

Festplatten
oooooo

Solid State Drives (SSD)
oooooooooooo

RAID
oooooooooooo

4. Foliensatz Betriebssysteme

Prof. Dr. Christian Baun

Frankfurt University of Applied Sciences
(1971–2014: Fachhochschule Frankfurt am Main)
Fachbereich Informatik und Ingenieurwissenschaften
christianbaun@fb2.fra-uas.de

Lernziele dieses Foliensatzes

- Am Ende dieses Foliensatzes kennen/verstehen Sie...
 - den Aufbau, die Arbeitsweise und die Eckdaten von **Festplatten**
 - den Aufbau, die Arbeitsweise und die Eckdaten von **Solid State Drives**
 - die Arbeitsweise und die am häufigsten verwendeten Varianten von Redundant Array of Independent Disks (**RAID**)

Wenn Sie wissen und verstehen wie HDDs und SSDs arbeiten, verstehen Sie auch besser wie Dateisysteme (⇒ Foliensatz 6) arbeiten und warum sie so entwickelt wurden wie sie entwickelt wurden

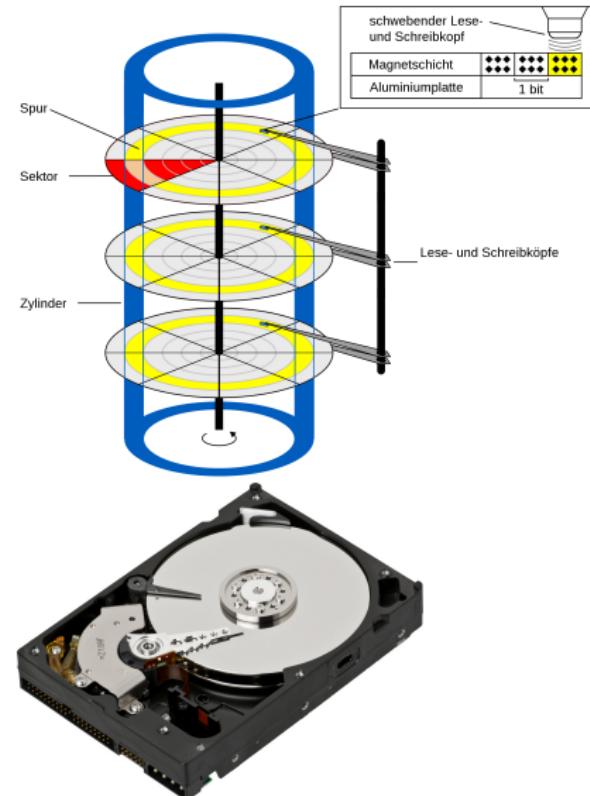
Übungsblatt 4 wiederholt die für die Lernziele relevanten Inhalte dieses Foliensatzes

Festplatten

- Festplatten sind ca. Faktor 100 preisgünstiger pro Bit als Hauptspeicher und bieten ca. Faktor 100 mehr Kapazität
 - Nachteil: Zugriffe auf Festplatten sind um ca. Faktor 1000 langsamer
- Grund für die geringere **Zugriffsgeschwindigkeit**:
 - Festplatten sind mechanische Geräte
 - Sie enthalten eine oder mehrere Scheiben, die mit 4200, 5400, 7200, 10800 oder 15000 Umdrehungen pro Minute rotieren
- Für jede Seite jeder Platte existiert ein Schwungarm mit einem **Schreib-/Lesekopf**
 - Der Schreib-/Lesekopf magnetisiert Bereiche der Scheibenoberfläche und schreibt bzw. liest so die Daten
 - Zwischen Platte und Kopf ist ein Luftpolder von ca. 20 Nanometern
- Auch Festplatten haben einen Cache (üblicherweise $\leq 32 \text{ MB}$)
 - Dieser puffert Schreib- und Lesezugriffe

Logischer Aufbau von Festplatten (1/2)

- Die Köpfe magnetisieren die Oberflächen der **Scheiben** (*Platter*) in kreisförmigen **Spuren** (*Tracks*)
- Alle Spuren auf allen Platten bei einer Position des Schwungarms bilden einen **Zylinder** (*Cylinder*)
- Die Spuren sind in logische Einheiten (Kreissegmente) unterteilt, die **Blöcke** oder **Sektoren** heißen
 - Typischerweise enthält ein Block 512 Bytes Nutzdaten
 - Sektoren sind die kleinsten adressierbaren Einheiten auf Festplatten

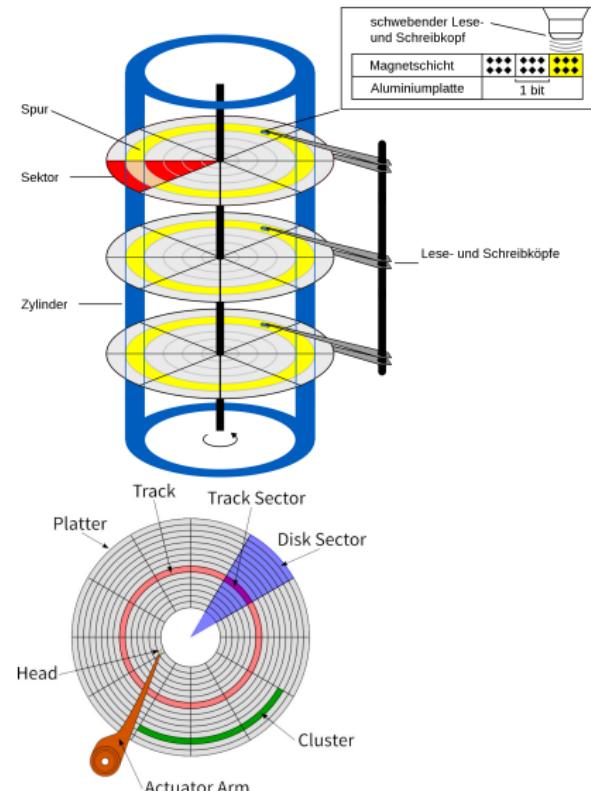


Bildquelle (Aufbau): Henry Mühlfordt. Wikimedia (CC-BY-SA-1.0)

