

# Betriebssysteme (BS)

## VL 12 – Gerätetreiber

**Volkmar Sieh / Daniel Lohmann**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

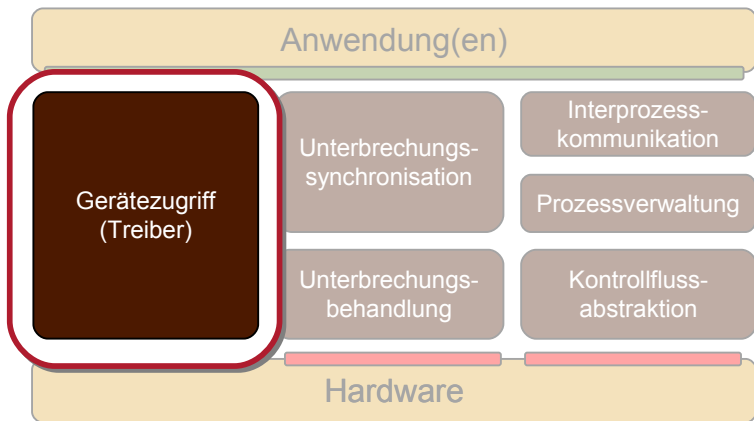
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg

WS 20 – 1. Februar 2021

[https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS20/V\\_BS](https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS20/V_BS)



# Überblick: Einordnung dieser VL



Einordnung  
Anforderungen an das BS  
Struktur des E/A-Systems  
Zusammenfassung



## Einordnung

Bedeutung von Gerätetreibern

Anforderungen an das BS

Struktur des E/A-Systems

Zusammenfassung



# Bedeutung von Gerätetreibern (1)

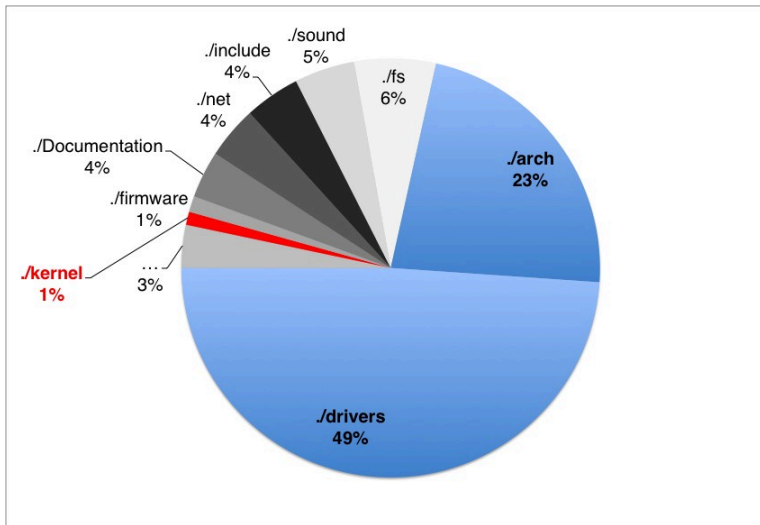
Anteil Treiber-Quellen in Linux-5.10.3:

```
linux-5.10.3> du -skh * | sort -n
...
 4.2M mm
 6.2M lib
11M  kernel
 34M  net
 41M  sound
 43M  fs
 43M  tools
 47M  include
 53M  Documentation
134M  arch
670M drivers
```



# Bedeutung von Gerätetreibern (1)

## ■ Anteil an Treibercode in Linux 3.2.1



## Bedeutung von Gerätetreibern (2)

- in Linux (3.2.1) ist der Treibercode (ohne ./arch) etwa **50 mal so groß** wie der Code des Kerns
    - und wächst rasant!
      - bei V2.6.32 waren es "nur" 25 mal mehr
      - bei V2.6.11 waren es "nur" 10 mal mehr
    - Windows unterstützt noch deutlich mehr Geräte ...
  - Treiberunterstützung ist für die Akzeptanz eines Betriebssystems ein **entscheidender Faktor**
    - warum sonst wäre Linux weiter verbreitet als andere freie UNIXe?
  - in Gerätetreibern steckt eine erhebliche Arbeitsleistung
- der Entwurf des E/A Subsystems erfordert viel Geschick
- möglichst viele wiederverwendbare Funktionen in eine **Treiber-Infrastruktur** verlagern
  - klare Vorgaben bzgl. Treiberstruktur, -verhalten und -schnittstellen, d.h. ein **Treibermodell**



