

Middleware – Cloud Computing – Übung

Aufgabe 4: MapReduce Framework

Wintersemester 2025/26

Paul Bergmann, Christian Berger

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
Lehrstuhl Informatik 4 (Systemsoftware)

<https://sys.cs.fau.de>



Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

MapReduce

- Einführung und Grundlagen

- Ablauf eines MapReduce-Jobs

- Aufgaben des Frameworks

Implementierungstipps

- Abstract Factory Entwurfsmuster

- Vergleichen und Sortieren mit Java

- Zusammenführung vorsortierter Listen

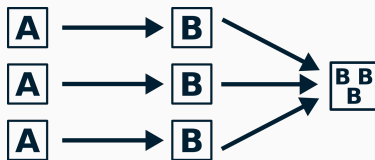
- Futures

- Daten finden und extrahieren

MapReduce

Einführung und Grundlagen

- Programmiermodell zur Strukturierung von Programmen für **parallele, verteilte** Ausführung
- Map und Reduce ursprünglich Bausteine aus funktionalen Programmiersprachen (z. B. LISP)
 - **Map:** Abbildung eines Eingabeelements auf ein Ausgabeelement
 - **Reduce:** Zusammenfassung mehrerer gleichartiger Eingaben zu einer einzelnen Ausgabe
- Formulierung zu lösender Aufgaben in MapReduce
 - Aufteilen in (potentiell mehrere) Map- und Reduce-Schritte
 - Implementierung der Map- und Reduce-Methoden (Entwickler)
 - Parallelisierung und Verteilung (MapReduce-**Framework**)



- „MapReduce: Simplified data processing on large clusters” (OSDI’04)
- Ursprüngliche Implementierung von Google nicht öffentlich
- Zahlreiche Open-Source-Implementierungen (z. B. **Apache Hadoop**, Disco, MR4C)
 - Ermöglicht Verarbeitung riesiger Datenmengen
 - Vereinfachung der Anwendungsentwicklung

- Literatur



Jeffrey Dean and Sanjay Ghemawat

MapReduce: Simplified data processing on large clusters

Proceedings of the 6th Conference on Operating Systems Design and Implementation (OSDI '04), pages 137–150, 2004.

Hadoop-Framework (Komponenten)

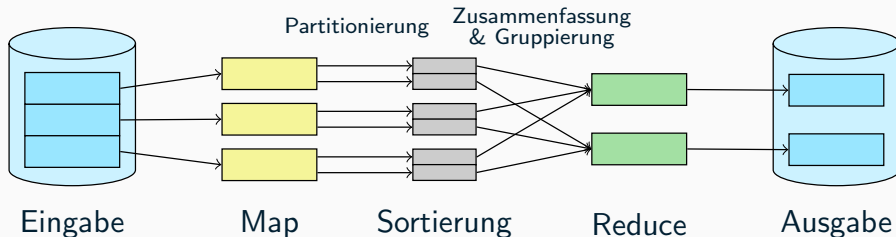


Quelle der Illustration: <https://blog.codecentric.de/2013/08/einfuehrung-in-hadoop-die-wichtigsten-komponenten-von-hadoop-teil-3-von-5/>

