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*
- 5-Minuten-Regel

* E. Rahm: Hochleistungs-Transaktionssysteme, Kap. 5 und 6, Vieweg 1993.
Online unter http://lips.informatik.uni-leipzig.de/pub/1993-2

IDBS

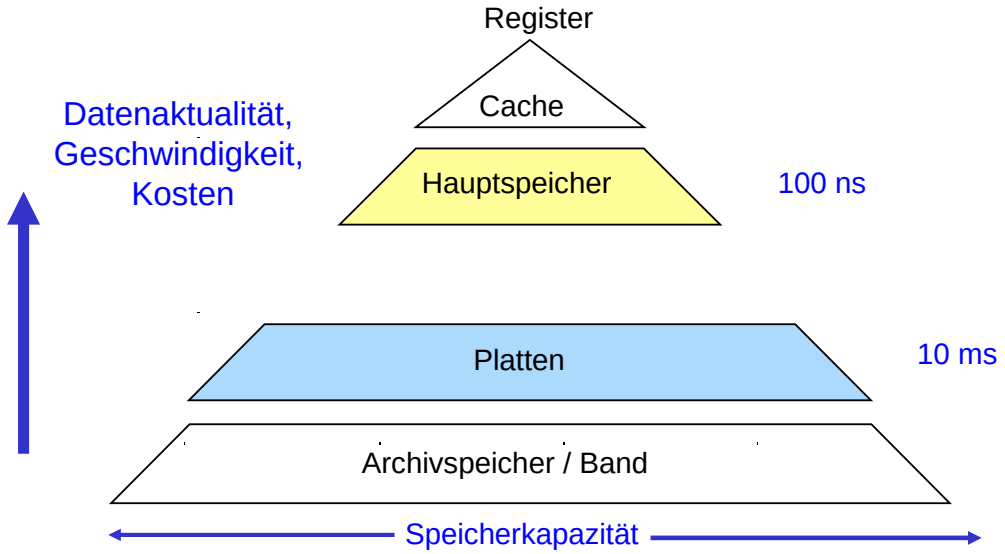
Einsatz einer Speicherhierarchie

- 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

IDBS

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

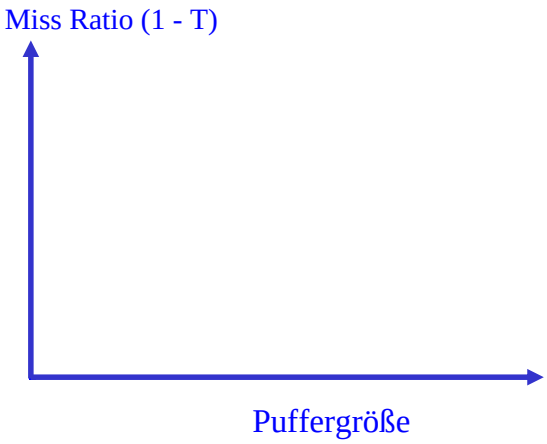
- Cache-Trefferrate

  T = #Treffer im Cache / alle Referenzen auf Cache

- Berechnung der effektiven Cache-Zugriffszeit C_{eff}
  - Cache-Zugriffszeit C
  - Zugriffszeit auf die nächst tiefere Ebene $Z \approx 100 \cdot C$

$$C_{eff}(T) = T \cdot C + (1-T) \cdot Z \approx (1-0.99 \cdot T) \cdot Z \approx (1-T) \cdot Z$$

-> hohe Trefferraten Voraussetzung für hohe Leistung

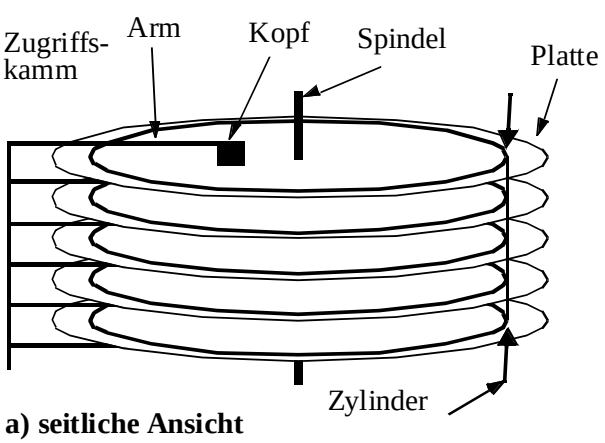


- Verbesserung der Trefferrate
  - Clusterbildung für referenzierte Daten (räumliche Lokalität)
  - größere Caches

