



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN

Fakultät Informatik Institut für Systemarchitektur, Professur für Betriebssysteme

BETRIEBSSYSTEME UND SICHERHEIT

mit Material von Olaf Spinczyk,
Universität Osnabrück

Ein- und Ausgabe

<https://tud.de/inf/os/studium/vorlesungen/bs>

HORST SCHIRMEIER

Inhalt

- Wiederholung
- Ein-/Ausgabe-Hardware
- Geräteprogrammierung
- Aufgaben des Betriebssystems
- Zusammenfassung

Silberschatz, Kap. ...
13: *I/O-Systems*

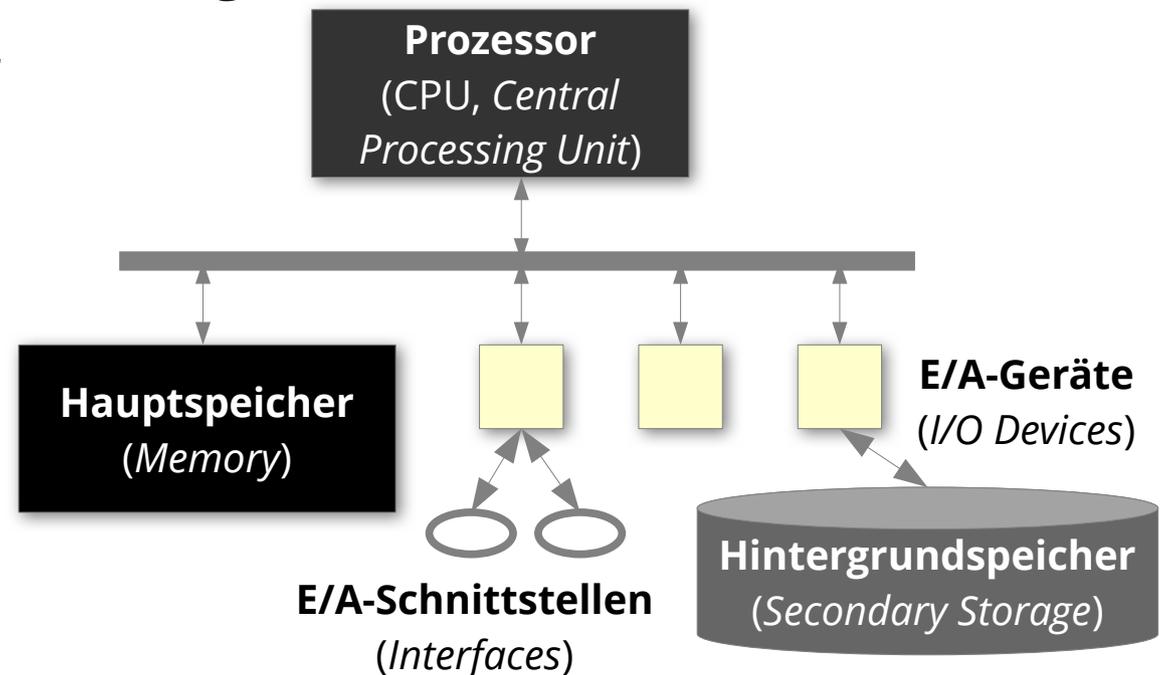
Tanenbaum, Kap. ...
5: Ein- und Ausgabe

Inhalt

- **Wiederholung**
- Ein-/Ausgabe-Hardware
- Geräteprogrammierung
- Aufgaben des Betriebssystems
- Zusammenfassung

Wiederholung

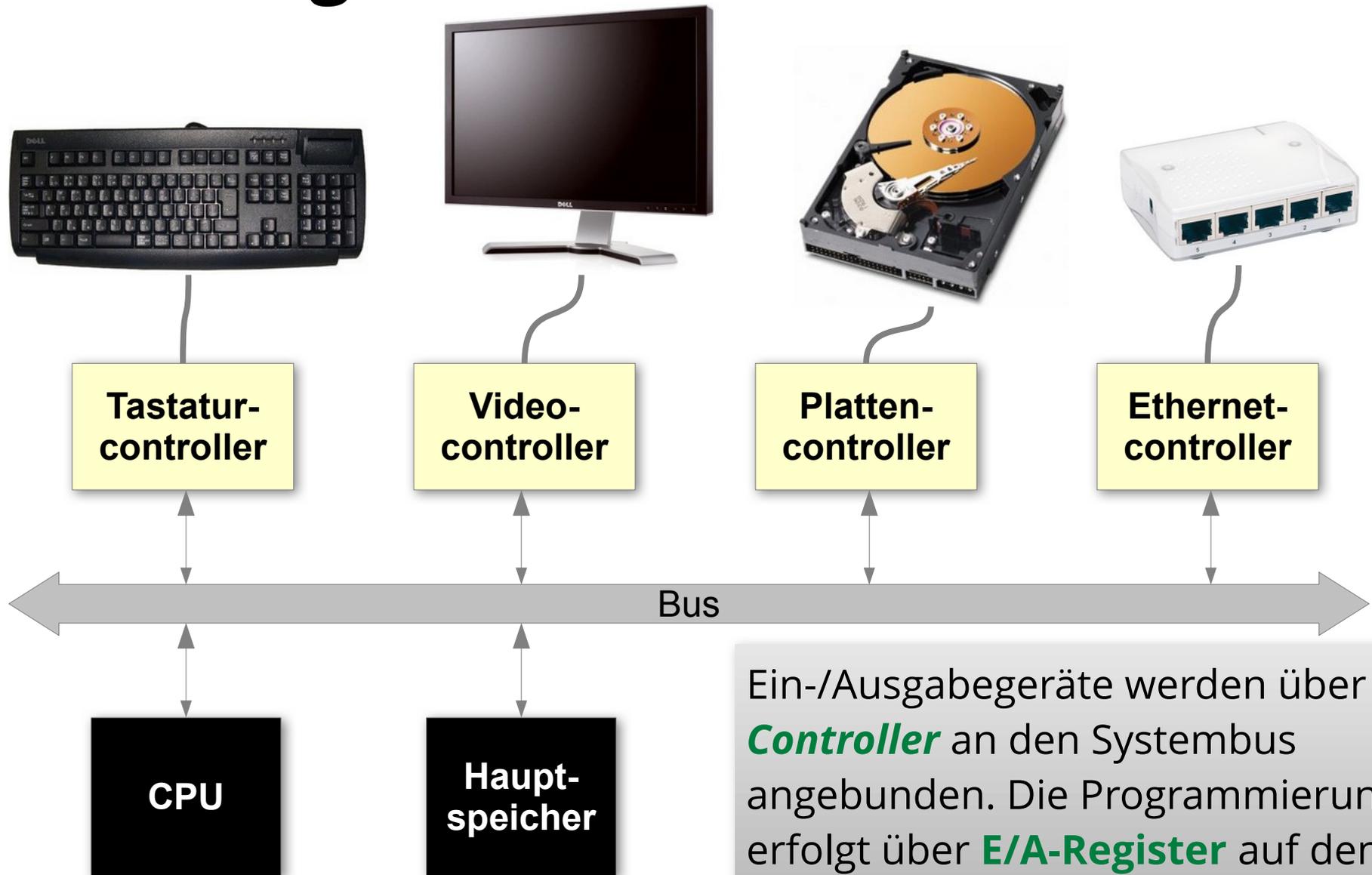
- In den bisherigen Vorlesungen:
 - CPU
 - Hauptspeicher
- In der kommenden Vorlesung:
 - Hintergrundspeicher
- **Heute: E/A-Geräte**



Inhalt

- Wiederholung
- **Ein-/Ausgabe-Hardware**
- Geräteprogrammierung
- Aufgaben des Betriebssystems
- Zusammenfassung