MapReduce

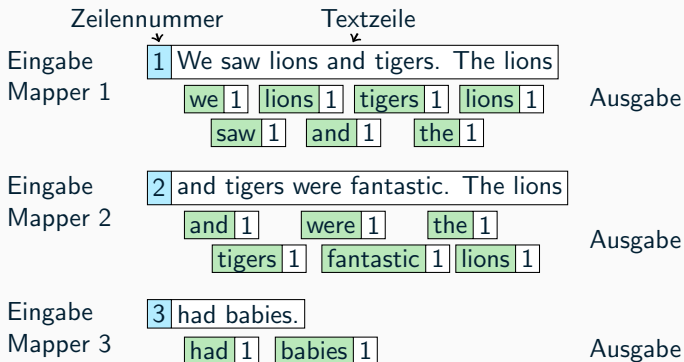
Ablauf eines MapReduce-Jobs

- Übersicht: Ablauf eines MapReduce-Durchlaufs



- Darstellung der Daten in Form von **Schlüssel-Wert-Paaren**

- Abbildung in der Map-Phase
 - Parallele Verarbeitung verschiedener Teilbereiche der Eingabedaten
 - Eingabedaten in Form von Schlüssel-Wert-Paaren
 - Abbildung auf **variable Anzahl** von **neuen** Schlüssel-Wert-Paaren
- Beispiel: Zählen von Wörtern



■ Schnittstelle **Mapper** in Apache Hadoop

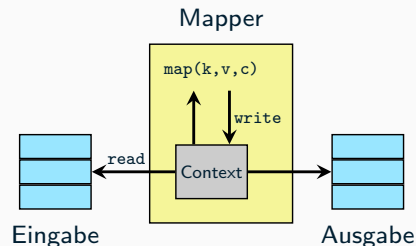
```
public class Mapper<KEYIN, VALUEIN, KEYOUT, VALUEOUT> {  
    void map(KEYIN key, VALUEIN value, Context context) {  
        context.write((KEYOUT) key, (VALUEOUT) value);  
    }  
}
```

■ Festlegen von Datentypen mittels „Generics“

■ Parameter:

- **key**: Schlüssel, z. B. Zeilennummer
- **value**: Wert, z. B. Inhalt der Zeile
- **context**: Ausführungskontext, enthält `write()`-Methode zur Ausgabe von Schlüssel-Wert-Paaren

- Jeder Mapper referenziert einen Context
- Context verwaltet die Ein- und Ausgabe des Mappers
 - Stellt Reader zum Lesen von Schlüssel-Wert-Paare aus Eingabe des Mappers bereit
 - Sammelt und bereitet Schlüssel-Wert-Paare für die Ausgabe des Mappers vor (z.B. Partitionierung)
- Datenfluss im Mapper:
 1. Reader liest nächstes Schlüssel-Wert-Paar aus Eingabe
 2. Schlüssel-Wert-Paar wird an map-Funktion übergeben
 3. map-Funktion übergibt Context das Ergebnis
 4. Context schreibt Ergebnis in die Ausgabe

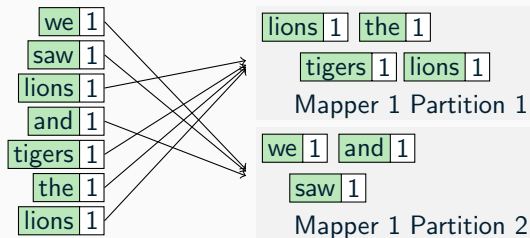


Context-Parameter in map

Der Parameter context in map zeigt auf das selbe Objekt, das der Mapper intern verwendet. Diese Trennung erlaubt eine komfortablere Implementierung der map-Funktion.

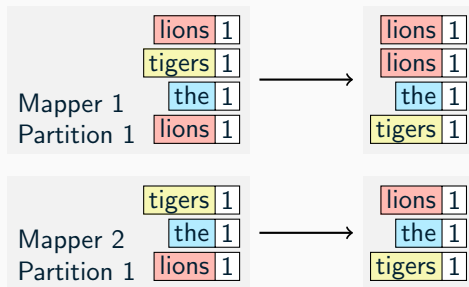
- Zuordnung der Mapper-Ausgabe zu späterem Reducer
 - Gleiche Schlüssel müssen zu gleichem Reducer
 - Eingaben der einzelnen Reducer sind unabhängig → parallelisierbar
- Schnittstelle **Partitioner** in Apache Hadoop

```
public class Partitioner<KEY, VALUE> {  
    int getPartition(KEY key, VALUE value, int numPartitions) {  
        return (key.hashCode() & Integer.MAX_VALUE) % numPartitions;  
    }  
}
```



