# Datenreduktion

## Hochleistungs-Ein-/Ausgabe

Michael Kuhn

Wissenschaftliches Rechnen
Fachbereich Informatik
Universität Hamburg

2018-06-15

# E/A-Schichten

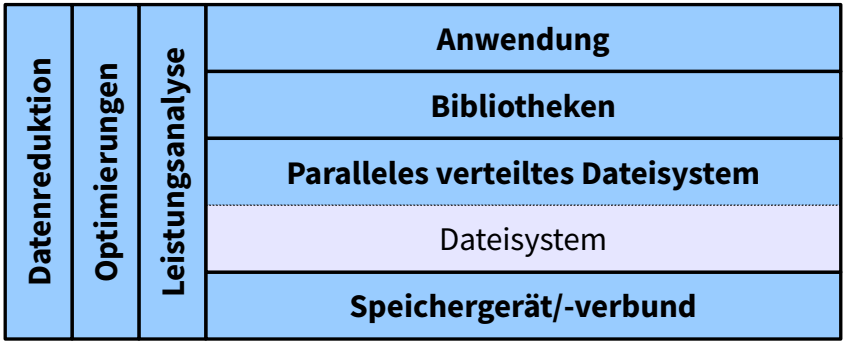
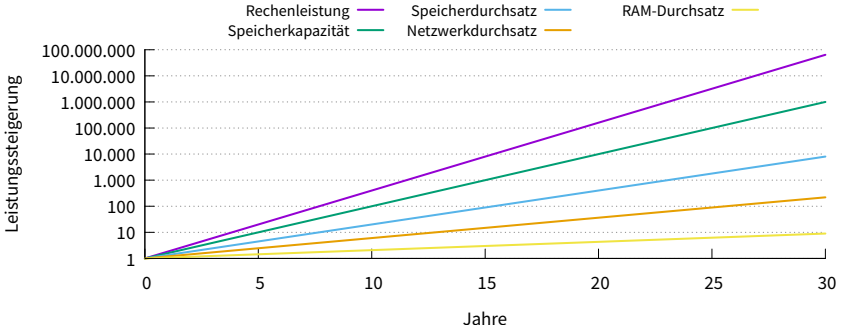



Abbildung: E/A-Schichten und orthogonale Themen

# Rechen- und Speicherleistung

- Kapazität und Leistung erhöhen sich weiterhin exponentiell
  - Komponenten verbessern sich unterschiedlich schnell
- E/A wird zunehmend zu einem Problem
  - Daten können immer schneller produziert werden
  - Speicherung ist nicht immer problemlos möglich
- Konsequenz: Höhere Ausgaben für Speicherhardware
  - In der Folge weniger verfügbare Mittel für Rechenleistung
  - Oder insgesamt teurere Systeme
- Speicherhardware ist ein maßgeblicher Teil der TCO
  - DKRZ: Ca. 20 % der Gesamtkosten
  - Entspricht 6.000.000 € Anschaffungskosten

# Rechen- und Speicherleistung…




- Rechenleistung: 300x alle zehn Jahre (basierend auf TOP500)
- Speicherkapazität: 100x alle zehn Jahre
- Speicherdurchsatz: 20x alle zehn Jahre

# Beispiel: DKRZ

| | 2009 | 2015 | Faktor |
|---|---|---|---|
| Leistung | 150 TF/s | 3 PF/s | 20x |
| Knotenzahl | 264 | 2.500 | 9,5x |
| Knotenleistung | 0,6 TF/s | 1,2 TF/s | 2x |
| Arbeitsspeicher | 20 TB | 170 TB | 8,5x |
| Speicherkapazität | 5,6 PB | 45 PB | **8x** |
| Speicherdurchsatz | 30 GB/s | 400 GB/s | 13,3x |
| Festplatten | 7.200 | 8.500 | 1,2x |
| Archivkapazität | 53 PB | 335 PB | **6,3x** |
| Archivdurchsatz | 9,6 GB/s | 21 GB/s | **2,2x** |
| Stromverbrauch | 1,6 MW | 1,4 MW | 0,9x |
| Beschaffungskosten | 30 M€ | 30 M€ | 1x |

