Moderne Dateisysteme

Hochleistungs-Ein-/Ausgabe

Michael Kuhn

Wissenschaftliches Rechnen
Fachbereich Informatik
Universität Hamburg

2016-04-22

E/A-Schichten

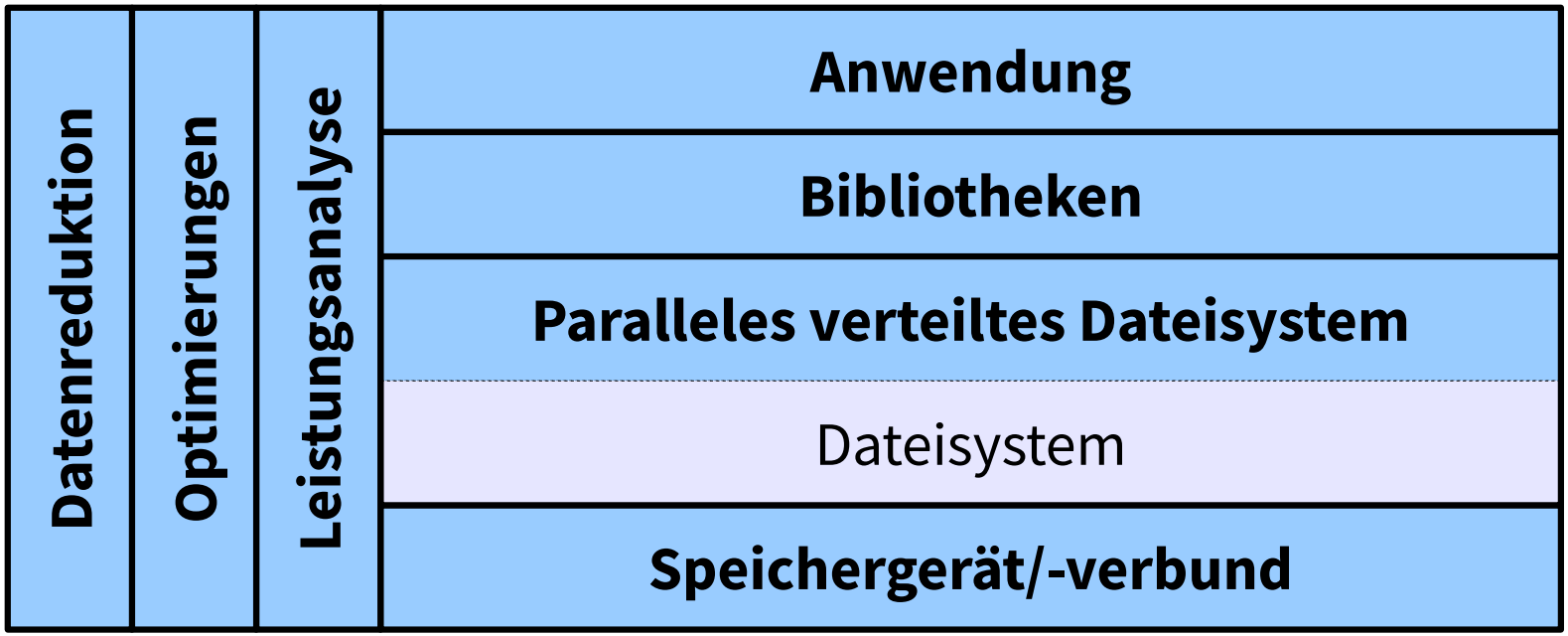


Abbildung: E/A-Schichten

Rückblick

- Erinnerung: Dateisysteme zur Strukturierung
  - Verwaltung von Daten und Metadaten
  - Blockallokation, Zugriffsrechte, Zeitstempel etc.
- Dateisysteme nutzen ein Speichergerät/-verbund
  - Logical Volume Manager (LVM) und/oder mdadm

Überblick

- Anforderungen an Dateisysteme wachsen
  - Datenintegrität
  - Speicherverwaltung
  - Komfortfunktionen
- Fehlerrate bei SATA-Festplatten: 1 in 10^{14} bis 10^{15} Bits [1]
  - 10^{14} Bits = 12,5 TB
  - 10^{15} Bits = 125 TB
  - Zusätzlich Bitfehler im RAM, dem Controller, dem Kabel, dem Treiber etc.

Überblick…

- Dateisystem hat kein Wissen über Speicherverbund
  - Und umgekehrt
- Wissen ist für optimale Leistung notwenig
  - Z.B. spezielle Optionen bei ext4
  - `-E stride=n,stripe_width=m`
- Hohe Wiederherstellungszeiten
  - Speicherverbund kennt Dateisystembelegung nicht
  - Üblicherweise $\geq$ 10 h

- `stride` gibt die Anzahl der Dateisystemblöcke pro Speichergerät an
- `stripe_width` gibt die Anzahl der Dateisystemblöcke pro Stripe an
  - Stripe bezeichnet hier einen Streifen über die gesamte Breite
  - Üblicherweise $\texttt{stride} \cdot k$, wobei k die Anzahl der Speichergeräte ist, die Daten enthalten (ohne Parität)

Überblick…

- Zusätzliche Funktionalität
  - Schnappschüsse
  - Unterdateisysteme
  - Kompression
  - Verschlüsselung
  - Effiziente Backups
  - Deduplikation

- Unterdateisysteme können wie normale Verzeichnisse benutzt aber auch separat gemountet werden
  - In btrfs Subvolumes genannt

Allgemeines

- ZFS ist ein lokales Metadateisystem
  - Stand ehemals für „Zettabyte File System“
  - Integrierte Volumenverwaltung etc.
- Wurde initial von Sun Microsystems entwickelt
  - 2001: Entwicklungsbeginn
  - 2005: Veröffentlichung in OpenSolaris
  - 2006: Veröffentlichung in Solaris 10
  - 2008: ZFS-basierte Appliances
  - 2010: Oracle beendet Entwicklung als Open Source

Allgemeines…

- Aktuelle Entwicklungen
  - 2010: Abspaltung von illumos
  - 2013: OpenZFS-Initiative
- Betriebssystemunterstützung
  - Solaris: Closed Source, inkompatibel zu OpenZFS
  - OS X: OpenZFS on OS X (O3X)
  - FreeBSD: Vollständige Unterstützung
  - Linux: ZFS on Linux (viele Distributionen)
- CDDL und GPL sind inkompatibel
  - Daher keine direkte Integration in Linux

Kompatibilität

- Versionierung der Dateisystemfunktionalität und des On-Disk-Formats
  - Aufsteigende Nummer vergeben durch Sun/Oracle
  - Durch Closed-Source-Weiterentwicklung eingeschränkte Kompatibilität zwischen ZFS und OpenZFS
- OpenZFS-Entwicklung mit Hilfe von „Feature Flags“
  - Version wurde auf 1000 bzw. 5000 festgelegt
  - Z.B. `async_destroy`, `lz4_compress`, `embedded_data` und `large_blocks`