Einordnung

Anforderungen an das BS

Einheitlicher Zugriff

Spezifischer Zugriff

Struktur des E/A-Systems

Zusammenfassung



# Anforderungen an Betriebssysteme

- Ressourcenschonender Umgang mit Geräten
  - schnell arbeiten
  - Energie sparen
  - Speicher, *Ports* und *Interrupt*-Vektoren sparen
  - Aktivierung und Deaktivierung zur Laufzeit
  - Generische *Power Management* Schnittstelle
- Einheitlicher Zugriffsmechanismus
  - **minimaler Satz von Operationen** für verschiedene Gerätetypen
  - **mächtige Operationen** für vielfältige Typen von Anwendungen
- auch gerätespezifische Zugriffsfunktionen



# Linux – einheitlicher Zugriff (1)

```
echo "Hallo, Welt" > /dev/ttyS0
```

- Geräte sind über Namen im Dateisystem ansprechbar
- Vorteile:
  - Systemaufrufe für Dateizugriff (`open`, `read`, `write`, `close`) können auch für sonstige E/A verwendet werden
  - Zugriffsrechte können über die Mechanismen des Dateisystems gesteuert werden
  - Anwendungen sehen keinen Unterschied zwischen Dateien und "Geräte-dateien"
- Probleme:
  - blockorientierte Geräte müssen in Byte-Strom verwandelt werden
  - manche Geräte lassen sich nur schwer in dieses Schema pressen
    - Beispiel: 3D Graphikkarte



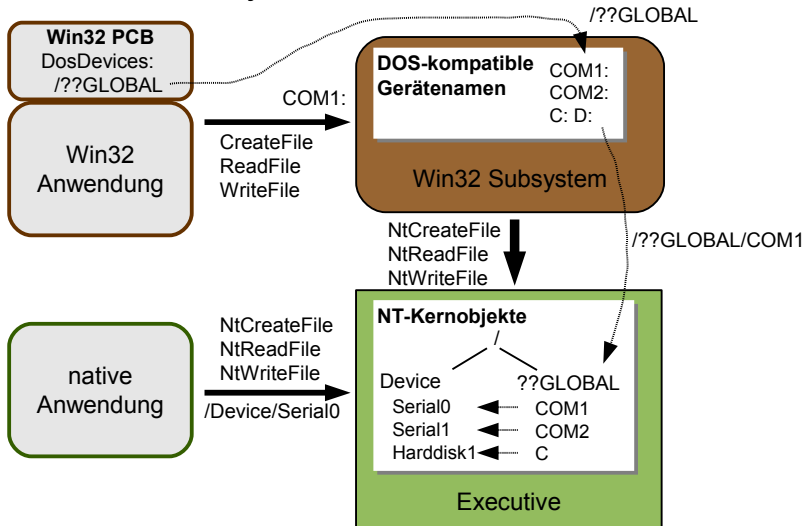
## Linux – einheitlicher Zugriff (2)

- blockierende Ein-/Ausgabe (Normalfall)
  - `read`: Prozess blockiert bis die angeforderten Daten da sind
  - `write`: Prozess blockiert bis Schreiben möglich ist
- nicht-blockierende Ein-/Ausgabe
  - `open/read/write` mit dem Zusatz-Flag `O_NONBLOCK`
  - statt zu blockieren kehren `read` und `write` so mit `-EAGAIN` zurück
  - der Aufrufer kann/muss die Operation später wiederholen
- nebenläufige Ein-/Ausgabe
  - neu: `aio_(read|write|...)` (POSIX 1003.1-2003)
  - indirekt mittels Kindprozess (`fork/join`)
  - `select`, `poll` Systemaufrufe



