

# Middleware – Cloud Computing

## Energieeffiziente Datenzentren

---

Wintersemester 2024/25

Tobias Distler

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



**Lehrstuhl für Informatik 4**  
Systemsoftware



**FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG**

TECHNISCHE FAKULTÄT


## Energieeffiziente Datenzentren

Motivation

Yahoo Compute Coop

Temperaturabhängige Lastverteilung

Energieeffizientes Hadoop

- Ziel auf Datenzentrumsebene: **Energieeffiziente Kühlung der Systeme**
  - Stand der Kunst vor 2004
    - Empfehlung der ASHRAE [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers]
    - Optimale Temperatur für Datenzentren zwischen 16 und 18 °C
  - Umdenken nach empirischer Überprüfung der Empfehlung: Temperaturen um 27 °C
- Ziel auf Systemebene: **Energieproportionale Systeme**
  - Energieverbrauch ist abhängig von der geleisteten Arbeit
  - Ideal: Kein Stromverbrauch im Leerlauf
- Herausforderungen
  - Wie lässt sich ein **Datenzentrum mit „natürlicher“ Klimaanlage** bauen?
  - Wie lässt sich Anwendungswissen zum Stromsparen nutzen?
- Literatur
  -  Gregory Mone  
**Redesigning the data center**  
*Communications of the ACM*, 55(10):14–16, 2012.

## Energieeffiziente Datenzentren

Motivation

Yahoo Compute Coop

Temperaturabhängige Lastverteilung

Energieeffizientes Hadoop

- Grundkonzept für Klimatisierung
  - Normalfall: **Kühlung mittels Umgebungsluft**
  - An warmen Tagen: Zusätzliche Kühlung durch Verdunstungskälte
  - **Kein Einsatz konventioneller Klimaanlage**
  - Keine Entstehung von Kühlabwasser
- Beispielstandort: Lockport, New York, USA
  - Durchschnittstemperaturen im Juli (heißester Monat): 16 – 28 °C
  - Erwartungswerte
    - > 27 °C: 212 Stunden pro Jahr
    - > 32 °C: 34 Stunden pro Jahr
  - Ca. 20 km Distanz zu den Niagarafällen → **Strom aus Wasserkraft**
- Literatur
  -  A. D. Robison, Christina Page, and Bob Lytle  
**Yahoo! Compute Coop (YCC): A next-generation passive cooling design for data centers**  
*Technical Report DE-EE0002899, Yahoo Inc., 2011.*

- Einsatz von Ventilatoren
  - Teil der Außenwände des Gebäudes
  - **Steuerung des Luftstroms**
- Kühlmodus des Datenzentrums abhängig von Außentemperatur
  - 21 – 29 °C: **Nutzung unbehandelter Umgebungsluft**
    - Umgebungsluft dringt durch Lüftungsschlitze in den Wänden ins Gebäude ein
    - Einsatz von Luftfiltern
    - Weiterleitung des Luftstroms durch die Server-Schränke
    - Abzug der warmen Luft durch Luftschlitze im „Dachboden“
  - < 21 °C: **Nutzung erwärmter Umgebungsluft**
    - Luftstrom wie bei erster Variante
    - Zusätzlich: Rückführung eines Teils der Abluft zur Erwärmung der einströmenden Luft
  - 29 – 43 °C: **Nutzung gekühlter Umgebungsluft**
    - Luftstrom wie bei erster Variante
    - Zusätzlich: Kühlung der Luft mittels Verdunstungskälte

## ■ Power Usage Effectiveness (PUE)

- Metrik für die Energieeffizienz von Datenzentren

- $$PUE = \frac{\text{Gesamter Energieverbrauch}}{\text{Energieverbrauch der IT-Systeme}}$$

