

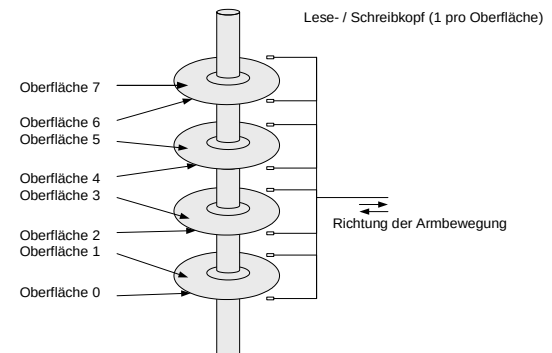
MAS: Betriebssysteme

Geräte- und Dateiverwaltung

T. Pospíšek

Gesamtüberblick

1. Einführung in Computersysteme
2. Entwicklung von Betriebssystemen
3. Architekturansätze
4. Interruptverarbeitung in Betriebssystemen
5. Prozesse und Threads
6. CPU-Scheduling
7. Synchronisation und Kommunikation
8. Speicherverwaltung
- 9. Geräte- und Dateiverwaltung**
10. Betriebssystemvirtualisierung



Zielsetzung

- Die Grundlagen der Geräteverwaltung am Beispiel der Festplatte und der Dateiverwaltung anhand praktisch relevanter Filesysteme verstehen
- Konzepte von Storage Systemen kennenlernen

Überblick

1. Geräteverwaltung

- Überblick
- Treiber, Gerätetypen, Gerätemodelle,...
- Fallbeispiel: Unix

2. Dateisysteme

- Grundlagen
- Fallbeispiel: Unix
- Fallbeispiel: Windows

3. Storage Systeme

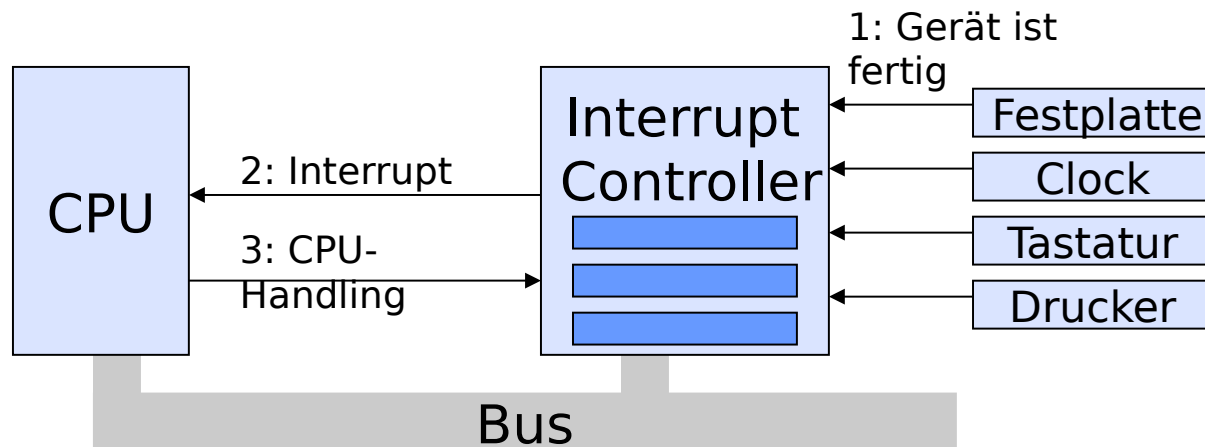
- RAID
- SAN, NAS

I/O-Manager

- Die Geräteverwaltung (**I/O-Manager**) dient der optimierten Verwaltung von externen Geräten zur Ein- und Ausgabe
 - Festplatten, Wechselmedien
 - Tastatur und Bildschirm
 - Netzwerkanbindung
- Schnittstelle zwischen den Geräten und dem Rest des Betriebssystems
- Aufgaben im Einzelnen:
 - Ausgabe von Kommandos an externe Geräte
 - Interruptbearbeitung
 - Fehlerbehandlung

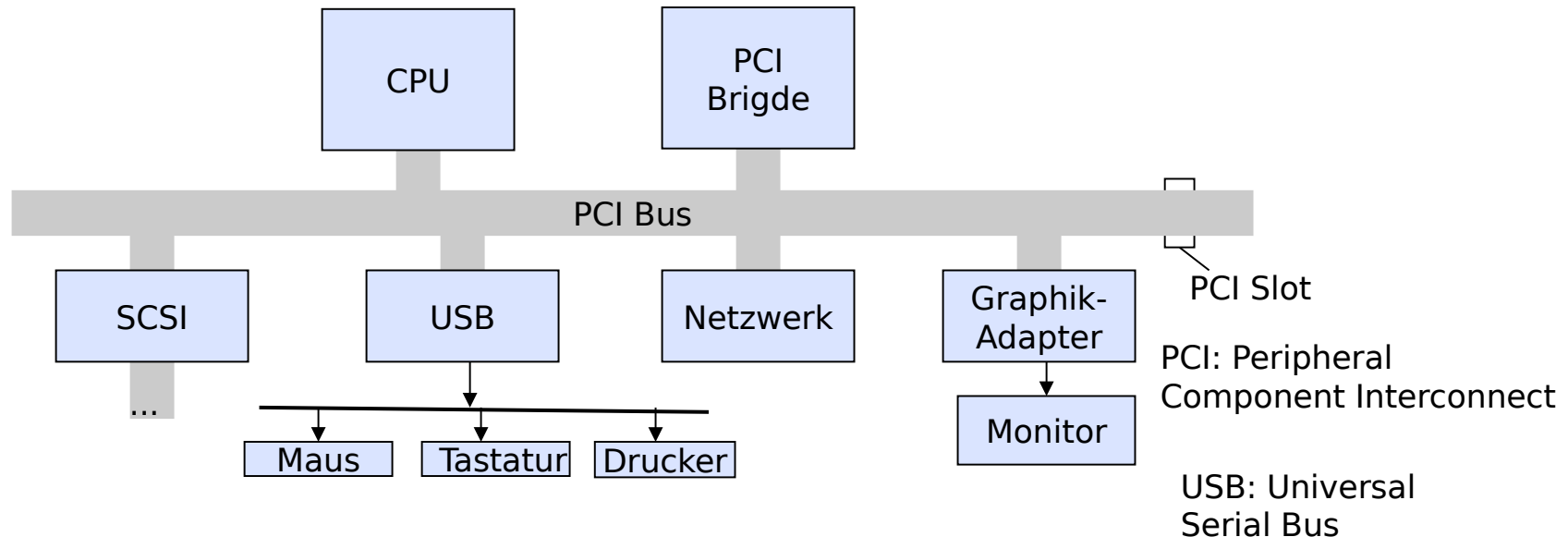
Interrupt-Bearbeitung: Interrupt-Controller

■ Auffrischung



Bussysteme am Beispiel des Pentium-Bussystems

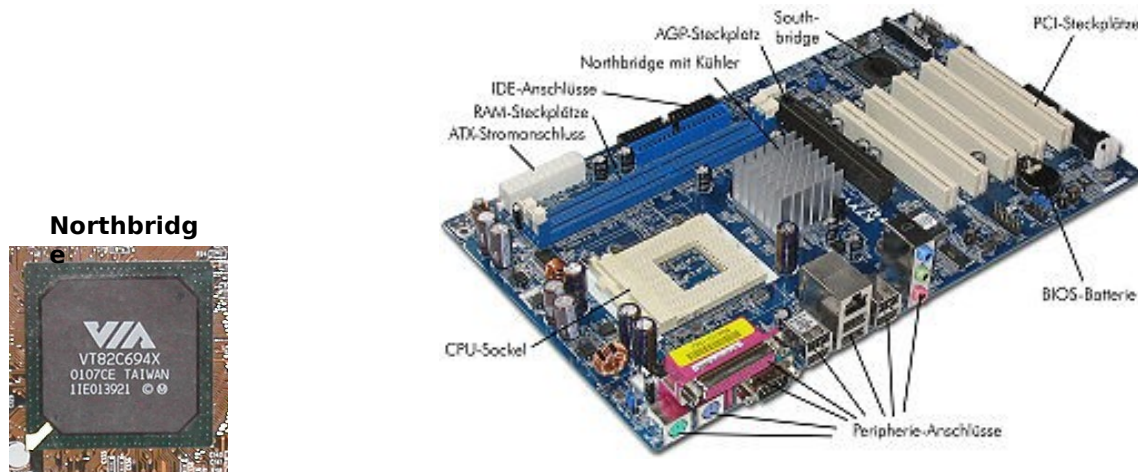
- Geräte sind über Bussysteme (**Datenverbindung**) an die CPU angebunden
- In heutigen Rechnern gibt es eine **Hierarchie** von Bussystemen



Vgl. Tanenbaum

Bussysteme am Beispiel des Pentium-Bussystems

- Northbridge und Southbridge (zwei Chips auf der Hauptplatine = Motherboard eines PCs) → Chipsatz:
 - Northbridge verbindet CPU mit Hauptspeicher (breitbandig)
 - Southbridge schließt Bussysteme an
 - Southbridge und Northbridge kommunizieren zum Beispiel über PCI