# Beispiel: DKRZ…

| | 2020 | 2025 | Exascale (2020) |
|---|---|---|---|
| Leistung | 60 PF/s | 1,2 EF/s | 1 EF/s |
| Knotenzahl | 12.500 | 31.250 | 100k–1M |
| Knotenleistung | 4,8 TF/s | 38,4 TF/s | 1–15 TF/s |
| Arbeitsspeicher | 1,5 PB | 12,8 PB | 3,6–300 PB |
| Speicherkapazität | 270 PB | 1,6 EB | 0,15–18 EB |
| Speicherdurchsatz | 2,5 TB/s | 15 TB/s | 20–300 TB/s |
| Festplatten | 10.000 | 12.000 | 100k–1M |
| Archivkapazität | 1,3 EB | 5,4 EB | 7,2–600 EB |
| Archivdurchsatz | 57 GB/s | 128 GB/s | — |
| Stromverbrauch | 1,4 MW | 1,4 MW | 20–70 MW |
| Beschaffungskosten | 30 M€ | 30 M€ | 200 M$ |

# Ansätze

- Speicherkosten sollen stabil gehalten werden
  - Datenvolumen muss reduziert werden
- Erster Schritt: Bestimmung der Speicherkosten
  - Es ist wichtig, unterschiedliche Kostentypen aufzuschlüsseln
  - Kostenmodell für Berechnung, Speicherung und Archivierung
- Analyse mehrerer Datenreduktionstechniken
  - Wiederberechnung, Deduplikation, Kompression

# Modell

- Vereinfachtes Modell für die Kosten von Anwendungsläufen und Datenspeicherung
  - Vereinheitlicht vorherige Modelle für Exascale-E/A
- Kosten der Komponenten auf Basis ihrer Auslastung
  - Anteil der benötigten Knoten
  - Kosten für den Anteil des Durchsatzes, der Metadaten und des belegten Speicherplatzes
  - Anzahl der benötigten Bandkassetten
- Wartung durch den Hersteller ist üblicherweise in den Anschaffungskosten enthalten

# Einschränkungen

- Anschaffungskosten des Rechenzentrums sind nicht enthalten
- Ausgaben für Mitarbeiter sind nicht enthalten
- Netzwerkinfrastruktur ist nicht enthalten
- E/A beeinflusst Berechnungen nicht
  - Komplett asynchrone E/A
- Portierungen und Optimierungen werden nicht beachtet
- Ungenutzte Ressourcen werden nicht behandelt

# CMIP5

- Teil des AR5 des IPCC
  - Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
  - Vergleich von Klimamodellen für gemeinsame Experimente
- Mehr als 10,8 Millionen Stunden Rechenzeit am DKRZ
  - 482 Läufe, Simulation von insgesamt 15.280 Jahren
  - Mehr als 640 TB Daten wurden berechnet, durch Post-Processing auf 55 TB verringert
- Typische Konfiguration mit niedriger Auflösung:
  - Ein Jahr benötigt ca. 1,5 Stunden auf dem 2009-System
    - Ein Monat Simulation entspricht 4 GB Daten
  - Schreibt am Ende einen Checkpoint (4 GB), weiterer Job startet auf Basis davon
    - Jeder zehnte Checkpoint wird archiviert
- Daten waren fast drei Jahre im Dateisystem gespeichert
  - Archivierung für 10 Jahre

# CMIP5…

| | | CMIP5 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| System | | 2009 | 2015 | 2020 | 2025 |
| Berechnung | | 10,50 | 0,55 | 0,03 | 0,001 |
| Speicherung | Beschaffung | 45,02 | 5,60 | 0,93 | 0,16 |
| | Zugriff | 0,09 | 0,01 | 0 | 0 |
| | Metadaten | 0,04 | 0 | 0 | 0 |
| Checkpoint | | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Archivierung | | 10,35 | 1,66 | 0,41 | 0,10 |
| Gesamt | | 66,01 | 7,82 | 1,38 | 0,26 |

- 2009: Berechnungskosten ≈ Archivierungskosten
  - Speicherkosten sind viel höher
- Speicherung und Archivierung werden (relativ) immer teurer

# HD(CP)$^2$

- High Definition Clouds and Precipitation for Climate Prediction
  - Besseres Verständnis der Wolken- und Niederschlagsprozesse
  - Einfluss auf Klimavorhersagen
- Simulation Deutschlands mit einer Gitterauflösung von 416 m
- Ein Lauf auf dem 2009-System benötigt 5.260 GB RAM
  - Simuliert zwei Stunden in 86 Minuten
  - Ergebnisse werden alle 30 Modellminuten geschrieben
- Am Programmende wird ein Checkpoint erstellt
- Ausgabe muss nur eine Woche im Dateisystem gehalten werden

# HD(CP)$^2$...

| | | HD(CP)$^2$ | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| System | | 2009 | 2015 | 2020 | 2025 |
| Berechnung | | 165,07 | 8,72 | 0,44 | 0,02 |
| Speicherung | Beschaffung | 2,37 | 0,30 | 0,05 | 0,01 |
| | Zugriff | 0,94 | 0,07 | 0,01 | 0 |
| | Metadaten | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Checkpoint | | 0,33 | 0,02 | 0 | 0 |
| Archivierung | | 86,91 | 13,91 | 3,48 | 0,87 |
| Gesamt | | 255,29 | 22,99 | 3,97 | 0,90 |