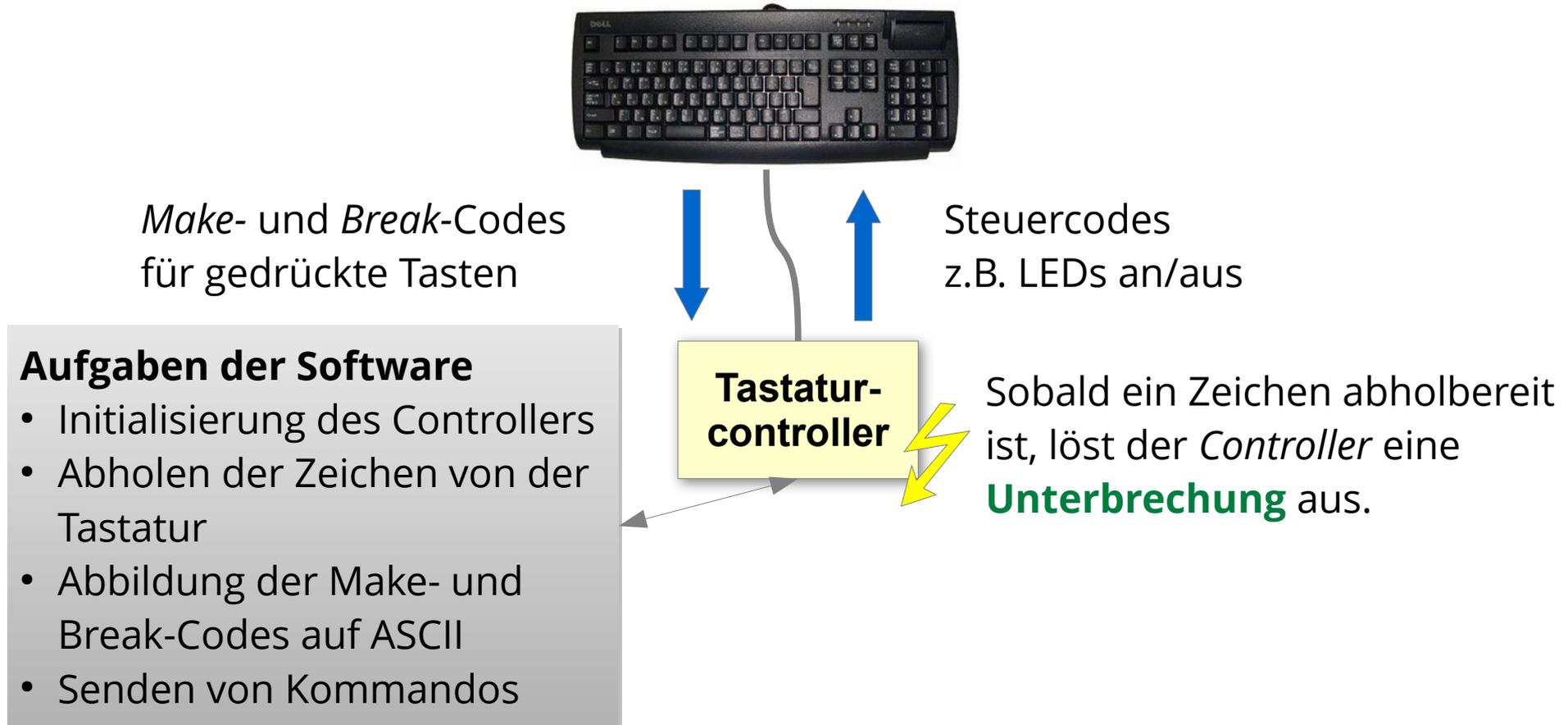
Anbindung von E/A-Geräten



Ein-/Ausgabegeräte werden über **Controller** an den Systembus angebunden. Die Programmierung erfolgt über **E/A-Register** auf den Controllern.

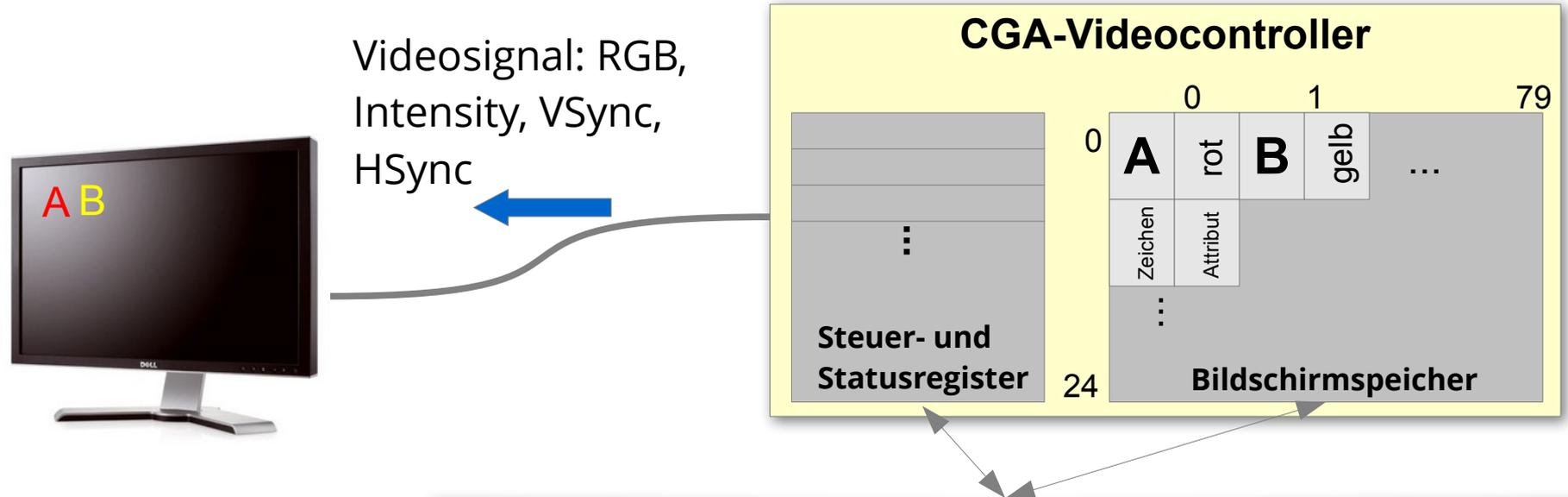
Beispiel: PC-Tastatur

- serielle zeichenweise Kommunikation
 - Tastatur ist „intelligent“ (besitzt eigenen Prozessor)



Beispiel: CGA-Videocontroller

- Kommunikation über Videosignal
 - Umwandlung des Bildschirmspeicherinhalts in Bild (80x25 Zeichen)

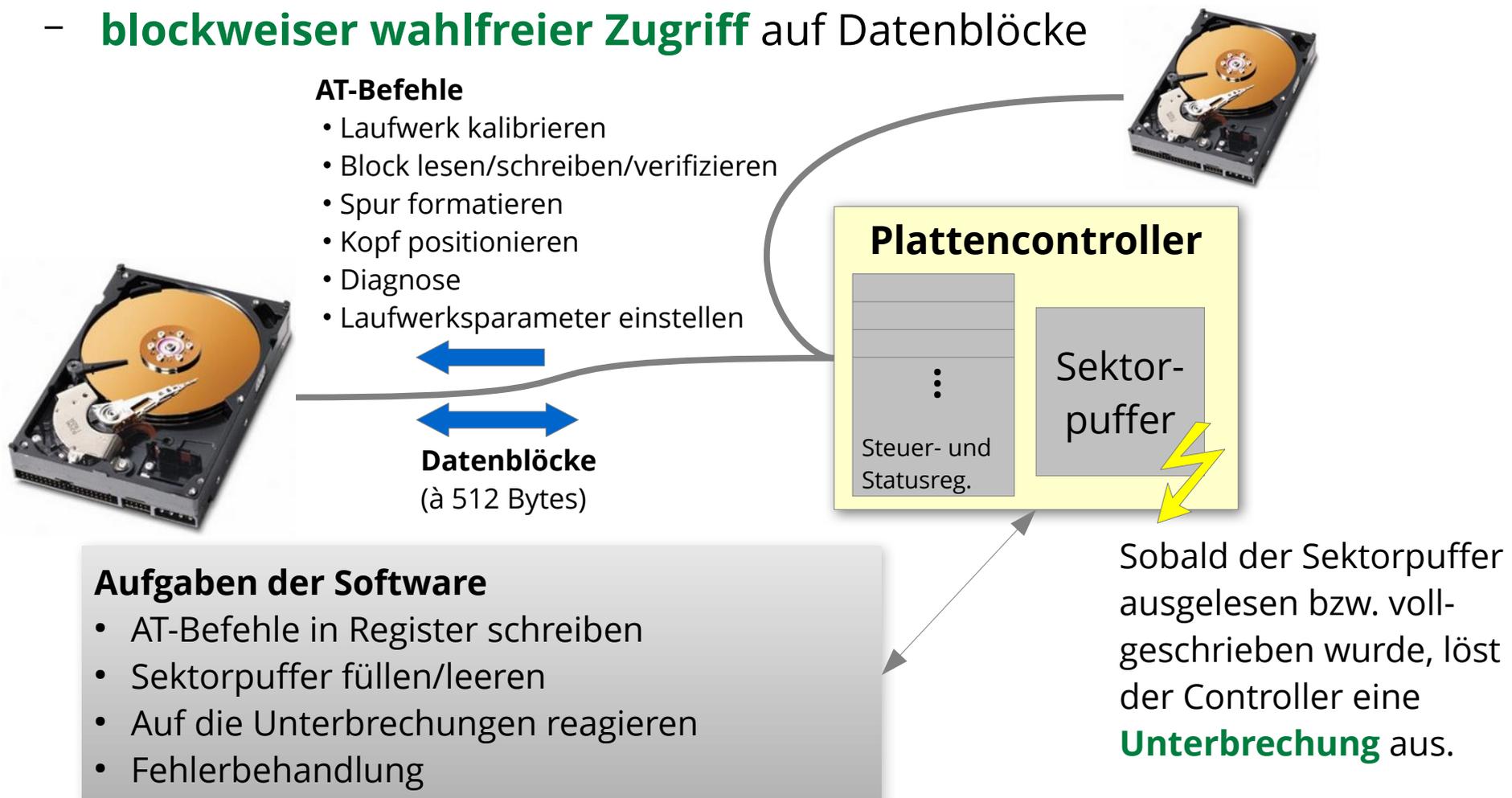


Aufgaben der Software

- Initialisierung des Controllers
- Bildschirmspeicher mit den gewünschten Zeichencodes füllen
- Steuerung der Position des Cursors
- Cursor an- und abschalten