# Windows – einheitlicher Zugriff (1)

- Geräte sind Kern-Objekte der Executive



# Windows – einheitlicher Zugriff (2)

## ■ synchrone oder asynchrone Ein-/Ausgabe

```
BOOL ReadFile(  
    HANDLE hFile,  
    LPVOID lpBuffer,  
    DWORD nNumberOfBytesToRead,  
    LPDWORD lpNumberOfBytesRead,  
    LPOVERLAPPED lpOverlapped  
);
```

NULL: synchrones Lesen

```
BOOL GetOverlappedResult(  
    HANDLE hFile,  
    LPOVERLAPPED lpOverlapped,  
    LPDWORD lpNumberOfBytesTransferred,  
    BOOL bWait  
);
```

true: auf Ende warten  
false: Status erfragen

## ■ weitere Möglichkeiten:

- E/A mit *Timeout*
- WaitForMultipleObjects – warten auf 1–N Kernobjekte
  - Datei-Handles, Semaphore, Mutex, Thread-Handle, ...
- I/O Completion Ports
  - Aktivierung eines wartenden Threads nach I/O Operation



# Linux – gerätespez. Funktionen (1)

- spezielle Geräteeigenschaften werden (klassisch) 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 und Semantik gerätespezifisch:

## CONFORMING TO

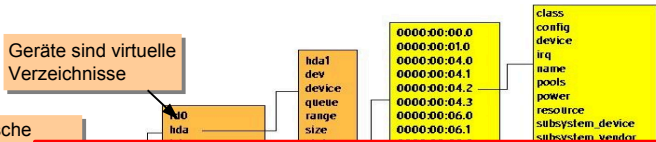
No single standard. Arguments, returns, and semantics of `ioctl(2)` vary according to the device driver in question (the call is used as a catch-all for operations that don't cleanly fit the Unix stream I/O model). The `ioctl` function call appeared in Version 7 AT&T Unix.





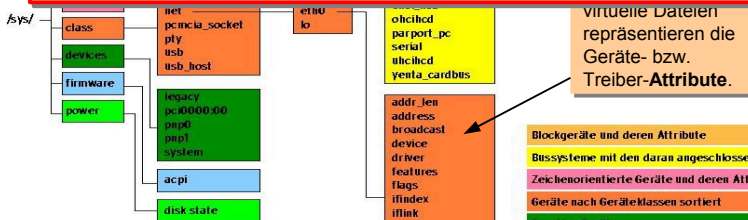
# Linux – gerätespez. Funktionen (2)

## Linux 2.6 – das Gerätermodell im sys-Dateisystem



Symbolische  
Links ermöglichen  
unterschiedliche  
Sortierkriterien

Das Gerätermodell erlaubt Kern- und Anwendungsfunktionen, die Rechnerhardware zu erforschen. Beispielsweise kann eine Power-Management-Funktion abhängige Geräte in der richtigen Reihenfolge stoppen und starten.



- Blockgeräte und deren Attribute
- Bussysteme mit den daran angeschlossenen Geräten
- Zeichenorientierte Geräte und deren Attribute
- Geräte nach Geräteklassen sortiert
- Sonstige Geräte
- Schnittstelle für Firmware-Downloads
- Schnittstelle für Powermanagement

- **DeviceIoControl** entspricht dem UNIX ioctl:

```
BOOL DeviceIoControl(  
    HANDLE hDevice,  
    DWORD dwIoControlCode,  
    LPVOID lpInBuffer,  
    DWORD nInBufferSize,  
    LPVOID lpOutBuffer,  
    DWORD nOutBufferSize,  
    LPDWORD lpBytesReturned,  
    LPOVERLAPPED lpOverlapped  
);
```