- Höhere Berechnungskosten als CMIP5
  - 2009: Berechnungskosten $\approx 2 \times$ Archivierungskosten
- Niedrige Speicherungskosten, da schneller archiviert wird

# Datenreduktionstechniken

- Es gibt mehrere Konzepte, um das Datenvolumen zu reduzieren
- Wiederberechnung der Ergebnisse
  - Nicht alle Ergebnisse werden explizit gespeichert, sondern bei Bedarf neu berechnet
- Deduplikation
  - Identische Daten werden nur einmal gespeichert
- Kompression
  - Daten können in der Anwendung oder dem Dateisystem komprimiert werden

# Überblick

- Speichere nicht alle produzierten Daten
  - Daten werden in situ analysiert
- Benötigt eine genaue Definition der Analysen
  - Post-mortem-Analysen sind unmöglich
  - Neue Analysen benötigen neue Berechnungen
- Wiederberechnung kann unter Umständen sinnvoll sein
  - Wenn Speicher- und Archivierungskosten deutlich höher als Berechnungskosten sind
- Berechnungskosten sind mit dem 2009-System höher als die Archivierungskosten
  - Berechnungsleistung verbessert sich schneller als Speicher

# Analyse

- 2015
  - Wiederberechnung lohnt sich, wenn auf die Daten nur ein (HD(CP)$^2$) oder 13 (CMIP5) Mal zugegriffen wird
- 2020
  - HD(CP)$^2$: Wiederberechnung lohnt, wenn auf die Daten seltener als acht Mal zugegriffen wird
  - CMIP5: Archivierung ist kosteneffizienter, wenn auf die Daten mehr als 44 Mal zugegriffen wird
- 2025
  - Wiederberechnung ist sinnvoll, wenn auf die Daten nicht öfter als 44 (HD(CP)$^2$) oder 260 (CMIP5) Mal zugegriffen wird

# Probleme: Erhaltung von Binärdateien

- Erhalte Binärdateien von Anwendungen und aller ihrer Abhängigkeiten
  - Durch Container und virtuelle Maschinen viel einfacher
- Es ist schwierig Anwendungen auf abweichenden Architekturen auszuführen
  - x86-64 vs. POWER, Big-Endian vs. Little-Endian
  - Emulation verursacht üblicherweise starke Leistungseinbußen
- Wiederberechnung auf dem selben Supercomputer ist machbar
  - Behalte Abhängigkeiten (versionierte Module), statisches Linken

# Probleme: Erhaltung von Quelltext

- Alle Komponenten können auch auf abweichenden Hardwarearchitekturen kompiliert werden
  - Benötigt unter Umständen zusätzlichen Aufwand
  - Unterschiedliche Betriebssysteme, Compiler etc.
  - Alternativ können alle Abhängigkeiten erhalten werden
- Minimale Änderungen könnten Ergebnisse ändern
  - Unterschiedliche Prozessoren, Netzwerktechnologien etc.
  - Möglicherweise irrelevant, solange Ergebnisse „statistisch gleich“ sind

# Überblick

- Daten werden in Blöcke aufgeteilt (4–16 KB)
  - Unterschiedliche Aufteilungsmethoden
- Jeder einzigartige Datenblock wird nur einmal gespeichert
  - Mehrfach vorkommende Blöcke werden referenziert
- Bisherige Studien zeigen 20–30 % Einsparung für HPC-Daten
  - Insgesamt mehr als 1 PB untersucht
  - Deduplikation ganzer Dateien: 5–10 %
- Deduplikation hat auch Nachteile
  - Deduplikationstabellen müssen im RAM gehalten werden
    - Je 1 TB Daten ca. 5–20 GB für Tabellen

# Overhead

- Deduplikationstabellen speichern Referenzen zwischen Hashes und Daten
  - SHA256-Hash (256 Bit = 32 Byte)
  - 8 KB große Dateisystemblöcke (mit Offsets der Größe 8 Byte)
  - Zusätzlicher Overhead von 8 Byte pro Hash
- Für effiziente Online-Deduplikation müssen sie im Arbeitsspeicher gehalten werden
  - Duplikate müssen bei jeder Schreiboperation gesucht werden
  - Schnelle Speichergeräte (SSDs) sind immer noch um Größenordnungen langsamer

$$1\,\mathrm{TB} \div 8\,\mathrm{KB} = 125.000.000$$

$$125.000.000 \cdot (32\,\mathrm{B} + 8\,\mathrm{B} + 8\,\mathrm{B}) = 6\,\mathrm{GB} \quad (0,6\,\%)$$