- `async_destroy`: Dateisysteme werden im Hintergrund zerstört
- `lz4_compress`: lz4 steht als Kompressionsalgorithmus zur Verfügung
- `embedded_data`: Dateien, die (nach der Kompression) nicht größer als 112 Bytes sind, können im Blockzeiger gespeichert werden
- `large_blocks`: Blöcke können größer als 128 KiB werden
- Mehr Informationen in der `zpool-features`-Manpage

Features

- ZFS ist das weltweit erste 128-Bit-Dateisystem
  - 64 Bit sind ausreichend für 16 EiB
  - 128 Bit momentan physikalisch gar nicht ausnutzbar
  - *“Populating 128-bit file systems would exceed the quantum limits of earth-based storage. You couldn’t fill a 128-bit storage pool without boiling the oceans.”*
    – Jeff Bonwick, ZFS-Chefentwickler
- Datensicherheit unverzichtbar
  - Datenfehler werden automatisch erkannt und behoben
- Einfache Administration gepaart mit hoher Leistung
  - Komplette Administration mit zwei Werkzeugen möglich

Zahlen

- Maximale Objektanzahl pro Verzeichnis: 2^{48}
- Maximale Größe einer Datei: 16 EiB (2^{64} Bytes)
- Maximale Größe eines Pools: 256 ZiB (2^{78} Bytes)
- Maximale Geräteanzahl pro Pool: 2^{64}
- Maximale Poolanzahl: 2^{64}
- Maximale Dateisystemanzahl pro Pool: 2^{64}

Motivation

- Traditionelle Dateisysteme nutzen veraltete Konzepte
  - Kein Schutz gegen Datenfehler
    - ext4 speichert nur Prüfsummen für Metadaten
  - Hoher Administrationsaufwand
    - Geräte müssen zu Verbünden zusammengefasst werden
    - Geräte/Verbünde müssen partitioniert werden
    - Partitionen müssen formatiert werden
  - Unflexible Konzepte
    - Feste Block- und Dateisystemgrößen
    - Teilweise statische Datei-/Verzeichnisanzahlen

Designprinzipien

- Pools
  - Keine Festplatten, Partitionen etc. mehr
  - Pool stellt Speicherplatz für alle Dateisystem bereit
- Datenintegrität
  - Wurde früher als zu teuer betrachtet
  - CPUs haben ausreichende Leistungsreserven
- Transaktionen
  - Daten sind immer konsistent
  - Zeitraubende Dateisystemüberprüfung entfällt

Pools

- Traditionell ein Dateisystem pro Partition
  - Volumenmanager um ein Dateisystem über mehrere Partitionen/Festplatten zu ermöglichen
- Aktuelle Dateisysteme sind sehr statisch
  - Größenänderungen sind eher problematisch
- Neues Poolkonzept
  - Nutze gesamte Kapazität und Bandbreite der Hardware
  - Halte die Dateisysteme dynamisch

Pools

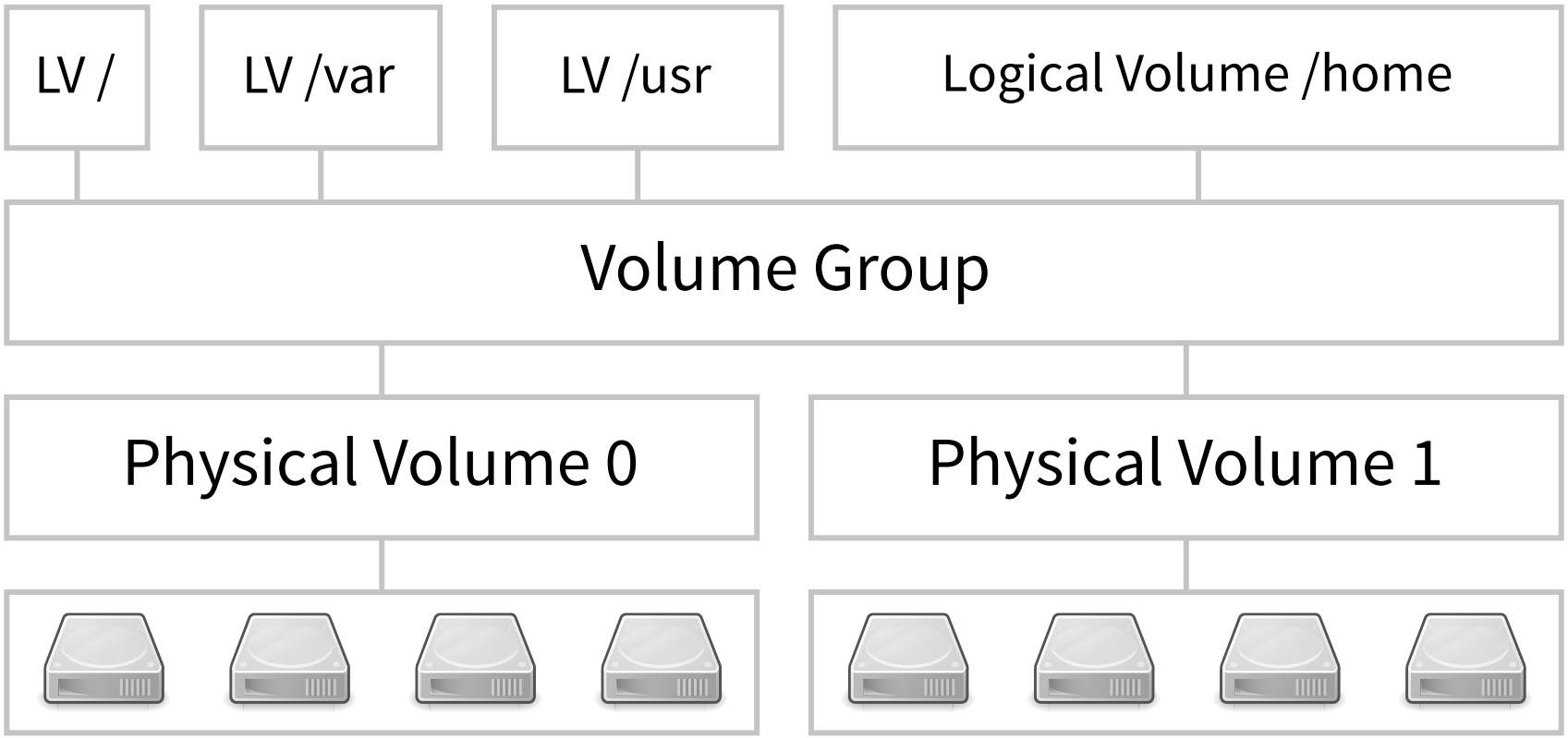


Abbildung: Traditionelle Architektur (RAID, LVM, Dateisystem)

Pools...

```
$ mdadm --create /dev/md0 --level=5 --raid-devices=4
    ↪ /dev/sd[abcd]
$ mdadm --create /dev/md1 --level=5 --raid-devices=4
    ↪ /dev/sd[efgh]
$ pvcreate /dev/md0
$ pvcreate /dev/md1
$ vgcreate tank /dev/md0 /dev/md1
$ lvcreate --size 15G --name root tank
$ lvcreate --size 25G --name var tank
$ lvcreate --size 30G --name usr tank
$ lvcreate --size 75G --name home tank
$ mkfs.ext4 /dev/mapper/tank-root
$ mkfs.ext4 /dev/mapper/tank-var
$ mkfs.ext4 /dev/mapper/tank-usr
$ mkfs.ext4 /dev/mapper/tank-home
```

Pools...