Northbridge



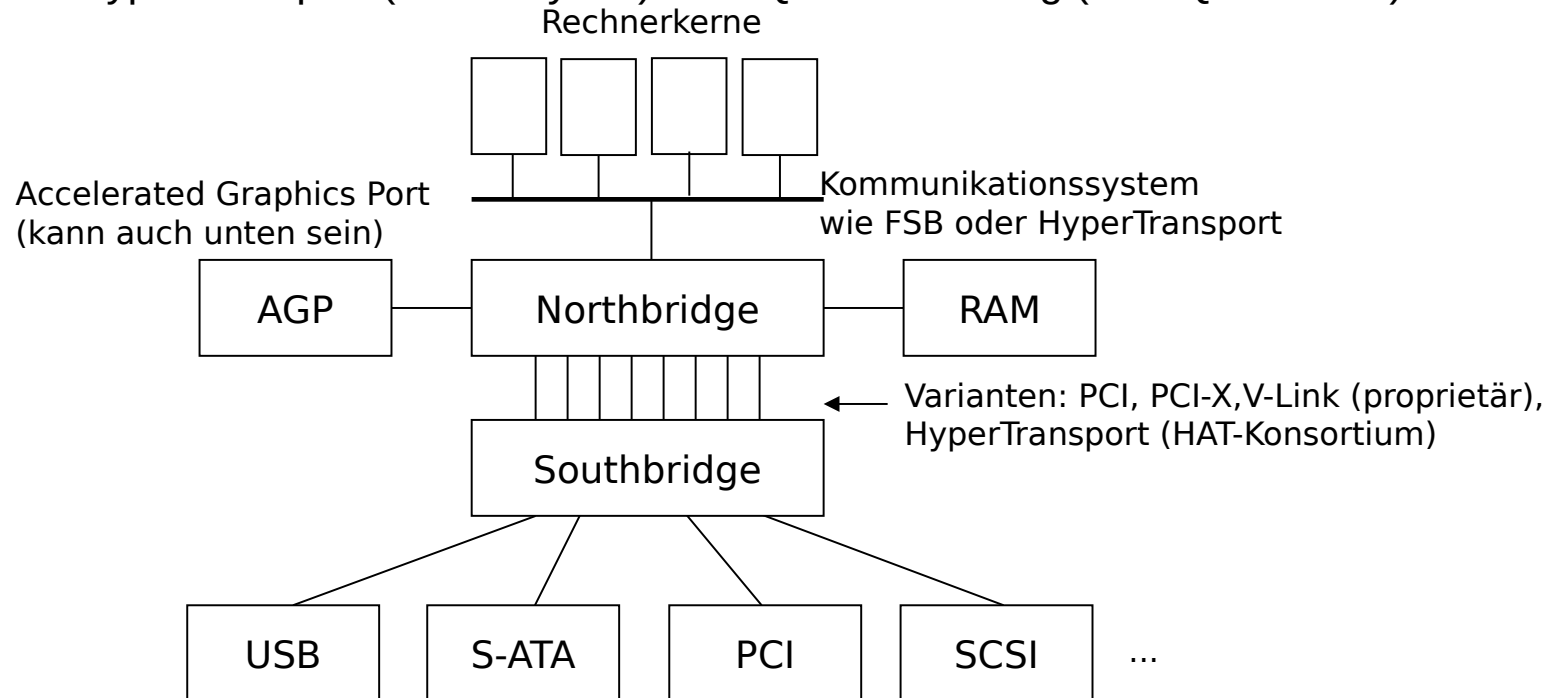
Southbridge



Hauptplatine, Quelle: Wikipedia

Verbindungen im Chipsatz

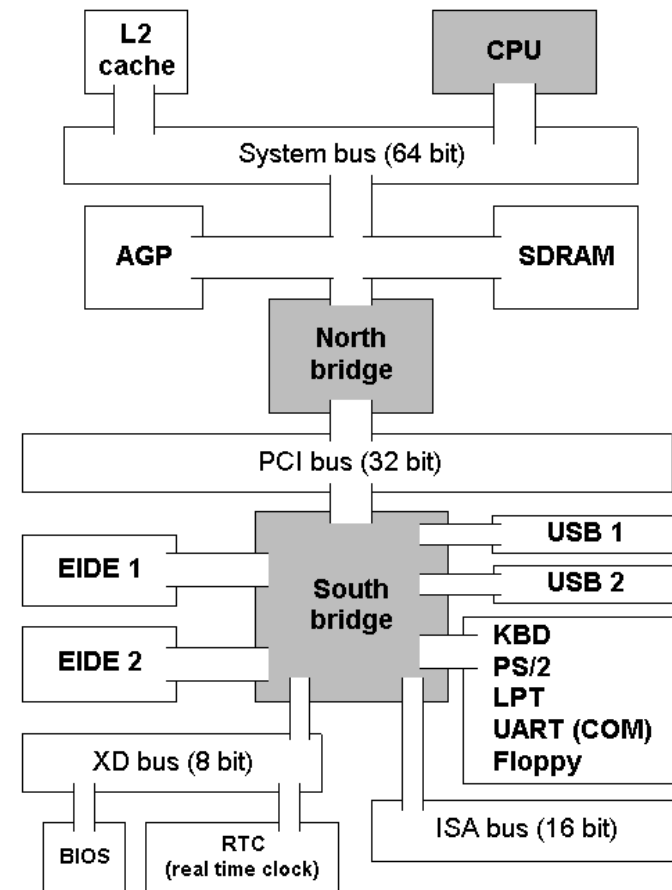
- Verbindung CPU – Northbridge über FSB
 - Systembus alter Prägung gibt es nicht mehr seit CPUs zu schnell sind
 - FSB (Front Side Bus) oder schnellere Verbindungen wie eine HyperTransport (> 50 Gbyte/s) oder QPI-Verbindung (Intel Quick Path)



Ergänzung: Northbridge, Southbridge

Beispiel eines modernen Chipsatzes

- North- und Southbridge sind "Router"
- Routing von Traffic von Bus zu Bus
- Die Northbridge bedient den umfangreichen Traffic zwischen CPU und RAM
- Die Southbridge bedient die anderen Routen (Bussysteme) zu den externen Geräten
- Verbindung über PCI-Bus

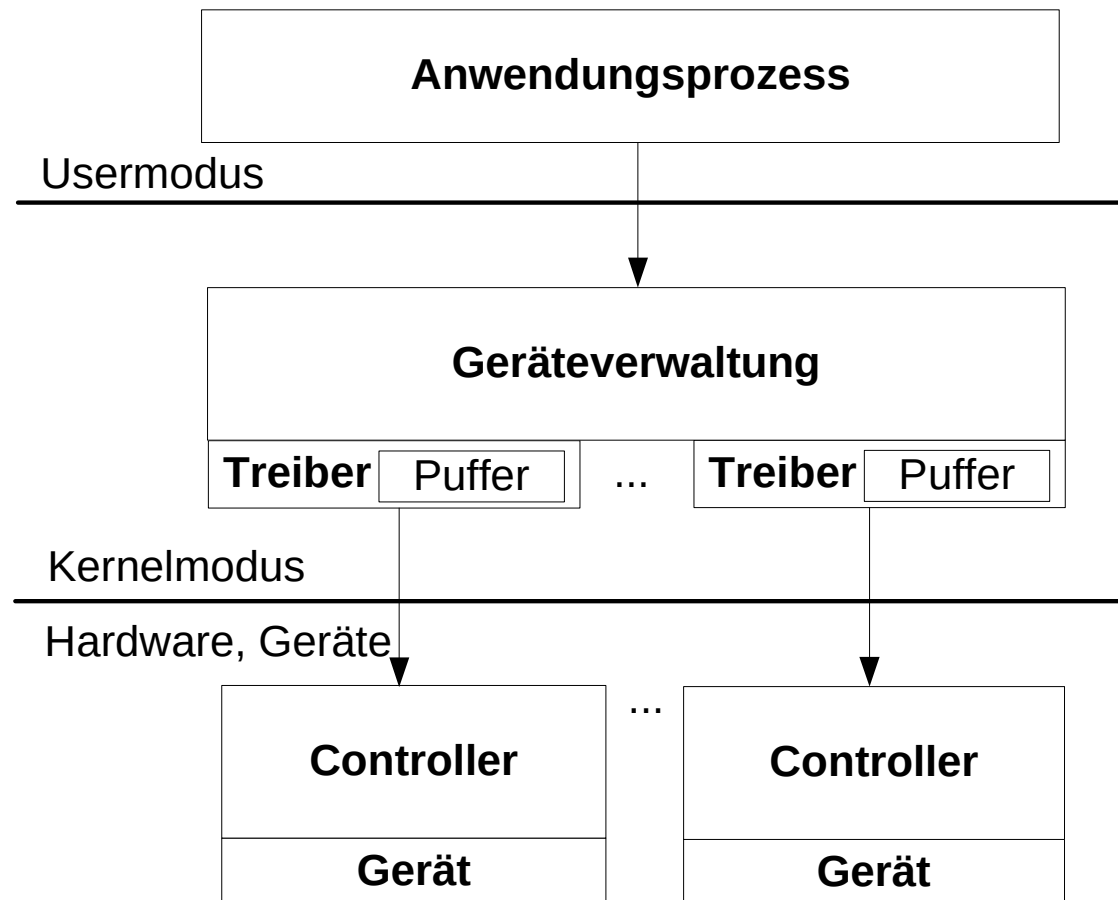


Typische Datenraten

- Sehr unterschiedliche Transferraten [Bit/s] bzw. Datenraten [Byte/s] für die einzelnen Geräte

Gerät	Transferrate bzw. Datenrate
Keyboard	ca. 10 Byte/s
Maus	ca. 100 Byte/s
Laserdrucker	ca. 100 KByte/s
USB3	5 GBit/s
10Gbit Ethernet	1,25 GByte/s
Serial Attached SCSI	750 MByte/s
Tape	ca. 320 MByte/s
PCI Express	32 GBit/s
IDE-Festplatten mit ATA	ca. 130 MByte/s
Festplatten mit S-ATA	Bis zu knapp 2 GByte/s
Bus-Kommunikationssystem wie AMD HyperTransport oder Intel QPI	50 GBit/s bis über 100 GBit/s

Schichtung des I/O-Systems



Treiber

- Treiber sind gerätespezifische Programmteile
- Treiber werden in eigenen Modulen meist durch den Gerätehersteller realisiert
- Die wichtigsten Aufgaben eines Treibers:
 - Initialisierung und Bekanntgabe des Geräts
 - Datenübertragung von und zu einem Gerät
 - Logisches Programmiermodell auf gerätespezifische Anforderungen übersetzen
 - Pufferung von Daten
 - Interruptbearbeitung
 - Koordination der nebenläufigen Zugriffe

Gerätearten (1)

- **Zeichenorientierte** Geräte
 - Information wird in einzelnen Zeichen gespeichert und gelesen
 - Einzelne Zeichen sind nicht adressierbar, es wird in Streams gelesen bzw. gespeichert
 - Beispiele: Drucker, Maus, Netzwerkkarten
- **Blockorientierte** Geräte
 - Information wird in Blöcken von mind. 512 Bytes gespeichert und gelesen
 - Blöcke sind adressierbar, Zugriff erfolgt auf Blöcke
 - Beispiele: Festplatten, Tapes
- **Sonstige** Geräte wie Clocks (Zeitgeber)

Gerätearten (2)

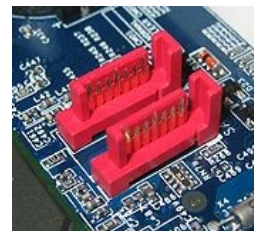
■ Geräte mit wahlfreiem Zugriff

- Adressierungsinformation notwendig
- Beispiel: Plattenspeicher
 - Adressierung über
 - Spurnummer
 - Sektornummer
 - Zylindernummer

Festplatte, Quelle: Wikipedia



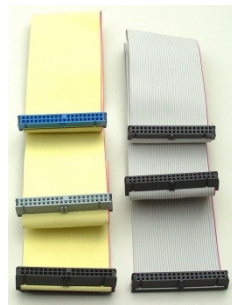
S-ATA-Anschluss, Quelle: Wikipedia



Alte IBM-Festplatte, 1979, Quelle: Wikipedia



IDE-Schnittstelle, Quelle: Wikipedia



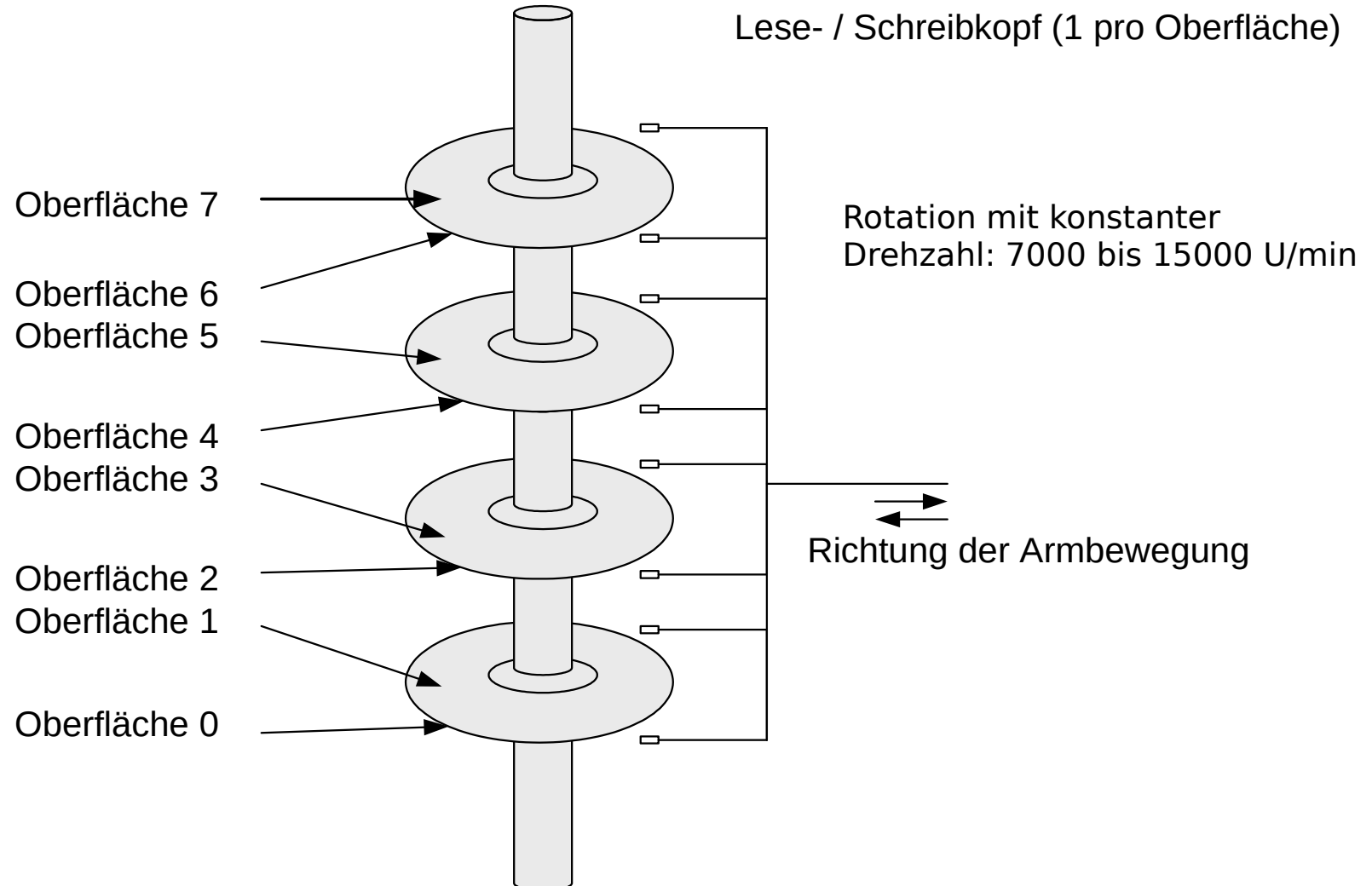
ISA-Steckplatz, Quelle: Wikipedia



Gerätearten: Beispiel Festplatte (1)

