mithilfe der für A[1 ... j - 1]  
    ... kommt noch ...  
  
  return Lösung // nicht nötig – das aufrufende Programm  
                    hat Zugriff auf das sortierte Feld A
```

Inkrementeller Algorithmus

INSERTIONSORT

~~INCREMENTALALG~~(array of **int** A) // Schreiben wir künftig so: **int**[] A

~~berechne Lösung für $A[1]$~~ // nix zu tun: $A[1 \dots 1]$ ist sortiert

for $j = 2$ **to** $A.length$ **do**

// berechne Lösung für $A[1 \dots j]$ mithilfe der für $A[1 \dots j - 1]$

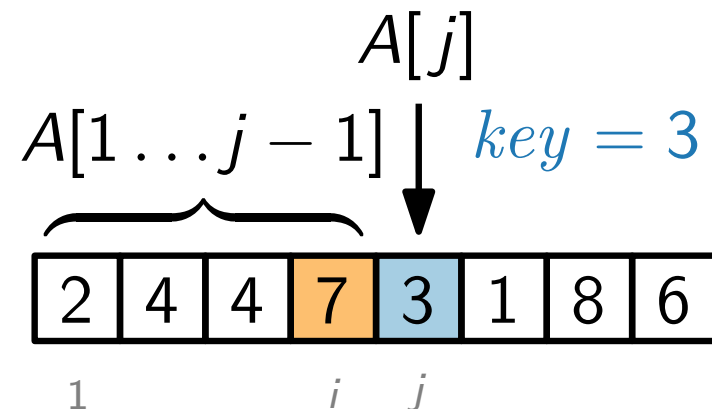
// hier: füge $A[j]$ in die sortierte Folge $A[1 \dots j - 1]$ ein

$key = A[j]$

$i = j - 1$

while $i > 0$ **and** $A[i] > key$ **do**

Wie verschieben wir die Einträge größer key nach rechts?



Inkrementeller Algorithmus

INSERTIONSORT

~~INCREMENTALALG~~(array of **int** A) // Schreiben wir künftig so: **int**[] A

~~berechne Lösung für $A[1]$~~ // nix zu tun: $A[1 \dots 1]$ ist sortiert

for $j = 2$ **to** $A.length$ **do**

// berechne Lösung für $A[1 \dots j]$ mithilfe der für $A[1 \dots j - 1]$

// hier: füge $A[j]$ in die sortierte Folge $A[1 \dots j - 1]$ ein

$key = A[j]$

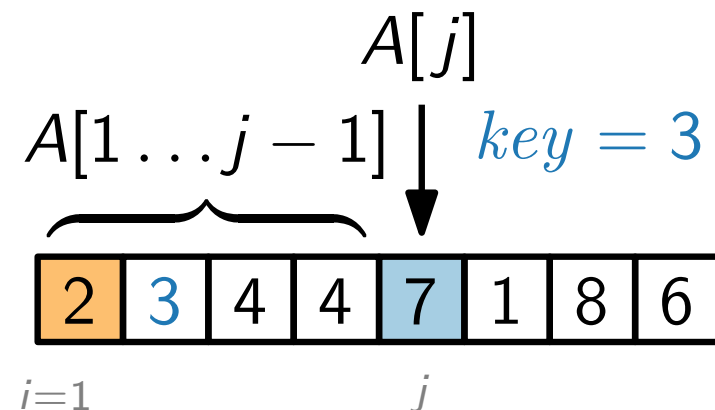
$i = j - 1$

while $i > 0$ **and** $A[i] > key$ **do**

$A[i + 1] = A[i]$

$i = i - 1$

$A[i + 1] = key$



Fertig?

Nicht ganz...

Wir interessieren uns heute (und im Rest dieser Vorlesung) für folgende zentrale Fragen:

- Ist der Algorithmus korrekt?
- Welche Laufzeit hat der Algorithmus?
- Wie viel Speicherplatz benötigt der Algorithmus?

Korrektheit *beweisen*

Schleifeninvariante

```
INSERTIONSORT(int[] A)
  for  $j = 2$  to  $A.length$  do
     $key = A[j]$ 
     $i = j - 1$ 
    while  $i > 0$  and  $A[i] > key$  do
       $A[i + 1] = A[i]$ 
       $i = i - 1$ 
     $A[i + 1] = key$ 
```

Hier enthält $A[1 \dots j - 1]$ dieselben Elemente wie zu Beginn des Algorithmus – jedoch sortiert.

Idee der Schleifeninvariante:

Wo? am Beginn jeder Iteration der **for**-Schleife...

Was? **WANTED:** Bedingung, die
a) an dieser Stelle immer erfüllt ist und
b) bei Abbruch der Schleife Korrektheit liefert

Korrektheit *beweisen*

Schleifeninvariante