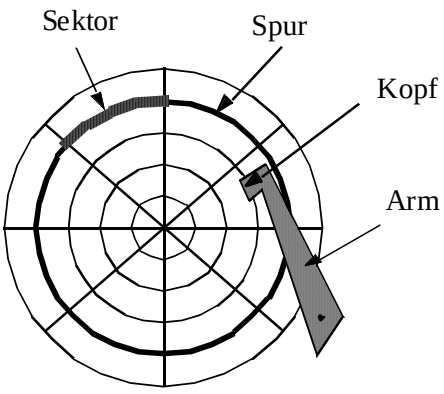
Magnetplattenspeicher

- Aufbau
  - mehrere gleichförmig rotierende Platten, für jede Plattenoberfläche ein 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-/Leseeinheit auf einer Platte

- Adressierung
  - Zylindernummer, Spurnummer, Sektornummer
  - jeder Sektor speichert selbstkorrigierende Fehlercodes; bei nicht behebbaren Fehlern erfolgt eine automatische Abbildung auf Ersatzsektoren



a) seitliche Ansicht



b) Draufsicht

Magnetplatten: Technische Merkmale

Magnetplattentyp / Merkmal	typische Werte 2000	IBM 3390 (1990)	IBM 3330 (1970)
t_{smin} = 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 2005:
  - 50 - 500 GB Kapazität, 10 - 100 MB/s
  - 2 - 5 ms Umdrehungszeit, 3 - 8 ms seek
  - 1 $ / GB

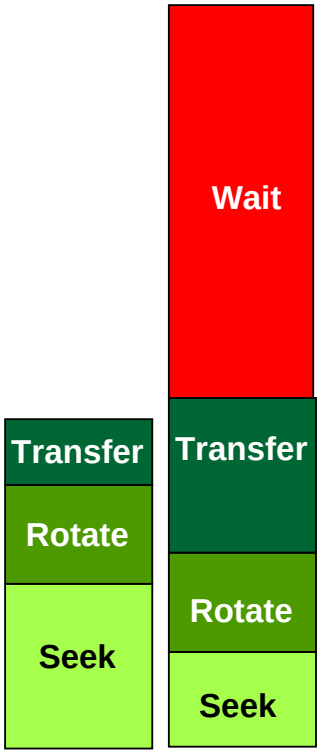
IDBS

Komponenten der Platten-Zugriffszeit

- Vorbereitung des Zugriffs (E/A-SVC) ≈ 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)



IDBS

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?

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

$t_{sequentiell} =$

	1970	2005	**Verbesserung**
wahlfrei			
sequentiell			
Verhältnis n			

Wahlfreier vs. Sequentieller Zugriff

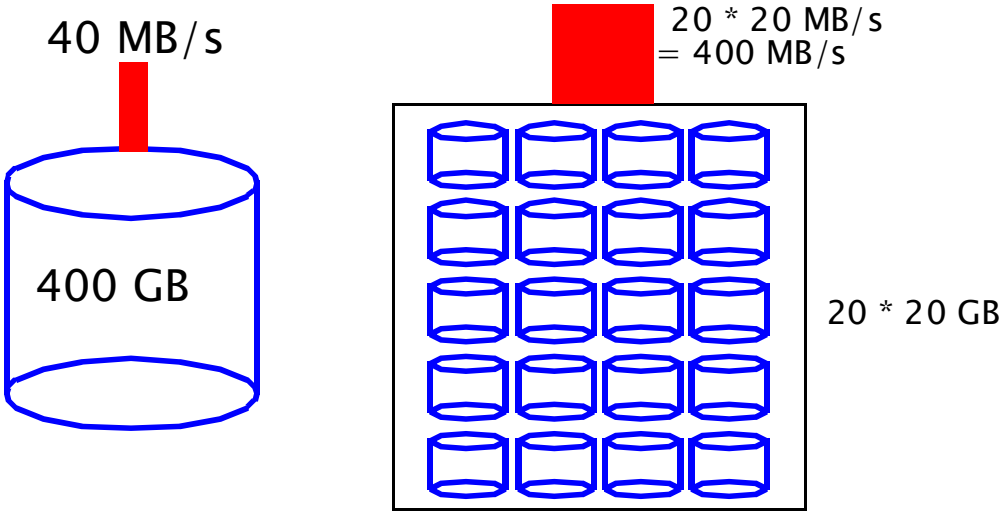
- Beobachtungen
  - Sequentieller Zugriff zu Magnetplatten ist bei großen Datenmengen n-mal schneller als wahlfreier Zugriff zu denselben Daten
  - Da die Transferraten (u und Kapazität) schneller wachsen als die Zugriffsraten, wird das Verhältnis wahlfreier zu sequentieller Zugriff immer schlechter
- 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

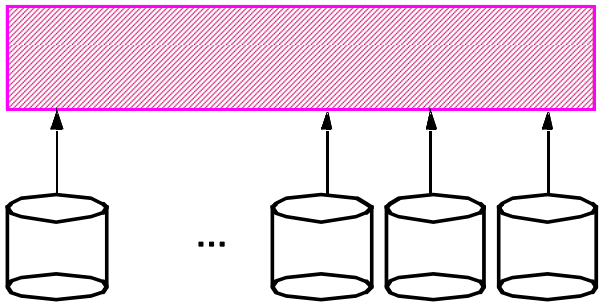
- Konventionelle Platten
  - hohe Kapazität
  - relativ geringe Bandbreite und E/A-Rate (ca. 60 Zugriffe/s)
- Disk-Arrays: viele kleinere Platten werden logisch als eine Platte verwendet