- Festplatten bestehen aus **Kunststoff-** oder **Aluminiumscheiben**, die mit einer hauchdünnen Magnetschicht überzogen sind
- **Schreib-/Leseköpfe** sind mit kleinem Elektromagneten ausgestattet
- Daten sind als Blöcke fester Größe in **Sektoren** gespeichert, die in **Spuren** zu finden sind
- Anordnung in sog. Zylindern
 - Bei übereinander liegenden Platten alle Spuren mit gleicher Nummer, auf welche die Schreib-/Leseköpfe gleichzeitig positionieren können

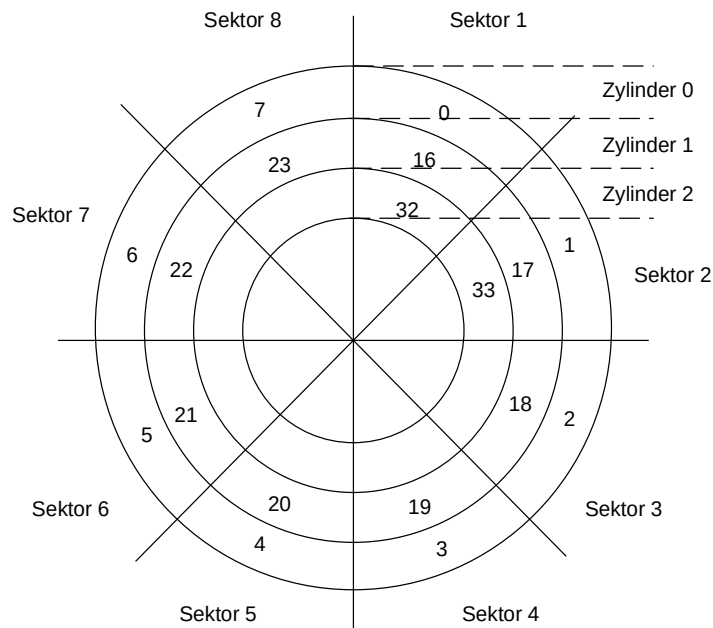
Gerätearten: Beispiel Festplatte (2)



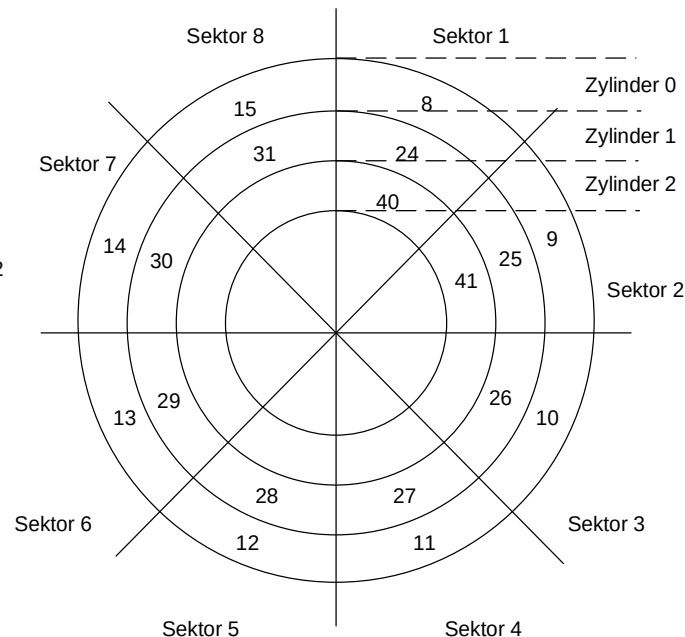
Gerätearten: Beispiel Festplatte (3)

- Plattenaufteilung: Spuren, Zylinder, **physikalische** Sektoren (Kuchenstücke, Kreissektoren)
- Alle Spuren untereinander nennt man Zylinder (eine Position des Kopfes)
- Durchnummerierung **logischer** Sektoren entlang der Spuren → keine mechanische Aktion erforderlich

Seite 0

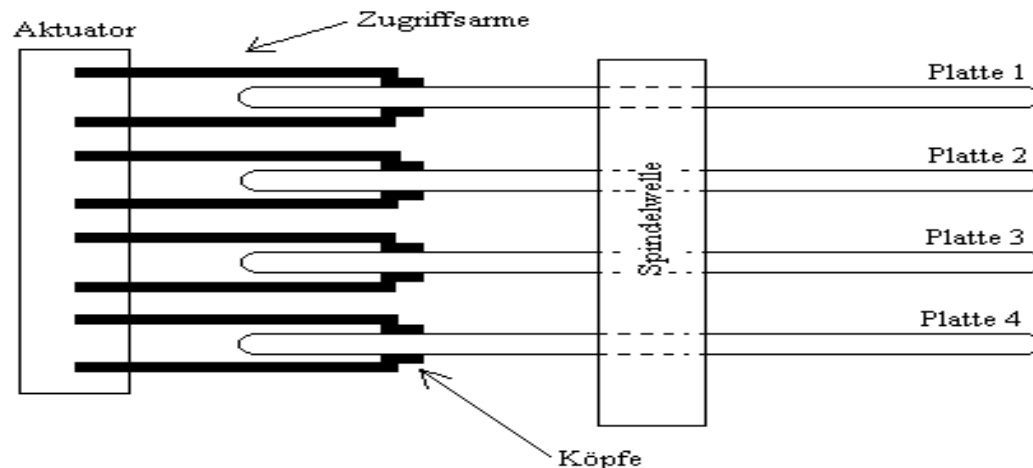


Seite 1



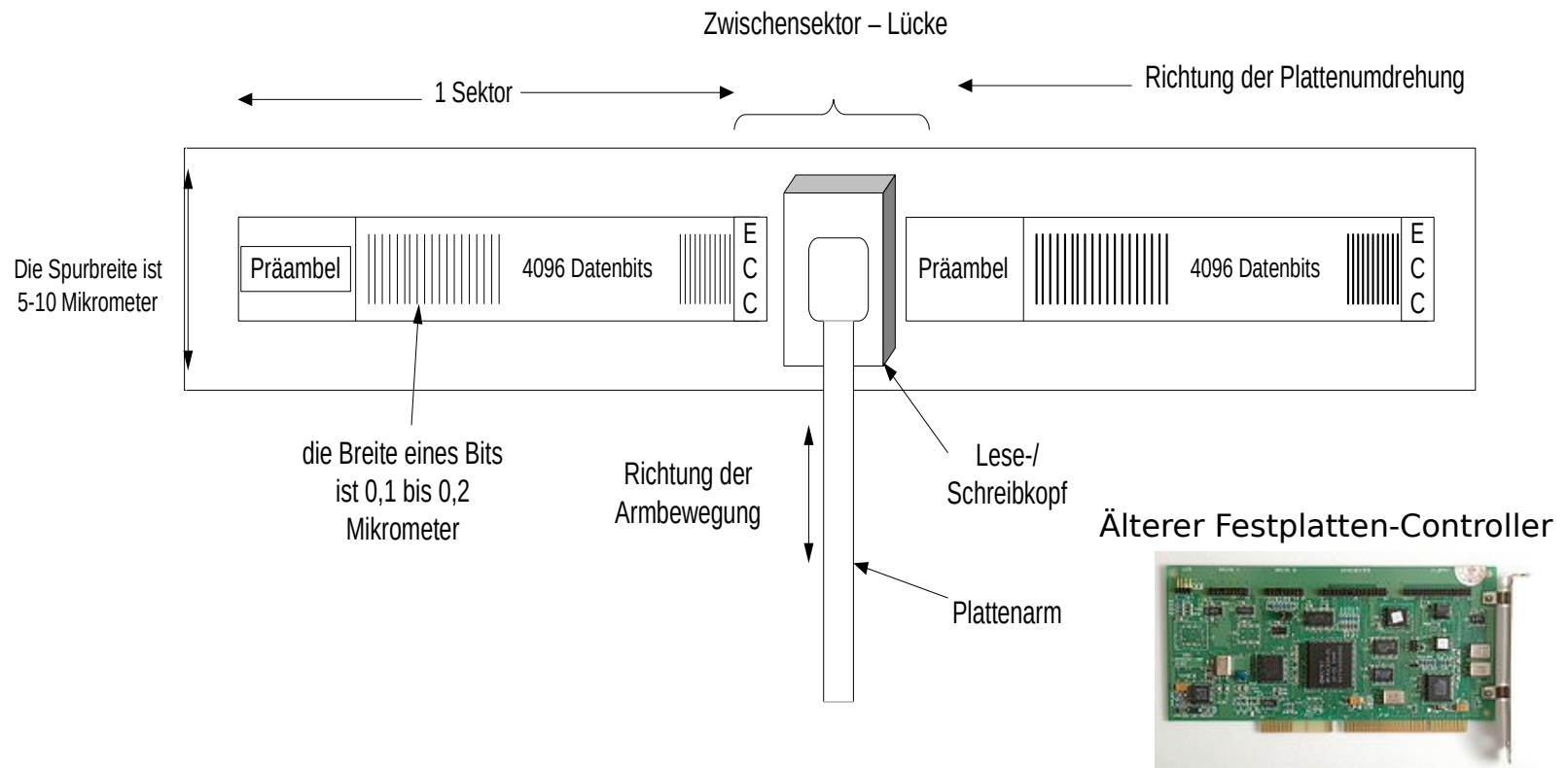
Gerätearten: Beispiel Festplatte (4)

- Üblicher Plattendurchmesser 3,25 oder 2,5 Zoll oder kleiner (1,8 Zoll)
- Zwischen 2 und 8 Platten, Beispiel: 135.000 Spuren/Zoll
- Kapazität: Bei 39 Sektoren, 761 Zylinder und 8 Köpfen und 512 Byte großen Sektoren:
 - $39 \times 761 \times 8 \times 512 = 121.565.184$ Byte
- Kapazität: mehrere TiB
 - Hat sich in den letzten 30 Jahren mehr um als das 200-fache erhöht
 - Zugriffszeiten aber nicht!



Gerätearten: Beispiel Festplatte (5)

- Betrachtung zweier Sektoren aus einer Festplattenspur
- Sektoreninhalt: Präambel, Nutzdaten (hier 4096 Bit) und ECC



Gerätearten: Beispiel Festplatte (6)

- Das Betriebssystem kennt nur logische Sektoren in durchnummerierter Reihenfolge (sog. **LSN** = Logical Sector Number)
- Eine Übersetzung der logischen Adressen in phys. Adressen ist erforderlich

Einfaches lineares Adressierungsmodell
mit den Speicheradressen 0..N



Adressierungslogik der Festplatte
(Laufwerk-, Zylinder-, ...,
Sektornummer)

- Folge 1 bis N von Blöcken, die eindeutig durch ein **Quadrupel der Form (g, z, h, s)** adressierbar sind, mit
 - g: Laufwerk
 - z: Zylindernummer
 - h: Nummer des Schreib-Lesekopfes
 - s: Sektornummer

Gerätearten: Beispiel Festplatte (7)

- Scheduling-Strategie
 - Ein Plattentreiber muss die Lese- und Schreibaufträge möglichst optimal und fair bearbeiten
- Bekannte Scheduling-Strategien
 - **FCFS** (First Come First Serve)
 - Einfach und fair: Alle Aufträge in der Reihenfolge ausführen, in der sie ankommen
 - **SSTF** (Shortest Seek Time First)
 - Aufträge in näherer Umgebung der aktuellen Schreib-/Lesekopf-Position ausführen
 - Vermeidung von Kopfbewegungen
 - Wie bei SJF-Prozessverwaltung besteht das Problem des Verhungerns von Aufträgen

