

2. E/A-Architekturen und Speicherhierarchien

- Einsatz einer Speicherhierarchie
- Magnetplatten
 - Technische Merkmale
 - Bestimmung der Zugriffszeit
 - Wahlfreie vs. sequentielle Plattenzugriffe
- Disk-Arrays
 - Realisierungsformen
 - Datenallokation
 - Fehlertoleranz
 - RAID-1 vs. RAID-5
- Seitenadressierbare Halbleiterspeicher
 - Platten-Caches
 - Flash-SSD
- 5-Minuten-Regel



Einsatz einer Speicherhierarchie

- Idealer Speicher besitzt
 - nahezu unbegrenzte Speicherkapazität
 - geringe Speicherkosten
 - kurze Zugriffszeit bei wahlfreiem Zugriff
 - hohe Zugriffsraten
 - Nichtflüchtigkeit
 - Fähigkeit zu logischen, arithmetischen u.ä. Verknüpfungen
- **Speicherhierarchie** versucht Annäherung an idealen Speicher durch reale Speichermedien durch Nutzung von Lokalitätseigenschaften zu erreichen
 - Pufferung/Allokation von Daten mit hoher Zugriffswahrscheinlichkeit in schnelle (relativ kleine) Speicher
 - Mehrheit der Daten verbleibt auf langsameren, kostengünstigeren Speichern



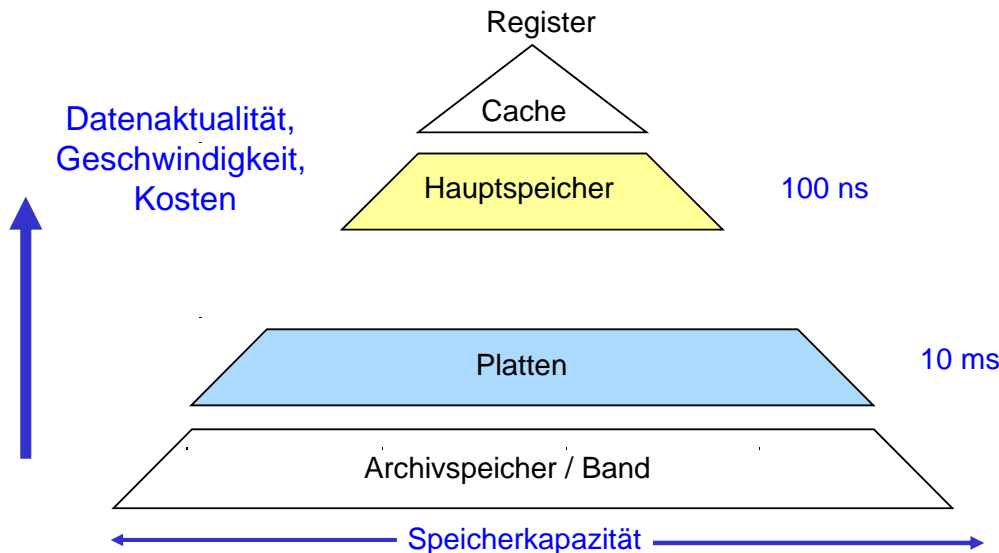
Speicherhierarchie (2)

■ Rekursives Prinzip

- Kleinere, schnellere und teurere Cache-Speicher werden benutzt, um Daten zwischenzuspeichern, die sich in größeren, langsameren und billigeren Speichern befinden

■ Preis-Leistungs-Tradeoff

- Schneller Speicher ist teuer und deshalb klein
- Speicher hoher Kapazität ist typischerweise langsamer



Speicherhierarchie (3)

■ Ähnliche Verwaltungsaufgaben auf jeder Ebene der Speicherhierarchie:

- Lokalisieren von Datenobjekten
- Allokation von Speicherplatz
- Ersetzung
- Schreibstrategie (Write-through vs. Write-back)
- ggf. Anpassung an verschiedene Transfergranulate

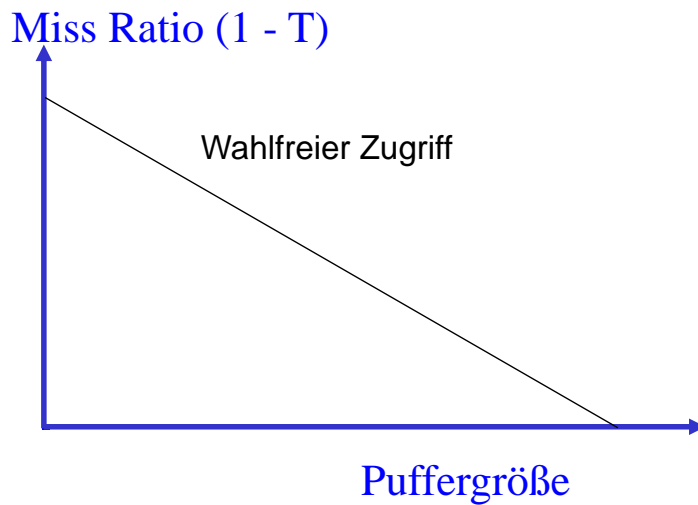
■ Warum funktionieren Speicherhierarchien?

- "perfekter Speicher" würde die Daten, die demnächst angefordert werden, schon bereithalten
- Annäherung durch **Lokalitätsprinzip**
- temporale Lokalität: Pufferung kürzlich referenzierter Objekte
- räumliche Lokalität: Pufferung benachbart gespeicherter Objekte

Cache-Nutzung

■ Cache-Trefferrate

$T = \text{\#Treffer im Cache} / \text{alle Referenzen auf Cache}$



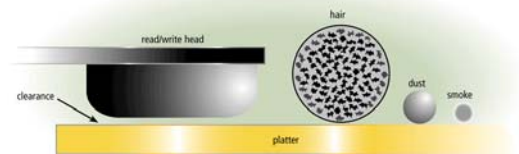
■ Verbesserung der Trefferrate

- größere Caches
- Clusterbildung für referenzierte Daten (räumliche Lokalität)

Magnetplattenspeicher

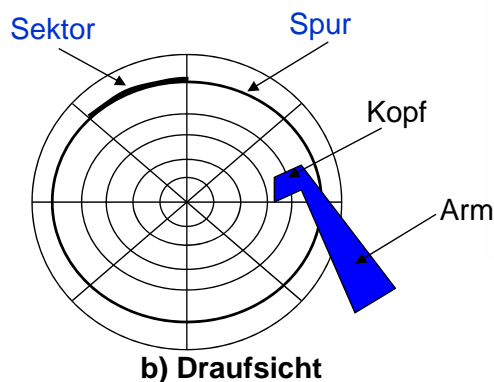
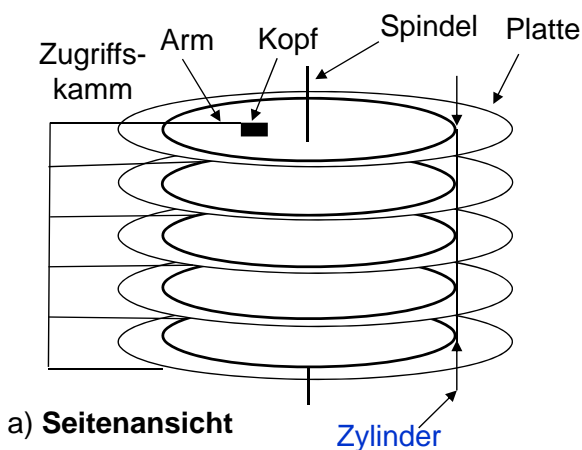
■ Aufbau