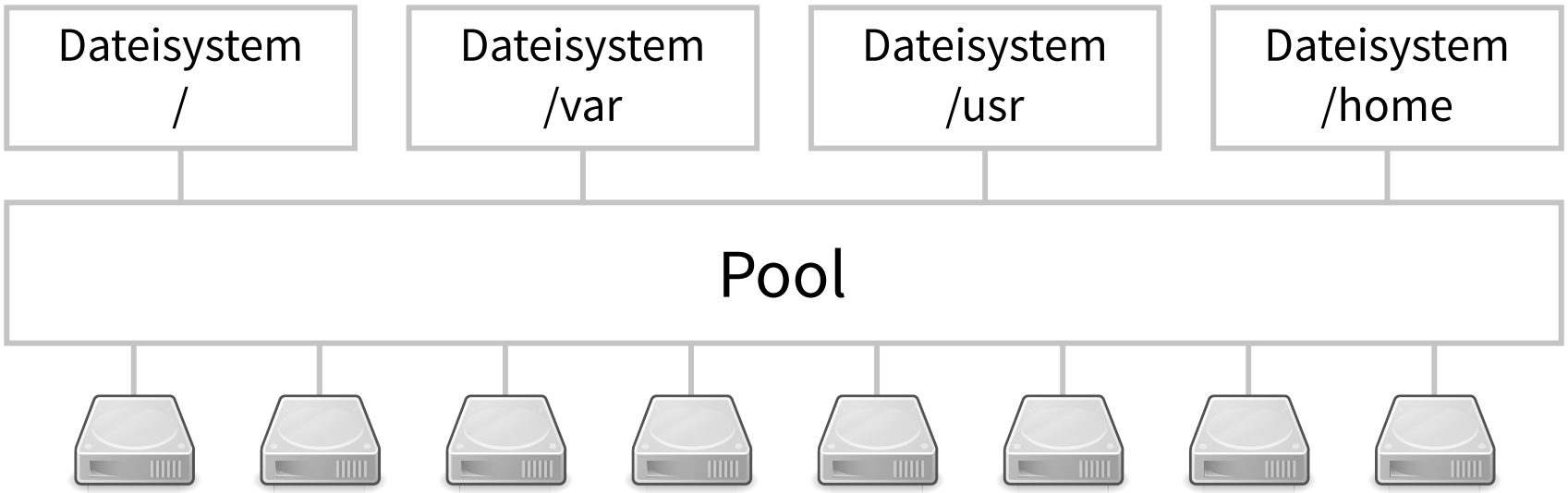


Abbildung: ZFS-Pool-Architektur

Pools...

```
1 $ zpool create tank raidz /dev/sd[abcd] raidz
    ↪ /dev/sd[efgh]
2 $ zfs create tank/root
3 $ zfs create tank/var
4 $ zfs create tank/usr
5 $ zfs create tank/home
```

Pools…

- Pools bestehen aus virtuellen Geräten (vdevs)
  - Daten werden dynamisch darüber verteilt
- Virtuelle Geräte können reale Geräte oder eine Zusammenfassung solcher sein
  - Mirror (RAID 1)
  - RAID-Z (RAID 5 ohne „Write Hole“)
  - RAID-Z2 (RAID 6 ohne „Write Hole“)
  - RAID-Z3 (ohne „Write Hole“)
- Erinnerung: „Write Hole“ ist die Zeit zwischen Schreiben der Daten und der Parität

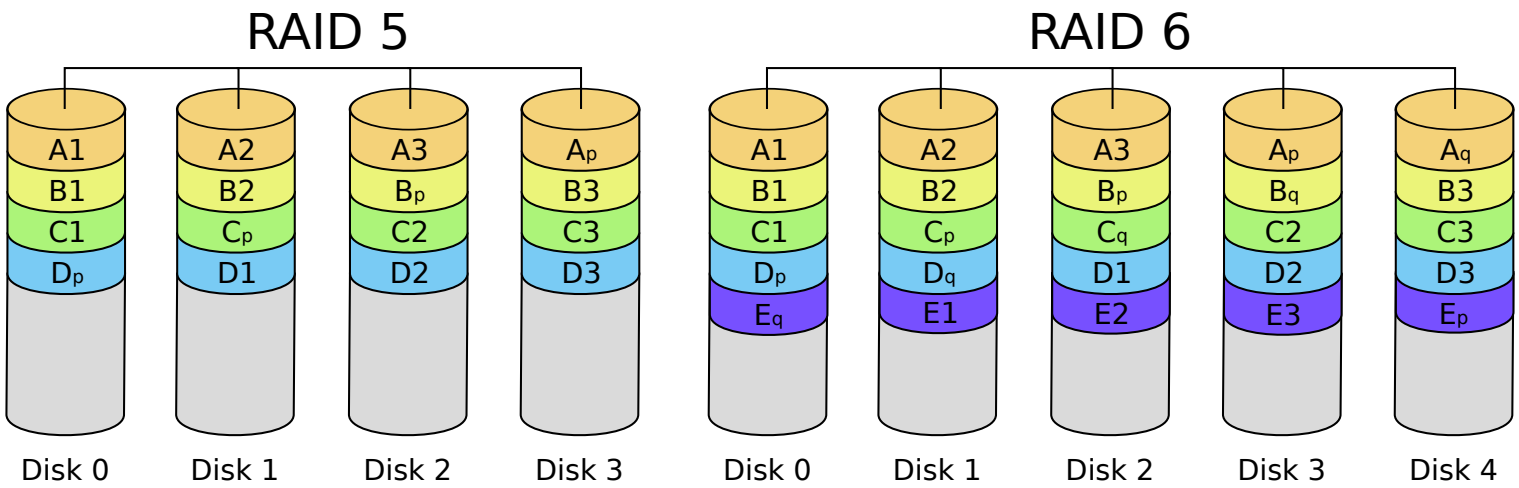
Dynamisches Striping

- Intelligente Verteilung der Daten auf alle virtuellen Geräte
- Mehrere Auswahlkriterien
  - Kapazität
  - Leistung (Latenz, Bandbreite, Auslastung)
  - Status (Mirror mit ausgefallener Festplatte)
- Neue virtuelle Geräte werden automatisch mitbenutzt
  - Existierende Daten werden nicht rebalanciert
  - Neues virtuelles Gerät wird bevorzugt