# Analyse

| | 2009 | 2015 | 2020 | 2025 |
|---|---|---|---|---|
| Speicher | 5,6+**1,68** PB | 45+**13,5** PB | 270+**81** PB | 1,6+**0,48** EB |
| RAM | 20+**33,6** TB | 170+**270** TB | 1,5+**1,62** PB | 12,8+**9,6** PB |
| Strom | 1,6+**0,24** MW | 1,4+**0,20** MW | 1,4+**0,14** MW | 1,4+**0,09** MW |
| Kosten | 30+**2,52** M€ | 30+**2,38** M€ | 30+**1,62** M€ | 30+**1,13** M€ |

- Optimistische Annahme von 30 % Einsparung
- Benötigt mehr zusätzlichen RAM als für Berechnung vorhanden ist (außer 2025)
- Benötigt deutlich mehr Strom (5–15 %)
- Erhöht Gesamtkosten (3–8 %)

# Analyse…

| 2009 | 2015 | 2020 | 2025 |
|---|---|---|---|
| 4,3+**1,3** PB | 34,6+**10,4** PB | 207,7+**62,3** PB | 1,2+**0,4** EB |
| 20+**25,8** TB | 170+**207,7** TB | 1,5+**1,2** PB | 12,8+**7,4** PB |
| 1,54+**0,19** MW | 1,34+**0,15** MW | 1,34+**0,1** MW | 1,34+**0,07** MW |
| 28,27+**1,94** M€ | 28,27+**1,83** M€ | 28,27+**1,25** M€ | 28,27+**0,87** M€ |

- Deduplikation wird genutzt, um selbe Kapazität zu erreichen
- Benötigt immer noch deutlich mehr Arbeitsspeicher
- Stromverbrauch erhöht sich (bis zu 8 %)
- Gesamtkosten sinken ab 2020

# Zusammenfassung

- Größere Blöcke senken den Overhead
  - 8 KB $\rightarrow$ 0,6 %, 16 KB $\rightarrow$ 0,3 %, 32 KB $\rightarrow$ 0,15 %
  - Einfluss auf Deduplikationsrate muss beachtet werden
- Deduplikation ganzer Dateien
  - E/A-Durchsatz bleibt gleich
  - Dateien müssen immer erst komplett geschrieben werden
- Offline-Deduplikation
  - Einfacher möglich mit modernen Copy-on-Write-Dateisystemen
  - Nützlich für Deduplikation ganzer Dateien
  - Nicht ganz so leistungskritisch
    - Tabellen müssen nicht immer im RAM gehalten werden

# Überblick

- Erfassung der wichtigsten Leistungsmetriken unterschiedlicher Kompressionsalgorithmen
  - Kompressionsrate, Prozessorlast, Stromverbrauch und Laufzeit
- $\approx$ 500 GB Klimadaten (MPI-OM)
  - Vorabtests mit sich wiederholenden und zufälligen Daten
  - Serielle Tests für Grundleistung
  - Parallele Tests für echte Anwendungen

# Tracing

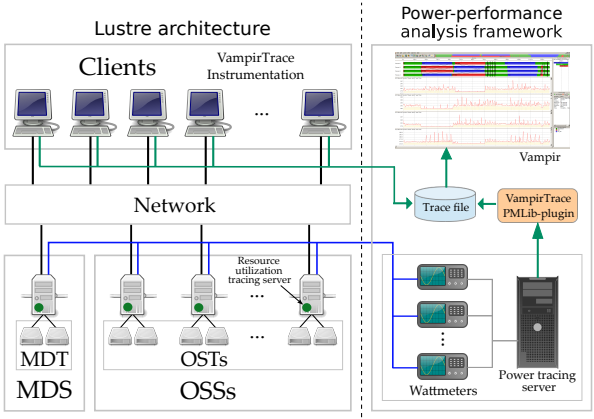



Abbildung: Framework zur Messung der Leistung und des Stromverbrauchs

# Tracing…

- Normale Lustre-Installation
  - Clients und Server auf unterschiedlichen Maschinen
- Zusätzliche Instrumentierung
  - VampirTrace für Client-Anwendungen
  - pmserver für Dateisystemserver
  - Server zur Erfassung des Stromverbrauchs
    - Verbunden mit Strommessgeräten
- pmlib-Plugin erlaubt Korrelation von Client- und Serveraktivität