- mehrere gleichförmig rotierende Platten mit eigenem Schreib-/Lesekopf
- jede Plattenoberfläche ist eingeteilt in Spuren
- die Spuren sind formatiert als Sektoren fester Größe (Slots)
- Sektoren (z.B. 2 - 32 KB) sind kleinste Schreib-/Leseinheit
- jeder Sektor speichert selbstkorrigierende Fehlercodes



■ Adressierung

- Zylindernummer, Spurnummer, Sektornummer



Magnetplatten: Technische Merkmale

Magnetplattentyp Merkmal	typische Werte 2000	IBM 3390 (1990)	IBM 3330 (1970)
t_{min} = Zugr.bewegung (Min)	0,65 ms	k. A.	10 ms
t_{sav} = " (Mittel)	4,1 ms	12.5 ms	30 ms
t_{smax} = " (Max.)	8,5 ms	k. A.	55 ms
t_r = Umdrehungszeit	4 ms	14.1.ms	16.7 ms
T_{cap} = Spurkapazität	178 KB	56 KB	13KB
T_{cyl} = #Spuren pro Zyl.	11	15	19
N_{dev} = #Zylinder	18700	2226	411
u = Transferrate	45 MB/s	4.2 MB/s	0. 8 MB/s
Nettokapazität	36,7 GB	1.89 GB	0.094 GB

■ Typische Werte in 2012:

- 2-4 TB Kapazität, 50 - 100 MB/s
- 2 - 6 ms Umdrehungszeit, 3 - 8 ms Seek, 7200 – 15.000 RPM (Rotations per Minute)
- 0.05-0.1 \$ / GB im Low-Cost-Sektor (SATA); 10x mehr für SAS/FC (Serial Attached SCSI, Fibre conn.)



Komponenten der Platten-Zugriffszeit

■ Vorbereitung des E/A-Zugriffs (SVC) \approx 2500 Instr.

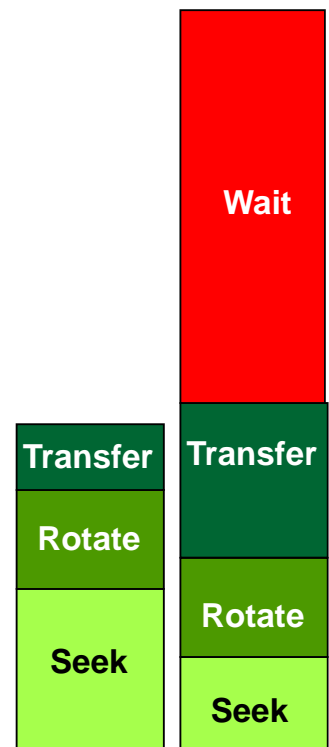
■ stets anfallende Zeitanteile

- Starten E/A durch Betriebssystem
- Zugriffsarmbewegung (**seek**) (t_s)
- Aktivieren Schreib-/Lesekopf
- Umdrehungswartezeit (**rotate**) (t_r)
- Wiederbelegen Kanal
- Übertragungszeit (**transfer**) (t_{tr})
- Prüfzeit

■ vereinfachtes Modell für die Zugriffszeit

$$t = t_s + t_r + t_{tr}$$

- zusätzlich: lastabhängige Wartezeiten auf Platte bzw. Übertragung (oft Hauptanteil bei gemeinsam genutzten Platten)



Wahlfreier vs. Sequentieller Zugriff

- nur geringe Verbesserungen bei Zugriffszeit
(Seek t_{sav} , Umdrehungszeit t_r)
- starke Verbesserungen bei Aufzeichnungsdichte und Kapazität
- Wie teuer sind der sequentielle Zugriff und der wahlfreie Zugriff auf 1000 Blöcke?

$$t_{\text{random}} = 1000 \times (t_{\text{sav}} + t_r/2 + t_{\text{tr}})$$

$$t_{\text{sequentiell}} =$$

	1970	2010	Verbesserung
wahlfrei			
sequentiell			
Verhältnis n			

Wahlfreier vs. Sequentieller Zugriff

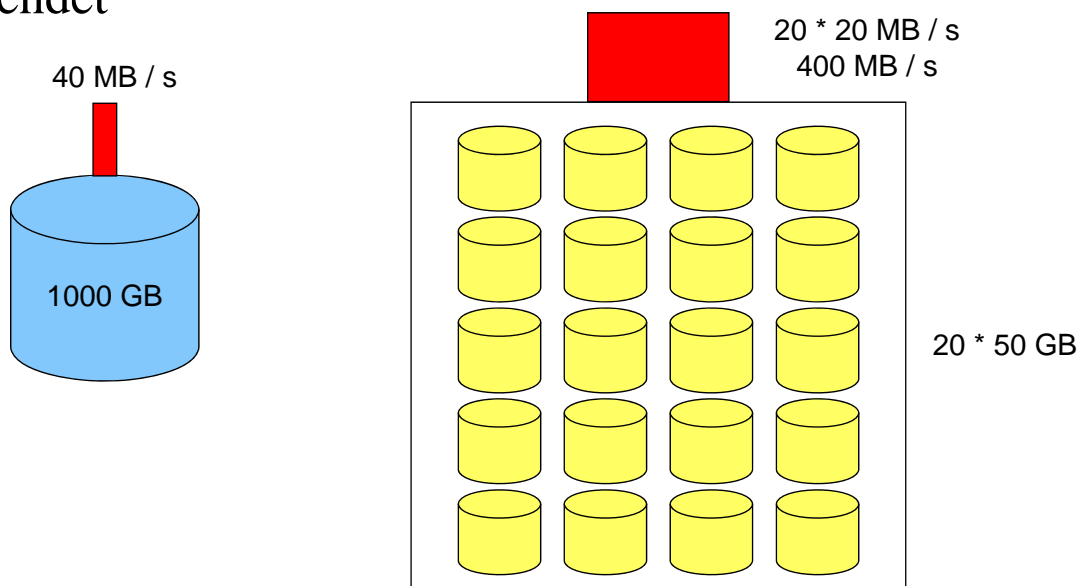
- **Beobachtungen**
 - Sequentieller Zugriff zu Magnetplatten ist bei großen Datenmengen n-mal schneller als wahlfreier Zugriff zu denselben Daten
 - Da die Transferraten (u und Kapazität) schneller wachsen als die Zugriffsraten, wird das Verhältnis wahlfreier zu sequentieller Zugriff immer schlechter
- **Folgende Maßnahmen werden immer wichtiger**
 - **große Blöcke**: Die Wahl größerer Transfereinheiten verbessert dieses Verhältnis
 - **Clusterbildung der Daten**: Datencluster sollen für den Zugriff auf Magnetplatten gebildet und bewahrt werden, so dass mit den großen Blöcken in möglichst wenigen Zugriffen möglichst viele nützliche Daten übertragen werden