Dynamisches Striping…

1. Virtuelle-Geräte-Auswahl
   - Bevorzuge neue/leere virtuelle Geräte
   - Vermeide beeinträchtigte virtuelle Geräte
   - Ansonsten normales Round-Robin
     - Weitere Striping-Methoden evtl. in Zukunft
2. „Metaslab“-Auswahl
   - Bevorzuge die äußeren Regionen der Festplatten
   - Bevorzuge bereits benutzte Metaslabs
3. Block-Auswahl
   - Wähle den ersten Block mit genügend freiem Platz
     - Weitere Algorithmen evtl. in Zukunft

RAID 5 und RAID 6



(a) RAID 5 [3]

(b) RAID 6 [3]

RAID 5/6

- Daten und Parität müssen aktualisiert werden
  - Operationen auf mehreren Festplatten müssten atomar durchgeführt werden
  - Dadurch entsteht das „Write Hole“
- Schreiben von Streifen ist ineffizient
  - Read-Modify-Write, zwei Reads und zwei Writes
- Lösung: Hardware-RAID-Controllern mit großen Caches
  - Idee war ein Redundant Array of **Inexpensive** Disks

RAID-Z

- Das „Write Hole“ wird durch Copy on Write gepaart mit Transaktionen eliminiert
  - Damit sind atomare Aktualisierungen möglich
  - Normale Festplatten reichen aus
- Kein Schreiben von Teilstreifen
  - Jeder Block befindet sich in einem eigenen Streifen
  - Erhöht die Leistung, macht aber Rekonstruktion schwieriger
    - Dateisystemstruktur muss bekannt sein

Transaktionen

- Operationen werden in Transaktionen durchgeführt
  - Auf Dateisystemebene alle Änderungen an Objekten
  - Auf Speicherebene alle Transaktionsgruppen (Daten und zugehörige Metadaten)
- ZFS befindet sich immer in einem konsistenten Zustand
  - Dadurch kein Journaling notwendig
  - Keine Dateisystemüberprüfung mehr notwendig

Dateisystemstruktur

- ZFS ist als Hash-Baum von Blöcken realisiert
  - Auch Merkle-Baum genannt
- Jeder Block enthält eine Prüfsumme
  - Es stehen mehrere Algorithmen zur Auswahl
- Bei jedem Lesen wird die Integrität des Blocks verifiziert
- Von Metadaten werden immer mehrere Kopien vorgehalten
  - Selbst ohne Redundanz durch mehrere Speichergeräte sollten Metadaten daher rekonstruierbar sein

Dateisystemstruktur...

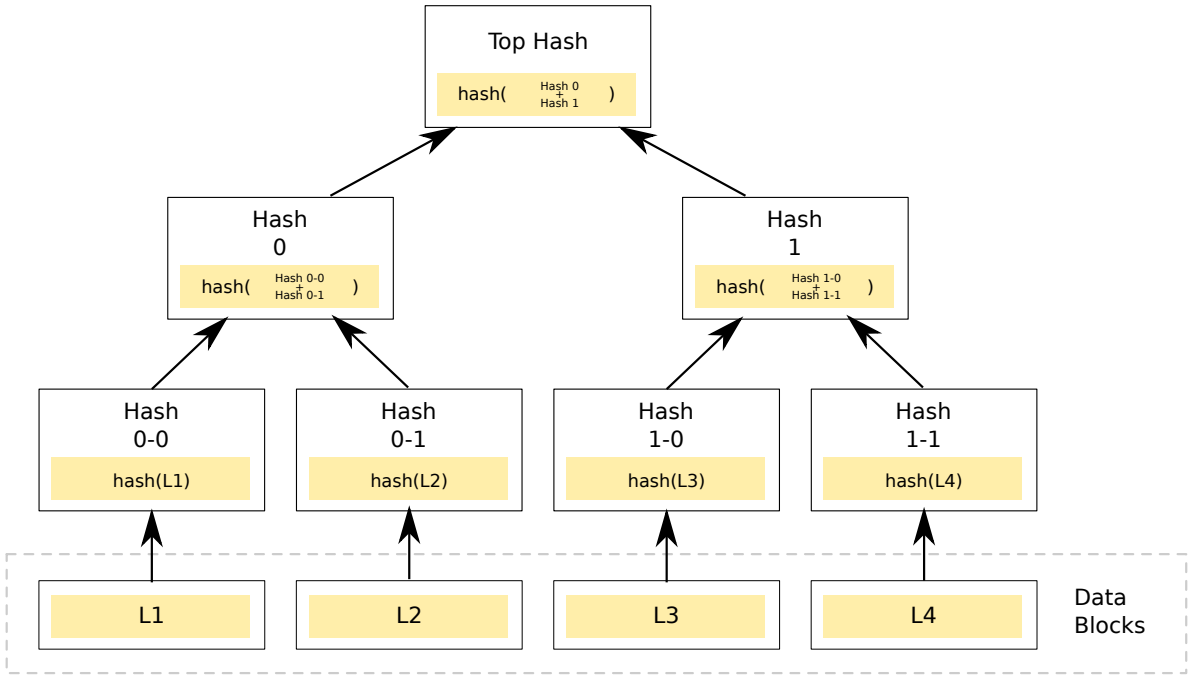


Abbildung: Hash-Baum [2]

- Blätter enthalten Prüfsummen der Datenblöcke
- Andere Knoten enthalten Prüfsummen ihrer Kinder

Copy on Write

- Benutzte Blöcke werden nie überschrieben
  - Traditionell werden Blöcke direkt modifiziert
  - Stürzt währenddessen das System ab, sind die Daten möglicherweise inkonsistent
- Alle betroffenen Blöcke werden kopiert
  - Kopien werden modifiziert und geschrieben
- Alle Änderungen geschehen außerhalb des Dateisystems
  - Stürzt das System ab, sind gemachte Änderungen einfach nicht sichtbar und werden verworfen
- Zuletzt werden neue Blöcke atomar integriert