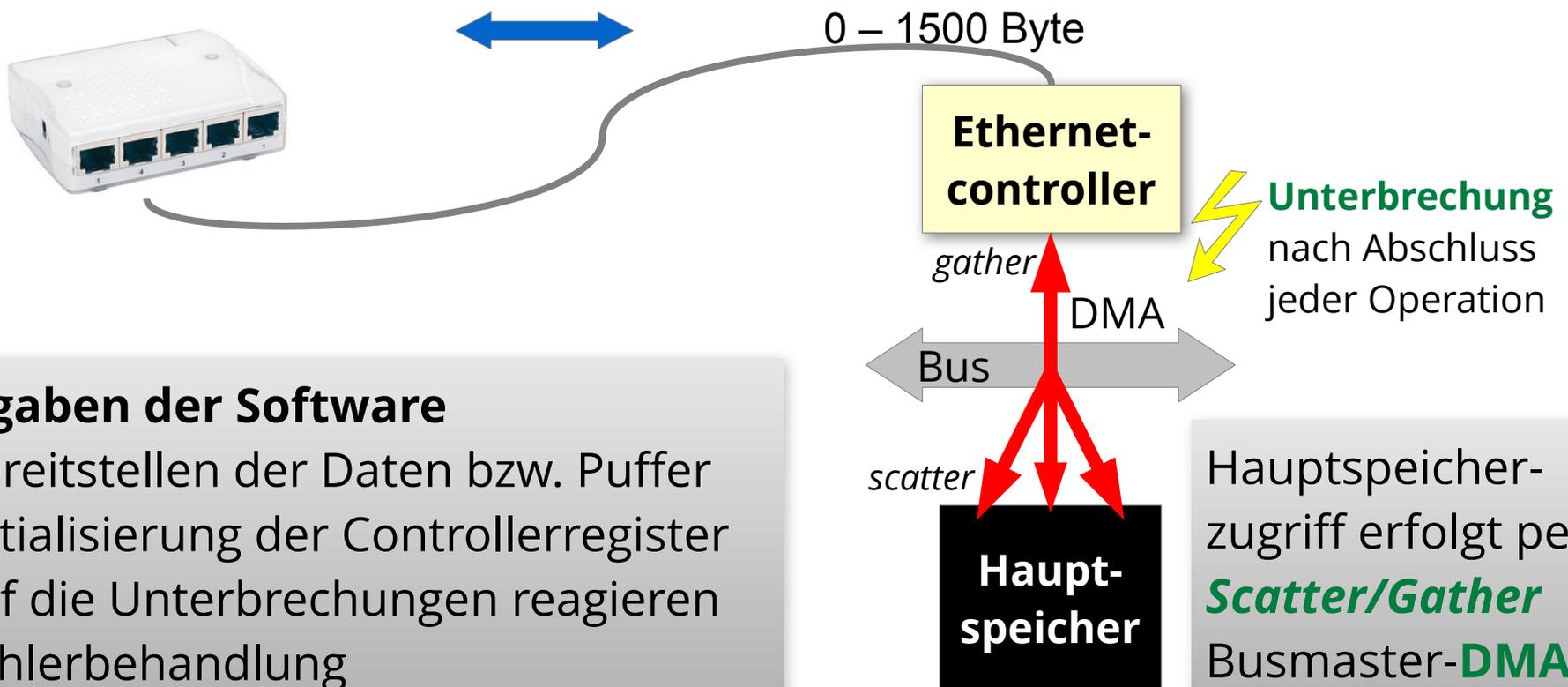
Beispiel: IDE-Plattencontroller

- Kommunikation über AT-Befehle
 - **blockweiser wahlfreier Zugriff** auf Datenblöcke



Beispiel: Ethernet-Controller

- serielle paketbasierte Buskommunikation
 - Pakete haben eine variable Größe und enthalten Adressen



Aufgaben der Software

- Bereitstellen der Daten bzw. Puffer
- Initialisierung der Controllerregister
- auf die Unterbrechungen reagieren
- Fehlerbehandlung

Hauptspeicherzugriff erfolgt per **Scatter/Gather** Busmaster-**DMA**.

Geräteklassen

- **zeichenorientierte Geräte**
 - Tastatur, Drucker, Modem, Maus, ...
 - meist rein **sequentieller Zugriff**, selten wahlfreie Positionierung
- **blockorientierte Geräte**
 - Festplatte, Diskette, CD-ROM, DVD, Bandlaufwerke, ...
 - meist **wahlfreier blockweiser Zugriff** (*random access*)
- Andere Geräte passen weniger gut in dieses Schema:
 - Grafikkarten (insbesondere 3D-Beschleunigung)
 - Netzwerkkarten (Protokolle, Adressierung, *Broadcast/Multicast*, Nachrichtenfilterung, ...)
 - Zeitgeberbaustein (einmalige oder periodische Unterbrechungen)
 - ...

Unterbrechungen ...

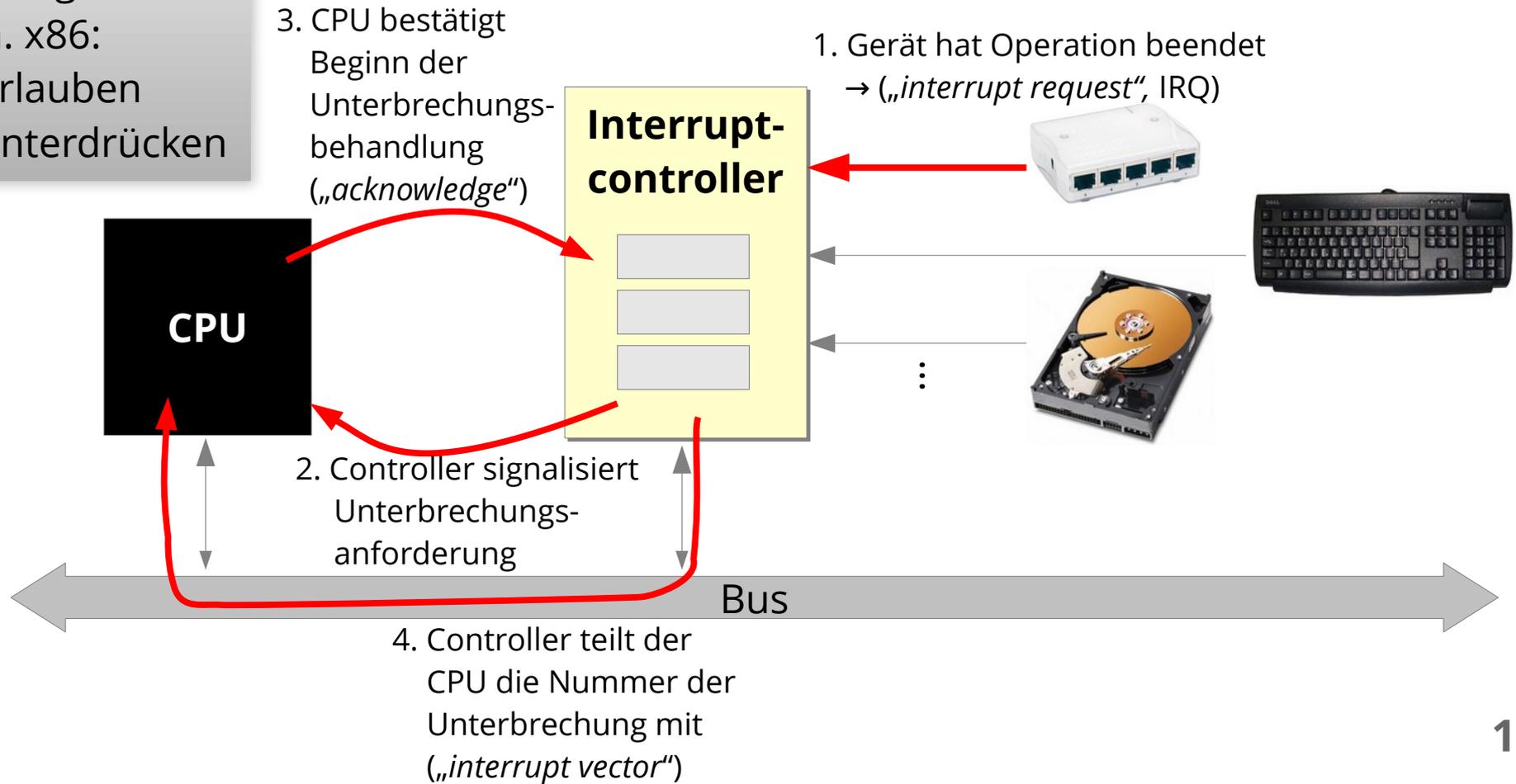
- signalisieren, dass die Software aktiv werden muss