■ Sortieren der Partitionen nach **Schlüssel**

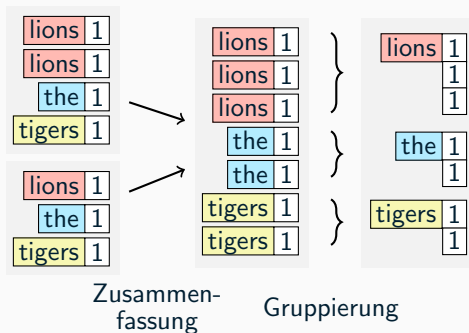
- Lokale Vorsortierung nach Verarbeitung der Daten durch Mapper
- Jede Partition wird einzeln sortiert



Sortierung

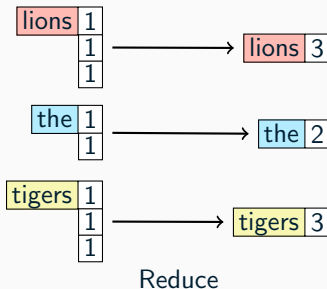
■ Zusammenfassen und Gruppierung der Daten nach **Schlüssel**

- Eingaben für Reducer befinden sich in (mehreren) Mapper-Ausgaben
- **Zusammenfassung** der vorsortierten Partitionen zu einer vollständig sortierten Gesamtliste
- **Gruppierung** aller Werte unter identischem Schlüssel
- Statt Schlüssel-Wert-Paar nun Schlüssel und **Liste von Werten**



■ Zusammenführen von Daten in der Reduce-Phase

- Eingabe in Form von Schlüssel und allen zugehörigen Werten aus Mapper
- Parallele Verarbeitung verschiedener Teilbereiche von Schlüssel
- Abbildung auf **variable Anzahl** von **neuen Schlüssel-Wert-Paaren**



■ Schnittstelle **Reducer** in Apache Hadoop:

```
public class Reducer<KEYIN, VALUEIN, KEYOUT, VALUEOUT> {  
    void reduce(KEYIN key, Iterable<VALUEIN> values, Context context) {  
        for(VALUEIN value : values) {  
            context.write((KEYOUT) key, (VALUEOUT) value);  
        }  
    }  
}
```

■ Parameter:

- **key**: Schlüssel aus Sortierungsphase
- **values**: Liste von Werten, welche zu dem Schlüssel gruppiert wurden
- **context**: Ausführungskontext, enthält `write()`-Methode zur Ausgabe von Schlüssel-Wert-Paaren

MapReduce

Aufgaben des Frameworks

- Generelle **Steuerung** der MapReduce-Abläufe
 - Scheduling einzelner (Teil-)Aufgaben
 - Einhaltung der Reihenfolge bei Abhängigkeiten
 - Zwischenspeicherung der Daten
- Implementiert grundsätzliche **Algorithmen** (z. B. Sortierung)
- Bereitstellen von **Schnittstellen** zur Anpassung von
 - Dateneingabe (Deserialisierung)
 - Mapper
 - Partitionierung
 - Sortierung/Gruppierung
 - Reducer
 - Datenausgabe (Serialisierung)

Implementierungstipps

Abstract Factory Entwurfsmuster

- Framework stellt **Rahmen** für Anwendungen auf
 - Lediglich **grundsätzlicher Ablauf** vorgegeben
 - Details der Anwendung nicht vorab bekannt
 - Hohe Flexibilität und Konfigurierbarkeit notwendig
- Im Fall des MapReduce-Frameworks in der Aufgabe:
 - Deserialisierung
 - Mapper
 - Reducer
 - Sortierkriterium
- Auswählbare Implementierung für einzelne Schritte
 - Framework muss notwendige Objekte selbst instanziiieren

⇒ Lösung mittels „Factory Pattern“

- Problemstellung: Es sollen Objekte instanziiert werden, welche eine bestimmte Schnittstelle zur Verfügung stellen, ohne dass der genaue Typ vorab bekannt ist.

