

MAS: Betriebssysteme

Interruptverarbeitung in Betriebssystemen

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

- Konzepte und Abläufe der Interruptverarbeitung in Betriebssystemen kennenlernen und verstehen
- Unterscheidung der verschiedenen Interrupt-Klassen vornehmen können
- Ablauf eines asynchronen Interrupts erläutern können
- Ablauf eines (synchronen) Systemcalls erläutern können

Überblick

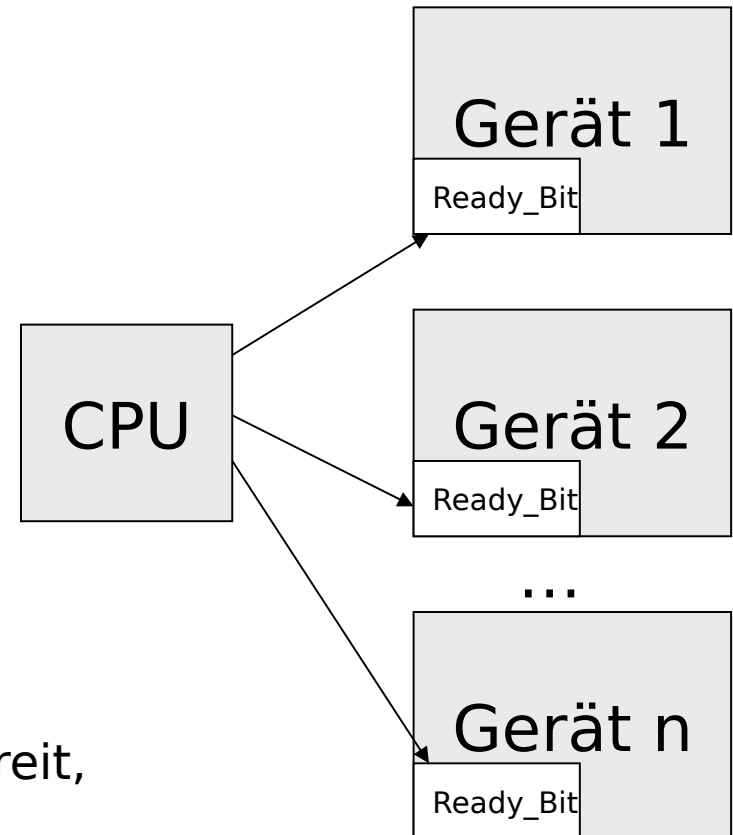
- 1. Begriffe und Klassifizierung**
2. Zusammenspiel der Komponenten
3. Systemdienste und Systemcalls

Polling

■ Polling => Busy Waiting (aktives Warten)

```
while() {  
    for (alle Geräte) {  
        if (Gerät[i].Ready_Bit == 1 ) {  
            doAction();  
        }  
    }  
}
```

Ready_Bit = 1 bedeutet, Gerät ist bereit,
es sind z.B. Daten abzuholen



Polling

- **Polling ist eine problematische Technik**
- **„Code Smell“**
- **Verallgemeinerung des Problems:**
 - Kooperation und Synchronisation
 - Pull vs Push