Entwicklungstrends: Magnetische Speicher

- starke Verbesserungen bei
 - Lese- und Schreibdichte (> Faktor 100 innerhalb einer Dekade)
 - analoge Verbesserungen in Kapazität sowie Kosten pro GB
- nur geringe Verbesserungen bei
 - Zugriffszeiten (Faktor 2 in 10 Jahren)
 - E/A-Raten (#IO / s)
- Konsequenzen
 - Plattengeschwindigkeit verbessert sich weit geringer als CPU-Geschwindigkeit (Verdoppelung alle 2-3 Jahre)
 - hohe Plattenkapazität kann im Mehrbenutzerbetrieb häufig nicht genutzt werden !
 - zunehmende Dauer zum vollständigen Lesen einer ganzen Platte (disk scan), z.B. für Backup
- Trends
 - Disk-Arrays
 - elektronische Zwischenspeicher (Platten-Caches, SSDs), Flash-Speicher
 - Platten ersetzen Bänder als Archivmedium
 - verteilte Online-Archive, z.B. zum Katastrophenschutz

Disk-Arrays

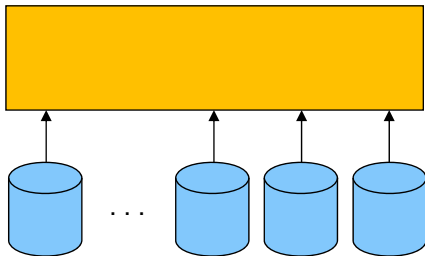
- Konventionelle Platten
 - hohe Kapazität
 - relativ geringe Bandbreite und E/A-Rate (ca. 80-200 Zugriffe/s)
- Disk-Arrays: viele kleinere Platten werden logisch als eine Platte verwendet



E/A-Parallelität

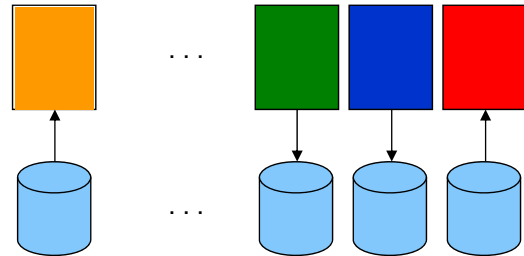
- Voraussetzung: *Declustering* von Dateien über mehrere Platten
- 2 generelle Arten von E/A-Parallelität

Intra-E/A-Parallelität



1 E/A-Auftrag wird in mehrere, parallel ausführbare Plattenzugriffe umgesetzt

Inter-E/A-Parallelität



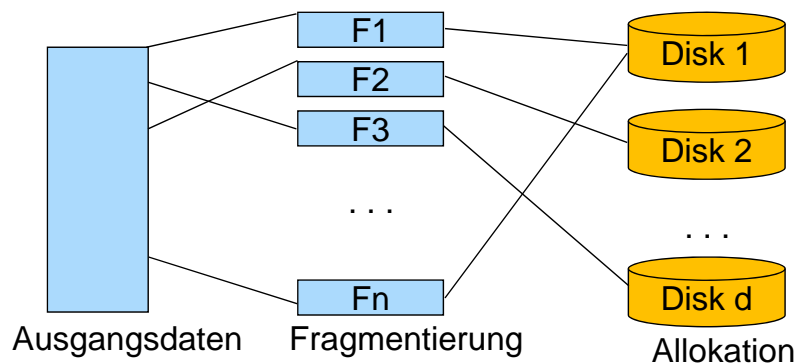
N unabhängige E/A-Aufträge können parallel ausgeführt werden, sofern die betreffenden Daten über verschiedene Platten verteilt sind

■ Probleme:

- gleichzeitige Unterstützung von Intra- und Inter-E/A-Parallelität
- Datenverteilung
- Fehlertoleranz

Disk-Arrays: Datenverteilung

- Nutzung von E/A-Parallelität setzt Verteilung der Daten (Dateien, Relationen) über mehrere Platten voraus: *Declustering* (*Partitionierung*)
- Ziele
 - Unterstützung von Inter- und Intra-E/A-Parallelität
 - Lastbalancierung (gleichmäßige Plattenauslastung)



■ Teilaufgaben bei der Allokation einer Datei

- Bestimmung des Verteilgrades d
- Bestimmung der Verteilgranulate (Fragmente): Logisches vs. physisches Declustering; Umfang / Striping-Granulat (z.B. #Blöcke)
- Allokation: Zuordnung der Fragmente zu Platten

Logisches Declustering

- Daten werden auf einer anwendungsorientierten Ebene partitioniert
- üblich: Zerlegung von Relationen in Tupelmengen aufgrund der Werte eines (Verteil-) Attributs, z.B. über Hash- oder Bereichspartitionierung

Beispiel:
Verteilattribut NAME



- Festlegung durch DBA
- Vorteil: DBS kann bekannte Datenverteilung nutzen, logische Operationen auf einer Teilmenge der Daten zu begrenzen
- effektive Parallelisierung von Operationen wird unterstützt, so dass parallele Teiloperationen auf disjunkten Datenmengen / Platten arbeiten können

Physisches Declustering (Striping)

- Realisierung durch BS oder Array-Kontroller => Nutzbarkeit durch verschiedene Anwendungen

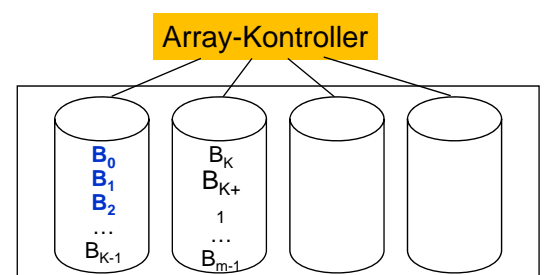
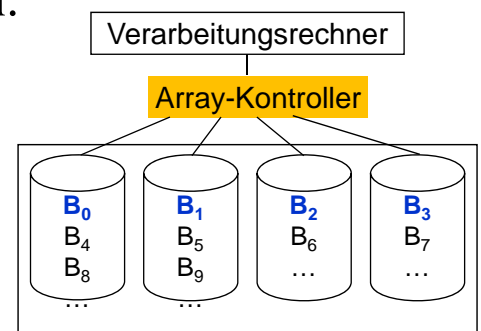
- **Striping-Granulat S** für DB-Anwendungen: Block bzw. Blockmengen

- Blockweise Fragmentierung + Allokation :

- Extrem 1: *Round-Robin* über alle Platten ($S=1$)
- Extrem 2: *Clustering* ($S=k$ für Plattenkapazität k ; minimale Plattenanzahl)

- Tradeoffs:

- Intra- vs. Inter-Transaktionsparallelität
- "Skew"-Effekte
- Lastbalancierung
- Sequentielle Zugriffe



Datenverteilung: Striping-Granulat

■ Wünschenswert: Dateibezogene Allokation mit Hinblick auf

- Dateigröße
- Zugriffshäufigkeiten
- mittl. Auftragssumfang, etc.