Copy on Write…

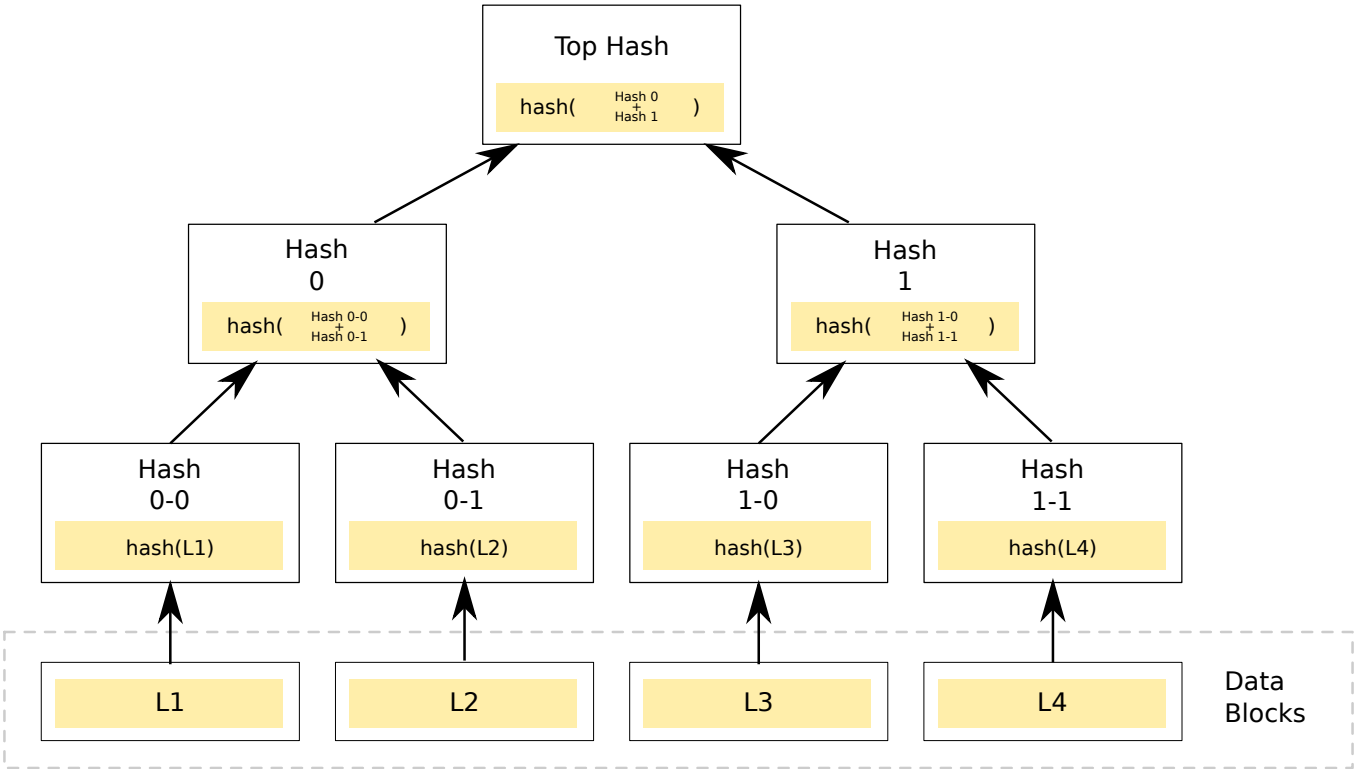


Abbildung: Copy on Write [2]

1 Ausgangszustand

Copy on Write…

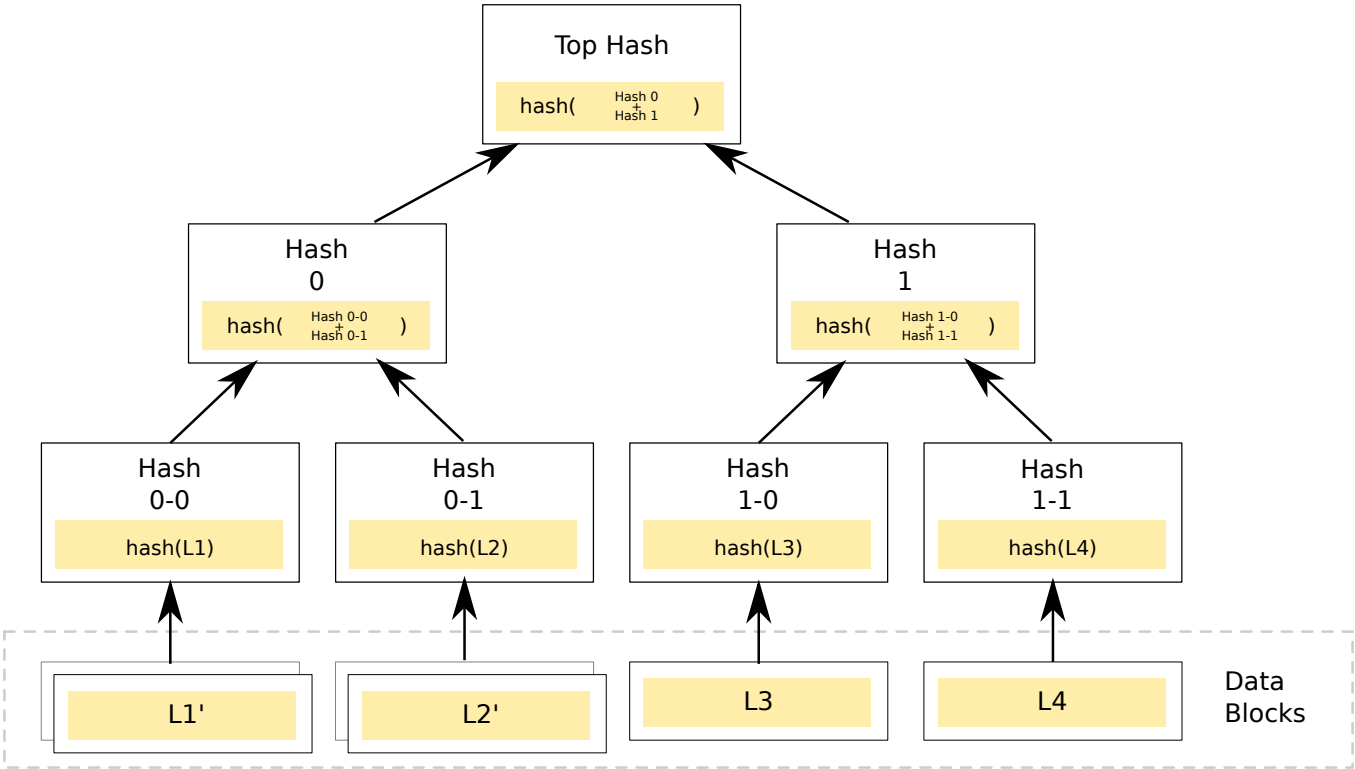


Abbildung: Copy on Write [2]