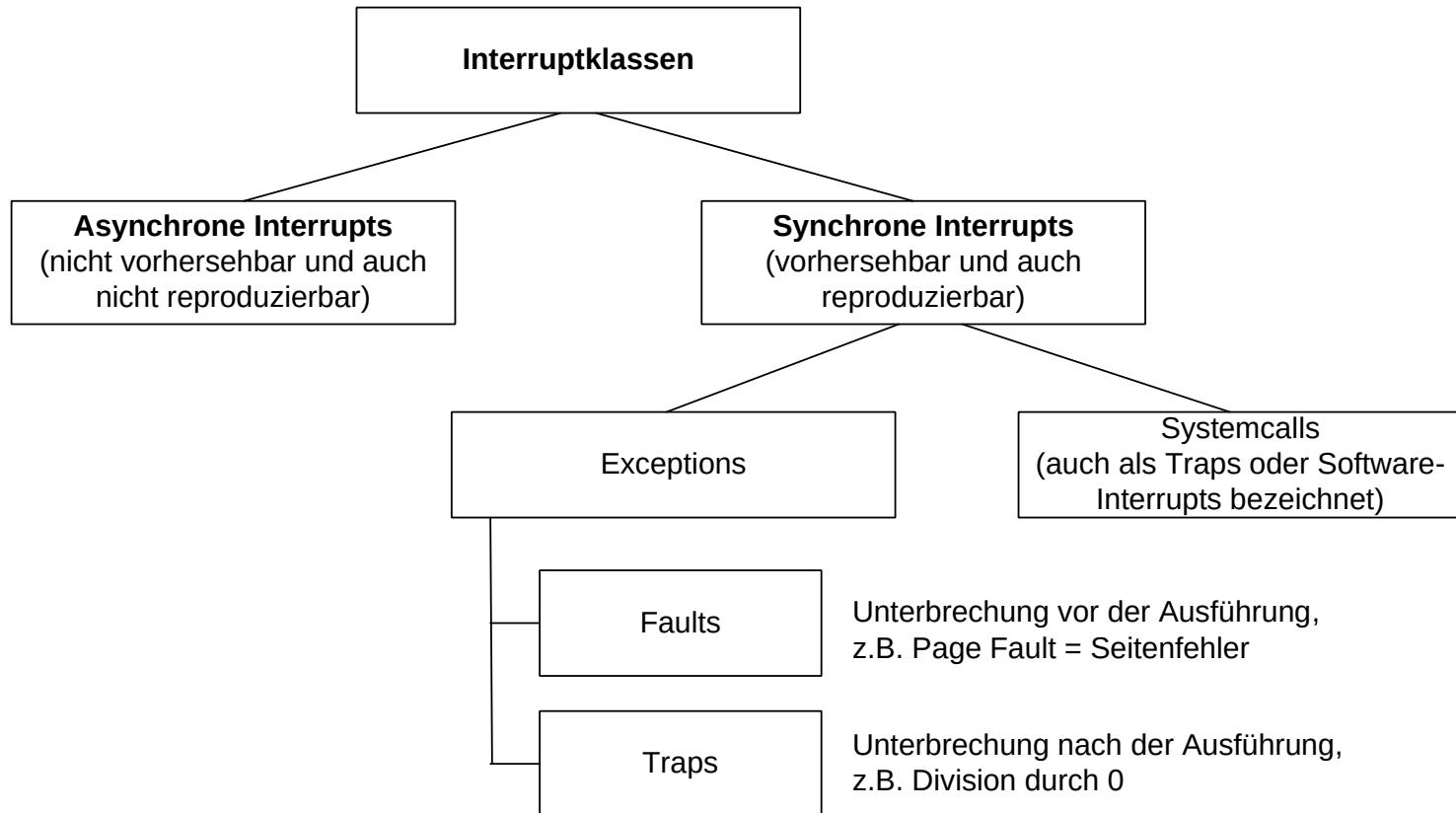
Interrupt

- **Interrupt** = Unterbrechung = Trap
- Abgrenzung zu **Polling**
 - Kein aktives Abfragen von Ereignisquellen
- Gründe für Interrupts:
 - Betriebssystembedingungen
 - Asynchrone Ereignisse
- Verursacher: Hardware oder Software
- **Abschaltung** (Maskierung) von Interrupts ist möglich, sollte aber für sehr kurze Zeit sein
 - Manchmal unbedingt erforderlich (siehe später → Interrupt Service Routinen)

Synchron und asynchron

- **Synchrone** Interrupts: Von der CPU ausgelöste Ausnahmen (für das laufende Programm gedacht)
 - Division durch 0
 - Speicherzugriffsverletzung
- **Asynchrone** Interrupts: Treten unabhängig davon auf, was das System gerade ausführt
 - Netzwerkadapter meldet ankommende Nachricht
 - Plattenspeicher meldet Zustellung eines Blocks