Bildquelle (HDD): purepng.com (CC0)

Logischer Aufbau von Festplatten (2/2)

- Müssen Daten geändert werden, muss der ganze Sektor gelesen und neu geschrieben werden
- Heute werden auf Softwareseite **Cluster** (siehe Foliensatz 6) angesprochen
 - Cluster sind Verbünde von Sektoren mit fester Größe, z.B. 4 oder 8 kB
 - Bei den Dateisystemen von modernen Betriebssystemen sind Cluster die kleinste Zuordnungseinheit



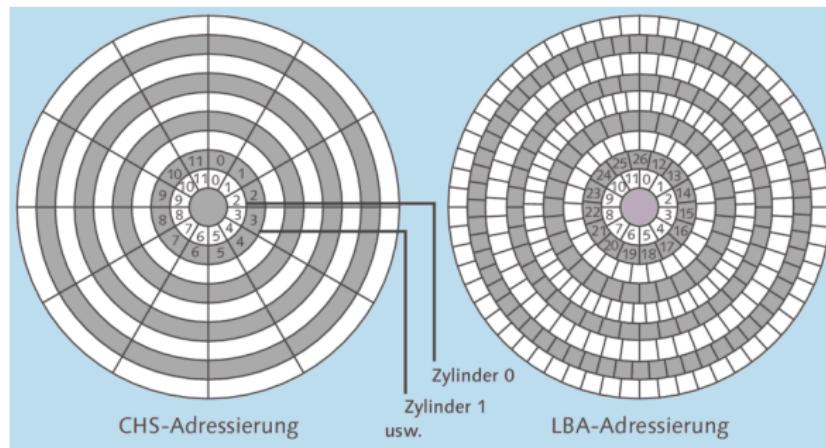
Bildquelle (Aufbau): Wimox. Wikimedia (CC-BY-SA-1.0)

Bildquelle (Scheibe): Tim Bielawa. The Linux Sysadmins Guide to Virtual Disks (CC-BY-SA-4.0)

Adressierung der Daten auf Festplatten

- Festplatten \leq 8 GB verwenden **Cylinder-Head-Sector-Adressierung**
- CHS unterliegt mehreren Einschränkungen:
 - Die Schnittstellen Parallel ATA und das BIOS bieten maximal...
 - 16 Bits für die Zylinder (maximal 65.536)
 - 8 Bits für die Köpfe (maximal 255).
 - 8 Bits für die Sektoren/Spur (maximal 255. Sektornummer 0 wird nicht verwendet)
- Bis 7,844 GB Speicherkapazität kann so adressiert werden
 - $1.024 \text{ Zylinder} * 255 \text{ Köpfe} * 63 \text{ Sektoren/Spur} * 512 \text{ Bytes/Sektor} = 8.422.686.720 \text{ Bytes}$
 - $8.422.686.720 \text{ Bytes} / 1.024 / 1.024 / 1.024 = 7,844 \text{ GB}$
- Keine 2,5" oder 3,5" Festplatte hat \geq 16 Köpfe!!!
 - Es handelt sich um logische Köpfe
- Festplatten $>$ 7,844 GB verwenden logische Blockadressierung **Logical Block Addressing (LBA)**
 - Alle Sektoren werden von 0 beginnend durchnummeriert

Logical Block Addressing (LBA)



Bildquelle

IT-Handbuch für
Fachinformatiker.
Sascha Kersken.
6. Auflage.
Rheinwerk Verlag

- Bei CHS-Adressierung sind alle Spuren (Tracks) in **gleich viele Sektoren** unterteilt
 - Jeder Sektor speichert 512 Bytes Nutzdaten
- Nachteil: Es wird **Speicherkapazität verschwendet**, weil die Datendichte nach außen hin immer weiter abnimmt
- Bei LBA existiert dieser Nachteil nicht

Zugriffszeit bei Festplatten

- Die Zugriffszeit ist ein wichtiges Kriterium für die Geschwindigkeit
- 2 Faktoren sind für die Zugriffszeit einer Festplatte verantwortlich

① Suchzeit (Average Seek Time)

- Die Zeit, die der Schwungarm braucht, um eine Spur zu erreichen
- Liegt bei modernen Festplatten zwischen 5 und 15 ms

② Durchschnittliche Zugriffsverzögerung durch Umdrehung (Average Rotational Latency Time)

- Verzögerung durch die Drehgeschwindigkeit bis der Schreib-/Lesekopf den gewünschten Block erreicht
- Hängt ausschließlich von der Drehgeschwindigkeit der Scheiben ab
- Liegt bei modernen Festplatten zwischen 2 und 7,1 ms

$$\text{Durchschnitl. Zugriffsverz. d. Umdrehung. [ms]} = \frac{\frac{1000 \frac{[ms]}{[sec]} \times 60 \frac{[sec]}{[min]} \times 0,5}{\frac{\text{Umdrehungen}}{[min]}}}{\frac{\text{Umdrehungen}}{[min]}} = \frac{30.000 \frac{[ms]}{[min]}}{\frac{\text{Umdrehungen}}{[min]}}$$

Warum enthält die Gleichung 0,5 ?