Kommunikation über  
untypisierte Puffer direkt  
mit dem Treiber

auch asynchron möglich

- und was sonst?
  - alle Geräte und Treiber werden durch Kern-Objekte repräsentiert
    - spezielle Systemaufrufe gestatten das Erforschen dieses Namensraums
  - statische Konfigurierung erfolgt über die Registry
  - dynamische Konfigurierung erfolgt z.B. über WMI
    - *Windows Management Instrumentation*



Einordnung

Anforderungen an das BS

**Struktur des E/A-Systems**

Treibermodell

Linux

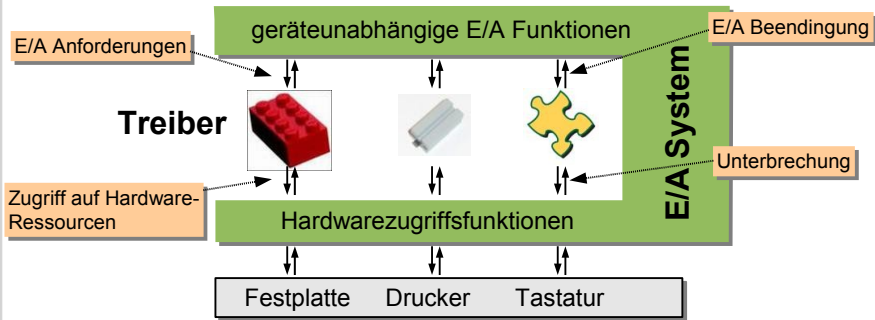
Windows

Zusammenfassung



# Struktur des E/A Systems (1)

- Treiber mit unterschiedlicher Schnittstelle ...

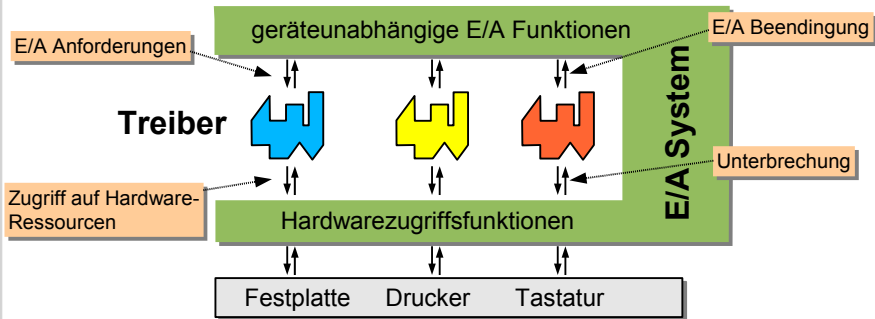


- erlauben die volle Ausnutzung aller Geräteeigenschaften
- erfordern eine Erweiterung des E/A Systems für jeden Treiber
  - enormer Aufwand bei der heutigen Gerätevielfalt
  - unrealistisch, da erst das BS und dann die Treiber entstehen



# Struktur des E/A Systems (2)

## ■ Treiber mit uniformer Schnittstelle ...



- ermöglichen ein (dynamisch) erweiterbares E/A System
- erlauben flexibles "Stapeln" von Gerätetreibern
  - virtuelle Geräte
  - Filter



# Das Treibermodell umfasst ...



"detaillierte Vorgaben für die Treiber-Entwicklung"

- die Liste der erwarteten Treiber-Funktionen
- Festlegung optionaler und obligatorischer Funktionen
- die Funktionen, die ein Treiber nutzen darf
- Interaktionsprotokolle
- Synchronisationsschema und Funktionen
  
- Festlegung von **Treiberklassen** falls mehrere Schnittstellentypen unvermeidbar sind



# Anforderungen an Gerätetreiber

- Zuordnung zu Gerätedateien erlauben
- Verwaltung mehrerer Geräteinstanzen
- Operationen:
  - Hardware-Erkennung
  - Initialisierung und Beendigung
  - Lesen und Schreiben von Daten
    - ggf. auch *Scatter/Gather*
  - Steueroperationen und Gerätestatus
    - z.B. über `ioctl` oder virtuelles Dateisystem
  - Energieverwaltung
- intern zu bewältigen:
  - Synchronisation
  - Pufferung
  - Anforderung benötigter Systemressourcen