# Algorithmen

| Kompressions-algorithmus | Kompressions-rate | Prozessor-auslastung | Laufzeit-verhältnis |
|---|---|---|---|
| none | 1,00 | 23,7 | 1,00 |
| zle | 1,13 | 23,8 | 1,04 |
| lzjb | 1,57 | 24,8 | 1,09 |
| lz4 | 1,52 | 22,8 | 1,09 |
| gzip-1 | 2,04 | 56,6 | 1,06 |
| gzip-9 | 2,08 | 83,1 | 13,66 |

Tabelle: Leistungsdaten für Klimadaten

- Laufzeit erhöht sich nur leicht (außer für höhere `gzip`-Level)
- `gzip` erhöht Prozessorauslastung deutlich
- `lz4` (und `gzip-1`) am interessantesten

# Algorithmen…

| Kompressions-algorithmus | Kompressions-rate | Prozessor-auslastung | Laufzeit-verhältnis |
|---|---|---|---|
| none | 1,00 | 23,7 | 1,00 |
| lz4 | 126,96 | 15,8 | 1,28 |
| gzip-1 | 126,96 | 23,3 | 1,24 |

Tabelle: Leistungsdaten für sich wiederholende Daten

- Mit Hilfe des `yes`-Kommandos erzeugt
- `lz4` erzeugt niedrigere Prozessorlast als keine Kompression
- Beide Algorithmen erhöhen die Laufzeit um ca. 25 %

# Algorithmen…

| Kompressions-algorithmus | Kompressions-rate | Prozessor-auslastung | Laufzeit-verhältnis |
|---|---|---|---|
| none | 1,00 | 23,5 | 1,00 |
| lz4 | 1,00 | 24,1 | 0,97 |
| gzip-1 | 1,00 | 66,1 | 1,03 |

Tabelle: Leistungsdaten für zufällige Daten

- Mit Hilfe des `frandom`-Kernelmoduls erzeugt
- `gzip-1` benötigt deutlich mehr Prozessorzeit
- Beide Algorithmen haben kaum Einfluss auf die Laufzeit
  - Erinnerung: serieller Test mit einer Festplatte

# Parallele Anwendung

| Kompressions-algorithmus | Laufzeit-verhältnis | Strom-verhältnis | Energie-verhältnis |
|---|---|---|---|
| `none` | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| `lz4` | 0,92 | 1,01 | 0,93 |
| `gzip-1` | 0,92 | 1,10 | 1,01 |

- IOR-Benchmark, angepasst für realistische Schreibaktivität
- Anwendungsleistung wird nicht beeinträchtigt
  - Höherer E/A-Durchsatz auf den Servern
- Energieverbrauch bei `lz4` niedriger
  - Niedrigere Laufzeit und nur leicht erhöhter Stromverbrauch
- Sogar `gzip-1` erhöht den Energieverbrauch nur um 1 %

# Analyse

| | 2009 | 2015 | 2020 | 2025 |
|---|---|---|---|---|
| Speicher | 5,6+**2,8** PB | 45+**22,5** PB | 270+**135** PB | 1,6+**0,8** EB |
| Strom | 1,6+**0,025** MW | 1,4+**0,025** MW | 1,4+**0,025** MW | 1,4+**0,025** MW |

Tabelle: Vor- und Nachteile von Kompression

- Angenommene Kompressionsrate von 1,5 für `lz4`
- Pessimistische Annahme von 10 % höherem Stormverbrauch
- Laufzeitverhältnis von 1,0
  - Nicht notwendig zusätzliche Prozessoren zu beschaffen

# Zusammenfassung

- Kompression kann Speicherkapazität deutlich erhöhen
  - Passende Algorithmen haben vernachlässigbaren Overhead
- Oft keine zusätzliche Hardware notwendig
- Geringer zusätzlicher Stromverbrauch
  - Insgesamt trotzdem lohnenswert
- Anwendungsspezifische Kompression kann Kompressionsraten deutlich erhöhen
  - Dadurch verlustbehaftete Kompression möglich
  - Kompressionsraten $>$ 10 sind möglich

# Überblick

- Kompression im Dateisystem kann bereits genutzt werden
  - Lustre unterstützt ein ZFS-Backend
  - Kompression kann einfach in ZFS aktiviert werden
- Momentan allerdings nur statische Ansätze für Kompression
  - Ein Kompressionsalgorithmus pro Dateisystem
  - Dynamischere Ansätze könnten effizienter komprimieren
- Semantische Informationen zur Verbesserung der Kompression
  - Adaptive Kompression muss auch raten
  - Effizientere anwendungsspezifische Kompression