Software kann IRQ-
Behandlung unter-
drücken. x86:

sti → erlauben

cli → unterdrücken

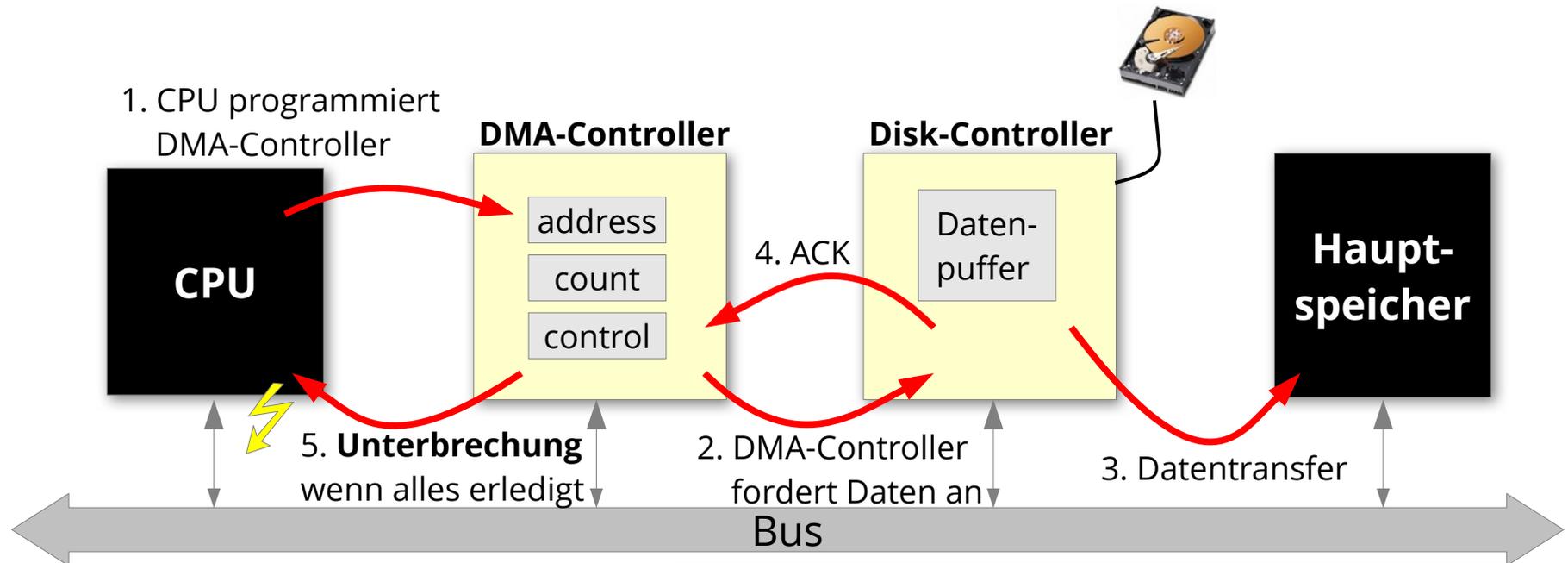
Ablauf einer Unterbrechungsbehandlung auf der Hardwareebene



Direct Memory Access (DMA) ...

- ... wird von komplexen Controllern benutzt, um Daten unabhängig von der CPU in den bzw. aus dem Hauptspeicher zu transferieren.

Durchführung eines DMA-Transfers



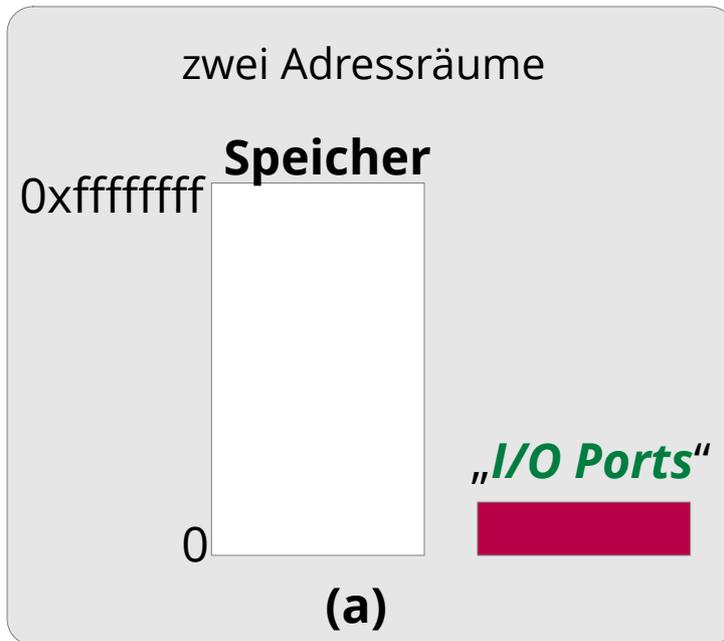
2., 3. und 4. wird in Abhängigkeit von **count** wiederholt durchgeführt

Inhalt

- Wiederholung
- Ein-/Ausgabe-Hardware
- **Geräteprogrammierung**
- Aufgaben des Betriebssystems
- Zusammenfassung

Ein-/Ausgabeadressraum

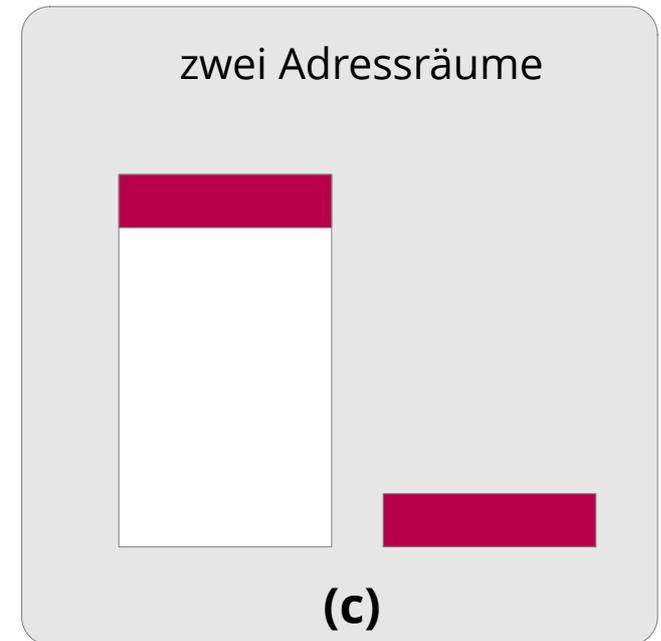
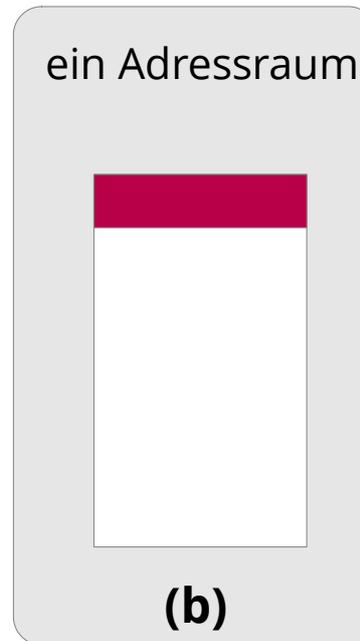
- Zugriff auf Controller-Register und Controller-Speicher erfolgt je nach Systemarchitektur ...



(a) separater E/A-Adressraum

- anzusprechen über spezielle Maschineninstruktionen

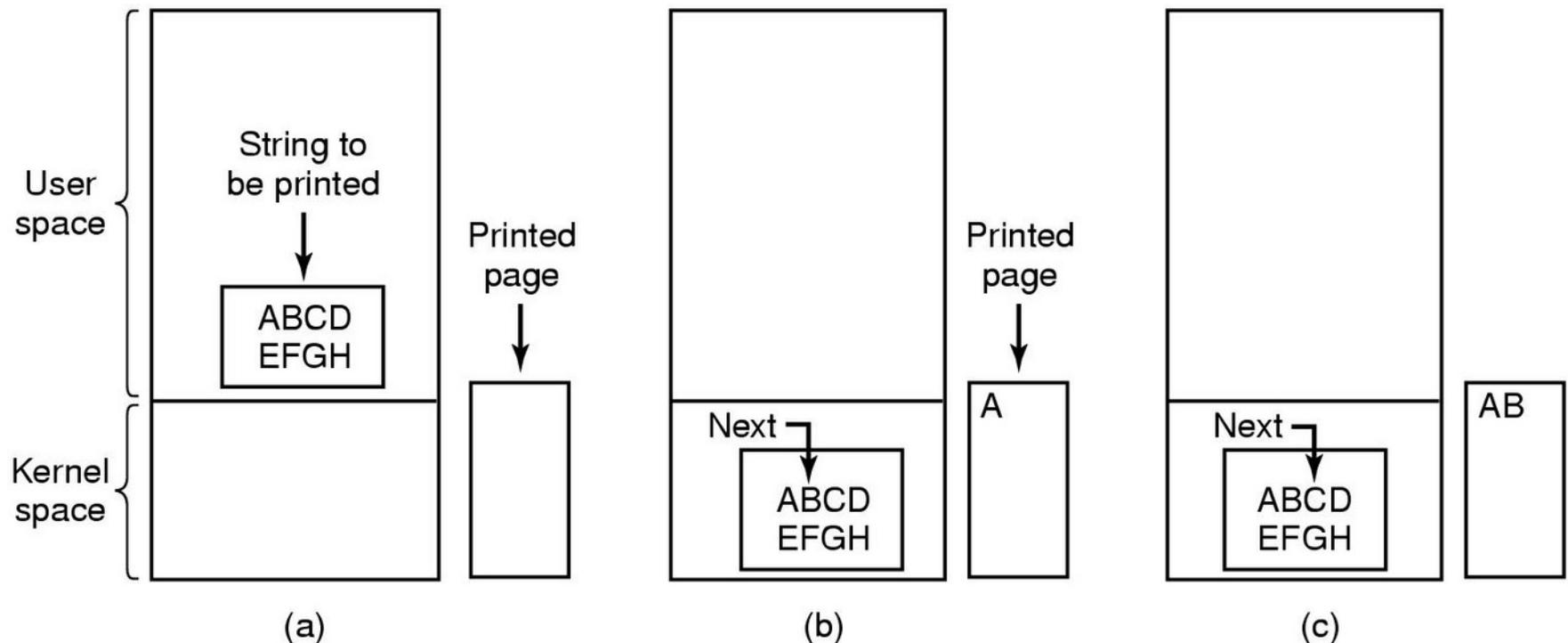
(b) gemeinsamer Adressraum (*Memory-Mapped I/O*)