Sobald der Kopf die richtige Spur erreicht hat, muss im Durchschnitt eine halbe Umdrehung der Scheibe abgewartet werden, bis sich der richtige Sektor unter dem Kopf befindet

⇒ Durchschnittliche Zugriffsverzögerung durch Umdrehung = halbe Zugriffsverzögerung durch Umdrehung

Solid State Drives (SSD)

- Werden manchmal fälschlicherweise Solid State Disks genannt
- Enthalten keine beweglichen Teile
- Vorteile:
 - Kurze Zugriffszeit
 - Geringer Energieverbrauch
 - Keine Geräuschenentwicklung
 - Mechanische Robustheit
 - Geringes Gewicht
 - Die Position der Daten ist irrelevant \Rightarrow Defragmentieren ist sinnlos
- Nachteile:
 - Höherer Preis im Vergleich zu Festplatten gleicher Kapazität
 - Sicheres Löschen bzw. Überschreiben ist schwierig
 - Eingeschränkte Anzahl an Schreib-/Löschenzyklen



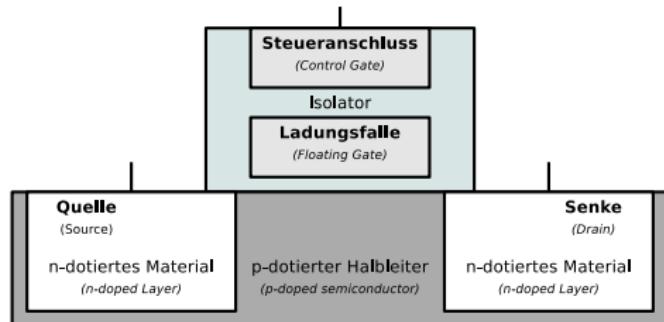
Bildquelle (SSD): Thomas Springer. Wikimedia (CC0)



Bildquelle (HDD): Erwan Velu. Wikimedia (CC-BY-SA-1.0)

Arbeitsweise von Flash-Speicher

- Daten werden als elektrische Ladungen gespeichert
 - Im Gegensatz zum Hauptspeicher ist kein Strom nötig, um die Daten im Speicher zu halten
 - Jede Flash-Speicherzelle ist ein Transistor und hat 3 Anschlüsse
 - **Gate** (deutsch: *Tor*) = Steuerelektrode
 - **Drain** (deutsch: *Senke*) = Elektrode
 - **Source** (deutsch: *Quelle*) = Elektrode
 - Das Floating-Gate speichert Elektronen (Daten)
 - Ist komplett von einem Isolator umgeben
 - Die Ladung bleibt über Jahre stabil

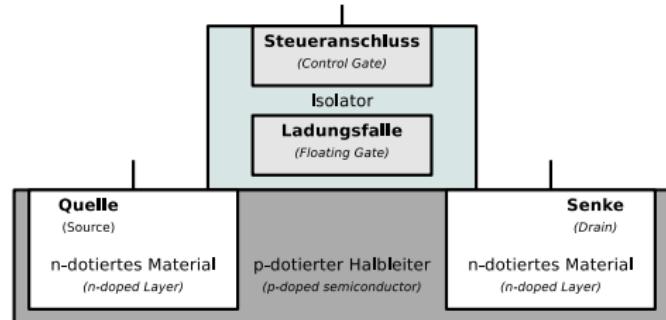


Sehr gute Erklärung zur Arbeitsweise von Flash-Speicher

Benjamin Benz, *Die Technik der Flash-Speicherkarten*, c't 23/2006

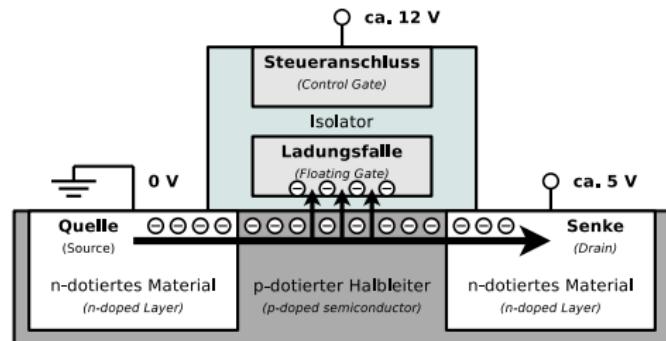
Daten aus Flash-Speicherzellen lesen

- Ein positiv-dotierter (p) Halbleiter trennt die beiden negativ-dotierten (n) Elektroden Drain und Source
 - Wie beim npn-Transistor ohne Basisstrom leitet der npn-Übergang nicht
- Ab einer bestimmten positiven Spannung (5V) am Gate (**Threshold**) entsteht im p-Bereich ein n-leitender Kanal
 - Durch diesen kann Strom zwischen Source und Drain fließen
- Sind Elektronen im Floating-Gate, verändert das den Threshold
 - Es ist eine höhere positive Spannung am Gate nötig, damit Strom zwischen Source und Drain fließen kann
 - **So wird der gespeicherte Wert der Flash-Speicherzelle ausgelesen**



Daten in Flash-Speicherzellen schreiben

- Flash-Speicherzellen werden durch den **Fowler-Nordheim-Tunneleffekt** beschrieben



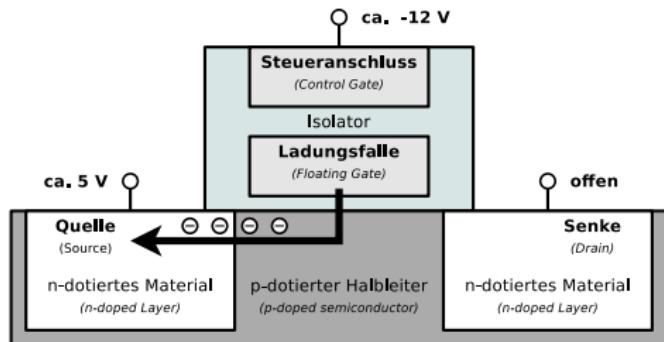
- Eine positive Spannung (5V) wird am Control-Gate angelegt
 - Darum können Elektronen zwischen Source und Drain fließen
- Ist die positive Spannung am Control-Gate groß genug (6 bis 20V), werden einige Elektronen durch den Isolator in das Floating-Gate getunnelt (\Rightarrow Fowler-Nordheim-Tunnel)
- Das Verfahren heißt auch **Channel Hot Electron Injection**