2 Neue Blöcke werden allokiert und mit Daten beschrieben

Copy on Write…

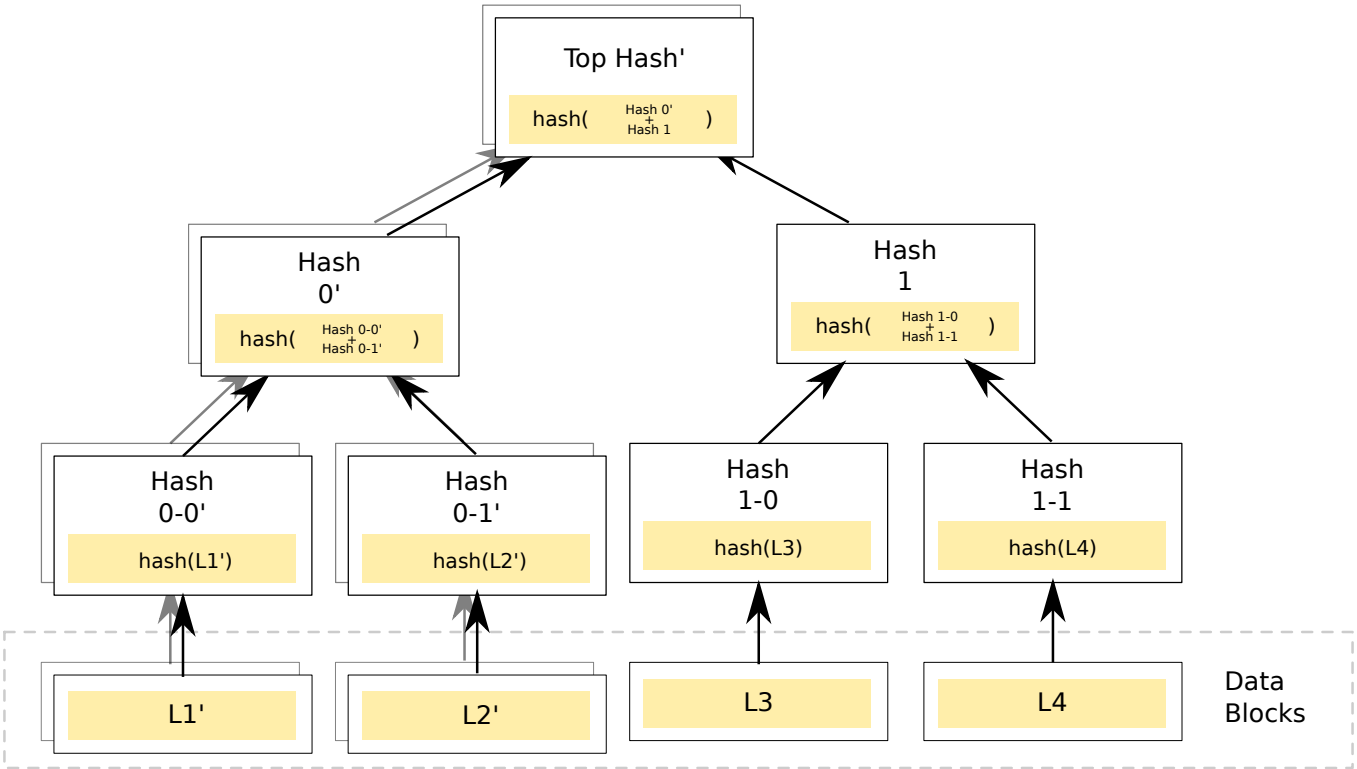


Abbildung: Copy on Write [2]

3 Neue Zeigerblöcke werden allokiert und gesetzt

Copy on Write…

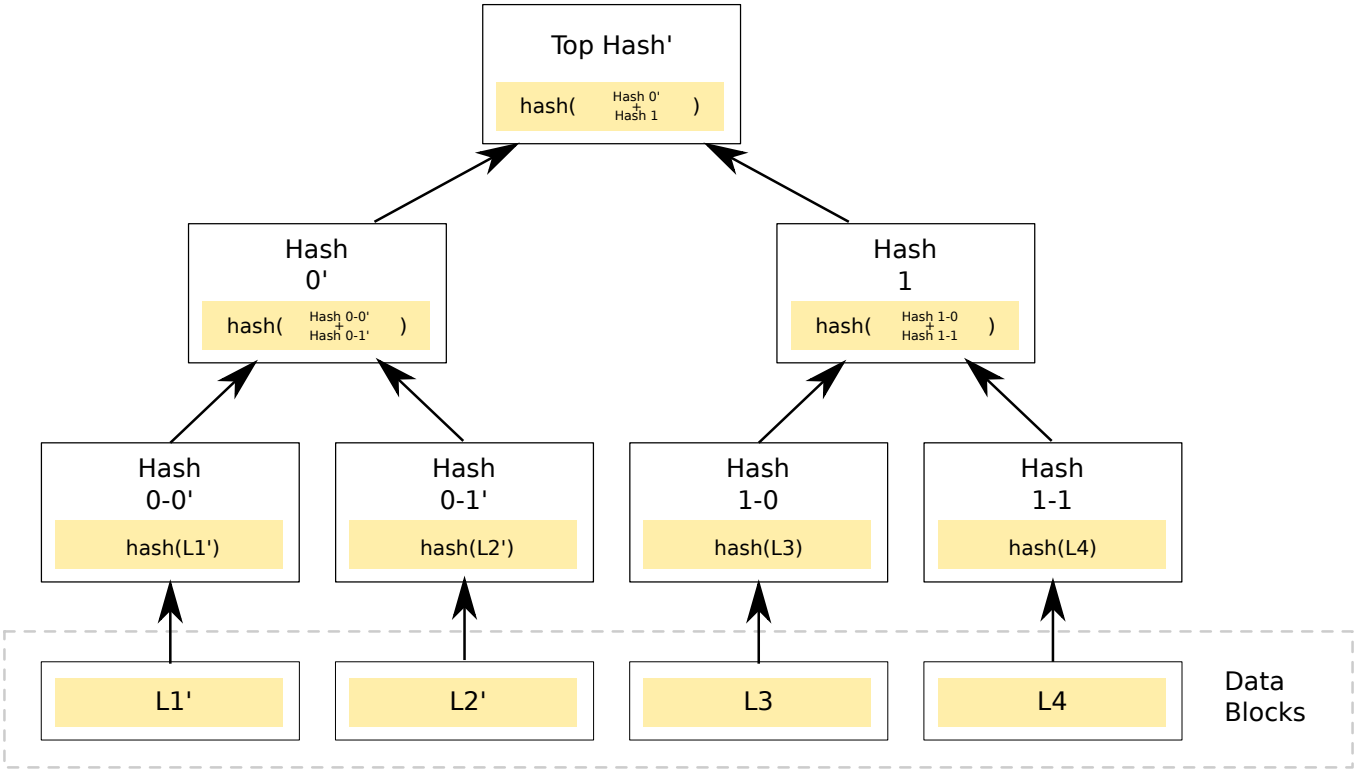


Abbildung: Copy on Write [2]