(c) hybride Architektur

Arbeitsweise von Gerätetreibern

- Je nach Fähigkeiten des Geräts erfolgt E/A mittels ...
 - **Polling** (oder „Programmierte E/A“),
 - **Unterbrechungen** oder
 - **DMA**
- **Beispiel:** Drucken einer Textzeile



Polling (oder „Programmierte E/A“)

... bedeutet **aktives Warten** auf ein Ein-/Ausgabegerät.

```
/* Zeichen in Kern-Puffer p kopieren */
copy_from_user (buffer, p, count);

/* Schleife über alle Zeichen */
for (i = 0; i < count; i++) {

    /* Warte "aktiv" bis Drucker bereit */
    while (*printer_status_reg != READY)
        ;

    /* Ein Zeichen ausgeben */
    *printer_data_reg = p[i];
}

return_to_user ();
```

Pseudo-Code einer Betriebssystemfunktion zum Drucken von Text im *Polling*-Betrieb

Unterbrechungsgetriebene E/A

... bedeutet, dass die CPU während der Wartezeit einem anderen Prozess zugeteilt werden kann.

```
copy_from_user (buffer, p, count);  
/* Druckerunterbrechungen erlauben */  
enable_interrupts ();  
/* Warte bis Drucker bereit */  
while (*printer_status_reg != READY);  
/* Erstes Zeichen ausgeben */  
*printer_data_reg = p[i++];  
scheduler ();  
return_to_user ();
```

Code, der die E/A-Operation initiiert

```
if (count > 0) {  
    *printer_data_reg = p[i];  
    count--;  
    i++;  
}  
else  
    unblock_user ();  
acknowledge_interrupt ();  
return_from_interrupt ();
```

Unterbrechungsbehandlungsroutine

DMA-getriebene E/A

... bedeutet, dass die Software nicht mehr für den Datentransfer zwischen Controller und Hauptspeicher zuständig ist.

- Die CPU wird weiter entlastet.

```
copy_from_user (buffer, p, count);  
set_up_DMA_controller (p, count);  
scheduler ();  
return_to_user ();
```

Code, der die E/A-Operation initiiert

```
acknowledge_interrupt ();  
unblock_user ();  
return_from_interrupt ();
```

Unterbrechungsbehandlungsroutine

Diskussion: Unterbrechungen

- Kontextsicherung:
 - Wird teilweise von der CPU selbst erledigt.
 - z.B. Statusregister und Rücksprungadresse, aber nur das Minimum.
 - **Alle veränderten Register** müssen gesichert und am Ende der Behandlung wiederhergestellt werden.
- Behandlungsroutine möglichst kurz:
 - Während der Unterbrechungsbehandlung werden i.d.R. weitere Unterbrechungen unterdrückt.
 - Es droht der **Verlust** von Unterbrechungen.
 - Möglichst nur den Prozess wecken, der auf E/A-Beendigung wartet.

Diskussion: Unterbrechungen (2)

- Unterbrechungen sind die Quelle der Asynchronität
 - Ursache für *Race Conditions* im Betriebssystemkern
- Unterbrechungssynchronisation:
 - einfachste Möglichkeit: **Unterbrechungsbehandlung** durch die CPU zeitweise „hart“ **verbieten**, während kritische Abschnitte durchlaufen werden.
 - x86: *sti, cli*
 - wieder Gefahr des Unterbrechungsverlusts
 - In realen BS gängig: **mehrstufige Behandlungen**, durch die das harte Sperren von Unterbrechungen minimiert wird.
 - UNIX: *Top Half, Bottom Half*
 - Linux: *Tasklets*
 - Windows: *Deferred Procedures*

Diskussion: *Direct Memory Access*

- **Caches**

- Heutige Prozessoren arbeiten mit Daten-Caches;
DMA läuft am Cache vorbei!
- Vor dem Aufsetzen eines DMA-Vorgangs muss der Cache-Inhalt in den Hauptspeicher zurückgeschrieben und invalidiert werden bzw. der Cache darf für die entsprechende Speicherregion nicht eingesetzt werden.

- **Speicherschutz**

- Heutige Prozessoren verwenden eine MMU zur Isolation von Prozessen und zum Schutz des Betriebssystems;
DMA läuft am Speicherschutz vorbei!
- Fehler beim Aufsetzen von DMA-Vorgängen sind extrem kritisch.
- Anwendungsprozesse dürfen DMA-Controller nie direkt programmieren!

Inhalt

- Wiederholung
- Ein-/Ausgabe-Hardware
- Geräteprogrammierung
- **Aufgaben des Betriebssystems**
- Zusammenfassung

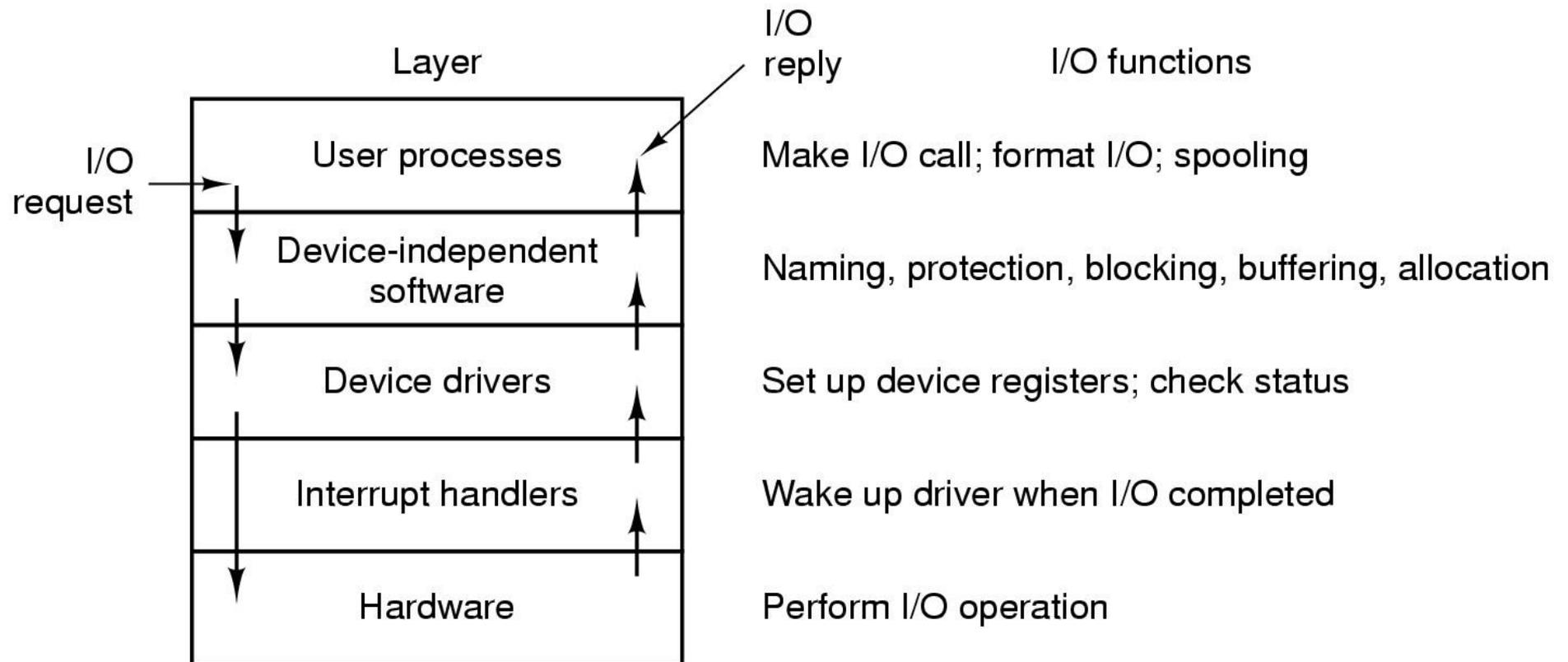
Aufgaben des Betriebssystems

- **Geräteabstraktionen** schaffen
 - einheitlich, einfach, aber vielseitig
- **Ein-/Ausgabenprimitiven** bereitstellen
 - synchron und/oder asynchron
- **Pufferung**
 - falls das Gerät bzw. der Empfängerprozess noch nicht bereit ist
- **Geräteansteuerung**
 - möglichst effizient unter Beachtung mechanischer Eigenschaften
- **Ressourcenzuordnung** verwalten
 - bei **teilbaren** Geräten: Welcher Prozess darf wo lesen/schreiben?
 - bei **unteilbaren** Geräten: zeitweise Reservierungen
- **Stromsparszustände** verwalten
- **Plug&Play** unterstützen
- ...