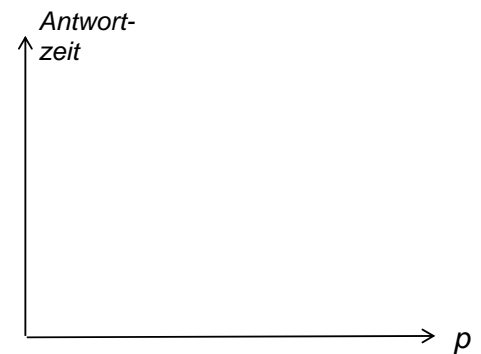
■ Wesentlicher Schritt: Bestimmung des Striping-Granulats S

- mittlere Auftragsgröße: R Blöcke
- S kann aus optimalem Parallelitätsgrad / Plattenanzahl p_{opt} für R Blöcke abgeleitet werden

$$\Rightarrow S = \lceil R / p_{opt} \rceil$$

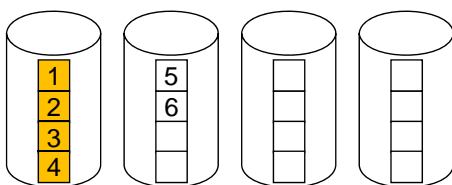
■ Bestimmung von p_{opt} durch Abschätzung der Antwortzeit in Abhängigkeit der Plattenanzahl p

- wachsendes p verbessert lediglich Transferanteil der Zugriffszeit
- Positionierungszeiten sind dagegen von der langsamsten Platte bestimmt (Verschlechterung mit wachsendem p)
- Zunahme der Plattenbelegungszeiten auch ungünstig für Durchsatz

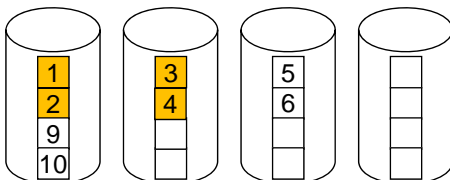


Beispiel für R=4

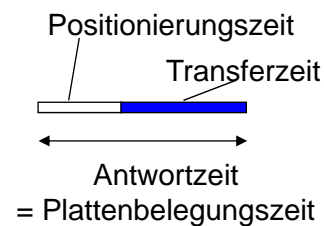
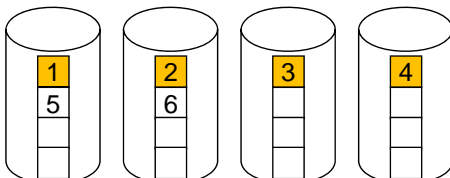
a) $p=1, S=4$



b) $p=2, S=2$



c) $p=4, S=1$



Allokation / Lastbalancierung

■ Zielsetzung der Allokation: Lastbalancierung

- Gesamtlast auf alle Fragmente soll gleichmäßig über alle Platten verteilt sein

■ Varianz der „Plattenhitzen“ soll minimal sein

- *Hitze*: Summe der Zugriffshäufigkeiten aller Blöcke eines Fragments
- Hitze einer Platte: akkumulierte Hitze ihrer Fragmente

■ Einfache Fragment-Allokation: Round Robin oder Random

- Garantiert keine gute Lastbalancierung bei ungleichmäßiger Hitzeverteilung in den Fragmenten (z.B. 80-20- oder 90-10-Regel bei der Zugriffsverteilung)

■ (Greedy) Heuristik zur Lastbalancierung

- Voraussetzung: Hitze aller Fragmente a priori bekannt
- Initialisierung: Setze die Gesamthitze aller Platten auf 0
- Schritt 1: Sortiere die zu allozierenden Fragmente nach absteigender Hitze
- Schritt 2: Für jedes Fragment in Sortierreihenfolge:
 - Alloziere Platz auf der derjenigen Platte mit der geringsten akkumulierten Hitze, die noch genügend freien Platz hat und auf der noch kein Fragment derselben Datei liegt
 - Addiere die Hitze des allozierten Fragments zur Gesamthitze der ausgewählten Platte

Beispiel (Lastbalancierung)

Datei 1

1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
-----	-----	-----	-----	-----	-----

Hitze: 10 4 4 3 2 1

Datei 2

2.1	2.2	2.3	2.4
-----	-----	-----	-----

Hitze: 8 5 5 1

Datei 3

3.1	3.2	3.3
-----	-----	-----

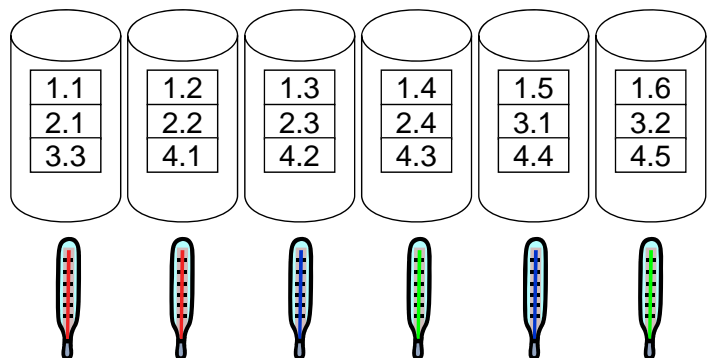
Hitze: 5 5 5

Datei 4

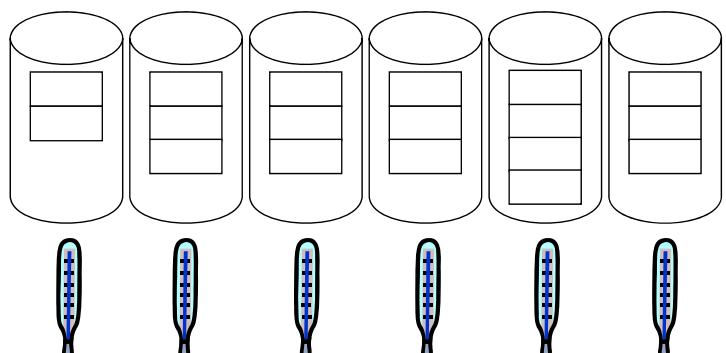
4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
-----	-----	-----	-----	-----