Empfehlenswerte Quelle

Flash memory. Alex Paikin. 2004. http://www.hitequest.com/Kiss/Flash_terms.htm

Daten in Flash-Speicherzellen löschen

- Um eine Flash-Speicherzelle zu löschen, wird eine negative Spannung (-6 bis -20V) am Control-Gate angelegt
 - Die Elektronen werden dadurch in umgekehrter Richtung aus dem Floating-Gate herausgetunnelt
- Die isolierende Schicht, die das Floating-Gate umgibt, leidet bei jedem Löschvorgang
 - Irgendwann ist die isolierende Schicht nicht mehr ausreichend, um die Ladung im Floating-Gate zu halten
 - Darum überlebt Flash-Speicher nur eine eingeschränkte Anzahl Schreib-/Löschzyklen



Arbeitsweise von Flash-Speicher

- Die Speicherzellen sind in Gruppen zu **Blöcken** und (abhängig vom Aufbau auch in **Seiten**) angeordnet
 - Ein Block enthält immer eine feste Anzahl an Seiten
- Schreib- und Löschoperationen können nur für komplette Seiten oder Blöcke durchgeführt werden
 - Darum sind Schreib- und Löschoperationen aufwendiger als Leseoperationen
- Sollen Daten in einer Seite verändert werden, muss der komplette Block gelöscht werden
 - Dafür wird der Block in einen Pufferspeicher kopiert
 - Im Pufferspeicher werden die Daten verändert
 - Danach wird der Block im Flash-Speicher gelöscht
 - Abschließend wird der veränderte Block in den Flash-Speicher geschrieben

Unterschiede beim Flash-Speicher

- Es existieren 2 Arten von Flash-Speicher:
 - **NOR-Speicher**
 - **NAND-Speicher**
- Das Schaltzeichen bezeichnet die interne Verbindung der Speicherzellen
 - Das beeinflusst Kapazität und Zugriffsgeschwindigkeit

NOR-Speicher

- Jede Speicherzelle hat eine eigene Datenleitung
 - Vorteil:
 - Wahlfreier Lese- und Schreibzugriff
⇒ Bessere Zugriffszeit als NAND-Speicher
 - Nachteil:
 - Komplexer (⇒ kostspieliger) Aufbau
 - Höherer Stromverbrauch als NAND-Speicher
 - Üblicherweise geringe Kapazitäten (≤ 32 MB)
- Enthält keine Seiten
 - Die Speicherzellen sind zu Blöcken zusammengefasst
 - Typische Blockgrößen: 64, 128 oder 256 kB
- Kein wahlfreier Zugriff bei Löschoperationen möglich
 - Es muss immer ein kompletter Block gelöscht werden

Einsatzbereiche

Industrielles Umfeld (z.B. Automobilbau), Speicherung der Firmware eines Computersystems



NOR-Flashspeicher (oberes Bild) auf dem Mainboard des iPhone 3G (unteres Bild)

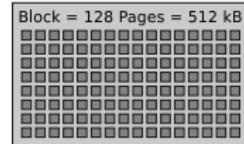


Bilder: Raimond Spekking. Wikimedia (CC-BY-SA-4.0)

NAND-Speicher

- Die Speicherzellen sind zu Seiten zusammengefasst
 - Typische Seitengröße: 512 bis 8.192 Bytes
 - Jede Seite hat eine eigene Datenleitung
 - Mehrere Seiten umfassen einen Block
 - Typische Blockgröße: 32, 64, 128 oder 256 Seiten
- Vorteil:
 - Weniger Datenleitungen \Rightarrow Benötigt < 50% Fläche von NOR-Speicher
 - Herstellung ist preisgünstiger im Vergleich zu NOR-Flash-Speicher
- Nachteil:
 - Kein wahlfreier Zugriff \Rightarrow Schlechtere Zugriffszeit als NOR-Speicher
 - Lese- und Schreibzugriffe sind nur für ganze Seiten möglich
 - Löschoperationen sind nur für ganze Blöcke möglich

Page
4 kB



Einsatzbereiche

USB-Sticks, SSDs,
Speicherkarten



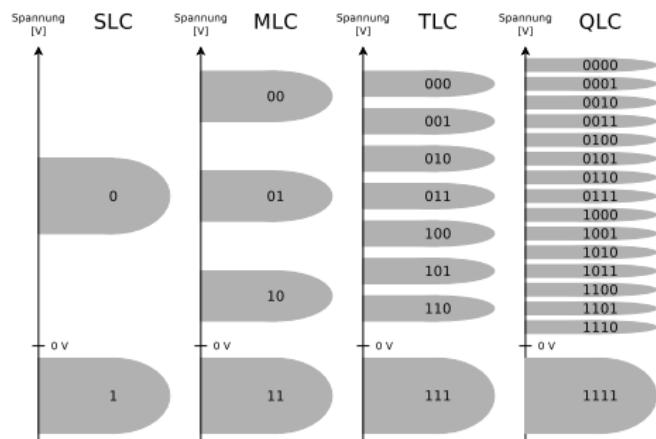
Single/Multi/Triple/Quad-Level Cell

- 4 Arten von NAND-Flash-Speicher existieren

- QLC-Zellen speichern 3 Bits
- TLC-Zellen speichern 3 Bits
- MLC-Zellen speichern 2 Bits
- SLC-Zellen speichern 1 Bit

- SLC-Speicher...