E/A-Parallelität

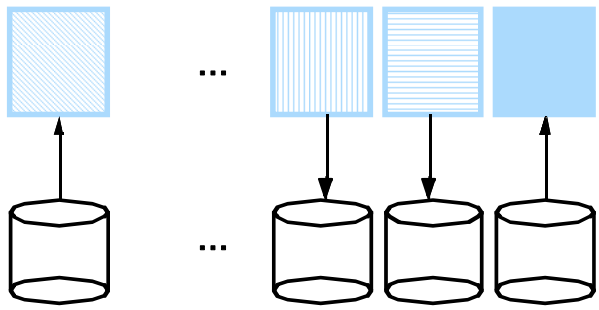
- Voraussetzung: *Declustering* von Dateien über mehrere Platten
- 2 generelle Arten von E/A-Parallelität

***Intra**-E/A-Parallelität*
(Zugriffsparallelität)



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

***Inter**-E/A-Parallelität*
(Auftragsparallelität)



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

- Problem: gleichzeitige Unterstützung von Intra- und Inter-E/A-Parallelität

Disk-Farms vs. Disk-Arrays

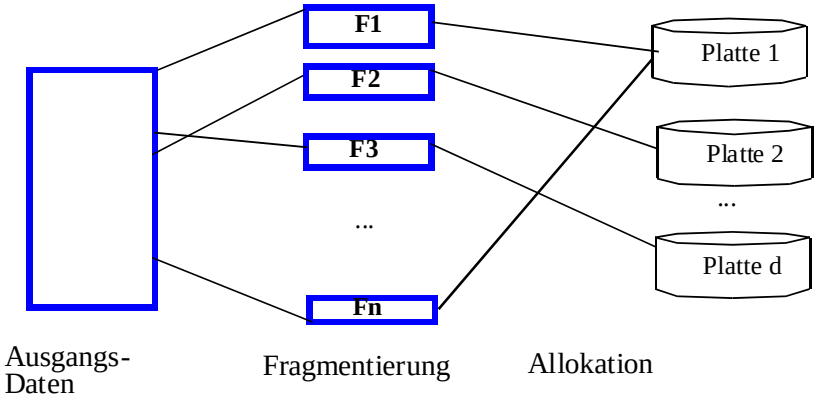
- Disk-Farm: lose gekoppelte Sammlung großer Plattenlaufwerke
  - Ziel: hoher Grad an Auftragsparallelität und bessere Verteilung der Last
  - keine automatische Verteilung der Daten auf die einzelnen Platten
  - Plattensubsystem unterstützt keine automatische Zugriffsparallelität
  - keine automatische Behandlung von Plattenausfällen

- Disk-Array: "logisches" Plattenlaufwerk wird durch mehrere eng miteinander verbundene physische Laufwerke realisiert
  - höhere E/A-Raten und größere Bandbreiten
  - leistungsfähige Datenübertragungsverbindungen durch Standard-Bus-Architekturen
  - geringere Speicherkosten durch standardisierte Komponenten, jedoch i.a. teuere Controller

- Kernprobleme: 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 Zugriffs- und Auftragsparallelität
  - Lastbalancierung (gleichmäßige Plattenauslastung)



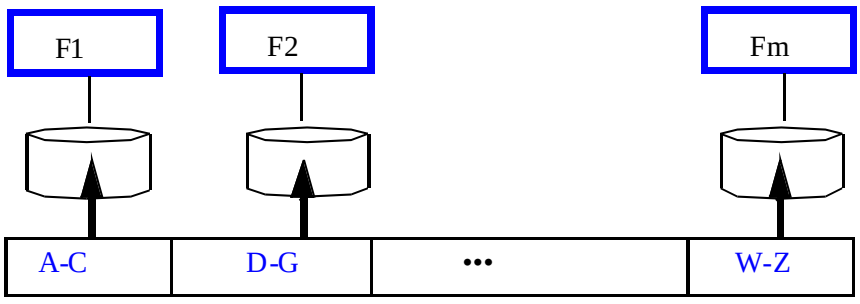
- Teilaufgaben bei der Allokation einer Datei
  - Bestimmung des Verteilgrades
  - Bestimmung der Verteilgranulate (Fragmente): Logisches vs. physisches Declustering; Umfang / Striping-Granulat (z.B. #Blöcke)
  - Allokation: Zuordnung der Fragmente zu Platten