→ **Kapselung der Instanziierung** in eigener Klasse

- Beispiel:

```
public class WordCountMapper implements Mapper {  
    ...  
}  
  
public class WordCountFactory {  
    public Mapper createMapper() {  
        return new WordCountMapper();  
    }  
}
```

- **Allerdings:** Klasse WordCountFactory muss Framework bekannt sein

- Lösung durch weitere Abstraktionsschicht: Schnittstelle zur Instanziierung

```
public class WordCountMapper implements Mapper { ... }

public interface MapperFactory {
    public Mapper createMapper();
}

public class WordCountFactory implements MapperFactory {
    public Mapper createMapper() {
        return new WordCountMapper();
    }
}
```

- Verwendung:

```
void myMethod(MapperFactory mfact) {
    Mapper m = mfact.createMapper();
    ...
}
```

Implementierungstipps

Vergleichen und Sortieren mit Java

■ Comparable

- Vergleicht Objekt mit **anderem** gegebenen Objekt

```
public interface Comparable<T> {  
    public int compareTo(T o);  
}
```

■ Comparator

- Vergleicht **zwei** gegebene Objekte miteinander
- **Invariante:** `Object.equals(o1, o2) == true` \Leftrightarrow `Comparator.compare(o1, o2) == 0`
- **Kein Ableiten** der zu sortierenden Objekte notwendig

```
public interface Comparator<T> {  
    public int compare(T o1, T o2);  
}
```


■ Verwendung:

- Methoden `compareTo()` und `compare()` liefern Integer zurück
 - **negativ**: Linker Wert **kleiner** als rechter Wert (kommt **vor**...)
 - **0**: Beide Werte sind **gleich** (**äquivalent**)
 - **positiv**: Linker Wert **größer** als rechter Wert (kommt **nach**...)

```
int x = links.compareTo(rechts);  
int y = comparator.compare(links, rechts);
```

■ Beispiel: Strings in einer TreeMap rückwärts sortieren

```
class RevStringComparator implements Comparator<String> {  
    public int compare(String o1, String o2) {  
        return -o1.compareTo(o2);  
    }  
}
```

```
RevStringComparator revcmp = new RevStringComparator();  
TreeMap<String,X> treemap = new TreeMap<String,X>(revcmp);
```

Implementierungstipps

Zusammenführung vorsortierter Listen

- Aufgabe: Zusammenführen bereits vorsortierter Listen
 - Vergleich des obersten Elements über alle Listen
 - Kleinstes Element bestimmt nächstes Ausgabeelement
- Datenstruktur **Priority-Queue**
 - Einfügen von Elementen mit zugeordneter Priorität
 - Entfernen entnimmt immer Element mit **höchster** Priorität
 - Üblicherweise als Heap-Datenstruktur implementiert

```
public PriorityQueue(int capacity, Comparator c); // Festlegen der Sortierung mittels Comparator
public boolean add(E item);                      // Einfügen eines Elements vom Typ E
public E peek();                                 // Abfrage des obersten Elements
public E poll();                                 // Entnahme des obersten Elements
```

- Nutzung als Merge-Algorithmus
 - Priorität entspricht Wertigkeit des **obersten Elements** jeder **Liste**
 - Entnahme aus Priority-Queue liefert Liste mit nächstem Element

1. Priority-Queue mit vorsortierten Listen befüllen
2. Entnahme des Elements höchster Priorität liefert Liste, welche das nächste auszugebende Listenelement an erster Stelle enthält
3. Ausgeben und Entfernen des obersten Listenelements aus der entnommenen Liste
4. Liste wieder in Priority-Queue einfügen
5. Wiederholen ab (2), bis alle Listen leer sind

Implementierungstipps

Futures

■ Allgemeine Schnittstelle

```
boolean isDone();  
<beliebiger Datentyp> get();
```