Interrupt-Klassifizierung

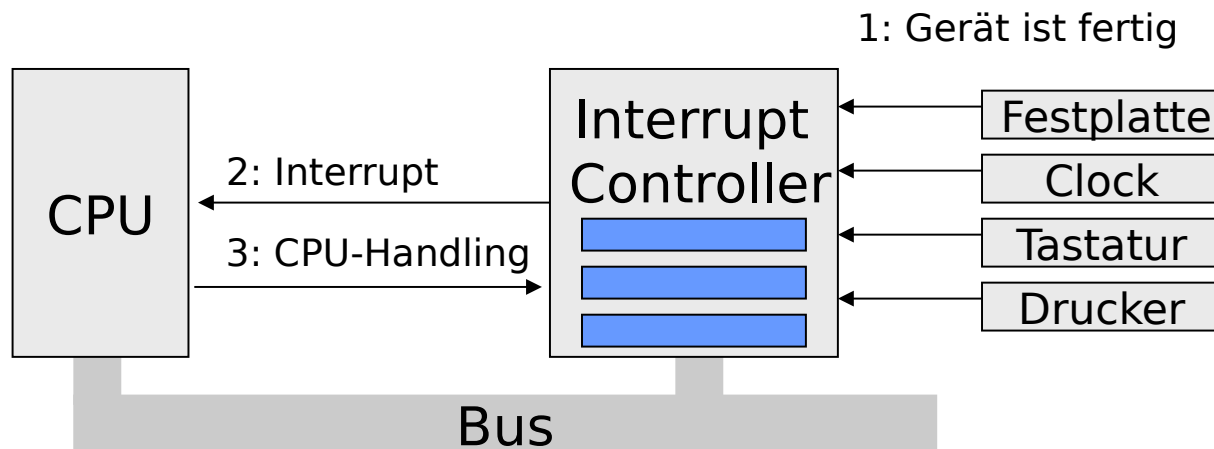


Überblick

1. Begriffe und Klassifizierung
- 2. Zusammenspiel der Komponenten**
3. Systemdienste und Systemcalls

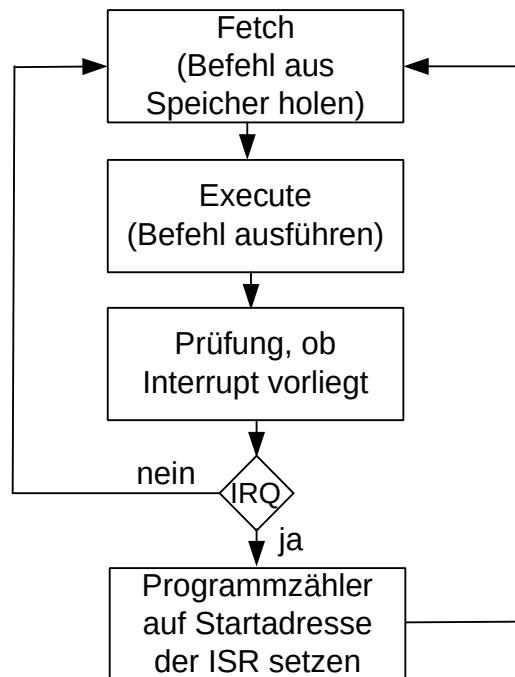
Interrupt-Bearbeitung: Zusammenspiel

- Interrupts führen dazu, dass Code außerhalb des normalen Programmflusses ausgeführt wird
- Steuerung wird an eine definierte Position im Kernel übergeben
→ **Interrupt-Service-Routine (ISR)**



Interrupt-Bearbeitung: Befehlszyklus

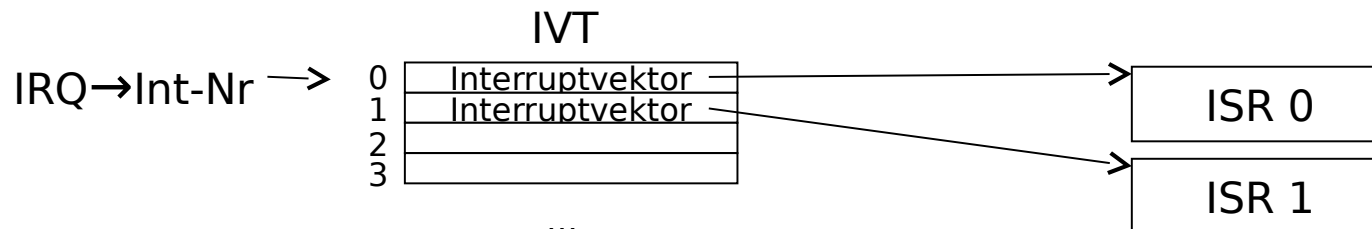
- Prüfung, ob Interrupt anliegt, ist Teil des CPU Befehlszyklus
- Prüfung am Ende der Ausführung eines Maschinenbefehls