Aufgaben des Betriebssystems

- **Geräteabstraktionen** schaffen
 - einheitlich, einfach, aber vielseitig
- **Ein-/Ausgabenprimitiven** bereitstellen
 - synchron und/oder asynchron
- **Pufferung**
 - falls das Gerät bzw. der Empfängerprozess noch nicht bereit ist
- **Geräteansteuerung**
 - möglichst effizient unter Beachtung mechanischer Eigenschaften
- **Ressourcenzuordnung** verwalten
 - bei **teilbaren** Geräten: Welcher Prozess darf wo lesen/schreiben?
 - bei **unteilbaren** Geräten: zeitweise Reservierungen
- **Stromsparzustände** verwalten
- **Plug&Play** unterstützen
- ...

Schichten des E/A-Subsystems



Quelle: Tanenbaum, „Modern Operating Systems“

UNIX: Geräteabstraktionen

- Periphere Geräte werden als **Spezialdateien** repräsentiert:
 - Geräte können **wie Dateien** mit Lese- und Schreiboperationen angesprochen werden.
 - Öffnen der Spezialdateien schafft eine Verbindung zum Gerät, die durch einen Treiber hergestellt wird.
 - direkter Durchgriff vom Anwender auf den Treiber
- **blockorientierte Spezialdateien** (*block devices*)
 - Plattenlaufwerke, Bandlaufwerke, *Floppy Disks*, CD-ROMs
- **zeichenorientierte Spezialdateien** (*character devices*)
 - serielle Schnittstellen, Drucker, Audiokanäle etc.

UNIX: Geräteabstraktionen (2)

- Eindeutige Beschreibung der Geräte durch ein 3-Tupel:
(Gerätetyp, *Major Number*, *Minor Number*)
- **Gerätetyp:** *Block Device*, *Character Device*
- **Major Number:** Auswahlnummer für einen Treiber
- **Minor Number:** Auswahl eines Gerätes innerhalb eines Treibers

UNIX: Geräteabstraktionen (3)

- Auszug aus dem *Listing* des **/dev**-Verzeichnisses

```
brw-rw---- olaf disk 3, 0 2008-06-15 14:14 /dev/hda
brw-rw---- olaf disk 3, 64 2008-06-15 14:14 /dev/hdb
brw-r----- root disk 8, 0 2008-06-15 14:13 /dev/sda
brw-r----- root disk 8, 1 2008-06-15 14:13 /dev/sda1
crw-rw---- root uucp 4, 64 2006-05-02 08:45 /dev/ttyS0
crw-rw---- root lp 6, 0 2008-06-15 14:13 /dev/lp0
crw-rw-rw- root root 1, 3 2006-05-02 08:45 /dev/null
lrwxrwxrwx root root 3 2008-06-15 14:14 /dev/cdrecorder -> hdb
lrwxrwxrwx root root 3 2008-06-15 14:14 /dev/cdrom -> hda
```



Zugriffs-
rechte

Eigen-
tümer

Major und
Minor No.

Erstellungs-
zeitpunkt der
Spezialdatei

Name der
Spezialdatei

c: character device

b: block device

l: link

UNIX: Zugriffsprimitiven

Das Wichtigste in Kürze ... (siehe Manpages: `man 2 open` usw.)

- `int open(const char *devname, int flags)`
 - „Öffnen“ eines Geräts. Liefert **Dateideskriptor** als Rückgabewert.
- `off_t lseek(int fd, off_t offset, int whence)`
 - Positioniert den **Schreib-/Lesezeiger** – natürlich nur bei Geräten mit wahlfreiem Zugriff.
- `ssize_t read(int fd, void *buf, size_t count)`
 - Einlesen von max. **count** Bytes in Puffer **buf** von Deskriptor **fd**
- `ssize_t write(int fd, const void *buf, size_t count)`
 - Schreiben von **count** Bytes aus Puffer **buf** auf Deskriptor **fd**
- `int close(int fd)`
 - „**Schließen**“ eines Geräts. Dateideskriptor **fd** kann danach nicht mehr benutzt werden.

UNIX: Gerätespezifische Funktionen

- Spezielle Geräteeigenschaften werden über **ioctl** angesprochen:

```
IOCTL(2)                Linux Programmer's Manual                IOCTL(2)

NAME
    ioctl - control device

SYNOPSIS
    #include <sys/ioctl.h>

    int ioctl(int d, int request, ...);
```

- Schnittstelle generisch, Semantik gerätespezifisch:

CONFORMING TO

```
No single standard. Arguments, returns, and semantics of
ioctl(2) vary according to the device driver in question
(the call is used as a catch-all for operations that
don't cleanly fit the Unix stream I/O model). The ioctl
function call appeared in Version 7 AT&T Unix.
```

UNIX: Warten auf mehrere Geräte

- bisher: Lese- oder Schreibaufrufe **blockieren**
 - Was tun beim Lesen von mehreren Quellen?
- **Alternative 1:** nichtblockierende Ein-/Ausgabe
 - `O_NDELAY` beim `open()`
 - *Polling*-Betrieb: Prozess muss immer wieder `read()` aufrufen, bis etwas vorliegt
 - unbefriedigend, da **Verschwendung von CPU-Zeit**

UNIX: Warten auf mehrere Geräte (2)

- **Alternative 2:** Blockieren an *mehreren* Dateideskriptoren

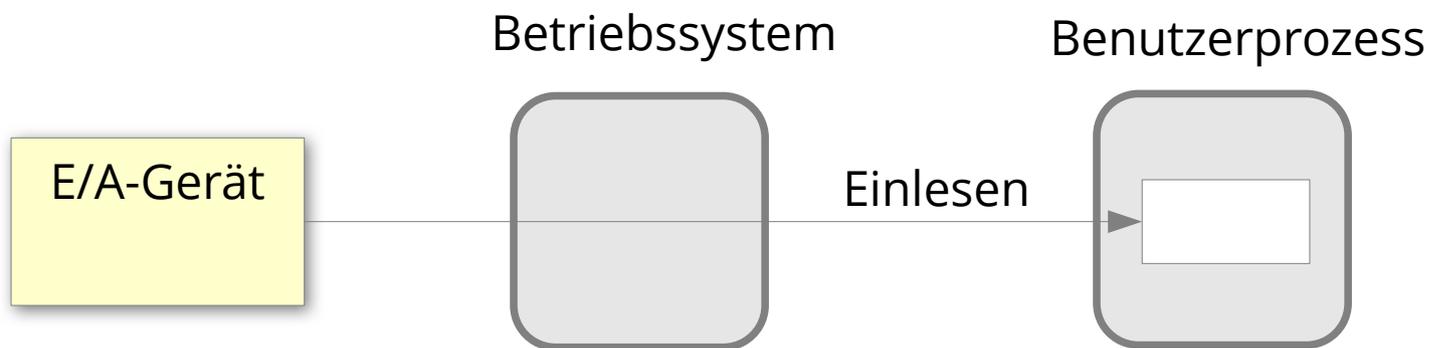
- **Systemaufruf:**

```
int select (int nfd, fd_set *readfds, fd_set *writefds,  
           fd_set *errorfds, struct timeval *timeout);
```

- `nfd` legt fest, bis zu welchem Dateideskriptor ***select*** wirken soll.
- ...`fds` sind Dateideskriptoren, auf die gewartet werden soll:
 - `readfds` — bis etwas zum Lesen vorhanden ist
 - `writefds` — bis man schreiben kann
 - `errorfds` — bis ein Fehler aufgetreten ist
- *Timeout* legt fest, wann der Aufruf spätestens deblockiert.
- Makros zum Erzeugen der Dateideskriptormengen
- **Ergebnis:** In den Dateideskriptormengen sind nur noch die Dateideskriptoren vorhanden, die zur Deblockade führten.

Pufferung bei E/A-Operationen

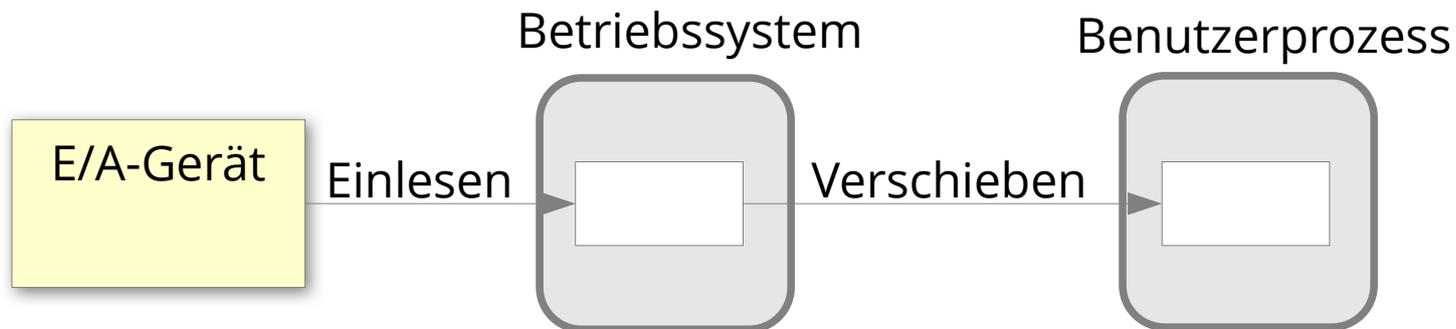
- **Probleme** ohne Datenpuffer im Betriebssystem:
 - Daten, die eintreffen, bevor **read** ausgeführt wurde (z.B. von der Tastatur), müssten verloren gehen.
 - Wenn ein Ausgabegerät beschäftigt ist, müsste **write** scheitern oder den Prozess blockieren, bis das Gerät wieder bereit ist.
 - Ein Prozess, der eine E/A-Operation durchführt, kann nicht ausgelagert werden.