■ Funktionsweise

1. Beim asynchronen Aufruf wird (statt dem eigentlichen Ergebnis) sofort ein Future-Objekt zurückgegeben
2. Das Future-Objekt lässt sich befragen, ob der tatsächliche Rückgabewert der Operation bereits vorliegt bzw. ob die Operation beendet ist → `isDone()`
3. Ein Aufruf von `get()`
 - liefert das Ergebnis der Operation sofort zurück, sofern es zu diesem Zeitpunkt bereits vorliegt **oder**
 - blockiert solange, bis das Ergebnis eingetroffen ist

■ Schnittstelle Future

```
public interface Future<V> {  
    public V get() throws InterruptedException, ExecutionException;  
    public V get(long timeout, TimeUnit unit)  
        throws InterruptedException, ExecutionException, TimeoutException;  
  
    public boolean isDone();  
  
    public boolean cancel(boolean mayInterruptIfRunning);  
    public boolean isCancelled();  
}
```

■ Umfang

- Methoden der allgemeinen Future-Schnittstelle
- Zusätzliche Methoden zum Abbrechen von Tasks
- get() wirft ggf. von Operation geworfene Exception
 - Verpackt als ExecutionException
 - Zugriff auf ursprüngliche Exception: executionException.getCause()

■ Interface ExecutorService

- Erlaubt asynchrone Ausführung von Tasks
- Task bei Executor-Service „abgeben“, Ergebnis per Future

```
// ExecutorService erstellen (Beispiele)
public static ExecutorService newSingleThreadExecutor(); // einzelner Thread
public static ExecutorService newFixedThreadPool(int nThreads); // konstante Anzahl Threads

<T> Future<T> submit(Callable<T> task);
Future<?> submit(Runnable task)

public void shutdown();
boolean awaitTermination(long timeout, TimeUnit unit);
```

■ Interface Callable

```
public interface Callable<V> {
    V call() throws Exception;
}
```

■ Interface Runnable

```
public interface Runnable {
    void run();
}
```


■ Beispielflasse

```
public class FutureExample implements Callable<Integer> {  
    private int a;  
  
    public FutureExample(int a) {  
        this.a = a;  
    }  
    public Integer call() throws Exception {  
        return a * a;  
    }  
}
```

■ Aufruf

```
ExecutorService es = Executors.newSingleThreadExecutor();  
FutureExample task = new FutureExample(4);  
Future<Integer> f = es.submit(task);  
[...]  
try {  
    System.out.println("result:␣" + f.get());  
} catch (InterruptedException | ExecutionException e) {  
    // Fehlerbehandlung  
}
```

Implementierungstipps

Daten finden und extrahieren

- Typische MapReduce-Anwendung: Extrahieren von Daten
 - Statistiken, Data Mining
 - Mustererkennung, Machine Learning
 - Graph-Algorithmen
- Eingabedaten häufig in Form von Textzeilen
- Zeilenweise Partitionierung von Eingabedaten problematisch:
Zusammengehörige Daten können in **unterschiedlichen** Worker-Threads verarbeitet werden
- Lösungsmöglichkeiten:
 - Beeinflussung der Partitionierung durch Eingabedaten
 - Verwerfen unvollständiger Datensätze, z. B. statistischen Auswertungen großer Datenmengen

- Einfache Methoden in `Java.lang.String`

- Finden konstanter Zeichenketten

- Vorwärts suchen ab bestimmter Position:

```
public int indexOf(String str, int start);
```

- Rückwärts suchen ab bestimmter Position:

```
public int lastIndexOf(String str, int start);
```

- Teilstrings extrahieren:

```
public String substring(int start, int end);
```

- Ausgabe des Strings ab `start` bis `end`, **ohne** `end` selbst
- Tipp: Zum Testen ein Zeichen vor und nach dem gesuchten Teilbereich ausgeben lassen