Gerätearten: Geräte mit serielltem Zugriff

■ Geräte mit serielltem Zugriff

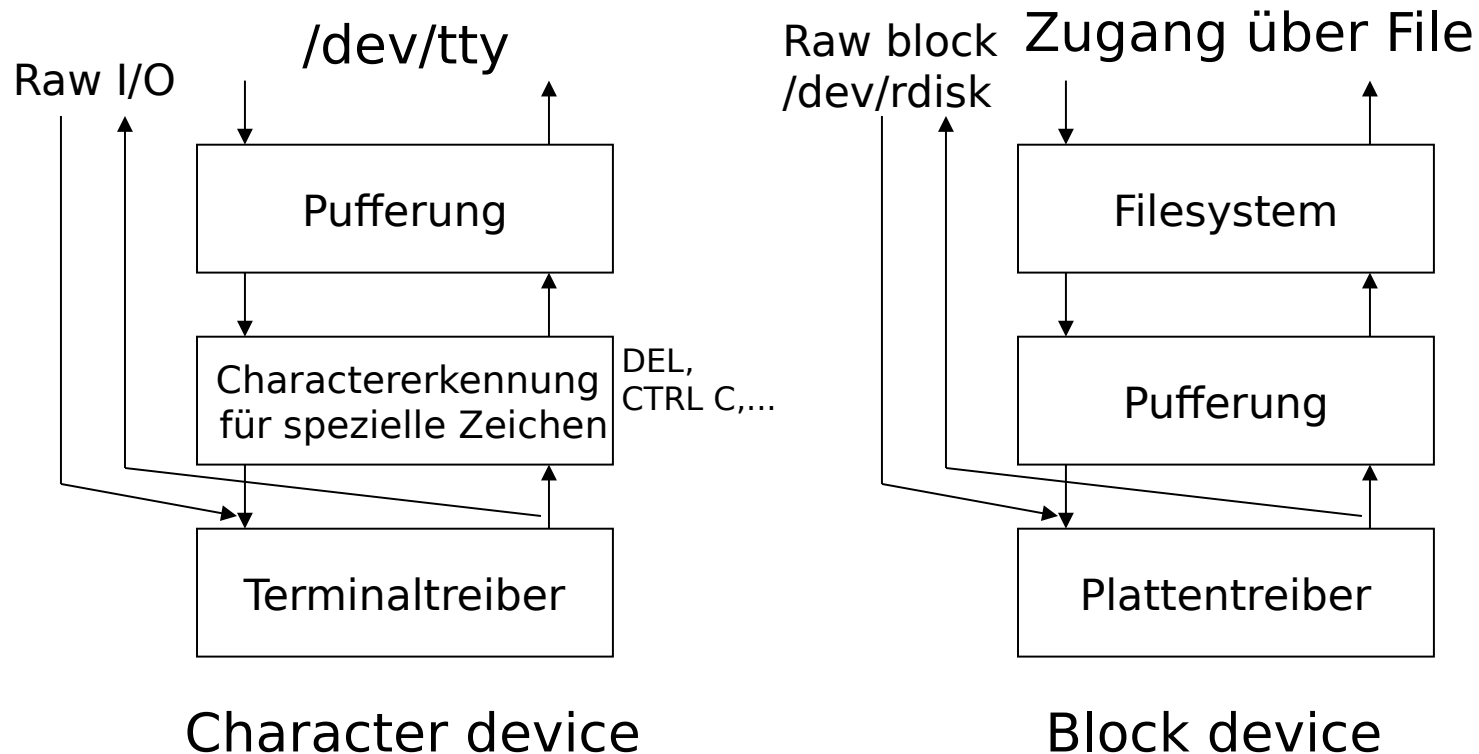
- „Serielle Geräte“
- Keine Adressierungsinformation notwendig
- Lesen bzw. Schreiben geht Zeichen für Zeichen
- Beispiele
 - Maus
 - langsame Zeilendrucker
 - Tastatur
- Es wird eine Flusssteuerung benötigt (XON/XOFF)

Fallbeispiel Unix: Geräte als spezielle Dateien

- „Jedes“ Gerät hat unter Unix ein „special file“ zugeordnet, über das es wie eine Datei behandelt werden kann
 - Verzeichnis z.B. **/dev**
 - Genaue Namen sind abhängig vom Unix-Derivat
 - Operationen (System Calls): open, read, write,...
- Bei den sog. special files unterscheidet man:
 - **Block special file**, z.B. /dev/hd1 (Festplatte)
 - **Character special file**, z.B. /dev/tty (Bildschirm, Tastatur)
- Beispiel:
 - Kommando *cp file /dev/lp* kopiert eine Datei namens *file* direkt auf den Drucker

Fallbeispiel Unix: Streams

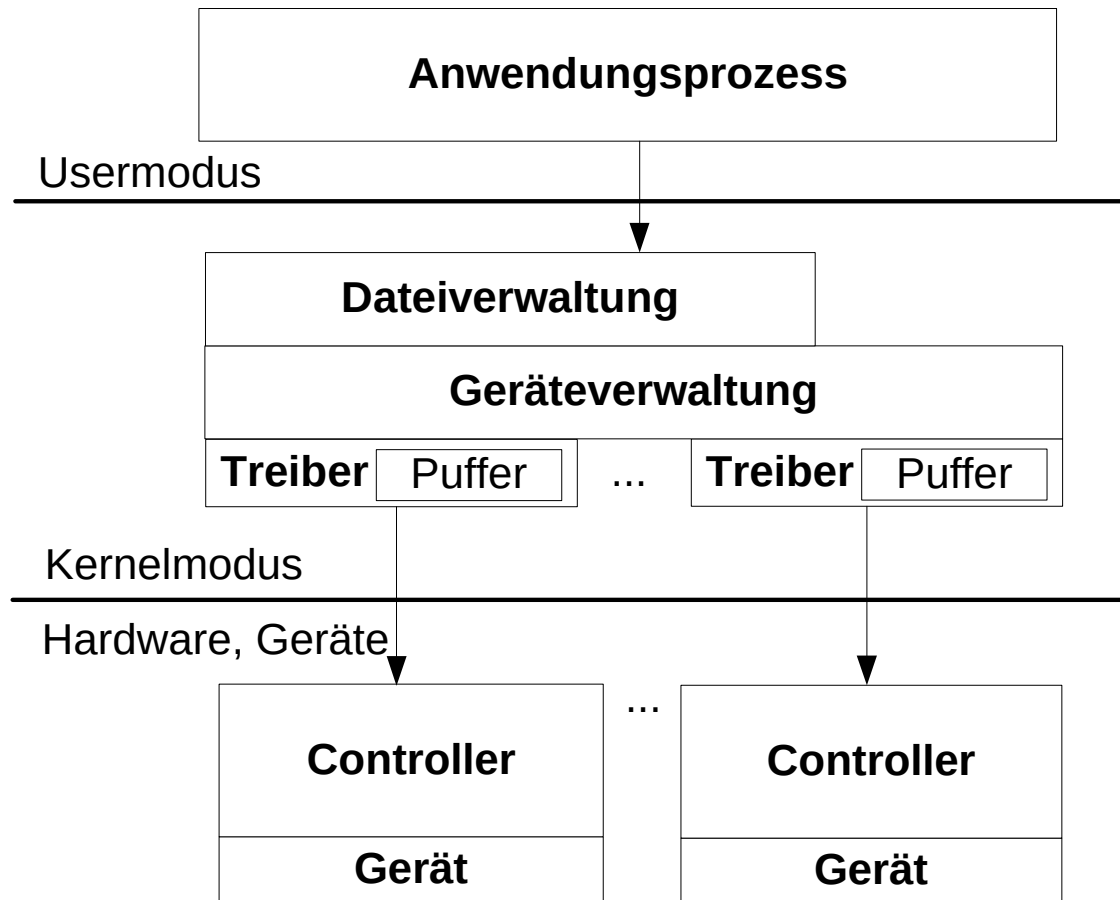
- Streams-orientiertes Modell bei System V:
Treiberschichten (Filter) können in den Stream eingebaut werden



Überblick

1. Geräteverwaltung
 - Überblick
 - Treiber, Gerätetypen, Gerätemodelle,...
 - Fallbeispiel: Unix
2. **Dateisysteme**
 - Grundlagen
 - Fallbeispiel: Unix
 - Fallbeispiel: Windows
3. Storage Systeme
 - RAID
 - SAN, NAS

Einordnung in die Schichten



Dateien

- Informationen müssen von Betriebssystemen **persistent** gespeichert werden können
- **Dateien** sind ein abstrakter Mechanismus zur Speicherung und zum Wiederauffinden von Informationen
- Der Teil des Betriebssystems, der sich mit Dateien und deren Organisation befasst, wird als Dateiverwaltung bezeichnet
- Zu jeder Datei sind bestimmte Informationen zu verwalten

Informationen zu Dateien

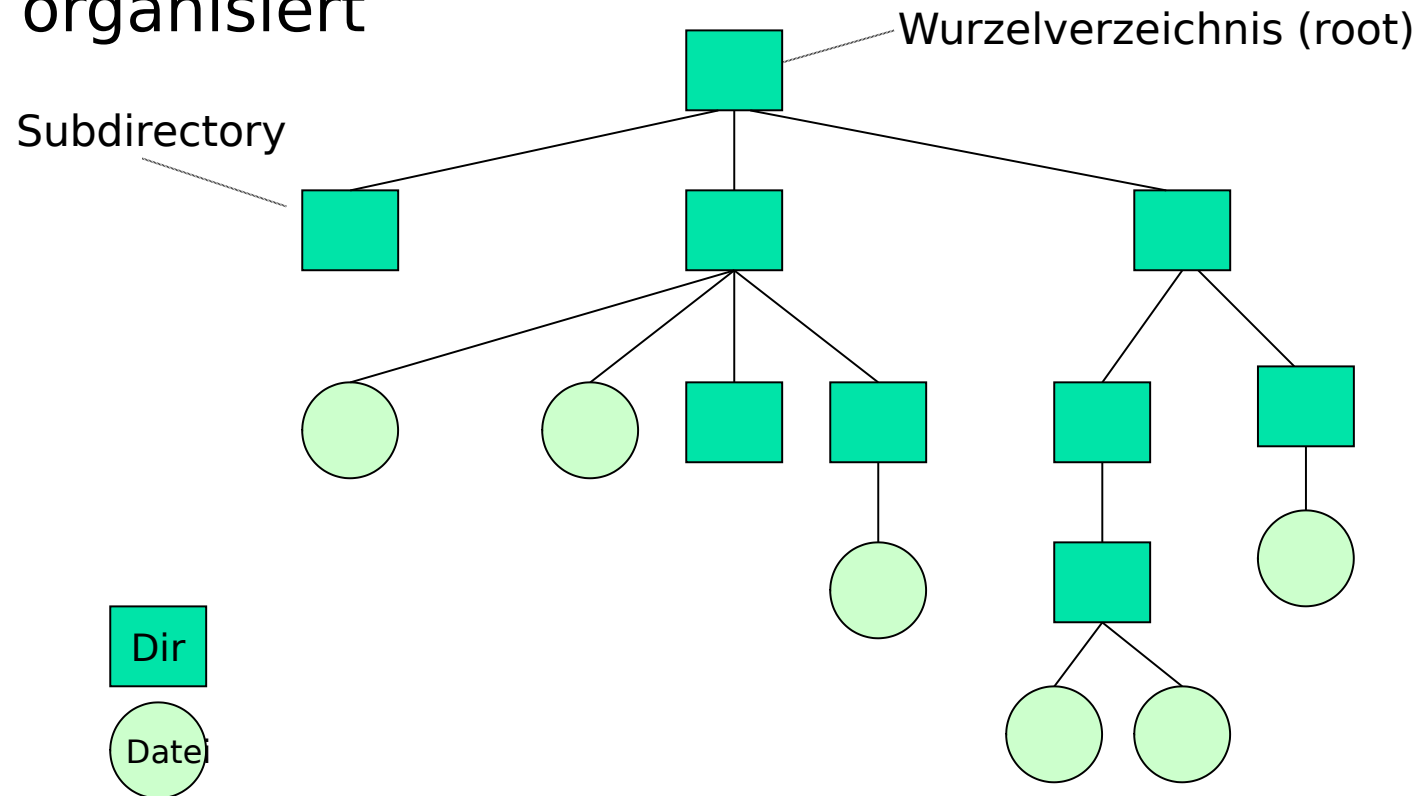
- Dateien haben einen Dateinamen und einen Inhalt
- Jede Datei besitzt einen Eintrag mit Informationen über:
 - Namen der Datei
 - Typ der Datei: Normal- oder Katalogdatei
 - Länge der Datei in Bytes
 - Blöcke, aus denen die Datei besteht
 - Zugriffsrechte zu dieser Datei
 - Passwörter zum Schutz der Datei
 - Statistikdaten: z.B.: Datum letzte Änderung
 - ...