IDBS

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

Bsp.:
Verteilattribut NAME

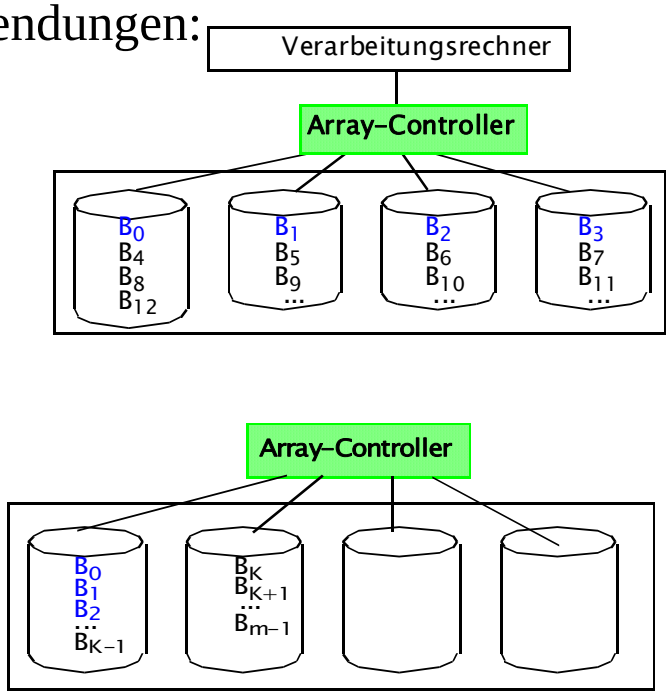


- Festlegung durch DBA
- Vorteil: DBS kann bekannte Datenverteilung nutzen, logische Operationen auf einer Teilmenge der Daten zu begrenzen
- effektive Parallelisierung von Operationen wird unterstützt, so dass parallele Teiloperationen auf disjunkten Datenmengen / Platten arbeiten können

IDBS

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: *Clusterung* (S=k für Platten-kapazität k; minimale Plattenanzahl)
- Tradeoffs:
  - Zugriffs- vs. Auftragsparallelität
  - "Skew"-Effekte
  - Lastbalancierung



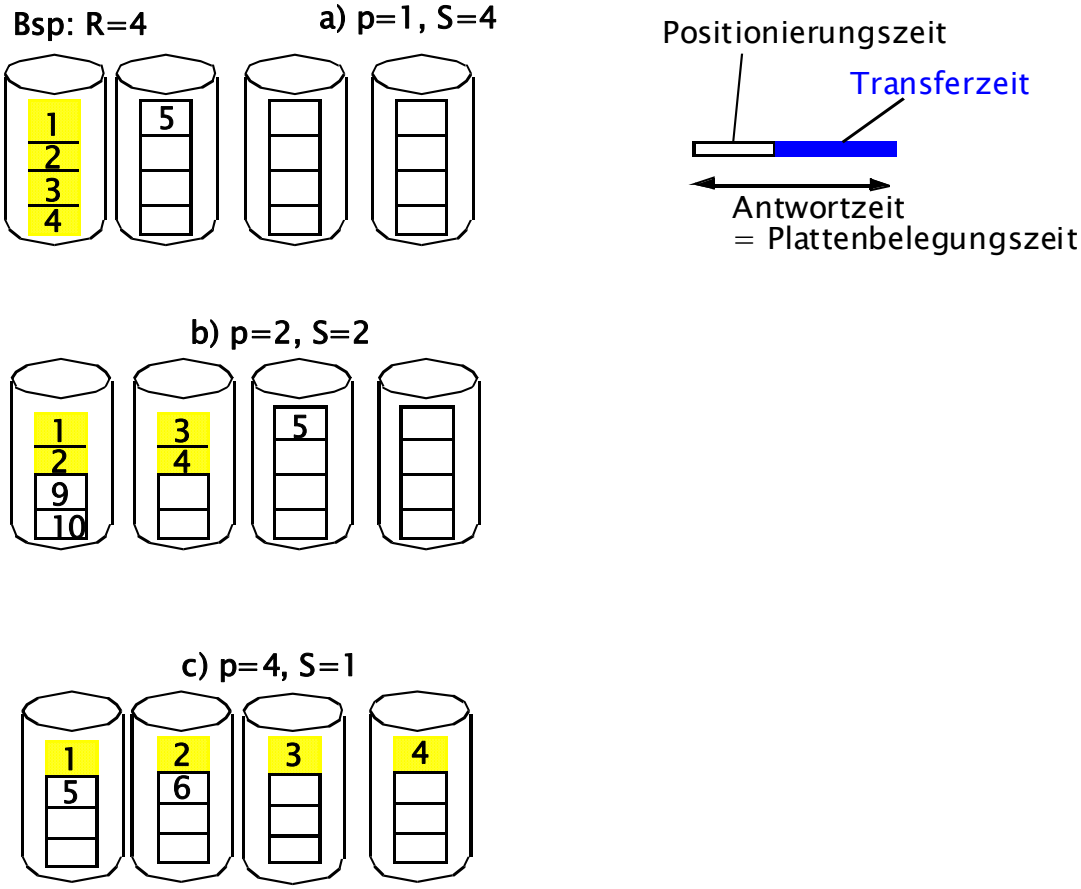
Datenverteilung: Striping-Granulat

- 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 popt 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