# Linux – Treibergerüst: Registrierung

```
MODULE_AUTHOR("B.S. Student");
MODULE_LICENSE("GPL");
MODULE_DESCRIPTION("Dummy Treiber.");
MODULE_SUPPORTED_DEVICE("none");

static struct file_operations fops;
// ... Initialisierung von fops (Funktionszeiger)

static int __init mod_init(void){
    if(register_chrdev(240,"DummyDriver",&fops)==0)
        return 0; // Treiber erfolgreich angemeldet
    return -EIO; // Anmeldung beim Kernel fehlgeschlagen
}

static void __exit mod_exit(void){
    unregister_chrdev(240,"DummyDriver");
}

module_init( mod_init );
module_exit( mod_exit );
```

Metainformation,  
anzufordern mit  
'modinfo'

Registrierung für  
das char-Device  
mit der **Major-  
Number 240**

mod\_init und  
mod\_exit werden  
beim Laden bzw.  
Entladen  
ausgeführt.



# Linux – Treibergerüst: Operationen

```
static char hello_world[]="Hello World\n";

static int dummy_open(struct inode *geraete_datei,
    struct file *instanz) {
    printk("driver_open called\n"); return 0;
}

static int dummy_close(struct inode *geraete_datei,
    struct file *instanz) {
    printk("driver_close called\n"); return 0;
}

static ssize_t dummy_read(struct file *instanz,
    char *user, size_t count, loff_t *offset ) {
    int not_copied, to_copy;
    to_copy = strlen(hello_world)+1;
    if( to_copy > count ) to_copy = count;
    not_copied=copy_to_user(user,hello_world,to_copy);
    return to_copy-not_copied;
}

static struct file_operations fops = {
    .owner  =THIS_MODULE,
    .open   =dummy_open,
    .release=dummy_close,
    .read   =dummy_read,
};
```

die Treiberoperationen entsprechen den normalen Dateioperationen

in diesem Beispiel machen open und close nur Debugging-Ausgaben

mit **copy\_to\_user** und **copy\_from\_user** kann man Daten zwischen Kern- und Benutzer-adressraum austauschen

es gibt noch wesentlich mehr Operationen, sie sind jedoch größtenteils optional



# Linux – Treibergerüst: Operationen

```
// Struktur zur Einbindung des Treibers in das virtuelle Dateisystem
```

```
struct file_operations {  
    struct module *owner;  
    loff_t (*llseek) (struct file *, loff_t, int);  
    ssize_t (*read) (struct file *, char __user *, size_t, loff_t *);  
    ssize_t (*aio_read) (struct kiocb *, char __user *, size_t, loff_t);  
    ssize_t (*write) (struct file *, const char __user *, size_t, loff_t *);  
    ssize_t (*aio_write) (struct kiocb *, const char __user *, size_t, loff_t);  
    int (*readdir) (struct file *, void *, filldir_t);  
    unsigned int (*poll) (struct file *, struct poll_table_struct *);  
    int (*ioctl) (struct inode *, struct file *, unsigned int, unsigned long);  
    int (*mmap) (struct file *, struct vm_area_struct *);  
    int (*open) (struct inode *, struct file *);  
    int (*flush) (struct file *);  
    int (*release) (struct inode *, struct file *);  
    int (*fsync) (struct file *, struct dentry *, int datasync);  
    int (*aio_fsync) (struct kiocb *, int datasync);  
    int (*fasync) (int, struct file *, int);  
    int (*lock) (struct file *, int, struct file_lock *);  
    ssize_t (*readv) (struct file *, const struct iovec *, unsigned long, loff_t *);  
    ssize_t (*writev) (struct file *, const struct iovec *, unsigned long, loff_t *);  
    ssize_t (*sendfile) (struct file *, loff_t *, size_t, read_actor_t, void __user *);  
    ssize_t (*sendpage) (struct file *, struct page *, int, size_t, loff_t *, int);  
    unsigned long (*get_unmapped_area)(struct file *, unsigned long,  
        unsigned long, unsigned long, unsigned long);  
};
```