```
INSERTIONSORT(int[] A)
  for  $j = 2$  to  $A.length$  do ←
     $key = A[j]$ 
     $i = j - 1$ 
    while  $i > 0$  and  $A[i] > key$  do
       $A[i + 1] = A[i]$ 
       $i = i - 1$ 
     $A[i + 1] = key$ 
```

Hier enthält $A[1 \dots j - 1]$ dieselben Elemente wie zu Beginn des Algorithmus – jedoch sortiert.

Beweis nach Schema „F“: Wir brauchen noch drei Zutaten...

1.) Initialisierung

Zeige: Invariante ist beim 1. Schleifendurchlauf erfüllt.

Hier: klar, denn für $j = 2$ gilt:
 $A[1 \dots j - 1] = A[1 \dots 1]$ ist unverändert und sortiert.

Korrektheit *beweisen*

Schleifeninvariante

```
INSERTSORT(int[] A)
  for  $j = 2$  to  $A.length$  do
     $key = A[j]$ 
     $i = j - 1$ 
    while  $i > 0$  and  $A[i] > key$  do
       $A[i + 1] = A[i]$ 
       $i = i - 1$ 
     $A[i + 1] = key$ 
```

Hier enthält $A[1 \dots j - 1]$ dieselben Elemente wie zu Beginn des Algorithmus – jedoch sortiert.

Beweis nach Schema „F“: Wir brauchen noch drei Zutaten...

1.) Initialisierung ✓ 2.) Aufrechterhaltung

Zeige: Wenn die Invariante vor dem j . Schleifendurchlauf erfüllt ist, dann auch vor dem $j + 1$.

Hier: Eigentlich: Invariante für **while**-Schleife aufstellen und beweisen!

Korrektheit *beweisen*

Schleifeninvariante

```
INSERTSORT(int[] A)
  for  $j = 2$  to  $A.length$  do
     $key = A[j]$ 
     $i = j - 1$ 
    while  $i > 0$  and  $A[i] > key$  do
       $A[i + 1] = A[i]$ 
       $i = i - 1$ 
     $A[i + 1] = key$ 
```

Hier enthält $A[1 \dots j - 1]$ dieselben Elemente wie zu Beginn des Algorithmus – jedoch sortiert.

Beweis nach Schema „F“: Wir brauchen noch drei Zutaten...

1.) Initialisierung ✓ 2.) Aufrechterhaltung ✓

Zeige: Wenn die Invariante vor dem j . Schleifendurchlauf erfüllt ist, dann auch vor dem $j + 1$.

Hier: **Beob.** Elemente werden so lange nach rechts geschoben wie nötig. key wird korrekt eingefügt.

Korrektheit *beweisen*

Schleifeninvariante

```

INSERTSORT(int[] A)
  for  $j = 2$  to  $A.length$  do
     $key = A[j]$ 
     $i = j - 1$ 
    while  $i > 0$  and  $A[i] > key$  do
       $A[i + 1] = A[i]$ 
       $i = i - 1$ 
     $A[i + 1] = key$ 
  
```

Hier enthält $A[1 \dots j - 1]$ dieselben Elemente wie zu Beginn des Algorithmus – jedoch sortiert.

Beweis nach Schema „F“: Wir brauchen noch drei Zutaten...

1.) Initialisierung ✓ 2.) Aufrechterhaltung ✓ 3.) Terminierung ✓

Zeige: Zusammengenommen ergeben Invariante und verletzte Schleifenbedingung die Korrektheit.

Hier: Verletzte Schleifenbedingung ist $j > A.length$.
D.h. $j = A.length + 1$. Einsetzen in Invariante \Rightarrow Algorithmus korrekt!

Noch ein Beispiel: Fakultät berechnen

```
FACTORIAL(int k)
  if k < 0 then error(...)
  f = 1
  j = 2
  while j ≤ k do
    f = f · j
    j = j + 1
  return f
```

Korrekt?

Was passiert, wenn die Schleife gar nicht betreten wird?

Dann ist $j > k$. Da $j = 2 \Rightarrow$

$k = 0$ oder $k = 1$. Also $k! = 1$.

Rückgabewert ist $f = 1$. \Rightarrow Korrekt.

Zur Erinnerung: k Fakultät $= k! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (k - 1) \cdot k$,
wobei $0! = 1$, $1! = 1$, $2! = 2$, $3! = 6$, \dots

Noch ein Beispiel: Fakultät berechnen