IDBS

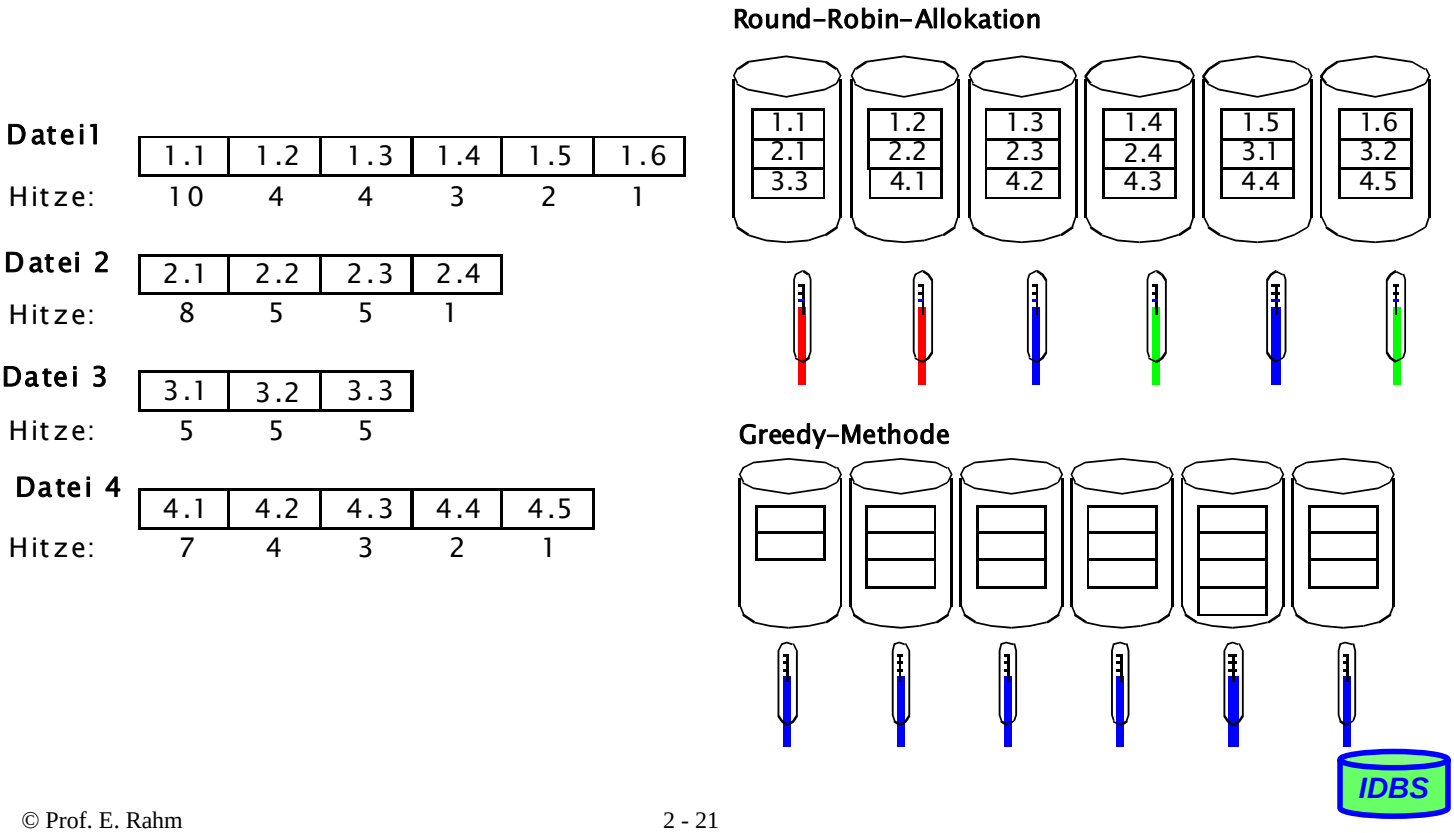
Allokation / Lastbalancierung

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

IDBS

Beispiel (Lastbalancierung)

- Vergleich von Greedy-Verfahren und Round-Robin-Allokation



Fehlertoleranz

"The Problem with Many Small Disks: Many Small Faults"