4 Der „Überblock“ wird aktualisiert

Copy on Write…

- Überblock-Aktualisierung
  - ZFS hält ein Überblock-Array mit 128 Einträgen vor
  - Replikate des Arrays werden an mehreren Stellen im Pool gespeichert
  - Array wird im Round-Robin-Verfahren benutzt
  - Überblock enthält u.a. eine Transaktionsnummer und Prüfsumme
  - Beim Mounten wird der Überblock mit der höchsten Transaktionsnummer benutzt
    - Integrität wird anhand der Prüfsumme überprüft

Schnappschüsse und Klone

- Durch Copy on Write sehr einfach Schnappschüsse möglich
  - Alte Dateisystemwurzel als Schnappschuss speichern
  - Alte Zeiger und Blöcke nicht löschen
- Schnappschüsse können nur gelesen werden
  - Schnappschüsse sind im `.zfs`-Verzeichnis zu finden
  - Benutzer können so selbst auf Backups zugreifen

Schnappschüsse und Klone…

- Schnappschüsse können einfach zurückgerollt werden
  - Ähnlich wie Transaktionen
  - Macht alle Änderungen seit dem Schnappschuss rückgängig
- Veränderbare Schnappschüsse nennen sich Klone
  - Unveränderte Blöcke werden geteilt
  - Änderungen an einem Klon durch neue Blöcke

Backups

- Backups basieren auf Schnappschüssen
- Vollständiges Backup
  - Als Grundlage dient ein beliebiger Schnappschuss
- Inkrementelles Backup
  - Als Grundlage dienen die Änderungen zwischen zwei Schnappschüssen
  - Aufwand hängt von den geänderten Daten ab
- Damit ist Replikation realisierbar
  - Erstelle minütlich Schnappschüsse und transferiere die inkrementellen Backups per SSH auf den anderen Server

Datensicherheit

- Fehlerszenario auf einem Mirror aus zwei Festplatten
  1. Programm liest Daten
  2. ZFS liest einen Block von der ersten Festplatte
  3. Es wird erkannt, dass der Block fehlerhaft ist
  4. ZFS liest die Blockkopie von der zweiten Festplatte
  5. Es wird erkannt, dass die Blockkopie korrekt ist
  6. Der fehlerhafte Block wird mit dem korrekten überschrieben
  7. Die Daten werden an die Anwendung weitergegeben
- Bei traditionellen Dateisystemen fallen die Schritte 3–6 weg

Datensicherheit…

- Traditionelle RAID-Systeme können Fehler nur erkennen
  - Dafür müssten aber bei jedem Zugriff die zugehörigen Paritätsdaten gelesen und verglichen werden
  - Wird ein Fehler erkannt, ist nicht klar ob Daten oder Parität korrekt sind

Scrubbing

- Scrubbing findet und korrigiert Fehler der Daten
- Für jeden Block wird Folgendes ausgeführt
  1. Block wird gelesen
  2. Block wird mit der gespeicherten Prüfsumme verglichen
  3. Falls der Block fehlerhaft ist, wird er wenn möglich repariert
- Scrubbing wird momentan nicht automatisch durchgeführt
  - Empfehlung: Wöchentlich bzw. monatlich

Resilvering

- Rekonstruktion der Daten in einem RAID-Verbund
- Traditionell musste alles rekonstruiert werden
  - Strenge Trennung zwischen Verbund und Dateisystem
  - Simples XOR über die noch vorhandenen Daten
  - Keine Möglichkeit die Korrektheit zu verifizieren
- Nur noch tatsächlich vorhandene Blöcke rekonstruieren
  - Bei temporärem Ausfall müssen nur veränderte Teile rekonstruiert werden
  - Mehr Datensicherheit durch Top-Down-Rekonstruktion
    - Verlust von Blöcken auf den oberen Ebenen fatal

- Die oberen Ebenen beziehen sich hierbei auf den Hash-Baum
  - Ein fehlerhafter Knoten macht den ganzen zugehörigen Teilbaum unzugänglich

Kompression

- ZFS unterstützt transparente Kompression
  - Kann auf Dateisystemebene gesetzt werden
  - Unterstützt mehrere Algorithmen
  - Momentan stehen zle, gzip, lzjb und lz4 zur Verfügung
- Kompression ist statisch
  - Gesetzter Algorithmus wird für alle Daten benutzt

Kompression…

- zle eliminiert Null-Sequenzen
  - Zero-Length Encoding
  - Üblicherweise geringe Kompressionsrate
  - Wird immer angewendet sobald Kompression aktiviert ist
- gzip komprimiert gut aber langsam
  - Unterstützt mehrere Komprimierungslevel (1–9)
  - Selbst schnelle Level recht langsam ($\sim$ 50 MB/s)
  - Dekompression schneller ($\sim$ 300 MB/s)

Kompression…

- lzjb wurde speziell für ZFS entwickelt
  - LZ: Lempel Ziv
  - JB: Jeff Bonwick (ZFS-Hauptentwickler)
  - Hohe Leistung
- lz4 relativ neu und schneller als lzjb
  - Hohe Kompressionsgeschwindigkeit ($\approx$ 400 MB/s)
  - Noch höhere Dekompressionsgeschwindigkeit ($\approx$ 1,8 GB/s)

Deduplikation

- Deduplikation ist ein Verfahren zur Datenreduktion
  - Mehrfach vorkommende Blöcke werden nur einmal gespeichert und referenziert
  - Duplikate werden anhand der Prüfsumme erkannt
- Datensicherheit ist ein wichtiger Faktor
  - Prüfsummen-Algorithmus wird auf SHA256 gestellt
  - Optional können Daten Byte für Byte verifiziert werden

Deduplikation…

- Deduplikation benötigt zusätzlichen Speicherplatz
  - Blöcke und Prüfsummen werden in Tabellen gespeichert
  - Tabellenzugriff bei jeder Schreiboperation
  - Tabellen sollten im Hauptspeicher gehalten werden
- Deduplikationsrate ist abhängig von der Blockgröße
  - Größere Blöcke verringern Deduplikationsrate
  - Kleinere Blöcke vergrößern Speicherbedarf
- 10+ GB pro TB bei einer Blockgröße von 8 KiB

Volumes

- ZFS unterstützt auch sogenannte Volumes
  - Exportiert als Blockgerät
  - Nützlich um andere Dateisystem auf Pools zu nutzen
- Alle Poolfunktionen können genutzt werden
  - Schnappschüsse, Komprimierung etc.

```
1 $ zfs create -V 4G tank/swap
2 $ zfs create -V 75G tank/home
3 $ mkswap /dev/zvol/tank/swap
4 $ mkfs.ext4 /dev/zvol/tank/home
```