```
FACTORIAL(int k)
```

```
  if  $k < 0$  then error(...)
```

```
   $f = 1$ 
```

```
   $j = 2$ 
```

```
  while  $j \leq k$  do
```

```
     $f = f \cdot j$ 
```

```
     $j = j + 1$ 
```

```
  return  $f$ 
```

Schleifeninvariante:

$$f = (j - 1)!$$

1.) Initialisierung ✓

Zeige: Invariante ist beim 1. Schleifendurchlauf erfüllt.

Hier: klar, denn für $j = 2$ gilt:
 $f = (2 - 1)! = 1! = 1$

Noch ein Beispiel: Fakultät berechnen

```
FACTORIAL(int k)
```

```
  if  $k < 0$  then error(...)
```

```
   $f = 1$ 
```

```
   $j = 2$ 
```

```
  while  $j \leq k$  do
```

```
     $f = f \cdot j$ 
```

```
     $j = j + 1$ 
```

```
  return  $f$ 
```

Schleifeninvariante:

$$f = (j - 1)!$$

1.) Initialisierung ✓ 2.) Aufrechterhaltung ✓

Zeige: Wenn die Invariante vor dem j . Schleifendurchlauf erfüllt ist, dann auch vor dem $j + 1$.

Hier: Vor dem j . Durchlauf gilt **Invariante**, d.h. $f = (j - 1)!$
Dann wird f mit j multipliziert $\Rightarrow f = j!$
Dann wird j um 1 erhöht $\Rightarrow f = (j - 1)! \Rightarrow$ **Invariante**

Noch ein Beispiel: Fakultät berechnen

```
FACTORIAL(int k)
```

```
  if  $k < 0$  then error(...)
```

```
   $f = 1$ 
```

```
   $j = 2$ 
```

```
  while  $j \leq k$  do
```

```
     $f = f \cdot j$ 
```

```
     $j = j + 1$ 
```

```
  return  $f$ 
```

Schleifeninvariante:

$$f = (j - 1)!$$

1.) Initialisierung ✓ 2.) Aufrechterhaltung ✓ 3.) Terminierung

Zeige: Algo terminiert.

Zusammen ergeben Invariante und verletzte Schleifenbedingung die Korrektheit.

Hier: Algo terminiert, da j in jedem Durchlauf erhöht wird.

Verletzte Schleifenbedingung: $j > k$, also $j = k + 1$.

Einsetzen von „ $j = k + 1$ “ in **Invariante** liefert $f = k!$

Noch ein Beispiel: Fakultät berechnen

```
FACTORIAL(int k)
  if k < 0 then error(...)
  f = 1
  j = 2
  while j ≤ k do
    f = f · j
    j = j + 1
  return f
```

Schleifeninvariante:

$$f = (j - 1)!$$

1.) Initialisierung ✓ 2.) Aufrechterhaltung ✓ 3.) Terminierung ✓

Der Algorithmus FACTORIAL(int) terminiert und liefert das korrekte Ergebnis.

Selbstkontrolle

■ *Programmieren Sie InsertionSort in Java!*

■ *Lesen Sie Kapitel 1 und Anhang A des Buchs von*

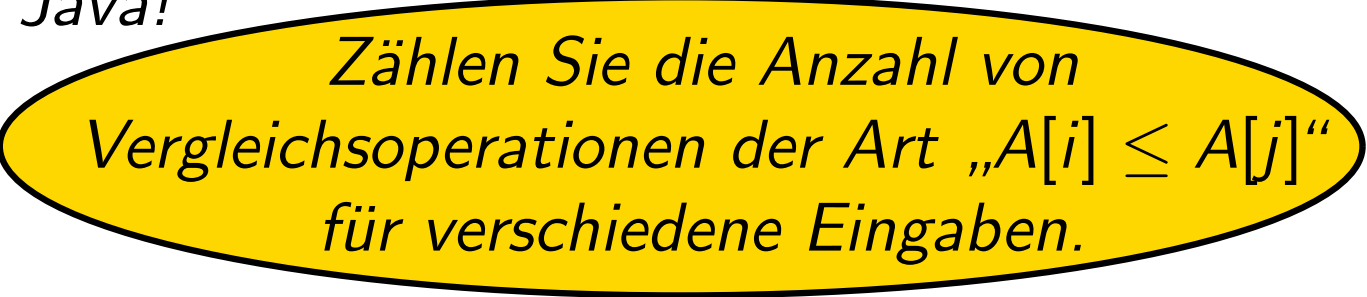
Cormen et al. durch und machen Sie dazu so viel Übungsaufgaben wie möglich!

■ *Bringen Sie Fragen in die Übung mit!*

■ *Bleiben Sie von Anfang an am Ball!*

■ *Schreiben Sie sich in die Vorlesung ein:*

- wuecampus2.uni-wuerzburg.de
- wuestudy.zv.uni-wuerzburg.de



Zählen Sie die Anzahl von Vergleichsoperationen der Art „ $A[i] \leq A[j]$ “ für verschiedene Eingaben.