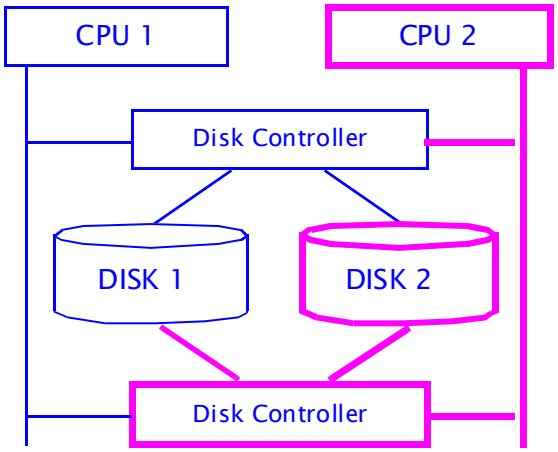
- Disk-Array mit N Platten: ohne Fehlertoleranzmechanismen N-fach erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit => System ist unbrauchbar
- Begriffe
  - Mean Time To Failure (MTTF): Erwartungswert für die Zeit (von der Inbetriebnahme) bis zum Ausfall einer Platte
  - Mean Time To Repair (MTTR): Erwartungswert für 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:

$$MTTDL = MTTF / N$$

- 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)

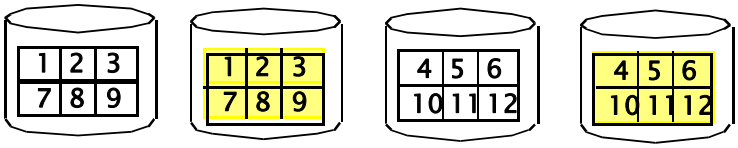
- weit verbreitet zur automatischen Behebung von Plattenfehlern
- Vorteile
  - sehr hohe Verfügbarkeit
  - Optimierung von Lesezugriffen (Lastbalancierung, Minimierung der Positionierungszeiten)
- Nachteile
  - Verdoppelung des Speicherbedarfs
  - Schreibzugriffe zweifach auszuführen
  - Lastbalancierung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



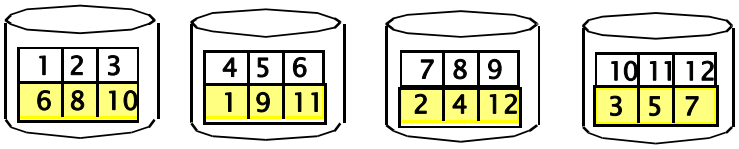
Spiegelplatten (2)

- 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)

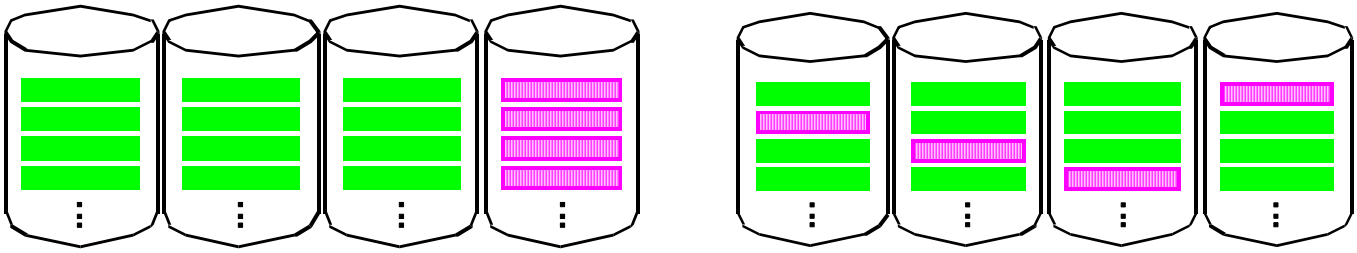


- Gruppenbildung erlaubt flexiblen Kompromiss zwischen Lastbalancierung und Verfügbarkeit
  - Verteilung der Replikate einer Platte nur über G-1 Platten derselben Gruppe
  - Mehrfachfehler führen nicht zu Datenverlust solange verschiedene Gruppen betroffen sind
  - konventionelle Spiegelplatten ergeben sich als Spezialfall mit G=2

Einsatz von Paritätsblöcken (ECC)