- ist am teuersten
- hat die höchste Schreibgeschwindigkeit
- hat die höchste Lebensdauer (überlebt die meisten Schreib-/Löschenzyklen)

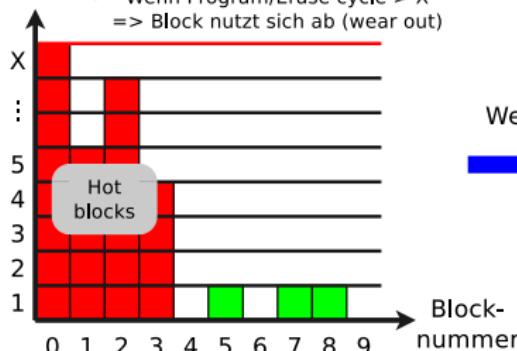


- SLC-Speicher überlebt ca. 100.000 bis 300.000 Schreib-/Löschenzyklen
- MLC-Speicher überlebt ca. 10.000 Schreib-/Löschenzyklen
- TLC-Speicher und QLC-Speicher überleben ca. 1.000 Schreib-/Löschenzyklen
- Es existieren auch Speicherzellen, die mehrere Millionen Schreib-/Löschenzyklen verkraften

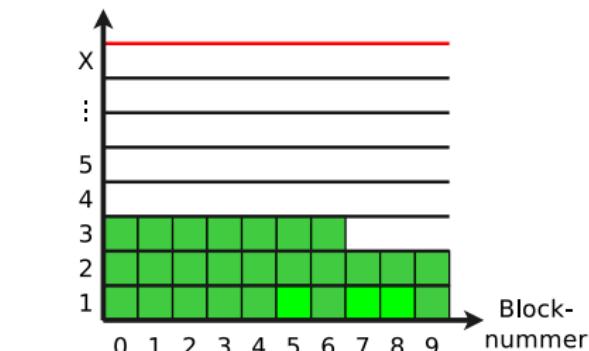
Wear Leveling

Schreib/Löscher-
Zyklen

(P/E count)

Wenn Program/Erase cycle > X
=> Block nutzt sich ab (wear out)Schreib/Löscher-
Zyklen

(P/E count)



Wear Leveling

- Wear Leveling-Algorithmen verteilen Schreibzugriffe gleichmäßig
- Dateisysteme, die speziell für Flash-Speicher ausgelegt sind, und darum Schreibzugriffe minimieren, sind u.a. JFFS, JFFS2, YAFFS und LogFS
 - JFFS enthält einen eigenen Wear Leveling-Algorithmus
 - Das ist bei eingebetteten Systemen häufig nötig, wo Flash-Speicher direkt angeschlossen wird

Zugriffszeiten bei Festplatten

- Die Geschwindigkeit von Prozessoren, Cache und Hauptspeicher wächst schneller als die Zugriffsgeschwindigkeit der Festplatten:

- Festplatten**

1973: IBM 3340, 30 MB Kapazität, 30 ms Zugriffszeit (*Latenz*)
1989: Maxtor LXTI00S, 96 MB Kapazität, 29 ms Zugriffszeit
1998: IBM DHEA-36481, 6 GB Kapazität, 16 ms Zugriffszeit
2006: Maxtor STM320820A, 320 GB Kapazität, 14 ms Zugriffszeit
2011: Western Digital WD30EZRSDETL, 3 TB Kapazität, 8 ms Zugriffszeit
2018: Seagate BarraCuda Pro ST14000DM001, 14 TB Kapazität, 4-5 ms Zugriffszeit

- Prozessoren**

1971: Intel 4004, 740 kHz Taktfrequenz
1989: Intel 486DX, 25 Mhz Taktfrequenz
1997: AMD K6-2, 550 Mhz Taktfrequenz
2007: AMD Opteron Santa Rosa F3, 2,8 GHz Taktfrequenz
2010: Core i7 980X Extreme (6 Cores), 3,33 Ghz Taktfrequenz
2018: AMD Ryzen Threadripper 2990WX (32 Cores), 3 Ghz Taktfrequenz
2020: AMD Ryzen Threadripper 3990X (64 Cores), 2,9 Ghz Taktfrequenz

- Die Zugriffszeit von **SSDs** ist $\leq 1 \mu\text{s}$ $\Rightarrow \approx 100x$ besser als bei HDDs

- Dennoch vergrößert sich der Abstand in Zukunft weiter wegen der Leistungsgrenzen der Schnittstellen und Mehrkernprozessoren

- Weitere Herausforderung

- Laufwerke können ausfallen \Rightarrow Gefahr des Datenverlustes

- Zugriffszeit und Datensicherheit** bei HDDs/SSDs erhöhen \Rightarrow **RAID**

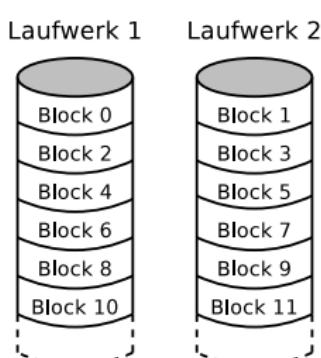
Redundant Array of independent Disks (RAID)

- Die Geschwindigkeit der Festplatten lässt sich nicht beliebig verbessern
 - Festplatten bestehen aus beweglichen Teilen
 - Physikalische und materielle Grenzen müssen akzeptiert werden
 - Eine Möglichkeit, die gegebenen Beschränkungen im Hinblick auf Geschwindigkeit, Kapazität und Datensicherheit zu umgehen, ist das gleichzeitige Verwenden mehrerer Komponenten
 - Ein RAID besteht aus mehreren Laufwerken (Festplatten oder SSDs)
 - Diese werden vom Benutzer und den Prozessen als ein einziges großes Laufwerk wahrgenommen
 - Die Daten werden über die Laufwerke eines RAID-Systems verteilt
 - Das RAID-Level spezifiziert, wie die Daten verteilt werden
 - Die gebräuchlichsten RAID-Level sind RAID 0, RAID 1 und RAID 5

Patterson, David A., Garth Gibson, and Randy H. Katz, **A Case for Redundant Arrays of Inexpensive Disks (RAID)**, Vol. 17, No. 3, ACM (1988).

