

Middleware – Cloud Computing

Energieeffiziente Datenzentren

Wintersemester 2025/26

Tobias Distler, Christian Berger

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

■ 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 Hauptverzeichnis
 - 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