(a) Leseoperation ohne Puffer

E/A-Einzelpuffer

- Einlesen:
 - Daten können vom System entgegengenommen werden, auch wenn der Leserprozess noch nicht **read** aufgerufen hat.
 - Bei Blockgeräten kann der nächste Block vorausschauend gelesen werden, während der vorherige verarbeitet wird.
 - Prozess kann problemlos ausgelagert werden. DMA erfolgt in Puffer.
- Schreiben:
 - Daten werden kopiert. Aufrufer blockiert nicht. Datenpuffer im Benutzeradressraum kann sofort wiederverwendet werden.



(b) Leseoperation mit Einzelpuffer

E/A-Einzelpuffer

Leistungsabschätzung

Eine einfache Rechnung zeigt den Leistungsgewinn beim wiederholten blockweisen Lesen mit anschließender Verarbeitung:

- T: Dauer der Leseoperation
C: Rechenzeit für die Verarbeitung
M: Dauer des Kopiervorgang (Systempuffer→Benutzerprozess)
- G: Gesamtdauer für Lesen und Verarbeiten eines Blocks

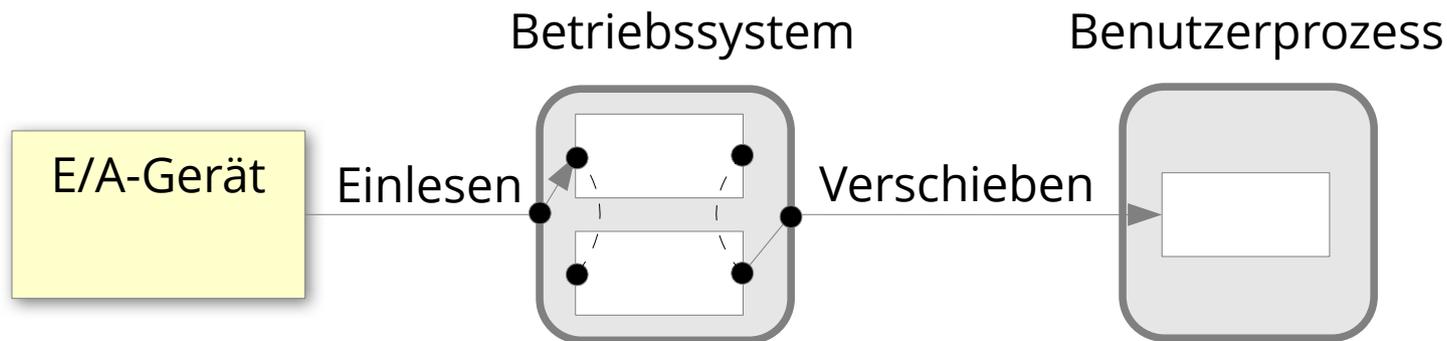
ohne Puffer: $G_0 = T + C$

mit Puffer: $G_E = \max(T, C) + M$

Mit $T \approx C$ und $M \approx 0$ wäre $G_0 \approx 2 \cdot G_E$. Leider ist $M > 0$.

E/A-Wechsellpuffer

- Einlesen:
 - Während Daten vom E/A-Gerät in den einen Puffer transferiert werden, kann der andere Pufferinhalt in den Empfängeradressraum kopiert werden.
- Schreiben:
 - Während Daten aus einem Puffer zum E/A-Gerät transferiert werden, kann der andere Puffer bereits mit neuen Daten aus dem Senderadressraum gefüllt werden.



(c) Leseoperation mit Wechsellpuffer

E/A-Wechsellpuffer

Leistungsabschätzung

Mit einem Wechsellpuffer kann ein Leseoperation parallel zur Kopieroperation und Verarbeitung erfolgen.

ohne Puffer: $G_0 = T + C$

mit Puffer: $G_E = \max(T, C) + M$

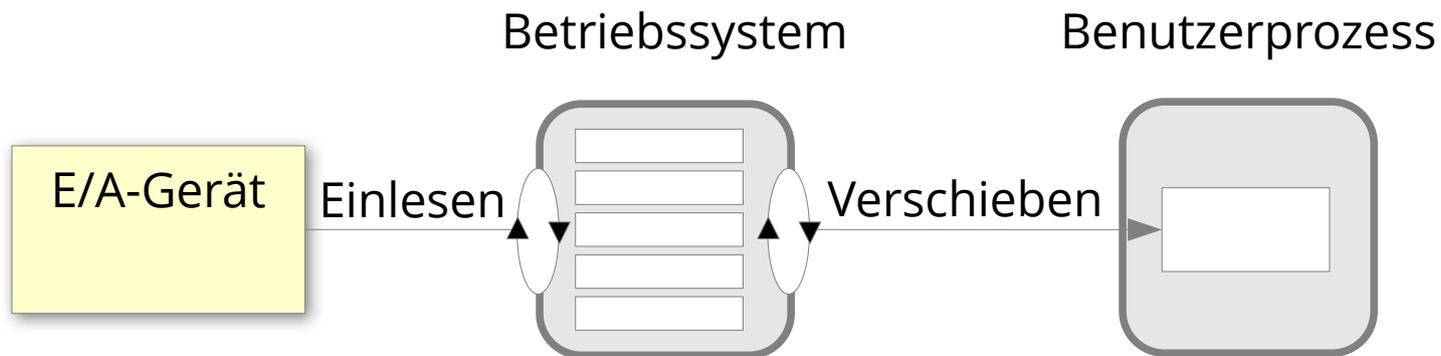
mit Wechsellpuffer: $G_W = \max(T, C + M)$

Mit $C + M \leq T$ könnte das Gerät zu 100% ausgelastet werden.

(c) Leseoperation mit Wechsellpuffer

E/A-Ringpuffer

- Einlesen:
 - Viele Daten können gepuffert werden, auch wenn der Leserprozess nicht schnell genug **read**-Aufrufe tätigt.
- Schreiben:
 - Ein Schreiberprozess kann mehrfach **write**-Aufrufe tätigen, ohne blockiert werden zu müssen.



(d) Leseoperation mit Ringpuffer

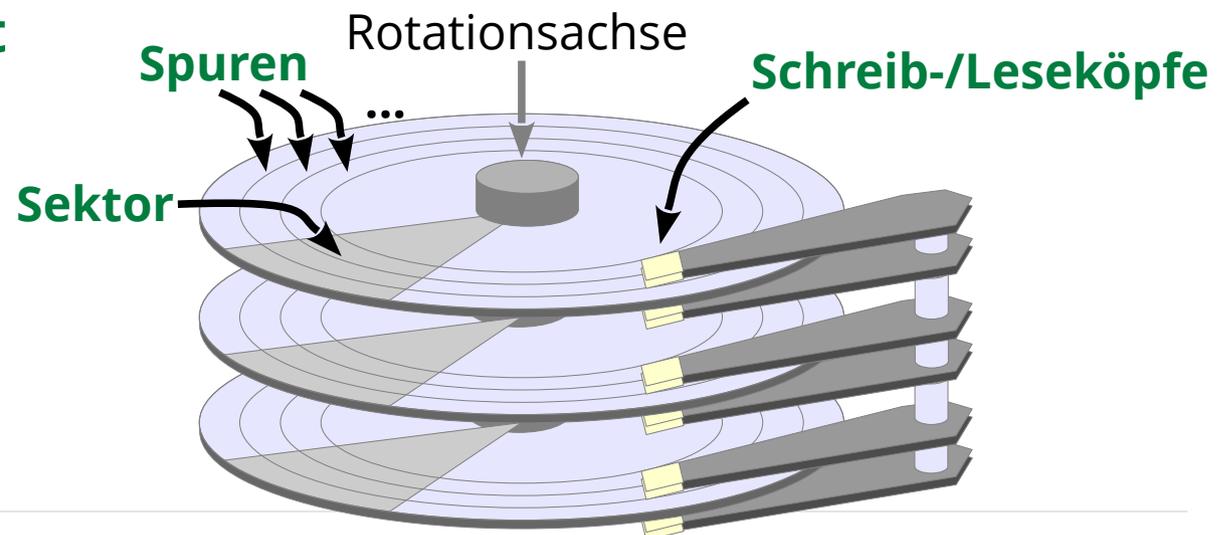
Diskussion: E/A-Puffer

- **E/A-Puffer entkoppeln** die E/A-Operationen der Nutzerprozesse vom Gerätetreiber
 - **Kurzfristig** lässt sich eine erhöhte Ankunftsrate an E/A-Aufträgen bewältigen.
 - **Langfristig** bleibt auch bei noch so vielen Puffern ein Blockieren von Prozessen (oder Verlust von Daten) nicht aus.
- Puffer haben ihren Preis:
 - Verwaltung der Pufferstruktur
 - Speicherplatz
 - Zeit für das Kopieren
- In komplexen Systemen wird teilweise mehrfach gepuffert.
 - **Beispiel:** Schichten von Netzwerkprotokollen
 - Nach Möglichkeit vermeiden!