RAID 0 – Striping – Beschleunigung ohne Redundanz

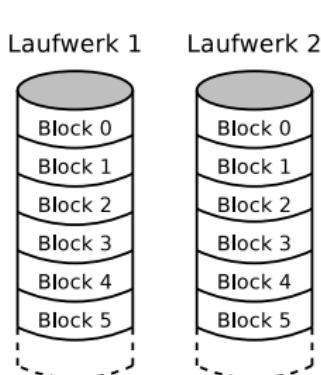
- Keine Redundanz
 - Steigert nur die Datentransferrate
- Aufteilung der Laufwerke in Blöcke gleicher Größe
- Sind die Ein-/Ausgabeaufträge groß genug (> 4 oder 8 kB), können die Zugriffe parallel auf mehreren oder allen Laufwerken durchgeführt werden



- Fällt ein Laufwerk aus, können die Daten nicht mehr vollständig rekonstruiert werden
 - Nur kleinere Dateien, die vollständig auf den verbliebenen Laufwerken gespeichert sind, können gerettet werden
- RAID 0 eignet sich nur, wenn die Sicherheit der Daten bedeutungslos ist oder eine geeignete Form der Datensicherung vorhanden ist

RAID 1 – Mirroring – Spiegelung

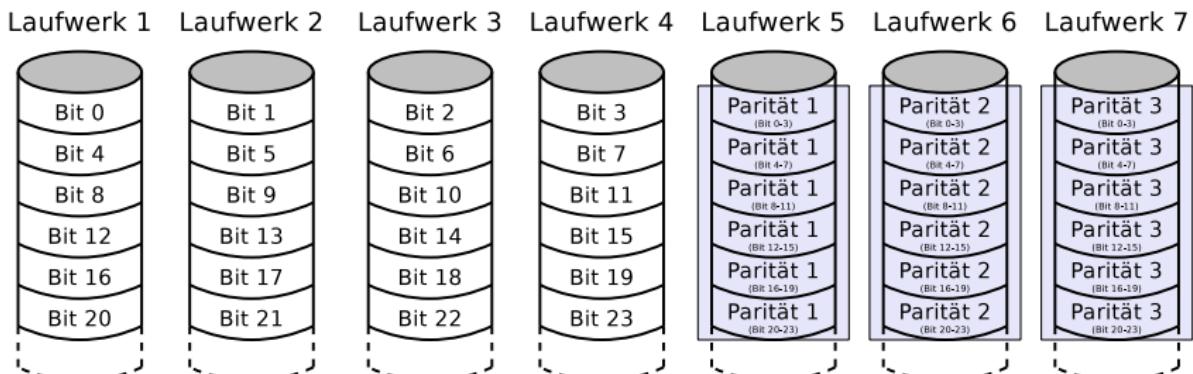
- Mindestens 2 Laufwerke gleicher Kapazität enthalten identische Daten
 - Sind die Laufwerke unterschiedlich groß, bietet ein Verbund mit RAID 1 höchstens die Kapazität des kleinsten Laufwerks
- Ausfall eines Laufwerks führt nicht zu Datenverlust
 - Grund: Die übrigen Laufwerke halten die identischen Daten vor
- Zum Totalverlust kommt es nur beim Ausfall aller Laufwerke



- Jede Datenänderung wird auf allen Laufwerken geschrieben
- Kein Ersatz für Datensicherung
 - Fehlerhafte Dateioperationen oder Virenbefall finden auf allen Laufwerken statt
- Die Lesegeschwindigkeit kann durch intelligente Verteilung der Zugriffe auf die angeschlossenen Laufwerke gesteigert werden

RAID 2 – Bit-Level Striping mit Hamming-Code-Fehlerkorrektur

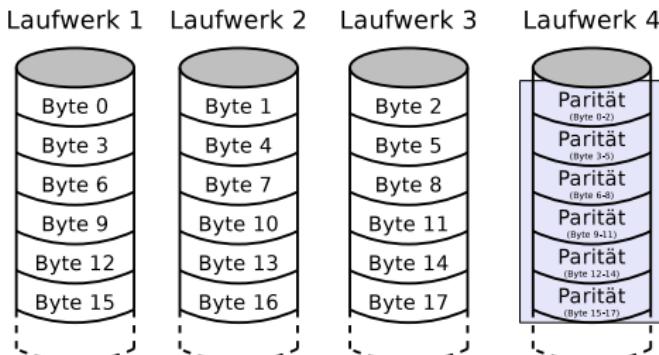
- Daten werden bitweise auf die Laufwerke verteilt
 - Bits, die Potenzen von 2 sind (1, 2, 4, 8, 16, usw.) sind Prüfbits



- Prüfbits werden über mehrere Laufwerke verteilt \Rightarrow Datendurchsatz wird gesteigert
- Wurde nur bei Großrechnern verwendet
 - Spielt heute keine Rolle mehr