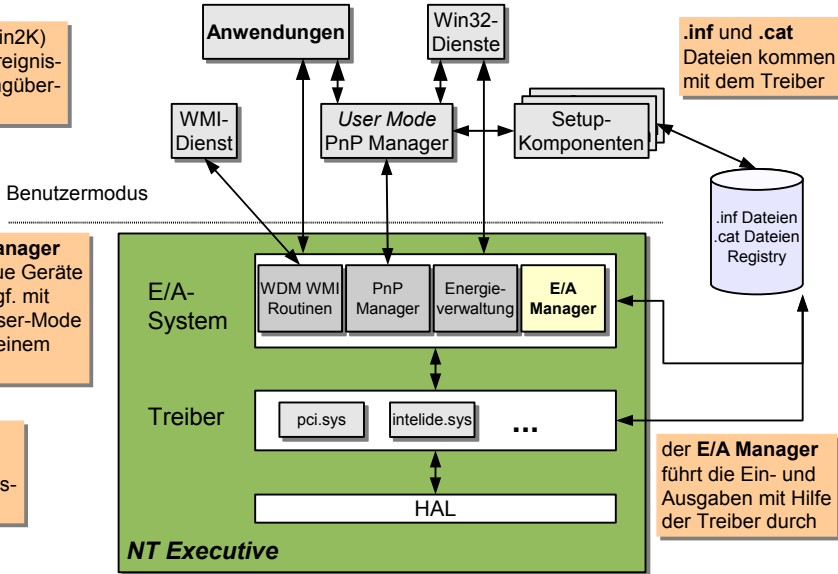


- Ressourcen reservieren
  - Speicher, Ports, IRQ-Vektoren, DMA Kanäle
- Hardwarezugriff
  - Ports und Speicherblöcke lesen und schreiben
- Speicher dynamisch anfordern
- Blockieren und Wecken von Prozessen im Treiber
  - waitqueue
- Interrupt-Handler anbinden
  - low-level
  - Tasklets für länger dauernde Aktivitäten
- Spezielle APIs für verschiedene Treiberklassen
  - Zeichenorientierte Geräte, Blockgeräte, USB-Geräte, Netzwerktreiber
- Einbindung in das proc oder sys Dateisystem



# Windows – E/A System

**WMI** (ab Win2K)  
dient der Ereignis-  
und Leistungsüber-  
wachung



der **PnP Manager**  
erkennt neue Geräte  
und fragt ggf. mit  
Hilfe des User-Mode  
Teils nach einem  
Treiber.

**HAL** ist die  
Hardware-  
Abstraktions-  
schicht

der **E/A Manager**  
führt die Ein- und  
Ausgaben mit Hilfe  
der Treiber durch



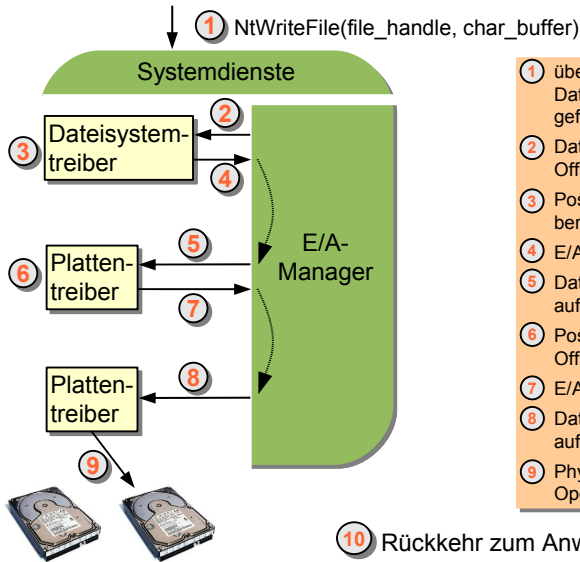
Das E/A-System steuert den Treiber mit Hilfe der ...