Hitze: 7 4 3 2 1

Round-Robin-Allokation



Greedy-Heuristik



Fehlertoleranz

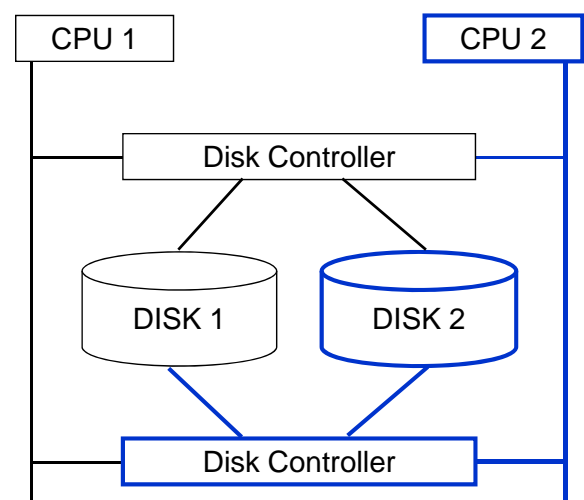
“The Problem with Many Small Disks: Many Small Faults”

- Disk-Array mit N Platten: ohne Fehlertoleranzmechanismen N-fach erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit => System ist unbrauchbar
- Begriffe
 - Mean Time To Failure (MTTF): Erwartungswert für die Zeit (von der Inbetriebnahme) bis zum Ausfall einer Platte
 - Mean Time To Repair (MTTR): Erwartungswert für die Zeit zur Ersetzung der Platte und der Rekonstruktion der Daten
 - Mean Time To Data Loss (MTTDL): Erwartungswert für die Zeit bis zu einem nicht-maskierbaren Fehler
- Disk-Array mit N Platten ohne Fehlertoleranzmechanismen:
$$\text{MTTDL} = \text{MTTF} / N$$
- Der Schlüssel zur Fehlertoleranz ist Redundanz =>
Redundant Arrays of Independent Disks (RAID)
 - durch Replikation der Daten (z. B. Spiegelplatten) - RAID1
 - durch zusätzlich zu den Daten gespeicherte Error-Correcting-Codes (ECCs), z.B. Paritätsbits (RAID-4, RAID-5)



Spiegelplatten (RAID1)

- weit verbreitet zur automatischen Behebung von Plattenfehlern
- Vorteile
 - sehr hohe Verfügbarkeit
 - Optimierung von Lesezugriffen (Lastbalancierung, Minimierung der Positionierungszeiten)
- Nachteile
 - Verdoppelung des Speicherbedarfs
 - Schreibzugriffe zweifach auszuführen
 - Lastbalancierung im Fehlerfall ungünstig

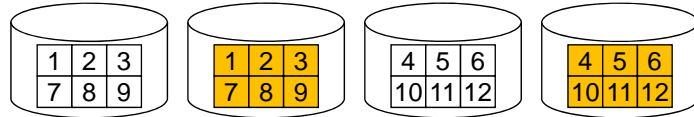


Spiegelplatten (2)

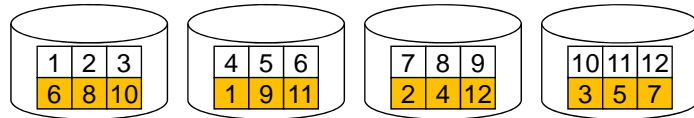
■ Verbesserung der Lastbalancierung im Fehlerfall durch **verstreute Replikation**

- Verteilung der Kopien zu Daten einer Platte über mehrere andere Platten

a) **Konventionelle Spiegelplatten**



b) **Verstreute Replikation: Interleaved Declustering**



■ Gruppenbildung erlaubt flexiblen Kompromiss zwischen Lastbalancierung und Verfügbarkeit

- Verteilung der Replikate einer Platte nur über $G-1$ Platten derselben Gruppe
- Mehrfachfehler führen nicht zu Datenverlust solange verschiedene Gruppen betroffen sind
- konventionelle Spiegelplatten ergeben sich als Spezialfall mit $G=2$

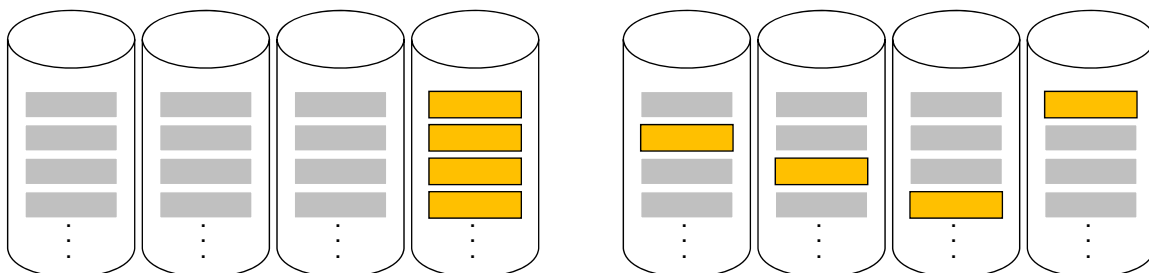
Einsatz von Paritätsblöcken (ECC)

■ Bildung von Gruppen mit je G Platten

- *Paritätsgruppe*: $G-1$ Datenblöcke + zugehöriger Paritätsblock
- Erhöhung des Platzbedarfs um lediglich $100/(G-1) \%$
- Paritätsblock entspricht EXOR-Bildung von $G-1$ Datenblöcken
- bei jeder Änderung eines Datenblockes anzupassen

■ RAID-4 vs. RAID-5

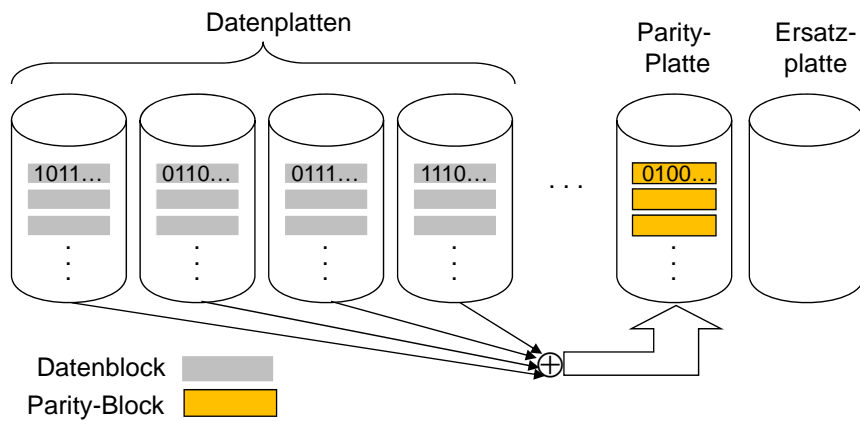
RAID-5 vermeidet Engpass einer einzigen Parity-Platte ("Parity Striping")