Dateisysteme

- Dateien werden in Dateisystemen (file system) verwaltet
- Dateisysteme oft hierarchisch organisiert
 - Dateigruppen (Dateiverzeichnis) mit Verwaltungsinformation
 - Dateien (mit den eigentlichen Daten)
- Strukturierung mit Unterverzeichnissen (Subdirectory)
- Jedes (Sub)directory enthält Einträge zu weiteren Katalogen oder *normalen* Dateien
- Beispiele:
 - Unix verfügt über ein systemweites Dateisystem
 - MS-DOS verwaltet für jedes Gerät ein unabhängiges Directory

Hierarchische Verzeichnissysteme

- Hierarchische Verzeichnissysteme beliebiger Tiefe sind heute „State of the Art“
- Directories sind in einer Baum-Struktur organisiert



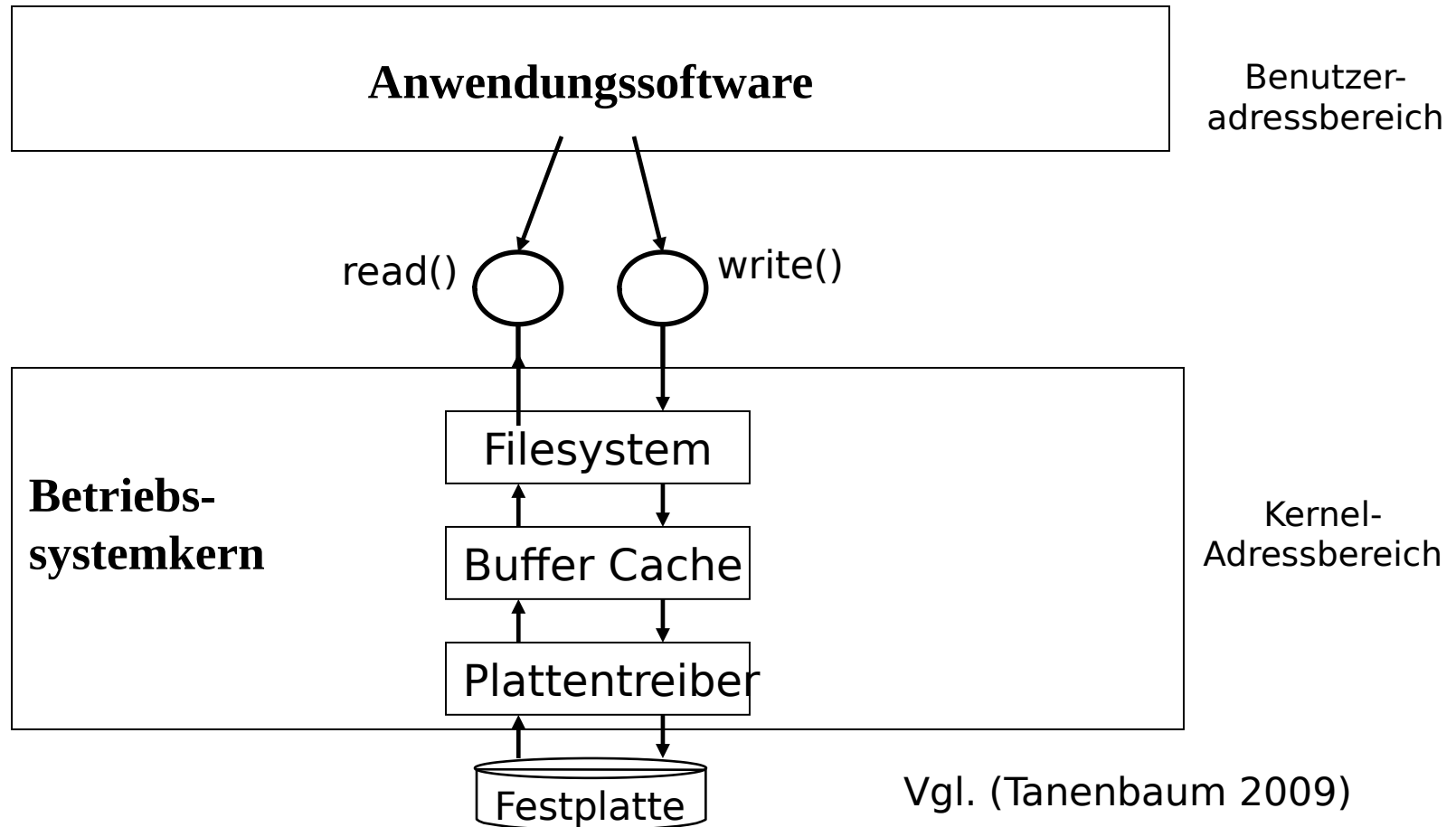
Operationen auf Dateien

- Systemdienste zur Verwaltung von Dateien:
 - **Erzeugen** eines Katalogeintrages (Dateiname)
 - **Löschen** des Katalogeintrags u. Dateiinhalts
 - **Kopieren** von Dateien
 - **Ändern** des Dateinamens oder anderer Katalogeinträge
 - **Übertragen** eines Katalogeintrags in einen anderen Katalog (Directory)

Blockverwaltung

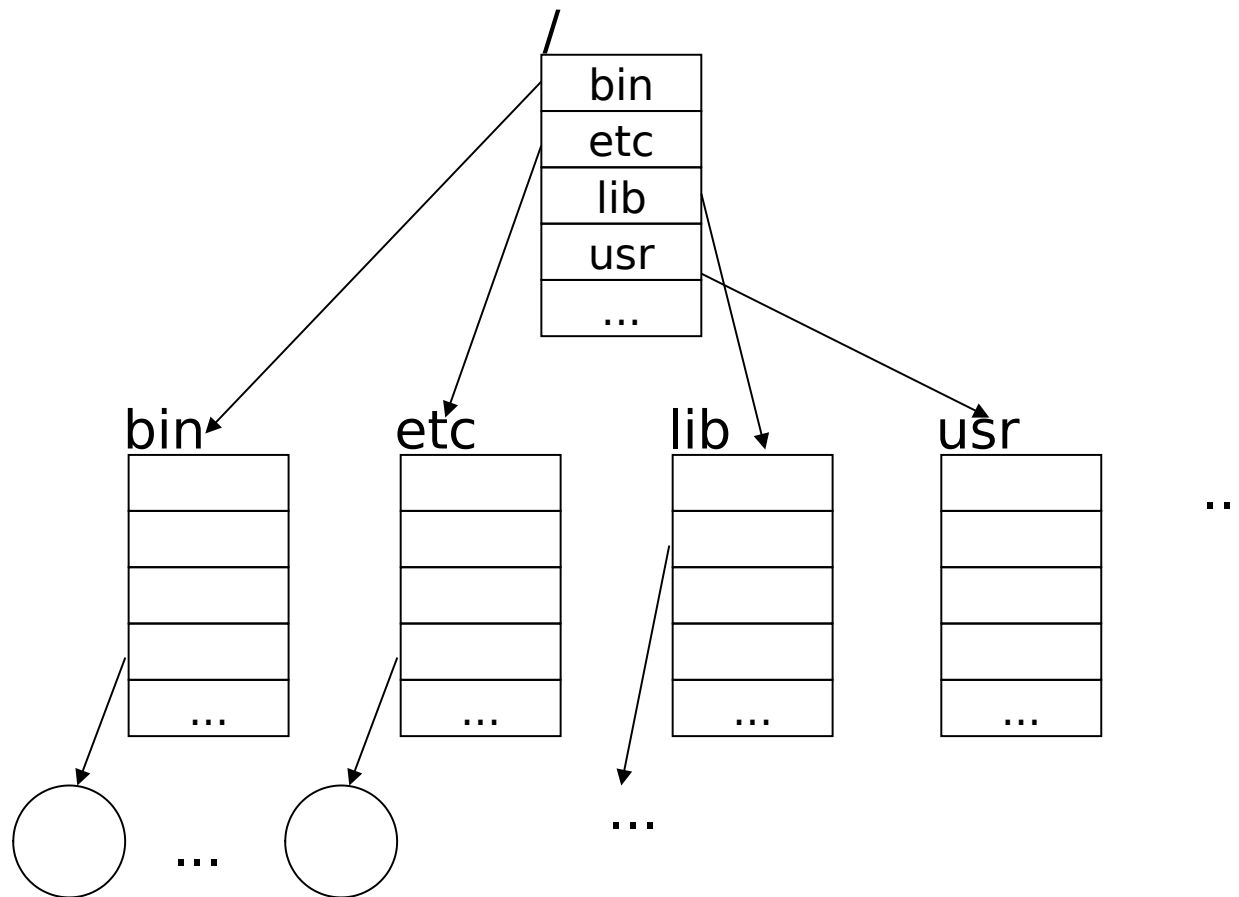
- Die Bearbeitung von Dateien ist blockweise oder zeichenweise möglich
- Jede gefüllte Datei hat eine Liste mit von ihr belegten Blöcken
- Der Katalog enthält Hinweise auf die Blöcke, aus denen die Dateien bestehen
- Das Dateisystem verwaltet zudem:
 - Eine **Pseudodatei** bestehend aus allen **freien** Blöcken eines Datenträgers
 - Eine **Pseudodatei** mit einer Liste aller **unzuverlässigen** Blöcke

Fallbeispiel: Unix, Einordnung von Filesystemen



Fallbeispiel: Unix, Verzeichnisstruktur

- Unix verwendet ein beliebig tiefes, hierarchisches Dateisystem



Fallbeispiel: Unix Verzeichnisstruktur

- Die Wurzel des Baums heißt **root**; das **root-directory** wird mit „/“ abgekürzt. (bei MS-DOS „\\“)
- Darunter befinden sich die **home-directories** der einzelnen User (/home)
- Die inneren Knoten des Baumes sind **subdirectories**, die Blätter des Baumes sind die eigentlichen Files
- Geräte (Drucker, Terminals, Maus etc.) werden logisch wie Dateien behandelt (**special files**)
- Für die Organisation des Unix-Baumes haben sich gewisse Konventionen eingebürgert

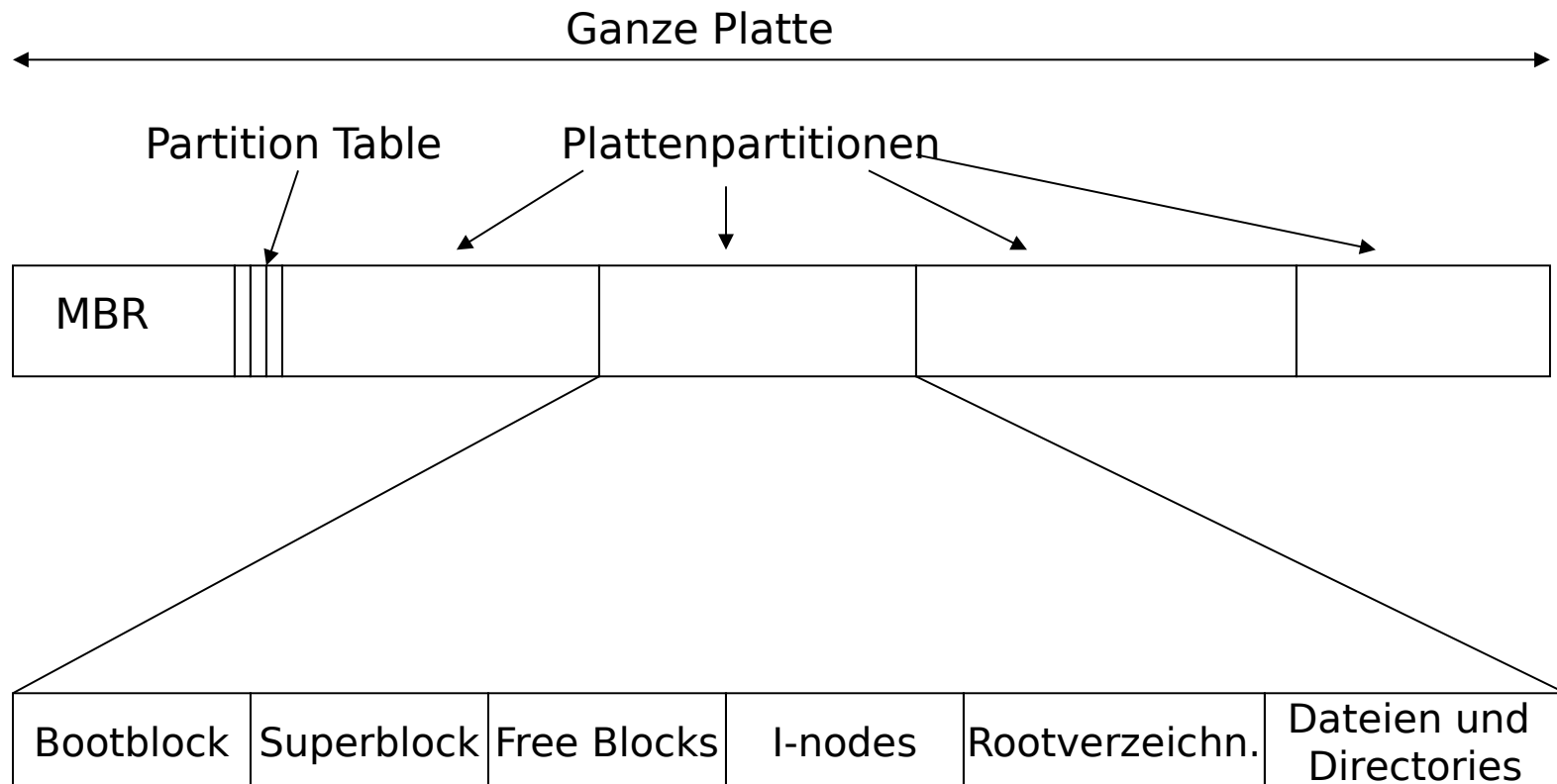
Fallbeispiel: Unix, Verzeichnisstruktur

- Unter den Kindern der Wurzel finden sich meist subdirectories mit folgender Bedeutung:
 - bin: Ausführbare Systemdateien (binär)
 - dev: Gerätedateien (devices)
 - lib: Bibliotheken (libraries)
 - usr: Systemdateien (ursprüngl.: user)
- Externe Dateisysteme, also physikalische Datenträger wie Harddisk, CDROM, Floppy,... können unabhängige Filesysteme enthalten
 - Diese kann man mit dem Befehl **mount** an beliebiger Stelle in den Unix-Dateibaum einklinken
 - Danach gibt es keine Unterscheidung mehr zwischen Files auf der Diskette und anderen block special files
 - Mit **umount** wird das Subdirectory entfernt