- Idealwert: 1,0

- Üblicher Wert für industrielle Datenzentren: Wert zwischen 1,5 und 2,0

- Vorheriger Bestwert eines Yahoo-Datenzentrums

- Standort: Wenatchee, Washington, USA
- PUE-Wert: 1,25

## ■ Datenzentrum in Lockport [Robison et al.]

- PUE-Wert liegt zwischen 1,08 und 1,11

- Während mehr als **99 % der Betriebszeit reicht die natürliche Kühlung aus**

- 99 % geringerer Wasserverbrauch als ein wassergekühltes Datenzentrum

- Nebeneffekt: **Verfügbarkeitsgrad von 99,98 %**

## ■ Ähnliches Konzept: Facebook (z. B. in Prineville, Oregon, USA)

## Energieeffiziente Datenzentren

Motivation

Yahoo Compute Coop

Temperaturabhängige Lastverteilung

Energieeffizientes Hadoop



# Temperaturabhängige Lastverteilung

## ■ Problem

- Rechner produzieren je nach Auslastung unterschiedlich viel Wärme
  - Kühleffekt abhängig von der Distanz zur Klimaanlage
- Aufrechterhaltung einer **einheitlichen Raumtemperatur** nicht trivial

## ■ Temperaturabhängige Lastverteilung

- Detaillierte Temperaturmessung: Fläche + unterschiedliche Höhen
- Platzierung von Prozessen abhängig von erwarteter Wärmeentwicklung
- Ziele
  - Reduzierung der auftretenden Temperaturunterschiede
  - Minimierung der Höchsttemperatur

→ Energieeinsparung durch **Entlastung der Klimaanlage**

## ■ Literatur



Ratnesh K. Sharma, Cullen E. Bash, Chandrakant D. Patel, Richard J. Friedrich et al.  
**Balance of power: Dynamic thermal management for Internet data centers**  
*IEEE Internet Computing*, 9(1):42–49, 2005.

## Energieeffiziente Datenzentren

Motivation

Yahoo Compute Coop

Temperaturabhängige Lastverteilung

**Energieeffizientes Hadoop**

- **Log-Daten-Analyse eines Yahoo-Hadoop-Cluster** im Produktiveinsatz
  - 2.600 Server, 34 Millionen Dateien, 6 Petabytes Daten
  - Ergebnisse für eines der Hauptverzeichnisse
    - 99 % der Dateien werden innerhalb von 2 Tagen nach dem Anlegen gelesen
    - 80 % der Dateien werden max. 8 Tage nach dem Anlegen letztmalig gelesen
    - 80 % der Dateien werden später als 20 Tage nach dem letzten Lesen gelöscht
  - Folgerungen
    - „Heiße Phase“: Relativ **häufige Zugriffe kurz nach dem Anlegen** der Daten
    - „Kalte Phase“: Anschließende, vergleichsweise **lange Phase ohne Zugriffe**
- **GreenHDFS: Energieeinsparung durch Anpassung an Nutzungsprofil**
- Literatur
  -  Rini T. Kaushik, Milind Bhandarkar, and Klara Nahrstedt  
**Evaluation and analysis of GreenHDFS: A self-adaptive, energy-conserving variant of the Hadoop distributed file system**  
*Proceedings of the 2nd International Conference on Cloud Computing Technology and Science (CLOUDCOM '10)*, S. 274–287, 2010.

### ■ **Heiße Zone** (*Hot Zone*)


- Verwaltung von Daten, die sich gerade in ihrer „heißen Phase“ befinden
- Mehrheit (z. B. 75 % [Kaushik et al.]) der Rechner im Cluster
- Rechner mit hoher Leistungsfähigkeit
- **Durchgängiger Betrieb** der Rechner


### ■ **Kalte Zone** (*Cold Zone*)

- Verwaltung von Daten, die sich gerade in ihrer „kalten Phase“ befinden
- Restliche Rechner im Cluster
- Rechner mit geringerer Leistungsfähigkeit aber vielen Festplatten
- Betrieb eines Rechners jeweils **nur nach Bedarf** (z. B. per *Wake-on-LAN*)

### ■ Üblicher Lebenszyklus einer Datei

- Erzeugung in der heißen Zone
- Bei einem bestimmten Alter der Datei: **Migration in die kalte Zone**
- Löschung der Datei in der kalten Zone