Datenblock

Parity-Block

Aktualisierung der Paritätsblöcke



Exor-Operation:

$x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_k = 1$
falls Zahl der x_i mit Wert 1
ungerade ist, sonst ist das
Ergebnis 0

■ inkrementelle Berechnung des Parity-Blocks

1. Alter Datenblock b und alter Parity-Block p werden parallel in den Speicher des Disk-Array-Controllers (bzw. HSP) gelesen
2. $p \oplus b \oplus b' = p'$
3. Geänderter Datenblock b' und neu-berechneter Parity-Block p' werden parallel auf Platte zurückgeschrieben
=> **4 Plattenzugriffe** (falls b bereits gepuffert, 3 Zugriffe)

– relative Aufwand ist geringer, wenn mehrere Blöcke einer Gruppe geändert werden

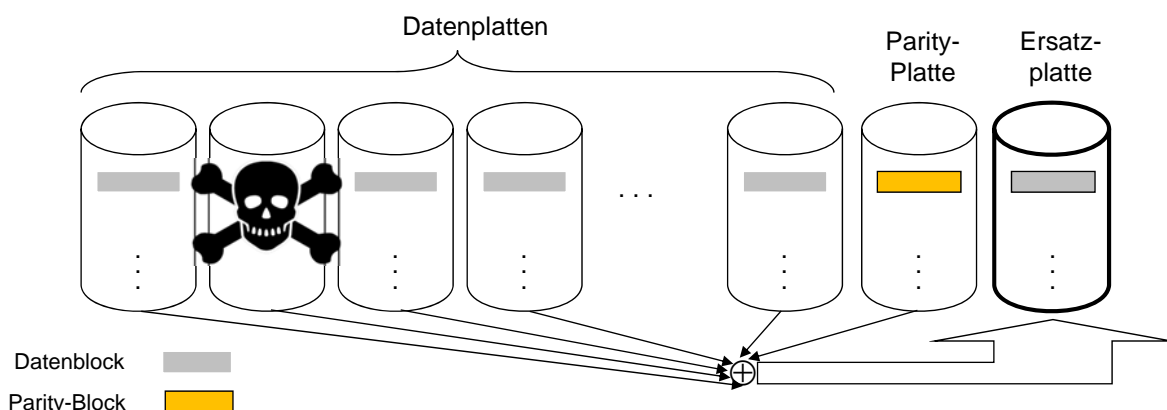
Datenrecovery: Rekonstruktion von Blöcken

■ Rekonstruktion von Blöcken

1. Paralleles Lesen des Parity-Blocks p und der Blöcke b_j aus der Gruppe des zu rekonstruierenden Blocks von allen noch verfügbaren Datenplatten
2. Rekonstruktion des Blockes b_i :

$$(b_1 \oplus \dots \oplus b_{i-1} \oplus b_{i+1} \oplus \dots \oplus b_{G-1}) \oplus p =$$

$$(b_1 \oplus \dots \oplus b_{i-1} \oplus b_{i+1} \oplus \dots \oplus b_{G-1}) \oplus (b_1 \oplus \dots \oplus b_{G-1}) = b_i$$
3. Zurückschreiben von b_i auf die Ersatzplatte

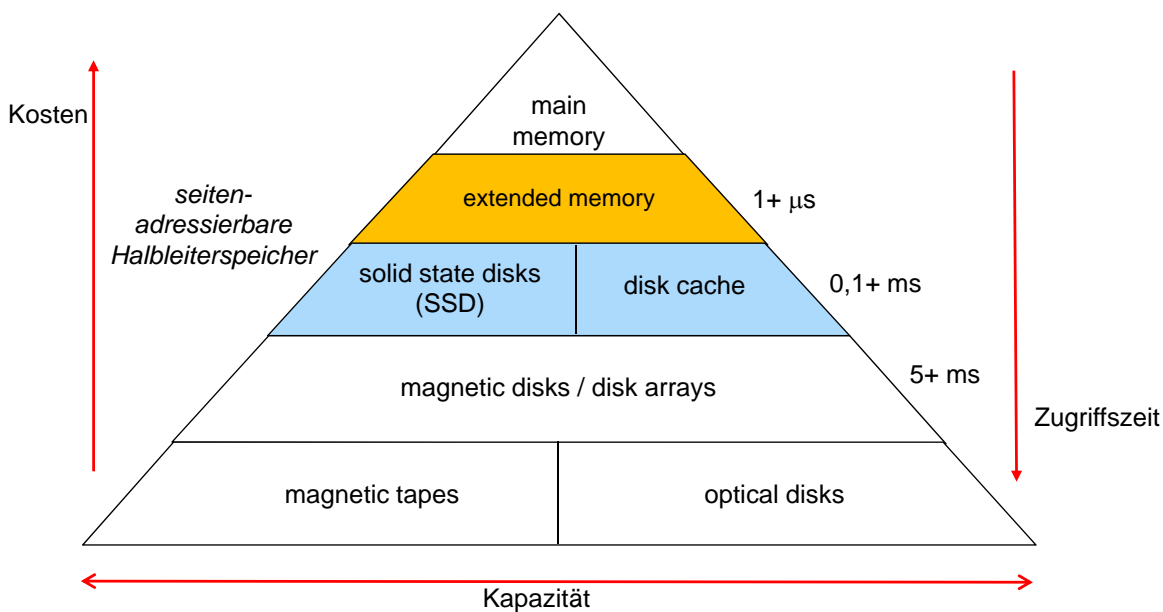


RAID-1 vs. RAID-5

Merkmal	RAID-0 (keine Redundanz)	RAID-1	RAID-5
Speichereffizienz (Kosteneffektivität)	1	1 / 2	(G-1) / G
Datenverfügbarkeit	--		
„Large Reads“ (Datentransferrate für Lesen)	1		
„Large Writes“ (Datentransferrate)	1		
„Small Reads“ (E/A-Rate)	1		
„Small Writes“ (E/A-Rate)	1		

- spezifische RAID-1-Vorteile: gute Lesezugriffszeiten und schnelle Platten-Recovery