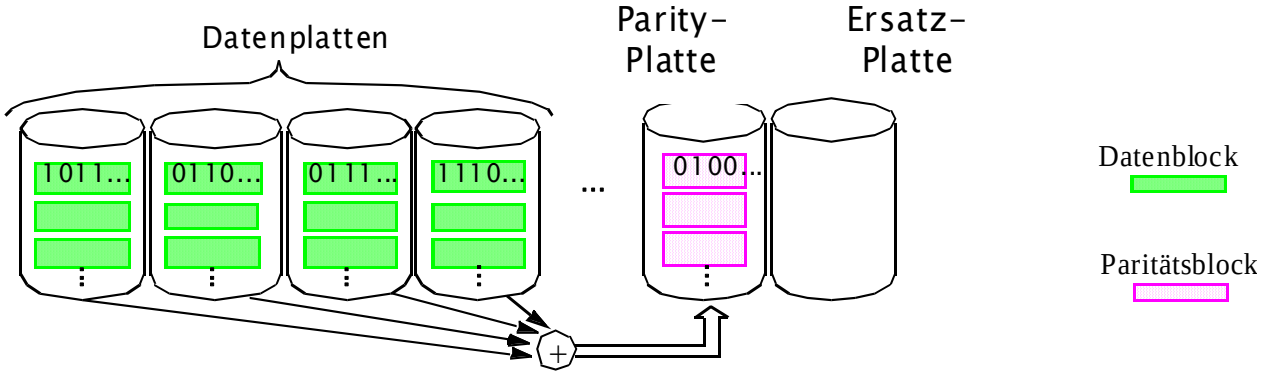
- Bildung von Gruppen mit je G Platten
  - *Paritätsgruppe*: G-1 Datenblöcke + zugehöriger Paritätsblock
  - Erhöhung des Platzbedarfs um lediglich 100/(G-1) %
  - Paritätsblock entspricht EXOR-Bildung von G-1 Datenblöcken
  - bei jeder Änderung eines Datenblockes anzupassen
- RAID-4 vs. RAID-5

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



Datenblock Paritätsblock

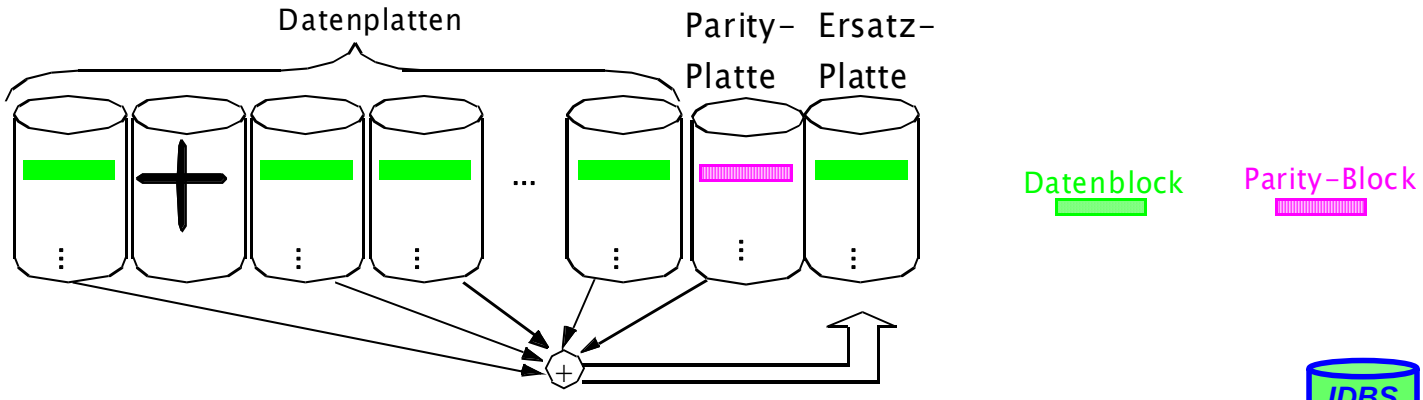
Aktualisierung der Paritätsblöcke



- 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

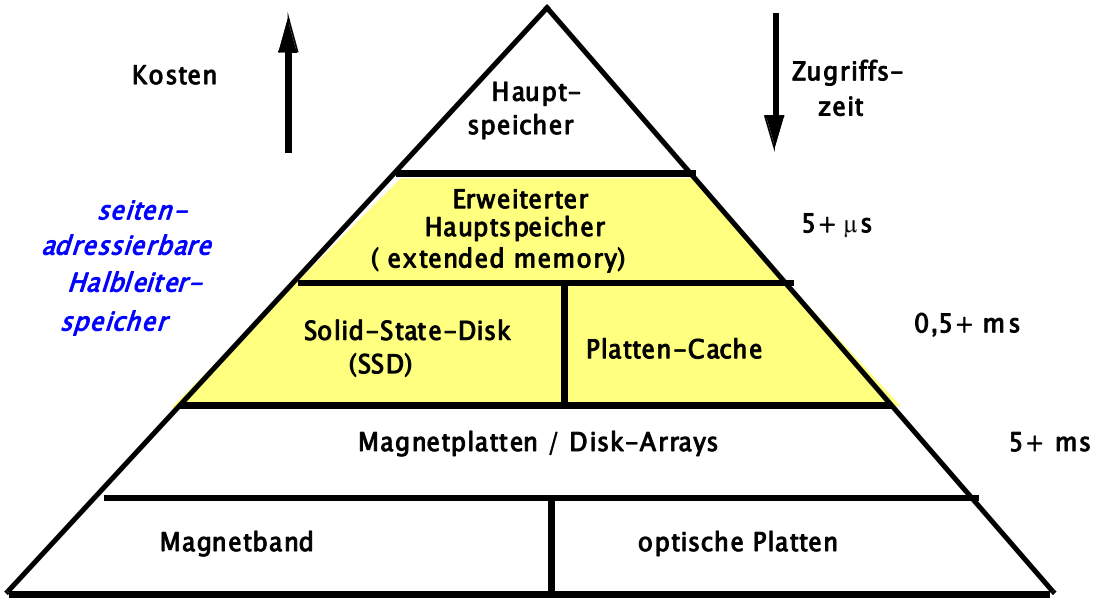
- Rekonstruktion von Blöcken
  1. Paralleles Lesen des Parity-Blocks p und der Blöcke b_j aus der Gruppe des zu rekonstruierenden Blocks von allen noch verfügbaren Datenplatten
  2. Rekonstruktion des Blockes b_i :
     $(b_1 \oplus ... \oplus b_{i-1} \oplus b_{i+1} \oplus .... \oplus b_{G-1}) \oplus p =$
     $(b_1 \oplus ... \oplus b_{i-1} \oplus b_{i+1} \oplus .... \oplus b_{G-1}) \oplus (b_1 \oplus ... \oplus b_{G-1}) = b_i$
  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		
Datenverfügbarkeit	--		
„Large Reads“ (Datentransferrate für Lesen)	1		
„Large Writes“ (Datentransferrate für Schreiben)	1		
„Small Reads“ (E/A-Rate)	1		
„Small Writes“ (E/A-Rate	1		