Fallbeispiel: Unix, Implementierung des Dateisystems

■ Beispiel eines Dateisystem-Layouts einer Festplatte

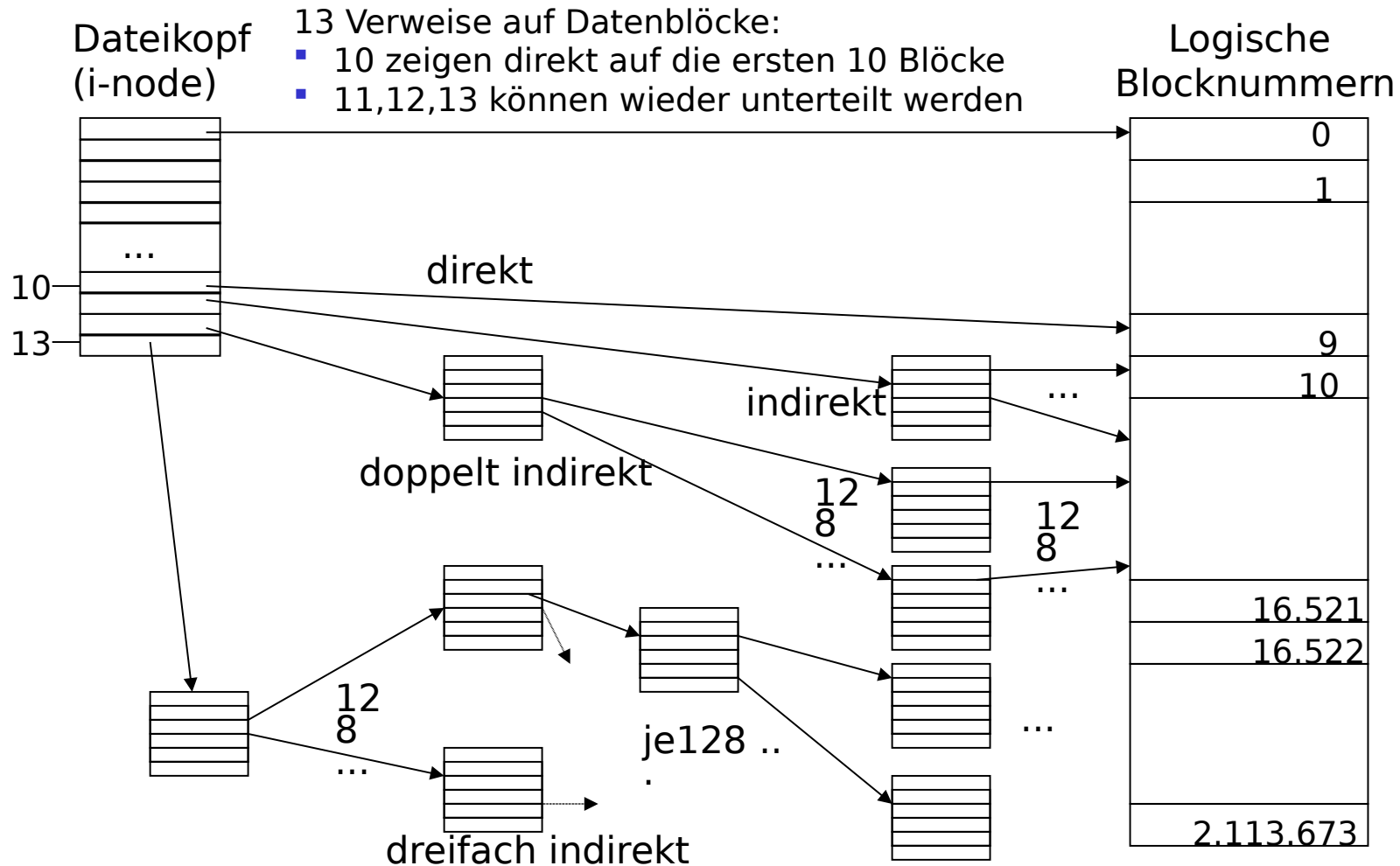
Vgl. Tanenbaum



Fallbeispiel: Unix, Implementierung des Dateisystems

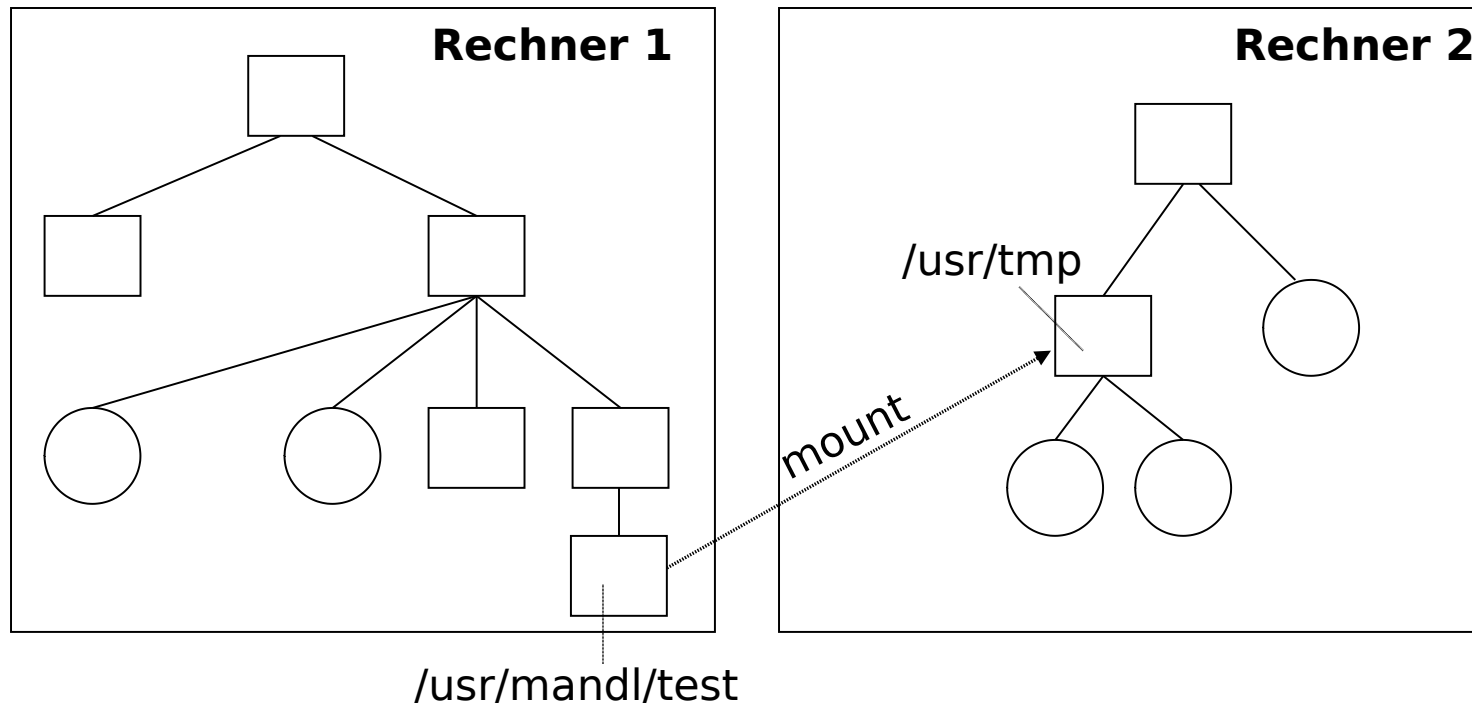
- **MBR** = Master Boot Record auf Sektor 0 zum Booten des Rechnersystems
- Am Ende des MBR liegt die **Partition Table**: Eine Platte kann i.d.R. in mehrere Partitionen eingeteilt werden
- **Bootblock** wird bei Hochfahren gelesen und ausgeführt
- **Superblock** enthält Verwaltungsinformationen zum Dateisystem (Anzahl der Blöcke,...)
- **Free Blocks** (z.B. Bitmap) gibt die freien Blöcke des Dateisystems an
- **Rootverzeichnis** enthält den Inhalt des Dateisystems (nach der Wurzel)
- **I-nodes**: I-nodes sind Einträge im Inhaltsverzeichnis des Dateisystems

Fallbeispiel: Unix, Verweisstruktur einer Datei



Einschub: NFS, Verteiltes Dateisystem

- Das **Network File System** (NFS) verbindet Dateisysteme mehrerer Rechner zu einem logisch zusammengehörigen Dateisystem
 - NFS-Protokoll

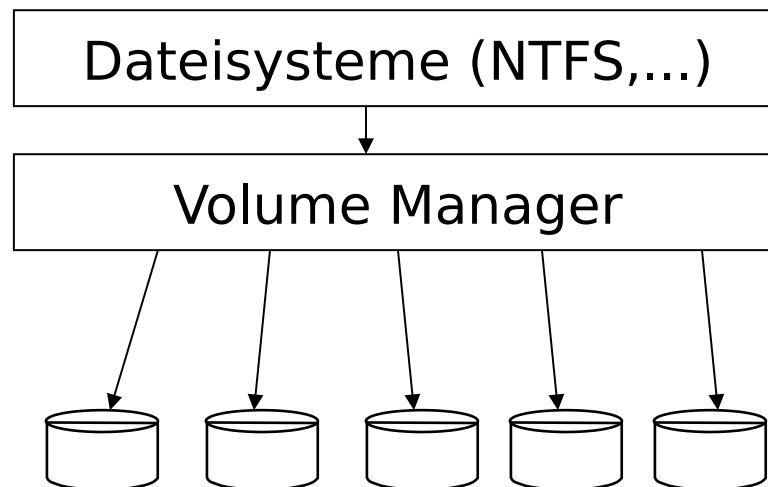


Fallbeispiel: Unix, Verzeichnisstruktur

- Jedes Unterverzeichnis und jede Datei lassen sich eindeutig durch den Weg von der Wurzel zur Datei beschreiben
- Die Folge der Knoten auf dem Weg wird, mit „/“ getrennt, als **Pfad** bezeichnet.
- Das Dateisystem jedes Users ist ein Subdirectory des gesamten Unix-Baums
- Die Wurzel des Unterbaums des Users nennt man **Home-Directory**
- Der User arbeitet meist in seinem Home-Directory
- Bei der Arbeit bezieht man sich oft auf Dateien des selben Verzeichnisses (**working directory**)

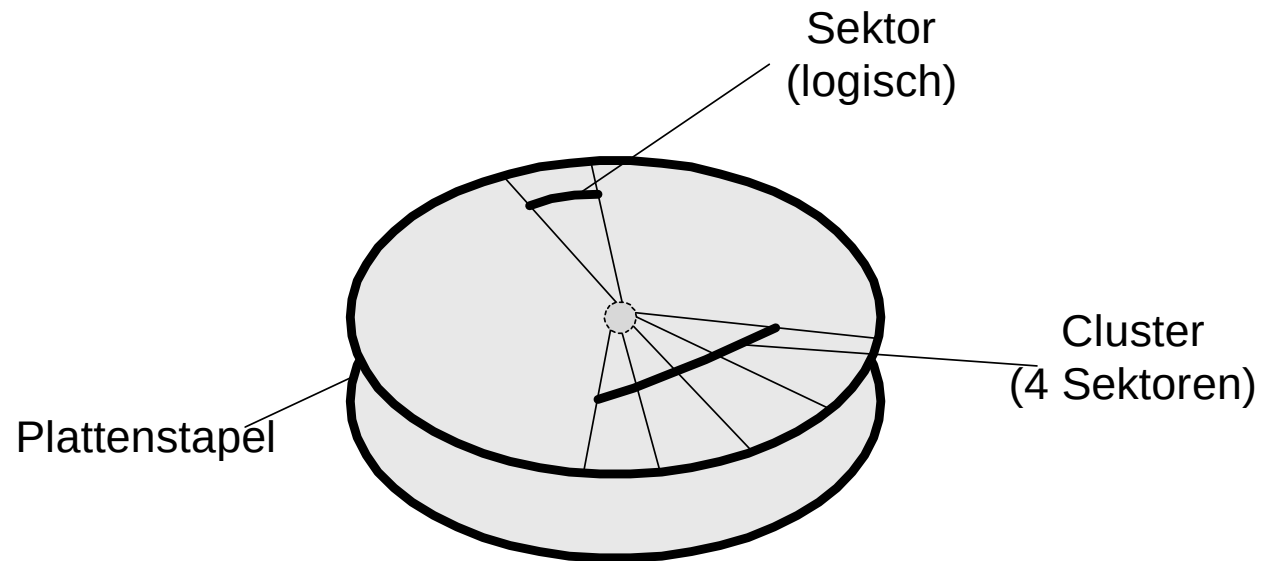
Fallbeispiel: Windows, Volume Manager

- Unter Windows gibt es einen **Volume Manager**
 - (Unter Linux LVM)
 - Verwaltung der Platten auf logischer Ebene
 - Stellt logische Laufwerke für die Anwendungen bereit
 - Veränderung, Neupartitionierung ist dynamisch, ohne Systemneustart möglich