RAID 3 – Byte-Level Striping mit Paritätsinformationen

- Paritätsinformationen sind auf einem Paritätlaufwerk gespeichert

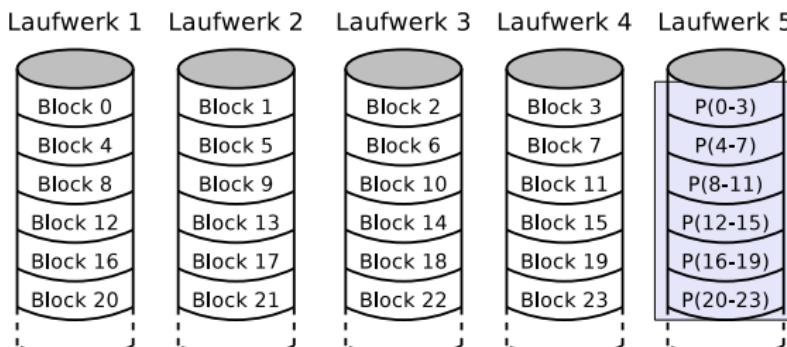


- Jede Schreiboperation auf das RAID führt zu Schreiboperationen auf das Paritätlaufwerk
⇒ Flaschenhals
- Wurde durch RAID 5 ersetzt

Datenlaufwerke	Summe	gerade/ungerade	Paritätlaufwerk
Bits sind 0 + 0 + 0	⇒ 0	⇒ Summe ist gerade	⇒ Summen-Bit 0
Bits sind 1 + 0 + 0	⇒ 1	⇒ Summe ist ungerade	⇒ Summen-Bit 1
Bits sind 1 + 1 + 0	⇒ 2	⇒ Summe ist gerade	⇒ Summen-Bit 0
Bits sind 1 + 1 + 1	⇒ 3	⇒ Summe ist ungerade	⇒ Summen-Bit 1
Bits sind 1 + 0 + 1	⇒ 2	⇒ Summe ist gerade	⇒ Summen-Bit 0
Bits sind 0 + 1 + 1	⇒ 2	⇒ Summe ist gerade	⇒ Summen-Bit 0
Bits sind 0 + 1 + 0	⇒ 1	⇒ Summe ist ungerade	⇒ Summen-Bit 1
Bits sind 0 + 0 + 1	⇒ 1	⇒ Summe ist ungerade	⇒ Summen-Bit 1

RAID 4 – Block-Level Striping mit Paritätsinformationen

- Paritätsinformationen sind auf einem Paritätlaufwerk gespeichert
- Unterschied zu RAID 3:
 - Nicht einzelne Bits oder Bytes, sondern Blöcke (**Chunks**) werden geschrieben



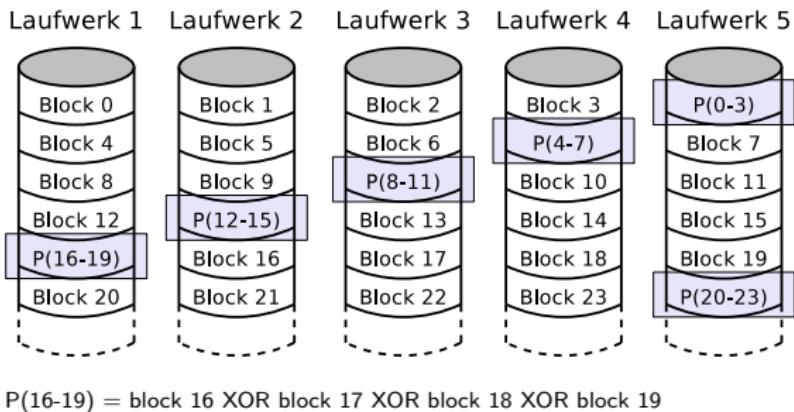
- Jede Schreiboperation auf das RAID führt zu Schreiboperationen auf das Paritätlaufwerk
 - Nachteile:
 - Flaschenhals
 - Paritätlaufwerk fällt häufiger aus

$$P(16-19) = \text{Block 16 XOR Block 17 XOR Block 18 XOR Block 19}$$

- Wird selten eingesetzt, weil RAID 5 nicht diese Nachteile hat
- Die Firma NetApp verwendet in ihren NAS-Servern RAID 4
 - z.B. NetApp FAS2020, FAS2050, FAS3040, FAS3140, FAS6080

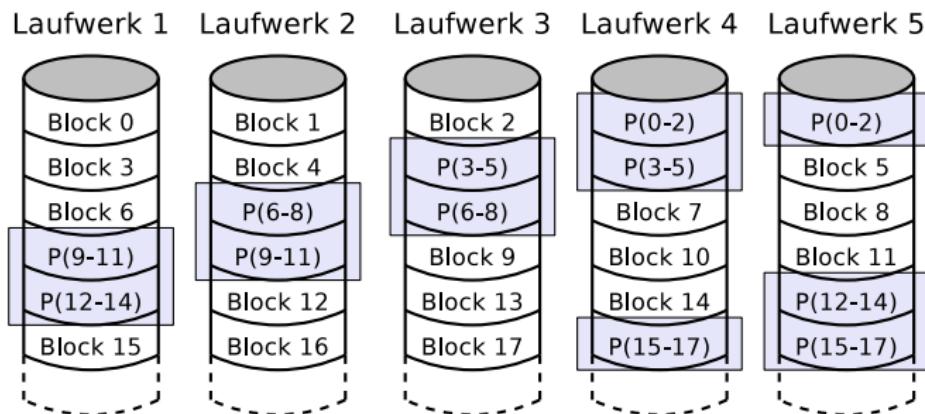
RAID 5 – Block-Level Striping mit verteilten Paritätsinformationen