# Überblick…

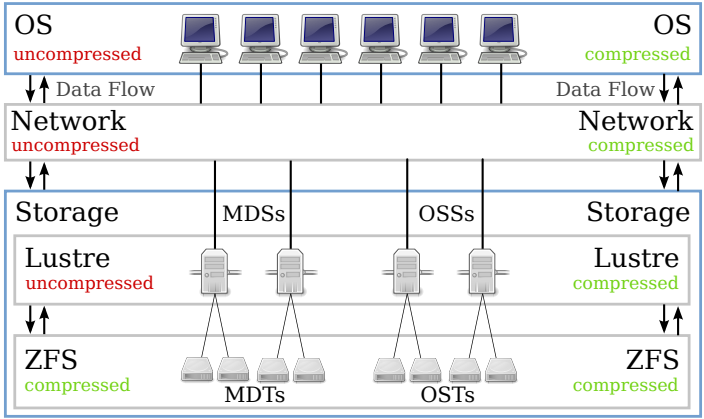



Abbildung: Lustre-Architektur mit Kompression

# Unterstützung

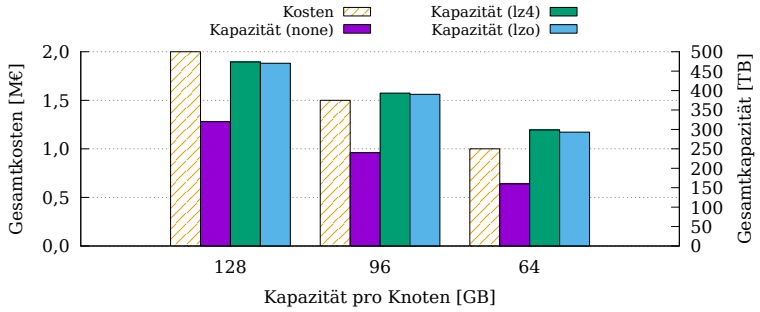
- Unterstützung auf mehreren Ebenen denkbar
  - Jeder Ansatz hat Vor- und Nachteile
  - Kompression auf dem Client beeinflusst die Berechnung, kann aber auch Netzwerkdurchsatz erhöhen
- Bisher keine Unterstützung für clientseitige Kompression
  - Komplett transparent für Awendungen
  - Konfigurierbar mittels `ladvise`
- Kompression ist statisch
  - Nutzung von Informationen über die Daten, die aktuelle Last etc.
  - Sowohl auf Clients als auch Servern nützlich

# Kompression: Schichten

| Algorithmus | Kompression | Dekompression | Rate |
|---|---|---|---|
| lz4fast | 2.945 MB/s | 6.460 MB/s | 1.825 |
| lz4 | 1.796 MB/s | 5.178 MB/s | 1.923 |
| lz4hc | 258 MB/s | 4.333 MB/s | 2.000 |
| lzo | 380 MB/s | 1.938 MB/s | 1.887 |
| xz | 26 MB/s | 97 MB/s | 2.632 |
| zlib | 95 MB/s | 610 MB/s | 2.326 |
| zstd | 658 MB/s | 2.019 MB/s | 2.326 |

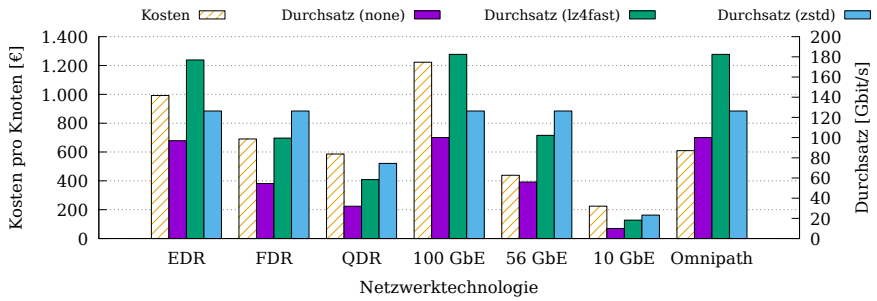
- lz4 und lz4fast allgemein sehr gut, zstd auch interessant
  - lz4fast und zstd können über Parameter angepasst werden
- Mehrere gute Kandidaten für Archivierung