Fallbeispiel: Windows, Cluster

- Cluster = in Windows adressierbarer Filesystemblock
- Cluster besteht aus einem oder mehreren Sektoren
- **FAT-x** → x gibt die Anzahl der Bits an, die für die Clusteradressierung verwendet werden
- Bit-Anzahl bestimmt die Größe des Filesystems



Fallbeispiel: Windows, Überblick zu Dateisystemen

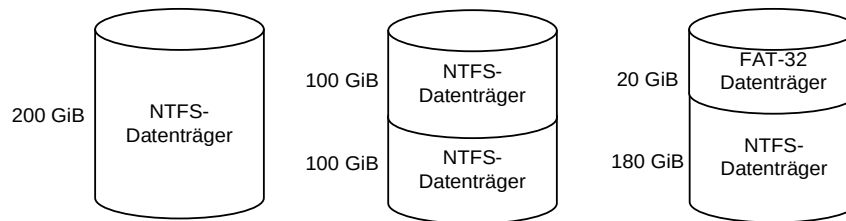
- **FAT-16** ist das alte MS-DOS Filesystem
 - nutzt 16-Bit Plattenadressen und max. 2 GiB (GibiByte) große Partitionen
- **FAT-32** ist das alte MS-DOS Filesystem
 - nutzt 32-Bit Plattenadressen und max. 2 TiB große (TebiByte) Partitionen
- **NTFS** (NT File System) ist das moderne, hierarchische Filesystem von Windows 2000
 - NTFS nutzt 64-Bit Plattenadressen und unterstützt Partitionen bis zu einer Größe von 2^{64} Byte
- Windows unterstützt auch **Read-Only Filesysteme** für DVDs (UDF) und CD-ROMs (CDFS)

Fallbeispiel: Windows, Filesysteme-Überblick

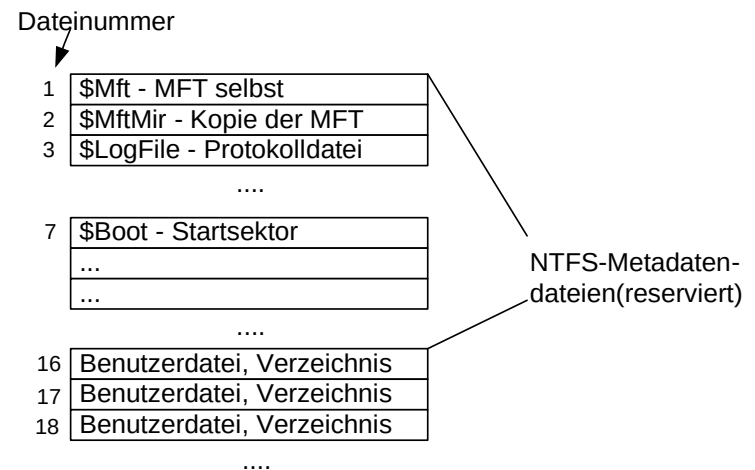
File-system	Bits für Clusterindex	Anzahl Cluster	Unterstützte Clustergrößen	Maximale Filesystemgröße
FAT-12	12 Bit	$2^{12} = 4.096$	512 Byte – 8 KiB	32 MiB
FAT-16	16 Bit	$2^{16} = 65.536$	512 Byte – 64 KiB	4 GiB (GibiByte)
FAT-32	32 Bit, aber nur 28 genutzt	2^{28}	512 Byte – 32 KiB	8 TiB (TebiByte) begrenzt auf 32 GiB
NTFS	64 Bit	2^{64}	512 Byte – 64 KiB	16 EiB (ExbiByte) begrenzt auf 256 TiB

Fallbeispiel: Windows, Partitionierung

- Plattenpartitionierung in NTFS
- Eine Platte kann mehrere logische Datenträger (Volumes) enthalten
- Festlegung bei der Formatierung, Beispiel:



- Eine Master File Table (MFT) je Volume
- Für jede Datei und jedes Verzeichnis ein oder mehrere Einträge in der MFT



Überblick

1. Geräteverwaltung
 - Überblick
 - Treiber, Gerätetypen, Gerätemodelle,...
 - Fallbeispiel: Unix
2. Dateisysteme
 - Grundlagen
 - Fallbeispiel: Unix
 - Fallbeispiel: Windows
3. **Storage Systeme**
 - RAID
 - SAN, NAS

Storage Systeme

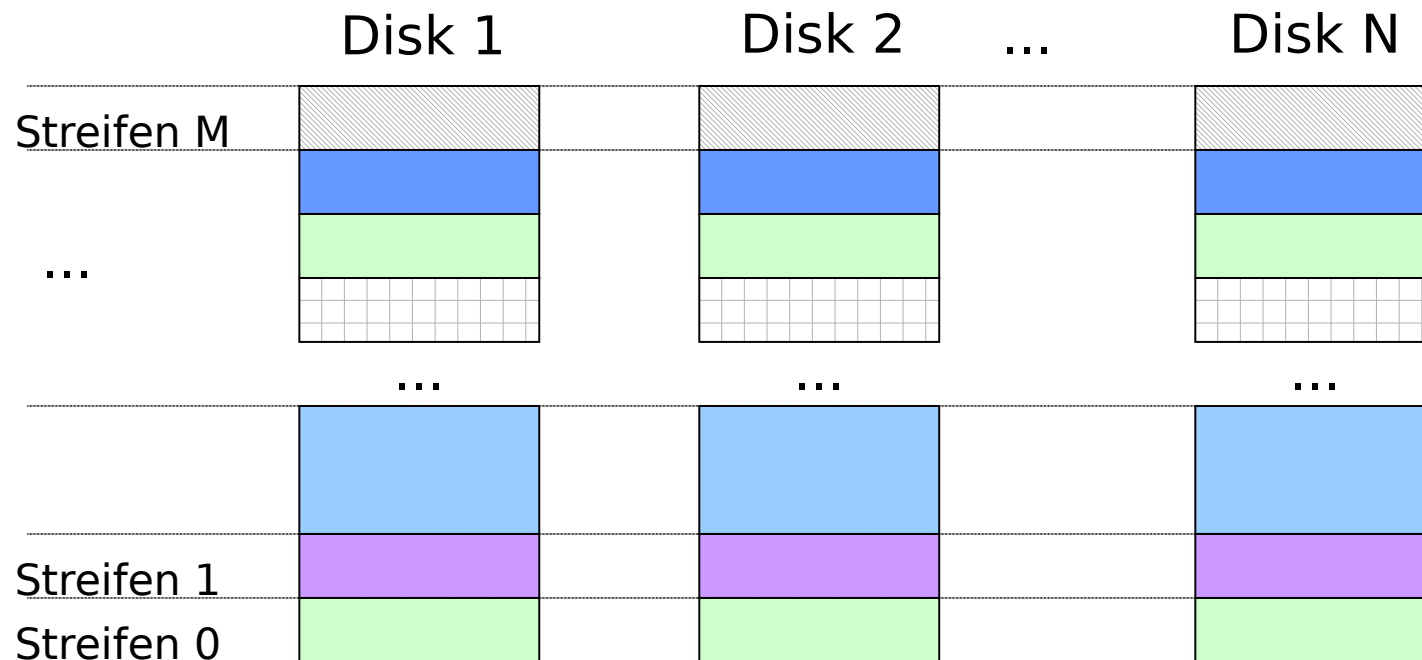
- Bisher betrachtet:
 - **DAS:** Direct Attached Storage = herkömmliche Speichersysteme
- Weitere wichtige Begriffe:
 - **RAID-Systeme**
 - **SAN:** Storage Area Network, Hochgeschwindigkeitsnetzwerk zwischen Servern und Subsystemen
 - **NAS:** Network Attached Storage, NAS-Systeme sind Dateiserver, keine Festplattenserver

RAID-Plattensysteme

- Multiple Plattenspeicher, sog. RAIDs
 - RAID steht für **R**edundant **A**rray of **I**nexpensive (heute **I**ndependent) **D**isks
 - sind heute sehr verbreitet
- Mehrere kleine Platten werden hier als große **virtuelle Platte** verwaltet
- Man verwendet RAID-Systeme auch zur Verbesserung der **Leistung** und zur Erhöhung der **Ausfallsicherheit**
- In HW implementiert für Betriebssystem transparent, als SW vom BS selbst betrieben
- Es werden verschiedene Varianten unterschieden

RAID-Plattensysteme

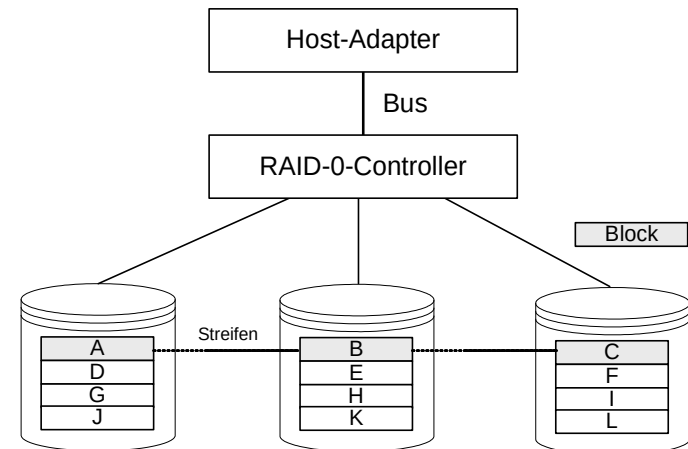
- Der gesamte logische Plattenbereich wird in Streifen (stripes) eingeteilt, die sich über mehrere Disks erstrecken



RAID-Plattensysteme

■ RAID-0-System:

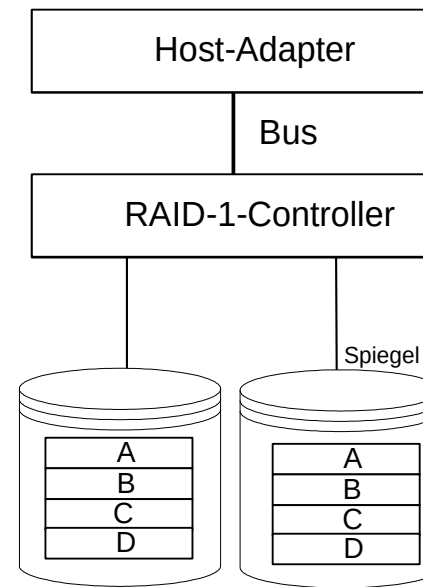
- Stripes werden über mehrere Platten eines Arrays verteilt
- Größe der Stripes beeinflusst die Leistung erheblich
 - Stripes-Größe: 32 KB, 64 KB, 128 KB (Striping-Granularität)
- Verteilung übernimmt entweder das Betriebssystem oder ein eigener RAID-Controller
- **Hoher** I/O-Durchsatz, schnelle Variante, aber **nicht** ausfallsicher



RAID-Plattensysteme

■ **RAID-1-System:**

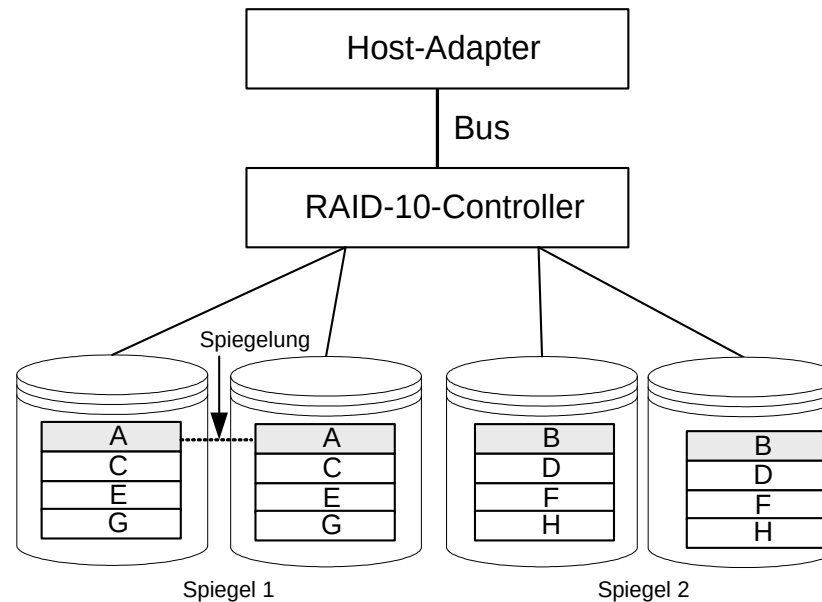
- Spiegelung der Daten, volle Redundanz der Daten
- Spiegelung durch Betriebssystem oder eigenen RAID-Controller möglich
- Ausfallsicher aber langsam