- **Anpassung der Replikationslogik** des verteilten Dateisystems [z. B. HDFS]
  - Definition eines *Covering Subset*: Untergruppe von Rechnern des Cluster
  - Modifikation des Auswahlmechanismus für Replikate
    - Mindestens ein Replikat jedes Datenblocks muss Teil des Covering Subset sein
    - Selektion der anderen Replikate wie bisher
- Vorteile
  - **Covering Subset im Normalfall für Verfügbarkeit ausreichend**
  - Sonstige Rechner nur beim Speichern der Ergebnisse erforderlich
- Nachteile
  - Reduzierung des Grads an Parallelität
  - **Erhöhte Latenzen** sowohl im Normal- als auch im Fehlerfall
- Literatur
  -  Jacob Leverich and Christos Kozyrakis  
**On the energy (in)efficiency of Hadoop clusters**  
*Operating Systems Review*, 44(1):61–65, 2010.

- Phasenweise Bearbeitung von MapReduce-Jobs
  - **Gebündelte Ausführung von Jobs** auf allen Rechnern
  - Anschließend: Versetzen des **kompletten Cluster in den Energiesparmodus**
  - Reaktivierung des Cluster zu Beginn der nächsten Phase
- Vorteile
  - Keine Einschränkung der für einen Job verfügbaren Ressourcen
  - **Breite Lastverteilung** der Dateisystemanfragen möglich
  - Keine Modifikationen am Dateisystem erforderlich
- Nachteile
  - Erhöhte Latenzen für Jobs, die während einer Energiesparphase eintreffen
  - **Einzelner Job kann Wechsel in den Energiesparmodus aufhalten**
- Literatur
  -  Willis Lang and Jignesh M. Patel  
**Energy management for MapReduce clusters**  
*Proceedings of the VLDB Endowment*, 3(1-2):129–139, 2010.

## ■ Analyse eines Facebook-Hadoop-Cluster im Produktiveinsatz

- 3.000 Server, 45 Tage, mehr als 1 Million MapReduce-Jobs
- Tägliche Lastspitzen um Mittag und Mitternacht
- Identifikation zweier Job-Klassen
  - **Interaktive, zeitsensitive Jobs:** Ad-hoc-Anfragen von Entwicklern
    - \* Eingabedaten decken nur einen kleinen Teil der Gesamtdaten ab
    - \* Viele dieser Jobs arbeiten auf denselben bzw. ähnlichen Eingabedaten
  - **Nicht-zeitsensitive Batch-Jobs**

## ■ Berkeley Energy Efficient MapReduce (BEEMR)

- Energieeinsparung durch **Ausnutzung der Eigenschaften interaktiver Jobs**
- Gebündelte Ausführung von Batch-Jobs

## ■ Literatur



Yanpei Chen, Sara Alspaugh, Dhruba Borthakur, and Randy Katz  
**Energy efficiency for large-scale MapReduce workloads with significant interactive analysis**  
*Proc. of the 7th European Conference on Computer Systems (EuroSys '12)*, S. 43–56, 2012.

## ■ Interaktive Zone

- Kleiner Teil der Rechner im Cluster
- **Durchgängiger Betrieb** der Rechner
- Vorrangige Bearbeitung interaktiver Jobs

## ■ Batch-Zone

- Restlicher Teil des Cluster
- Normalzustand: Rechner im Energiesparmodus
- **Periodische Aktivierung aller Rechner** zur Abarbeitung von Batch-Jobs
- Rückkehr in den Energiesparmodus, sobald alle eingeplanten Batch-Jobs beendet sind

## ■ Start eines neuen Jobs

- **Klassifizierung mittels in der Studie ermittelter Schwellenwerte**
- Für interaktive Jobs
  - Überprüfung, ob Eingabedaten bereits in der interaktiven Zone verfügbar
  - Bei Bedarf: Holen der Eingabedaten während der nächsten Batch-Phase