Listing 1: ZFS-Volume

Leistungsaspekte

- ZFS nutzt einen Pipeline-Scheduler
  - Jede Operation hat eine Priorität und eine Deadline
  - Höhere Priorität resultiert in kürzerer Deadline
  - Leseoperationen erhalten höhere Priorität als Schreiboperationen
- Der Scheduler kann mehrere Operationen zusammenfassen und umsortieren
  - Macht effizientes Copy on Write möglich
  - Sonst müsste bei jeder Änderung ein kompletter Unterbaum kopiert werden

Leistungsaspekte…

- ZFS nutzt zwei Cache-Level: ARC und L2ARC
  - Der Adaptive Replacement Cache befindet sich im RAM
  - Der L2ARC befindet sich üblicherweise auf SSDs
- Alle Zugriffe werden durch den ARC beschleunigt
  - Dafür ist ausreichend viel RAM notwendig
  - Dort werden auch die Deduplikationstabellen gespeichert
- Befinden sich die Daten nicht im ARC, wird auf den Pool zugegeriffen

Leistungsaspekte…

- SSDs werden für den L2ARC und das ZIL genutzt
  - L2ARC wird nur für Lesezugriffe benutzt (inklusive der Deduplikationstabellen)
  - Das ZFS Intent Log ist journalartig und wird für synchrone Schreibvorgänge genutzt
- Schreib- und Lesecaches werden als Pool-Geräte verwaltet
  - Lesecaches als `cache`-vdevs
  - Schreibcaches als `log`-vdevs
  - Beide können hinzugefügt und wieder entfernt werden
- Gibt es kein separates Log, wird das ZIL im Pool angelegt

Diverses

- ZFS arbeitet auch mit eingeschaltetem Festplatten-Cache korrekt
  - Einzige Voraussetzung: Die Festplatten müssen die Flush-Kommandos befolgen
  - Bei einigen Dateisystemen kann Datenverlust auftreten
- ZFS nutzt dynamische Blockgrößen von bis zu 128 KiB
  - Kann auf 1 MiB erhöht werden
  - Die maximale Blockgröße kann manuell angepasst werden

Diverses…

- ZFS passt sich der Byte-Reihenfolge (Endianness) an
  - ZFS kümmert sich nur um Metadaten
  - Daten sind laut POSIX ein Stream von Bytes
- ZFS unterstützt mehrere unabhängige Prefetch-Ströme
  - Automatische Längen- und Schritt-Erkennung
  - Erkennt beliebige lineare Zugriffsmuster (vorwärts und rückwärts)

Regressionstests

- Lesen, Schreiben, Erstellen und Löschen von Dateien und Verzeichnissen
- Erstellen und Zerstören von Dateisystemen und Pools
- Aktivieren und Deaktivieren von Kompression
- Ändern des Prüfsummen-Algorithmus
- Hinzufügen und Entfernen von Geräten
- Ändern von Caching- und Scheduling-Strategien
- Zufällige Daten auf eine Hälfte eines Mirror schreiben
- Abstürze simulieren

“Probably more abuse in 20 seconds than you’d see in a lifetime.”
– Jeff Bonwick, ZFS-Chefentwickler

Einschränkungen

- Es ist nicht möglich einen Pool zu verkleinern
  - Geräte können nicht entfernt werden
- Es ist nicht möglich RAID-vdevs zu erweitern
  - Geräte können durch größere ausgetauscht werden
  - Geräte können allerdings nicht hinzugefügt werden
- Nicht alle RAID-Level können abgebildet werden
  - Z.B. ist es nicht möglich ein RAID-51-Array zu erstellen
  - RAID 10, RAID 50 und RAID 60 sind allerdings möglich

Overhead

- Komfortfunktionen erzeugen zusätzlichen Overhead
  - Prüfsummen müssen berechnet werden
  - Copy on Write erzwingt Read-Modify-Write
  - Kompression benötigt CPU-Leistung
  - Deduplikation benötigt CPU und RAM
  - Verschlüsselung benötigt CPU-Leistung

```
1 $ openssl speed sha256
2 type   16 bytes  64 bytes   256 bytes  1024 bytes 8192 bytes
3 sha256 54163.05k 122745.00k 217991.85k 263372.12k 277577.73k
```

Listing 2: SHA256-Geschwindigkeit (E3-1225 v3)

Overhead...

```
1 $ openssl speed aes-256-cbc
2 type    16 bytes    64 bytes    256 bytes   1024 bytes 8192 bytes
3 aes256 104206.79k 110834.13k 112380.94k 113369.77k 113360.90k
```

Listing 3: AES256CBC-Geschwindigkeit (E3-1225 v3)

```
1 $ openssl speed -evp aes-256-cbc
2 type    16 bytes    64 bytes    256 bytes   1024 bytes 8192 bytes
3 aes256 529875.27k 558823.38k 565729.88k 568951.47k 567079.63k
```

Listing 4: AES256CBC-Geschwindigkeit mit AES-NI (E3-1225 v3)

Overhead...

```
1 $ lz4 -1 -b fonts.tar
2 354846720 -> 258230785 (72.77%),  513.8 MB/s , 2578.8 MB/s
3 $ lz4 -9 -b fonts.tar
4 354846720 -> 219545733 (61.87%),   29.9 MB/s , 2161.7 MB/s
```

Listing 5: lz4-Geschwindigkeit (E3-1225 v3)

```
1 $ time gzip -1 fonts.tar
2  8.18s user 0.14s system 99% cpu  8.318 total
3 $ time gzip -9 fonts.tar
4 21.71s user 0.16s system 99% cpu 21.878 total
```

Listing 6: gzip-Geschwindigkeit mit AES-NI (E3-1225 v3)

Ausblick

- Parallele verteilte Dateisysteme nutzen Funktionalität moderner Dateisysteme
  - ZFSs Data Management Unit (DMU) stellt einen effizienten Object Store bereit
  - Schnappschüsse/Versionierung auch im parallelen Fall wünschenswert

Zusammenfassung

- Dateisysteme organisieren Daten und Metadaten
- Moderne Dateisysteme integrieren zusätzliche Funktionen
  - U.a. verbesserte Datenintegrität, Schnappschüsse, Datenreduktion etc.
- Copy on Write hilft Konsistenz zu bewahren
- Integrierte Speicherverwaltung hat Vorteile bezüglich Leistung und Datensicherheit
- Kompression und Deduplikation können dabei helfen Speicherplatz zu sparen

Quellen I

[1] Seagate. Desktop HDD. http://www.seagate.com/www-content/datasheets/pdfs/desktop-hdd-8tbDS1770-9-1603DE-de_DE.pdf.

[2] Wikipedia. Hash-Baum. http://de.wikipedia.org/wiki/Hash-Baum.

[3] Wikipedia. Standard RAID levels. http://en.wikipedia.org/wiki/Standard_RAID_levels.