Geräteansteuerung: Bsp. Platte

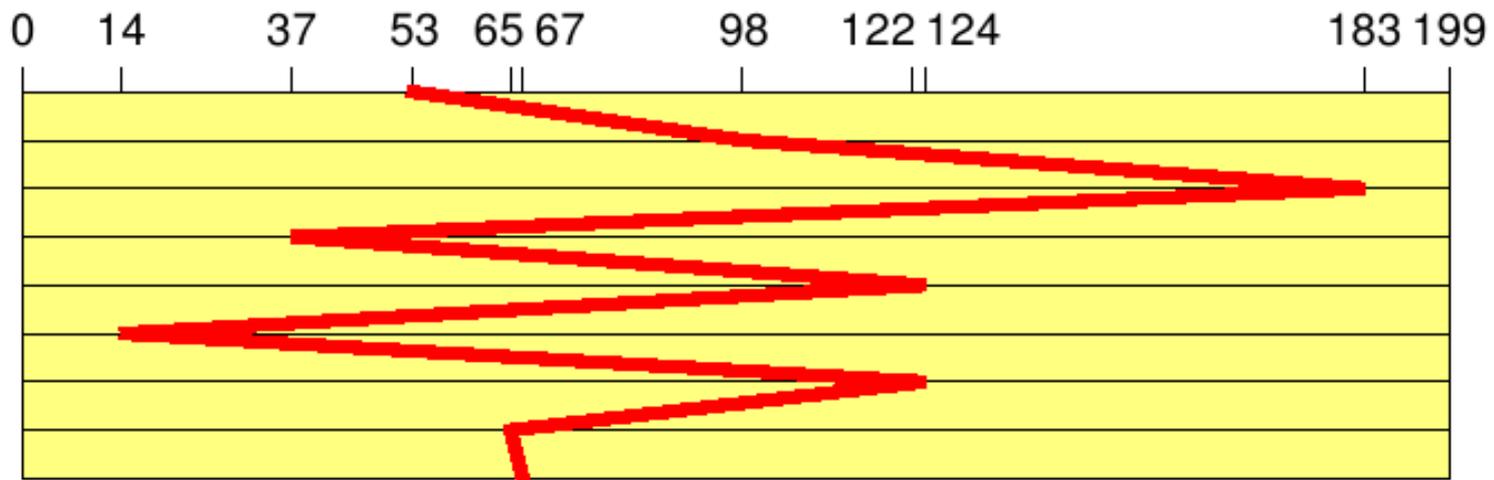
- Treiber muss **mechanische Eigenschaften** beachten!
- Plattentreiber hat in der Regel mehrere Aufträge in seiner Warteschlange
 - Eine bestimmte Ordnung der Ausführung kann Effizienz steigern.
 - Zusammensetzung der Bearbeitungszeit eines Auftrags:
 - **Positionierungszeit:** abhängig von aktueller Stellung des Plattenarms
 - **Rotationsverzögerung:** Zeit bis der Magnetkopf den Sektor bestreicht
 - **Übertragungszeit:** Zeit zur Übertragung der eigentlichen Daten
- Ansatzpunkt:

Positionierungszeit



E/A-Scheduling: FIFO

- Bearbeitung gemäß Ankunft des Auftrags
(*First In First Out*)
 - Referenzfolge (Folge von Spurnummern):
98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67
 - Aktuelle Spur: 53



- Gesamtzahl der **Spurwechsel: 640**
- Weite Bewegungen des Schwenkarms:
mittlere Bearbeitungsdauer lang!

E/A-Scheduling: SSTF

- Es wird der Auftrag mit der kürzesten Positionierzeit vorgezogen
(*Shortest Seek Time First*)

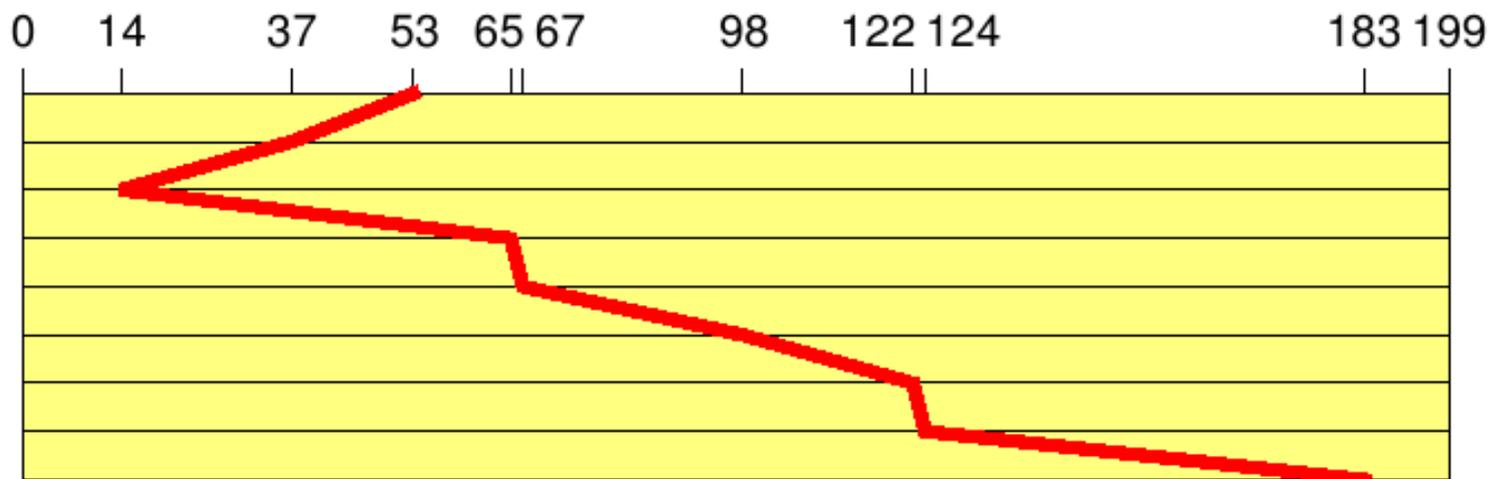
- dieselbe Referenzfolge: 98, 183, 37, 122, 14, 124, 65, 67
- (Annahme: Positionierungszeit proportional zum Spurabstand)



- Gesamtzahl der **Spurwechsel: 236**
- ähnlich wie SJF kann auch SSTF zur **Aushungerung** führen!
- noch nicht optimal

E/A-Scheduling: Elevator

- Bewegung des Plattenarms in eine Richtung bis keine Aufträge mehr vorhanden sind (**Fahrstuhlstrategie**)
 - Gleiche Referenzfolge (Annahme: bisherige Kopfbewegung Richtung 0)



- Gesamtzahl der **Spurwechsel: 208**
- Neue Aufträge werden miterledigt ohne zusätzliche Positionierungszeit
- Keine Aushungerung, lange Wartezeiten aber nicht ausgeschlossen

Diskussion: E/A-Scheduling heute

- Platten sind intelligente Geräte
 - Physikalische Eigenschaften werden verborgen (Logische Blöcke)
 - Platten weisen riesige Caches auf
 - *Solid State Disks* enthalten keine Mechanik mehr
- ➔ E/A-Scheduling verliert langsam an Bedeutung
- ➔ Erfolg einer Strategie ist schwerer vorherzusagen

- Trotzdem ist E/A-Scheduling noch immer sehr wichtig:
 - CPUs werden immer schneller, Platten kaum
 - **Linux** implementiert zur Zeit zwei verschiedene Varianten der **Fahrstuhlstrategie** (+ FIFO für „Platten“ ohne Positionierungszeit):
 - DEADLINE: Bevorzugung von Leseanforderungen (kürzere Deadlines)
 - COMPLETELY FAIR: Prozesse erhalten gleichen Anteil an E/A-Bandbreite

Inhalt

- Wiederholung
- Ein-/Ausgabe-Hardware
- Geräteprogrammierung
- Aufgaben des Betriebssystems
- **Zusammenfassung**

Zusammenfassung

- E/A-Hardware ist sehr unterschiedlich
 - teilweise auch „hässlich“ zu programmieren
- Die Kunst des Betriebssystembaus besteht darin, ...
 - trotzdem **einheitliche und einfache Schnittstellen** zu definieren
 - **effizient** mit der Hardware umzugehen
 - CPU und E/A-**Geräteauslastung zu maximieren.**
- **Gerätetreibervielfalt** ist für den Erfolg eines Betriebssystems extrem wichtig.
 - Bei Systemen wie Linux und Windows sind die Gerätetreiber das weitaus größte Subsystem.