Erweiterte Speicherhierarchie



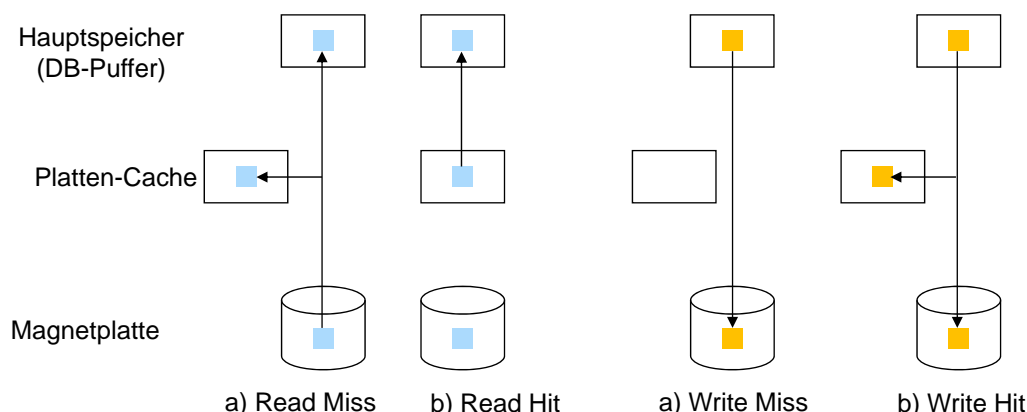
- **Erweiterter Hauptspeicher (EH):** Verwaltung durch BS, synchroner Seitenzugriff durch spezielle Instruktionen (z.B. in IBM-Mainframes)
- **Platten-Cache und SSD:** Verwaltung durch eigene Controller, allgemeine Plattenschnittstelle
- **Nicht-Flüchtigkeit:** Battery-Backup / ununterbrechbare Stromversorgung

Einsatzformen seitenadressierbarer Halbleiterspeicher

- **Pufferung von DB-Seiten** auf mehreren Speicherebenen zur Reduzierung von Lesevorgängen auf Platte
 - Einsparung von Lesezugriffen auf Platte
 - keine Nicht-Flüchtigkeit erforderlich
 - realisierbar mit Platten-Cache oder EH
- **Schreibpuffer** in nicht-flüchtigem Halbleiterspeicher (z.B. Platten-Cache)
 - synchrones Schreiben in Schreibpuffer, asynchrones Durchschreiben auf Platte
 - Antwortzeitverbesserung bereits durch kleinen Pufferbereich
- **Speicherung ganzer Dateien** in nicht-flüchtigen Halbleiterspeichern
 - z.B. in SSDs
 - Vermeidung aller Plattenzugriffe
 - hohe Kosten

Einsatz von Platten-Caches

- **Flüchtige Platten-Caches: nur Verbesserung für Lesezugriffe**
 - Problem: Doppel-Pufferung im Hauptspeicher und Platten-Cache



- **Prefetching für sequentielle Dateien**
- **nicht-flüchtiger Schreibpuffer im Platten-Cache**
 - starke Verbesserung von Schreibzugriffen (besonders wirksam für RAID-5)
 - bessere Antwortzeiten
 - höhere Plattenauslastung tolerierbar

Flash-Speicher



- Rapide Verbreitung in mobilen Geräten (MP3-Player, Kameras, Notebooks...)
- viel teurer als Magnetplatten (> Faktor 20), jedoch wird Unterschied geringer
 - Leise, geringer Energieverbrauch (da keine mechanische Bewegungen)
 - Robust gegen Erschütterungen
 - Sehr schnell wachsende Kapazität, stark fallende Kosten
- sehr schnelle Lesezugriffe (0,1-0,2 ms / Seite; gleichmäßige Zeiten; sehr hohe Leseraten)
- Langsame Schreibzugriffe (v.a. für NAND-Flash-Chips)
 - erst Löschen eines kompletten Bereichs (z.B. 64 Seiten /128 KB), dann neu Schreiben

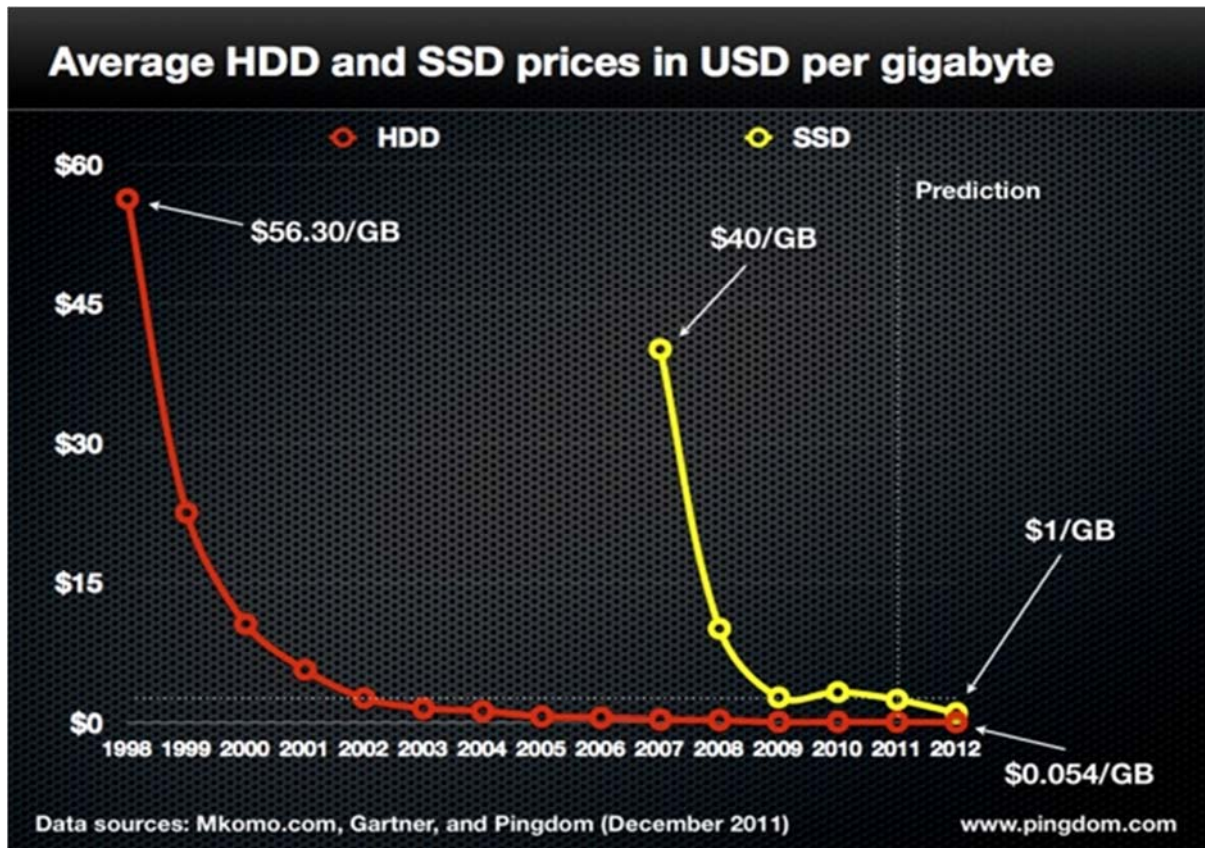
Vergleichswerte SSD-HDD-DRAM (2012)

	Bandbreite (sequential R/W)	Kosten/GB	Größe
HDD	50-100 MB/s	\$0.05-0.1/GB	2-4 TB
SSD*	200-500 MB/s (SATA) 6 GB/s (PCI)	\$1-5/GB	200GB-1TB
DRAM	10-16 GB/s	\$5-10/GB	64GB-256GB