# Kompression: Arbeitsspeicher



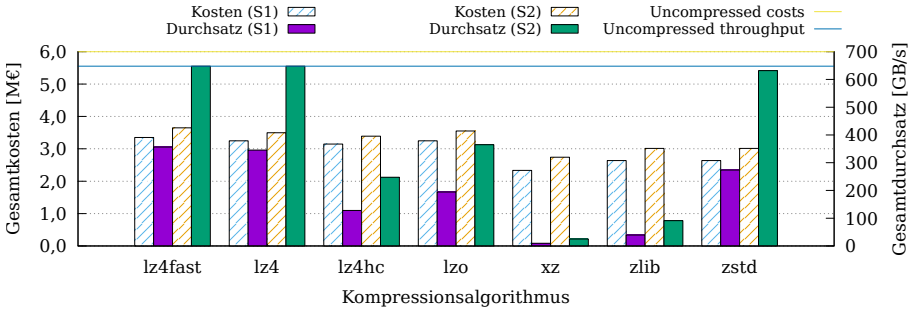

- Schätzungen mit zram
- Ziel: Kapazität pro Knoten von 128 GB
  - Nicht möglich mit 64 GB
  - 60 GB komprimiert, 4 GB unkomprimiert

# Kompression: Netzwerk



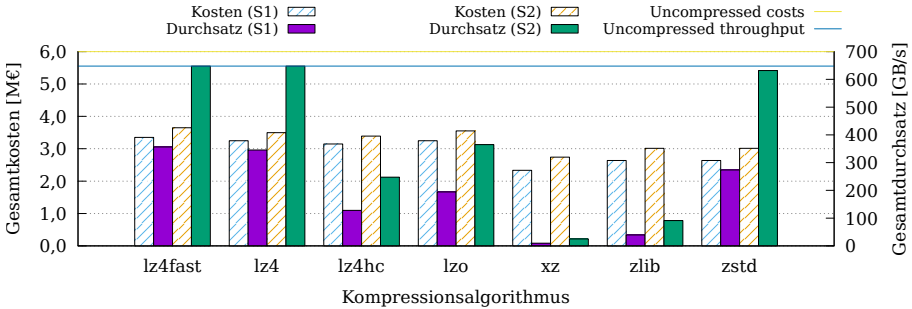

- zstd reduziert den Durchsatz bei Netzwerken mit hohem Durchsatz ($>$ 54 Gbit/s)
- FDR-InfiniBand kann mit QDR-InfiniBand ersetzt werden, wenn lz4fast genutzt wird (Kostenreduktion 15 %)
- Durchsatz kann mit lz4fast bzw. zstd auf 100 Gbit/s bzw. 125 Gbit/s erhöht werden

# Kompression: Speicher




- S1: So viele SSU/ESU-Paare wie für 50 PB notwendig (geringere Kosten/Durchsatz)
- S2: 50 SSU/ESU-Paare und so viele HDDs wie für 50 PB notwendig (höhere Kosten/Durchsatz als S1)

# Kompression: Speicher…




- lz4 und lz4fast beeinflussen Leistung nicht
  - Kosten sinken auf 3.500.000 €
- zstd senkt Durchsatz um 20 GB/s
  - Kosten sinken um 50 % auf 3.000.000 €

# Feature-Wunschliste

- Unterstützung für Kompression im parallelen Dateisystem
  - Interaktion mit anwendungsspezifischer Kompression
- Entwickler sollen nützliche Informationen spezifizieren können
  - Zusätzliches Wissen über die Daten (Varianz, Muster etc.)
  - Semantische Informationen im ganzen Stack nutzen
- Datenreduktion in einer zentralen Schicht
  - Momentan implementieren alle Schichten eigene Lösungen
  - Redundante Operationen, falsche Reihenfolge etc.

# Adaptive Kompression [2]

- Adaptive Kompression in ZFS
  - Direkt durch Lustre nutzbar
- Unterstützung für unterschiedliche Modi
  - Leistung, Archivierung, Energieverbrauch
- Unterschiedliche Heuristiken zur Bestimmung der Kompression
  - Basierend auf Dateitypen und Kostenfunktionen
- Für Kostenfunktion werden alle Algorithmen getestet
  - Der beste wird für die nächsten Operationen genutzt