RAID-Plattensysteme

■ **RAID-10-System: häufig verwendet!**

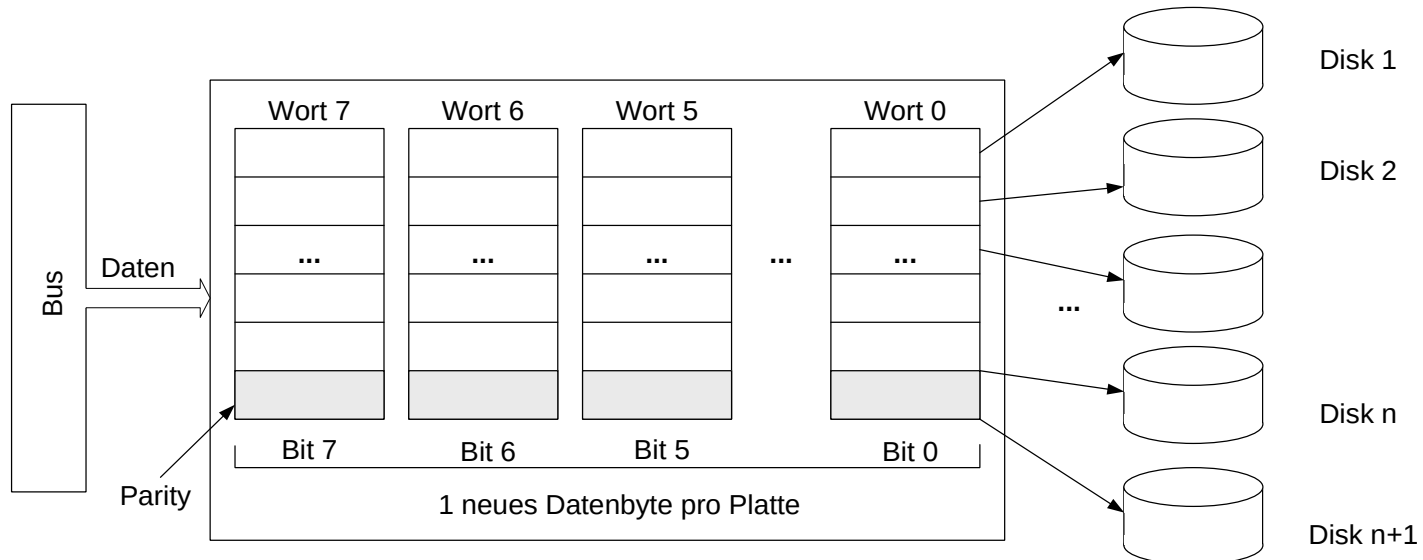
- Striping und Spiegelung, Kombination RAID-0 und RAID-1
- Schnell und ausfallsicher
- Zuerst Spiegelung und danach Striping



RAID-Plattensysteme

■ **RAID-2-System** (heute nicht mehr eingesetzt):

- Bitweises Striping und Ergänzung von Prüfdaten (Paritätsbits) zur Fehlerkorrektur
- Jedes Byte wird um ein Paritätsbit ergänzt
- Bei Ausfall einer Platte kann diese rekonstruiert werden
 - → Ausfallsicherheit für eine Platte des Arrays



RAID-Plattensysteme

■ **RAID-3-System:**

- Wie RAID-2, aber byteweises Striping
- Prüfdaten zusammenfassen und auf dedizierter Platte speichern
- Dient der Reduzierung der Kosten für die 1:1-Spiegelung (heute nicht mehr so relevant)
- Ausfall einer Platte führt nicht zu einer Ausfallzeit, Ausfall von zwei Platten schon

RAID-Plattensysteme

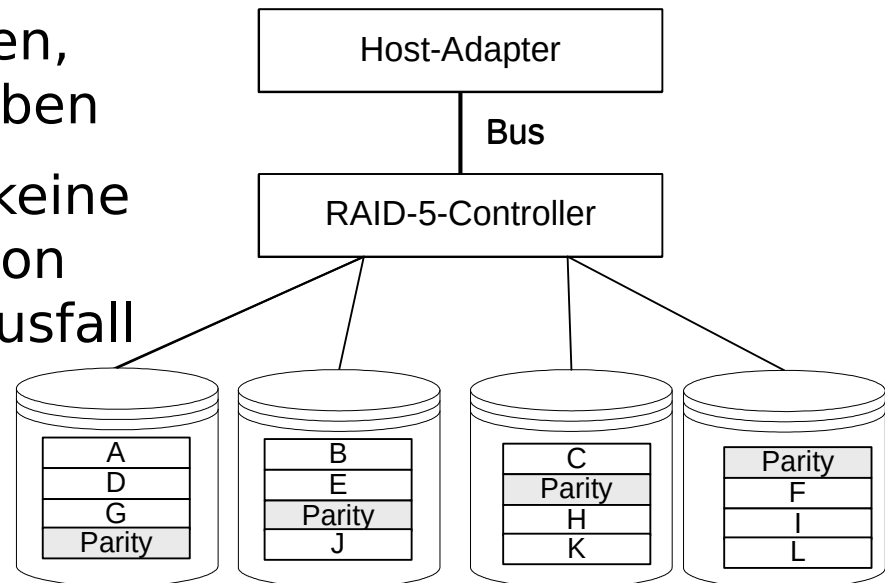
■ **RAID-4-System:**

- Block-basiertes Striping mit Prüfsummen-Disk
- Pro Streifen wird eine Prüfsumme gebildet und auf einer eigenen Platte gespeichert
- Ausfallsicherheit wie bei RAID-3, Speicheraufwand weniger als bei RAID-1, aber langsameres Schreiben

RAID-Plattensysteme

■ RAID-5-System:

- In Gegensatz zu RAID-4 werden die Paritätsabschnitte auf die beteiligten Platten verteilt → gleichmäßige Plattenauslastung
- Gute Leistung beim Lesen, schlechtere beim Schreiben
- Verlust einer Platte hat keine Auswirkungen, Verlust von zwei Platten bedeutet Ausfall
- Nicht so geeignet bei hoher Transaktionslast



RAID-Plattensysteme

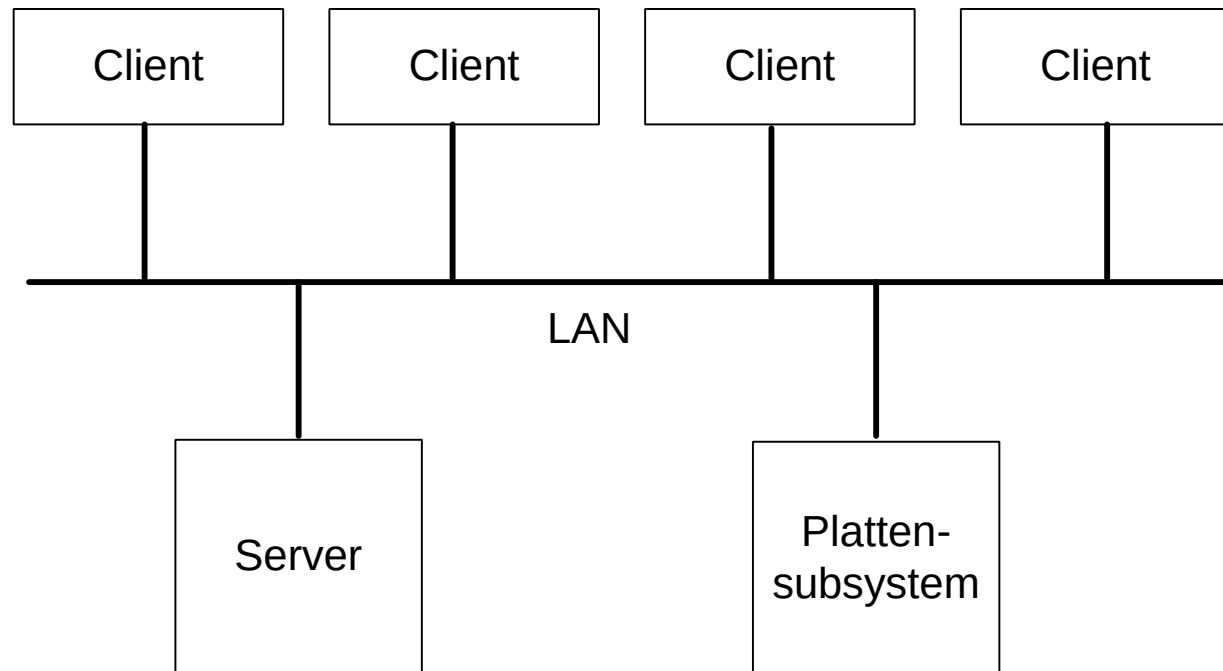
■ **RAID-6-System:**

- Wie RAID-5 mit redundanten Prüfdaten auf weiterer Platte, so dass sogar der Ausfall von zwei Platten ohne Auswirkung bleibt
- Gute Leistung beim Lesen, Schreibleistung schlechter als RAID-5
- Geeignet für sehr hohe Ausfallsicherheitsanforderungen

Network Attached Storage

■ NAS

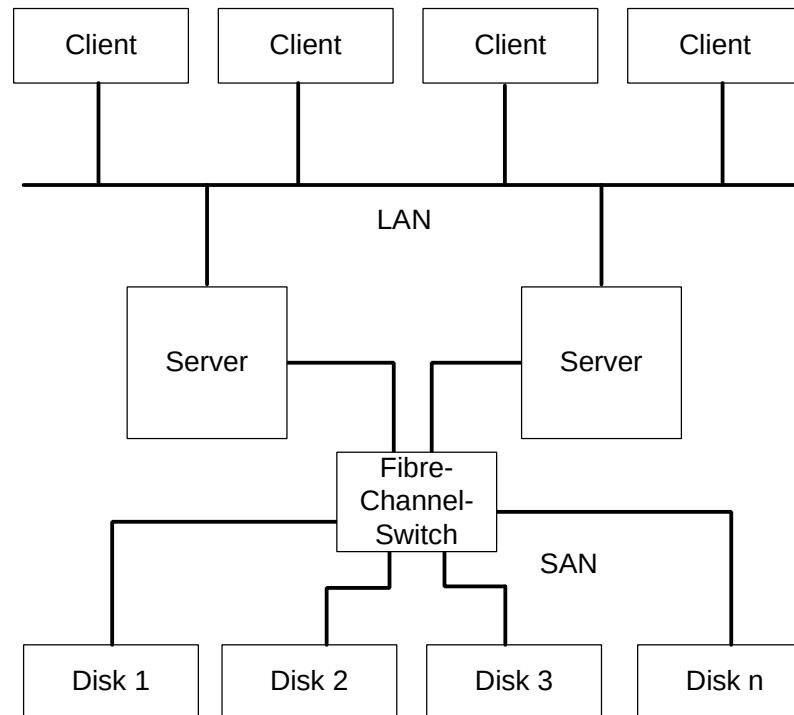
- Massenspeichereinheiten, die an ein lokales Netzwerk (LAN) angeschlossen sind
- Nachteil: belasten das Netzwerk



Storage Area Networks

■ SAN

- Eigenes Netzwerk zwischen Servern und den Speicherressourcen
- Speicher kann virtuell wie eine einzige Festplatte behandelt werden



Zusammenfassung

- Geräte- und Dateiverwaltung sind eigene Softwareschichten im Kernel
- SSDs/Festplatten wichtigstes externes Speichermedium
- Dateien und Dateisysteme (FAT, NTFS, Unix-Dateisysteme) als Abstraktion
- RAID-Systeme dienen der gesicherten Datenspeicherung
 - RAID 1, RAID-10 und RAID 5 oft im Einsatz
- NAS- bzw. SAN sind Storage-Systeme, die sich weiter Verbreitung erfreuen

Gesamtüberblick

- ✓ Einführung in Computersysteme
- ✓ Entwicklung von Betriebssystemen
- ✓ Architekturansätze
- ✓ Interruptverarbeitung in Betriebssystemen
- ✓ Prozesse und Threads
- ✓ CPU-Scheduling
- ✓ Synchronisation und Kommunikation
- ✓ Speicherverwaltung
- ✓ Geräte- und Dateiverwaltung

10. Betriebssystemvirtualisierung