- Nutzdaten und Paritätsinformationen werden auf alle Laufwerke verteilt
- Vorteile:
 - Hoher Datendurchsatz
 - Hohe Datensicherheit
 - Kein Flaschenhals



RAID 6 – Block-Level Striping mit doppelt verteilten Paritätsinformationen

- Funktioniert ähnlich wie RAID 5
 - Verkraftet aber den gleichzeitigen Ausfall von bis zu 2 Laufwerken
- Im Gegensatz zu RAID 5...
 - ist die Verfügbarkeit höher, aber die Schreibgeschwindigkeit ist niedriger
 - ist der Schreibaufwand für die Paritätsinformationen höher



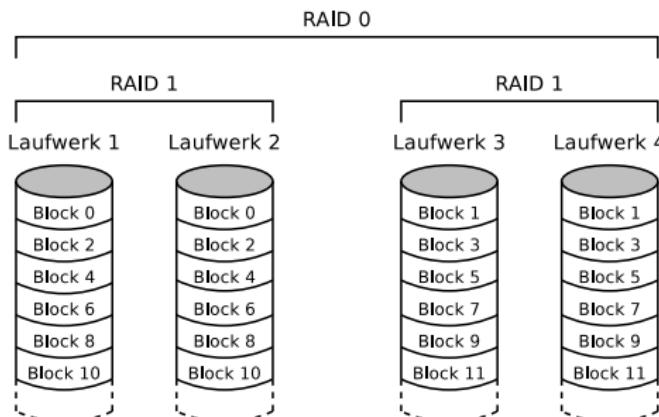
Übersicht über die RAID-Level

RAID	n (Anzahl Laufwerke)	k (Nettokapazität)	Ausfall-sicherheit	Leistung (Lesen)	Leistung (Schreiben)
0	≥ 2	n	0 (keine)	$n * X$	$n * X$
1	≥ 2	1	$n - 1$ Laufwerke	$n * X$	X
2	≥ 3	$n - [\log_2 n]$	1 Laufwerk	variabel	variabel
3	≥ 3	$n - 1$	1 Laufwerk	$(n - 1) * X$	$(n - 1) * X$
4	≥ 3	$n - 1$	1 Laufwerk	$(n - 1) * X$	$(n - 1) * X$
5	≥ 3	$n - 1$	1 Laufwerk	$(n - 1) * X$	$(n - 1) * X$
6	≥ 4	$n - 2$	2 Laufwerke	$(n - 2) * X$	$(n - 2) * X$

- X ist die Leistung eines einzelnen Laufwerks beim Lesen bzw. Schreiben
- Die maximale theoretisch mögliche Leistung wird häufig vom Controller bzw. der Rechenleistung des Hauptprozessors eingeschränkt

Sind die Laufwerke in einem RAID 1 unterschiedlich groß, entspricht die Nettokapazität des RAID 1 der Kapazität seines kleinsten Laufwerks

RAID-Kombinationen



- Meist wird RAID 0, 1 oder 5 verwendet
- Zusätzlich zu den bekannten RAID-Standards (*Leveln*) existieren verschiedene RAID-Kombinationen
 - Mindestens 2 RAIDs werden zu einem größeren RAID zusammengefasst

Beispiele

- RAID 00: Mehrere RAID 0 werden zu einem RAID 0 verbunden
- RAID 01: Mehrere RAID 0 werden zu einem RAID 1 verbunden
- RAID 05: Mehrere RAID 0 werden zu einem RAID 5 verbunden
- RAID 10: Mehrere RAID 1 werden zu einem RAID 0 verbunden (**siehe Abbildung**)
- RAID 15: Mehrere RAID 1 werden zu einem RAID 5 verbunden
- RAID 50: Mehrere RAID 5 werden zu einem RAID 0 verbunden
- RAID 51: Mehrere RAID 5 werden zu einem RAID 1 verbunden

Hardware-/Host-/Software-RAID (1/2)

Bildquelle: Adaptec



Adaptec SATA RAID 2410SA

• Hardware-RAID

- Ein RAID-Controller mit Prozessor berechnet die Paritätsinformationen und überwacht den Zustand des RAID

Vorteile: Betriebssystemunabhängigkeit
Keine zusätzliche CPU-Belastung
Nachteil: Hoher Preis (ca. € 200)



Adaptec SATA II RAID 1220SA

• Host-RAID

- Entweder ein preiswerter RAID-Controller oder der Chipsatz erbringen die RAID-Funktionalität
- Unterstützt meist nur RAID 0 und RAID 1

Vorteile: Betriebssystemunabhängigkeit
Geringer Preis (ca. € 50)
Nachteile: Zusätzliche CPU-Belastung
Eventuelle Abhängigkeit von seltener Hardware

Hardware-/Host-/Software-RAID (2/2)

- **Software-RAID**

- Linux, Windows und MacOS ermöglichen das Zusammenschließen von Laufwerken zu einem RAID auch ohne RAID-Controller

Vorteil: Keine Kosten für zusätzliche Hardware

Nachteile: Betriebssystemabhängigkeit
Zusätzliche CPU-Belastung

- Beispiel: RAID 1 (`md0`) mit den Partitionen `sda1` und `sdb1` erstellen:

```
mdadm --create /dev/md0 --auto md --level=1  
--raid-devices=2 /dev/sda1 /dev/sdb1
```

- Informationen über alle Software-RAIDs im System erhalten:

```
cat /proc/mdstat
```

- Informationen über ein bestimmtes Software-RAID (`md0`) erhalten:

```
mdadm --detail /dev/md0
```

- Partition `sdb1` entfernen und Partition `sdc1` zum RAID hinzufügen:

```
mdadm /dev/md0 --remove /dev/sdb1  
mdadm /dev/md0 --add /dev/sdc1
```