- Initialisierungsroutine/Entladeroutine
  - wird nach/vor dem Laden/Entladen des Treibers ausgeführt
- Routine zum Hinzufügen von Geräten
  - PnP Manager hat ein neues Gerät für den Treiber
- "Verteilerrouinen"
  - Öffnen, Schließen, Lesen, Schreiben und gerätespezifische Oper.
- Interrupt Service Routine
  - wird von der zentralen Interrupt-Verteilungsroutine aufgerufen
- DPC-Routine
  - "Epilog" der Unterbrechungsbehandlung
- E/A-Komplettierungs- und -Abbruchroutine
  - Informationen über den Ausgang weitergeleiteter E/A-Aufträge

...



# Windows – typischer E/A-Ablauf



- 1 über das Dateiojekt wird das Dateisystem und der Treiber gefunden
- 2 Daten an bestimmten Byte-Offset in Datei schreiben
- 3 Position auf Datenträger berechnen
- 4 E/A Auftrag weitergeben
- 5 Daten an best. Byte Offset auf Datenträger schreiben
- 6 Position in Plattennr. und Offset umrechnen
- 7 E/A Auftrag weitergeben
- 8 Daten an best. Byte Offset auf Platte 2 schreiben
- 9 Phys. Block berechnen und Operation initiieren

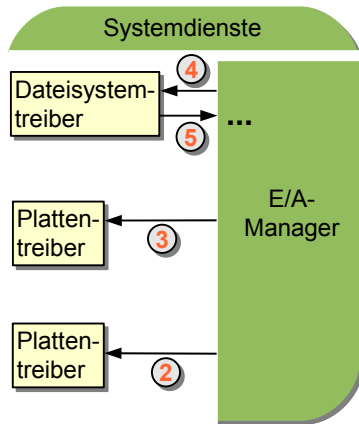
10 Rückkehr zum Anwendungsprozess!



# Windows – typischer E/A-Ablauf

... Fortsetzung (nachdem die Platte fertig geworden ist)

- 1 Plattencontroller signalisiert per Unterbrechung den Abschluss der Operation
- 2 Aufruf der ISR bzw. des DPC
- 3 Aufruf der Komplettierungs-routine
- 4 Aufruf der Komplettierungs-routine
- 5 weiterer (Teil-)Auftrag an den Datenträgertreiber



Wo merkt sich das System den Zustand einer E/A-Operation?



# Windows – E/A-Anforderungspaket

NtWriteFile(file\_handle, char\_buffer)

Systemdienste

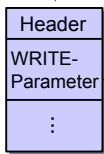
E/A-Manager

der E/A-Manager erstellt und initialisiert für jede E/A Operation ein IRP

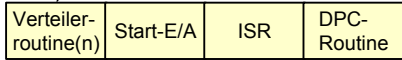
**IRP**  
(I/O Request Packet)

über die WRITE-Parameter wird die Verteileroutine gefunden

IRP-Stack



jede Treiberebene benutzt eine neue Ebene im IRP-Stack



**Gerätetreiber**



# Agenda

---

Einordnung  
Anforderungen an das BS  
Struktur des E/A-Systems  
Zusammenfassung



# Zusammenfassung

---

- ein guter Entwurf des E/A Subsystems ist enorm wichtig
  - E/A-Schnittstelle
  - Treibermodell
  - Treiberinfrastruktur
  - Schnittstellen sollten lange stabil bleiben
- Ziel ist die Aufwandsminimierung bei der Treibererstellung
- Windows besitzt ein ausgereiftes E/A System
  - "alles ist ein Kern-Objekt"
  - asynchrone E/A Operationen sind die Basis
- Linux zieht rasant nach
  - "alles ist eine Datei"
  - sysfs und asynchrone E/A sind relativ neu (seit 2.6)