Erweiterte Speicherhierarchie



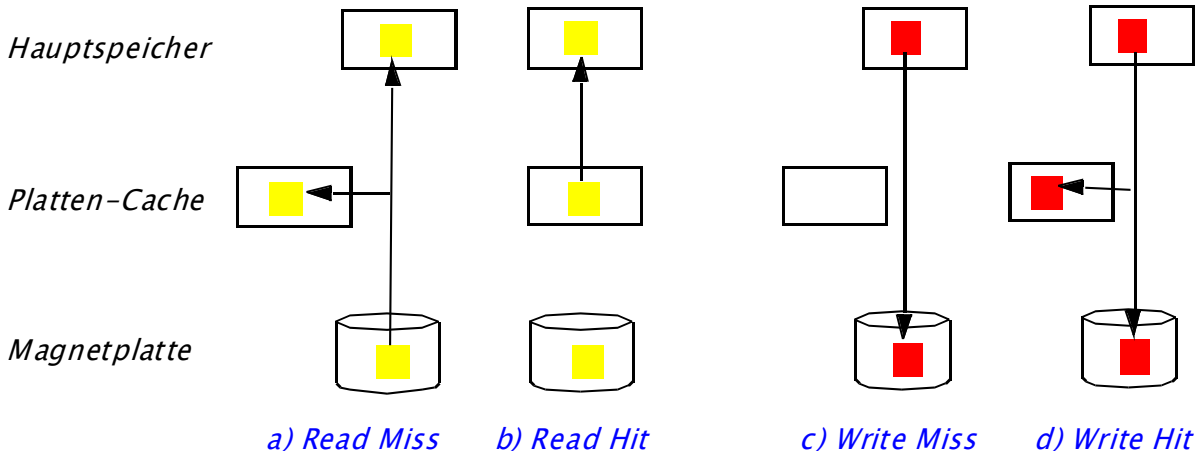
- Platten-Cache und SSD: Verwaltung durch eigene Kontroller, Kanalschnittstelle
- Erweiterter Hauptspeicher (EH): Verwaltung durch BS, synchroner Seitenzugriff
- Nicht-Flüchtigkeit: Battery-Backup / ununterbrechbare Stromversorgung

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



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

Speicherallokation von Dateien

- Wo soll Datei gespeichert werden ?
  - Platte
  - nicht-flüchtiger Zwischenspeicher (z.B. 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 (J. Gray)

- Gray1987/Gray1997: ein Block, auf den spätestens alle 5 Minuten zugegriffen wird, soll im Hauptspeicher bleiben
- Parameter bezüglich Technolgie 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

$$f \times \frac{PricePerDiskDrive}{AccessPerSecondPerDisk} >= \frac{PricePerMB}{PagesPerMB}$$

$$T <= \frac{PagesPerMB}{AccessPerSecondPerDisk} \times \frac{PricePerDiskDrive}{PricePerMB}$$

- Änderung bezüglich T nur, wenn sich Verhältnisse ändern

Zusammenfassung

- Speicherhierarchie: Geschwindigkeitsanpassung größerer / langsamerer Speicher an die schnellerer 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 (Zugriffsparallelität)
  - 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 (hohe Speicherkosten verlangen dedizierten Einsatz)

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
- Überprüfen Sie anhand typischer Werte für heutige Hauptspeicher und Magnetplatten inwieweit die 5-Minuten-Regel von Gray noch zutrifft
- 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.