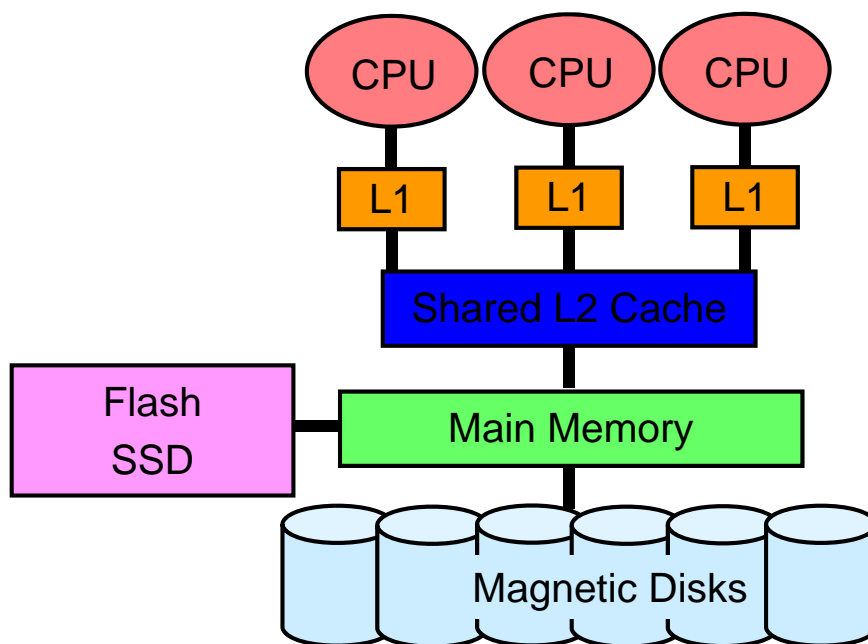
* www.fastestssd.com/featured/ssd-rankings-the-fastest-solid-state-drives/

Bandbreite: SSD >5x höher als HDD, DRAM > 10x als SSD
Kosten: HDD x20 geringer als SSD, SSD x4 weniger als DRAM

Haben SSDs Magnetplatten eingeholt?



Künftige Speicherhierarchie



- Flash-SSD werden Magnetplatten für Datenbanken komplementieren bzw. teilweise ersetzen

Speicherallokation von Dateien

- Wo soll Datei gespeichert werden ?
 - Platte
 - nicht-flüchtiger Halbleiterspeicher (z.B. Flash-SSD)
 - Hauptspeicher (-> Hauptspeicherdatenbank)
- Entscheidung abhängig von Speichereigenschaften (Kosten, Zugriffsgeschwindigkeit) und Zugriffsmerkmalen
- HS (bzw. SSD)-Allokation spätestens sinnvoll, wenn HS bzw. SSD-Kosten pro MB unter Plattenkosten
- Anderenfalls, wenn hohe Zugriffshäufigkeit vorliegt bzw. Kosten der Plattenallokation von E/A-Rate anstatt von Speicherkosten bestimmt sind



5-Minuten-Regel (Jim Gray)

- Gray1987/Gray1997: ein Block, auf den spätestens alle 5 Minuten zugegriffen wird, soll im Hauptspeicher bleiben
- Parameter bezüglich Technologie und Kosten
 - Kosten pro Plattenzugriff ($PricePerDrive / AccessPerSecondPerDisk$)
 - Kosten pro HS-Seite: ($PricePerMB / PagesPerMB$)
- Zugriffsfrequenz pro Block (Hitze) f
- Zeitabstand zwischen Zugriffen $T = 1/f$
- Hauptspeicherspeicherung günstiger wenn gilt

Beispielwerte	1987	1997
PricePerDiskDrive(\$)	30000	2000
ApsPerDisk	15	64
PagesPerMB	1000	128
PricePerMB (\$)	5000	15

$$f \times \frac{PricePerDiskDrive}{AccessPerSecondPerDisk} \geq \frac{PricePerMB}{PagesPerMB}$$

$$T \leq \frac{PagesPerMB}{AccessPerSecondPerDisk} \times \frac{PricePerDiskDrive}{PricePerMB}$$

- Änderung bezüglich T nur, wenn sich Verhältnisse ändern



Zusammenfassung

- **Speicherhierarchie: Geschwindigkeitsanpassung größerer / langsamerer Speicher an die schnelleren zu vertretbaren Kosten (Kosteneffektivität)**
- **dominierender Speichertyp als Externspeicher: Magnetplatte**
 - hohe Steigerung der Speicherkapazität, jedoch nur geringfügige Verbesserung der Zugriffszeit
 - wachsende Diskrepanz zwischen sequentieller und wahlfreier E/A-Leistung
 - zunehmende Dauer zum vollständigen Lesen einer ganzen Platte (z.B. für Backup)
- **Disk-Arrays: Leistungsverbesserung durch E/A-Parallelität**
 - E/A-Rate (Auftragsparallelität) und Bandbreite (Zugriffparallelität)
 - geeignete Datenverteilung (Declustering) erforderlich
 - automatische Behandlung von Plattenfehlern obligatorisch
- **Datenreplikation (Spiegelplatten)**
 - hohe Speicherkosten vs. sehr hoher Verfügbarkeit und guter Leistungsfähigkeit
 - Unterstützung der Lastbalancierung im Fehlerfall durch verstreute Replikation
- **Nutzung von Paritätsblöcken (RAID-5)**
 - geringer Mehrbedarf an Speicherplatz (z.B. 10%)
 - teure Schreibzugriffe (bis zu 4 Plattenzugriffe) -> Nutzung nicht-flüchtiger Schreibpuffer
 - schlechtes Leistungsverhalten im Fehlerfall
- **Schließung der Zugriffslücke durch nicht-flüchtige Halbleiterspeicher/Flash-SSDs**
 - hohe Speicherkosten verlangen kombinierten Einsatz mit Magnetplatten



Übungsaufgaben

- **Bestimmen Sie - unter Annahme typischer Parameter aktueller Magnetplatten - die Dauer zum vollständigen Lesen aller Blöcke einer Platte**
 - a) beim wahlfreien und
 - b) beim sequentiellen Zugriff
- **Schätzen Sie den Speicherbedarf sowie die Speicherkosten zur digitalisierten Speicherung**
 - einer Bibliothek mit 100.000 Büchern (Textspeicherung vs. in eingescannter Form)
 - des Radioprogrammes eines Senders von 1 Jahr
 - des Fernsehprogrammes eines Senders von 1 Jahr.
- **Überprüfen Sie anhand typischer Werte für heutige Hauptspeicher und Magnetplatten inwieweit die 5-Minuten-Regel von Gray noch zutrifft. Welcher Wert für T ergibt sich für aktuelle Flash-SSDs?**

Literatur-Tipp: G. Graefe: *The five-minute rule twenty years later, and how flash memory changes the rules.* Comm. ACM 2009