# Adaptive Kompression… [2]

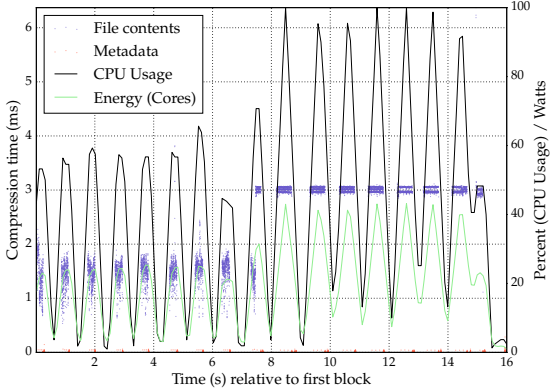



Abbildung: Komprimieren einer gemischten Datei mit `gzip-1`

# Adaptive Kompression… [2]

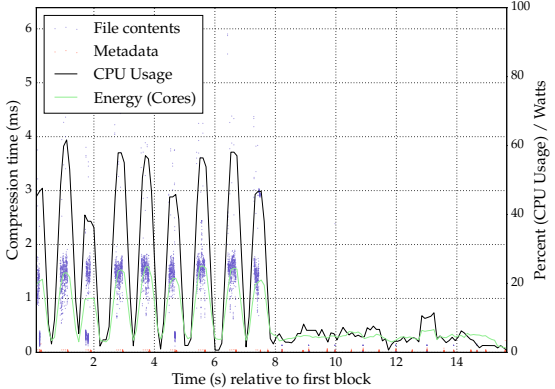
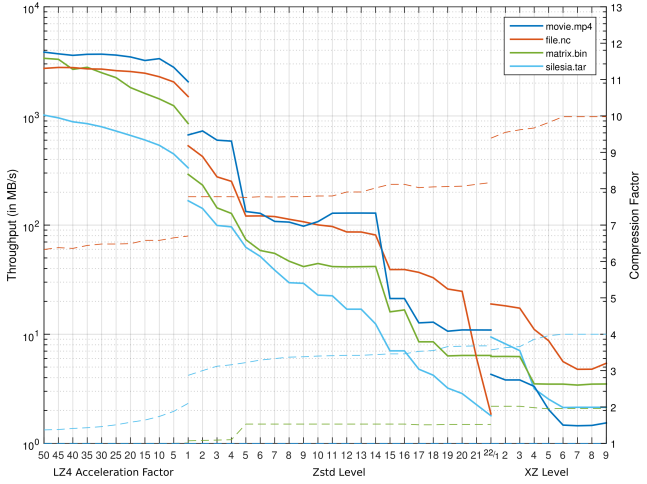



Abbildung: Komprimieren einer gemischten Datei mit dem Archivmodus

# Adaptive Kompression… [3]



# Interaktion mit Anwendungen

- ADIOS bietet eine ausdrucksstarke E/A-Schnittstelle
  - Abstrakte Beschreibung der Anwendungs-E/A über XML
- Unterstützung für Datenreduktion denkbar
  - Bietet bereits Unterstützung für Datentransformationen
- Erweiterung um zusätzliche semantische Informationen
  - Komprimierbarkeit etc.

```
1 <adios-config host-language="C">
2   <adios-group name="checkpoint">
3     <var name="matrix" type="double" dimensions="..." variance="low"
          ↪ transform="compression:performance"/>
4   </adios-group>
5 </adios-config>
```

Listing 1: ADIOS-Erweiterungen

# Zusammenfassung

- Wiederberechnung
  - Nicht alle Ergebnisse werden gespeichert
  - Negative Bilanz bei häufiger Wiederberechnung
- Deduplikation
  - Duplikate werden nicht gespeichert, sondern Referenzen auf existierende Blöcke
  - Overhead durch zusätzliche Checks
- Kompression kann die TCO deutlich senken
  - Positiver Effekt auf Arbeitsspeicher und Netzwerkdurchsatz
  - Nützlich für Daten, die nicht explizit durch Anwendungen komprimiert werden

# Zusammenfassung…

- Genaue Analyse der Kostenfaktoren und Nutzung notwendig
  - Rechenleistung steigt mit jeder Generation um Faktor 20
  - Speicherkapazität steigt nur um Faktor 8
- Schätzung der Kosten für Berechnung, Speicherung und Archivierung
  - Kostenmodelle für Langzeitarchivierung
  - Speicherung von Daten verursacht die größten Kosten
  - Das Problem wird sich weiter verschlimmern

# Quellen I

[1] Konstantinos Chasapis, Manuel Dolz, Michael Kuhn, and Thomas Ludwig. Evaluating Power-Performace Benefits of Data Compression in HPC Storage Servers. In Steffen Fries and Petre Dini, editors, *IARIA Conference*, pages 29–34. IARIA XPS Press, 04 2014.

[2] Florian Ehmke. Adaptive Compression for the Zettabyte File System. Master's thesis, Universität Hamburg, 02 2015.

[3] Janosch Hirsch. Dynamic decision-making for efficient compression in parallel distributed file systems. Master's thesis, Universität Hamburg, 08 2017.

[4] Michael Kuhn, Julian Kunkel, and Thomas Ludwig. Data Compression for Climate Data. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, pages 75–94, 06 2016.

# Quellen II

[5] Julian Kunkel, Michael Kuhn, and Thomas Ludwig. Exascale Storage Systems – An Analytical Study of Expenses. *Supercomputing Frontiers and Innovations*, pages 116–134, 06 2014.