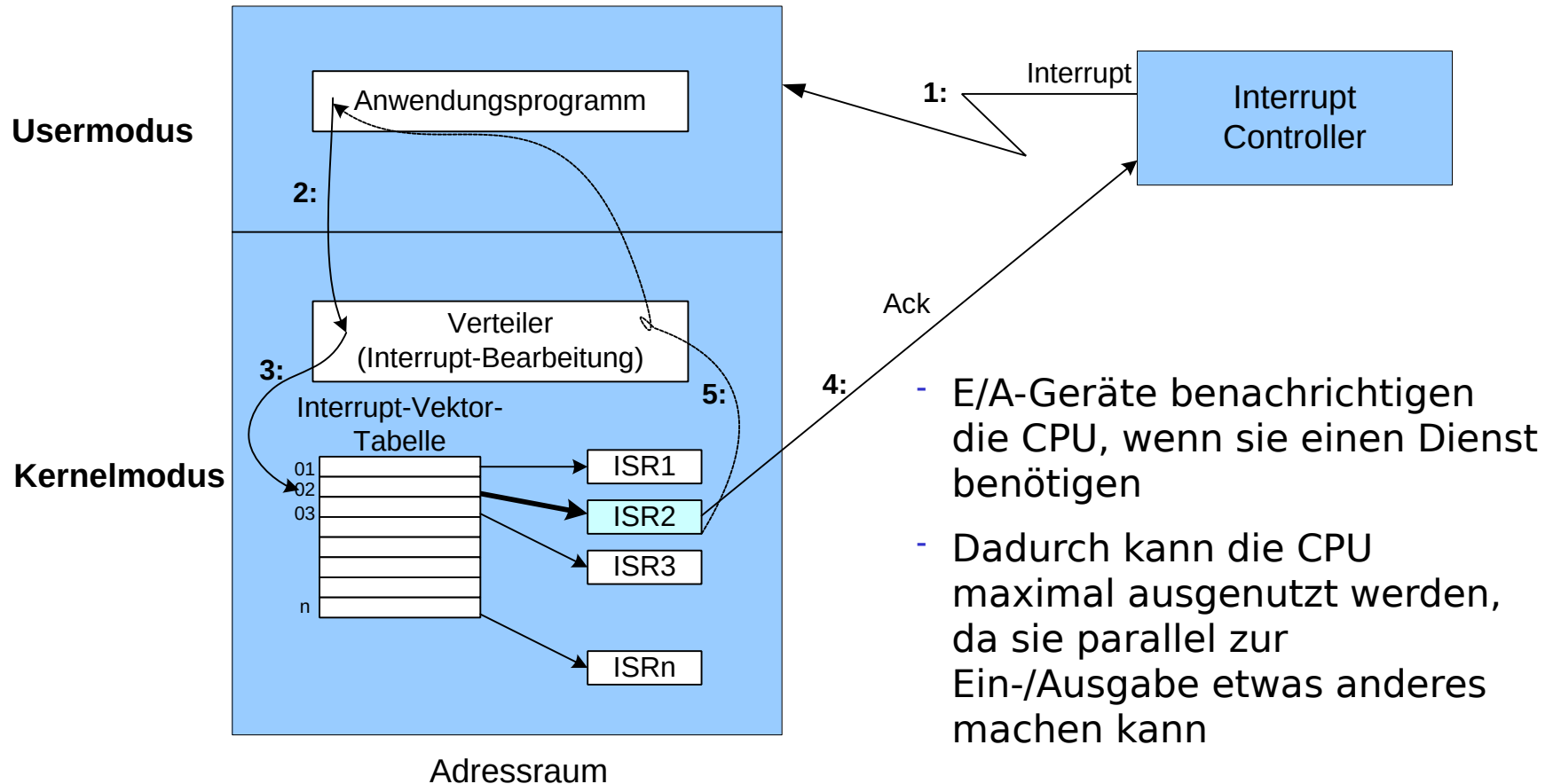
- Bei Multiprozessoren bzw. Mehrkernprozessoren:
 - Dispatching eines Prozessors/Kerns notwendig, um anstehenden Interrupt zu bearbeiten

Interrupt-Vektor-Tabelle und Adressierung

- Interrupt Request (IRQ) wird vom Gerät gesendet und identifiziert das Gerät
- Abbildung IRQ → Int-Nr durch Hardware in einem Interrupt Controller
 - Int-Nr ist der Index für die Interrupt-Vektor-Tabelle (IVT)
 - Die IVT wird von der CPU verwendet
- IVT-Aufbau durch Prozessor vorgegeben:
 - Bei Intel 256 IVT-Einträge für Exceptions, Systemcalls (Traps) und Geräteinterrupts



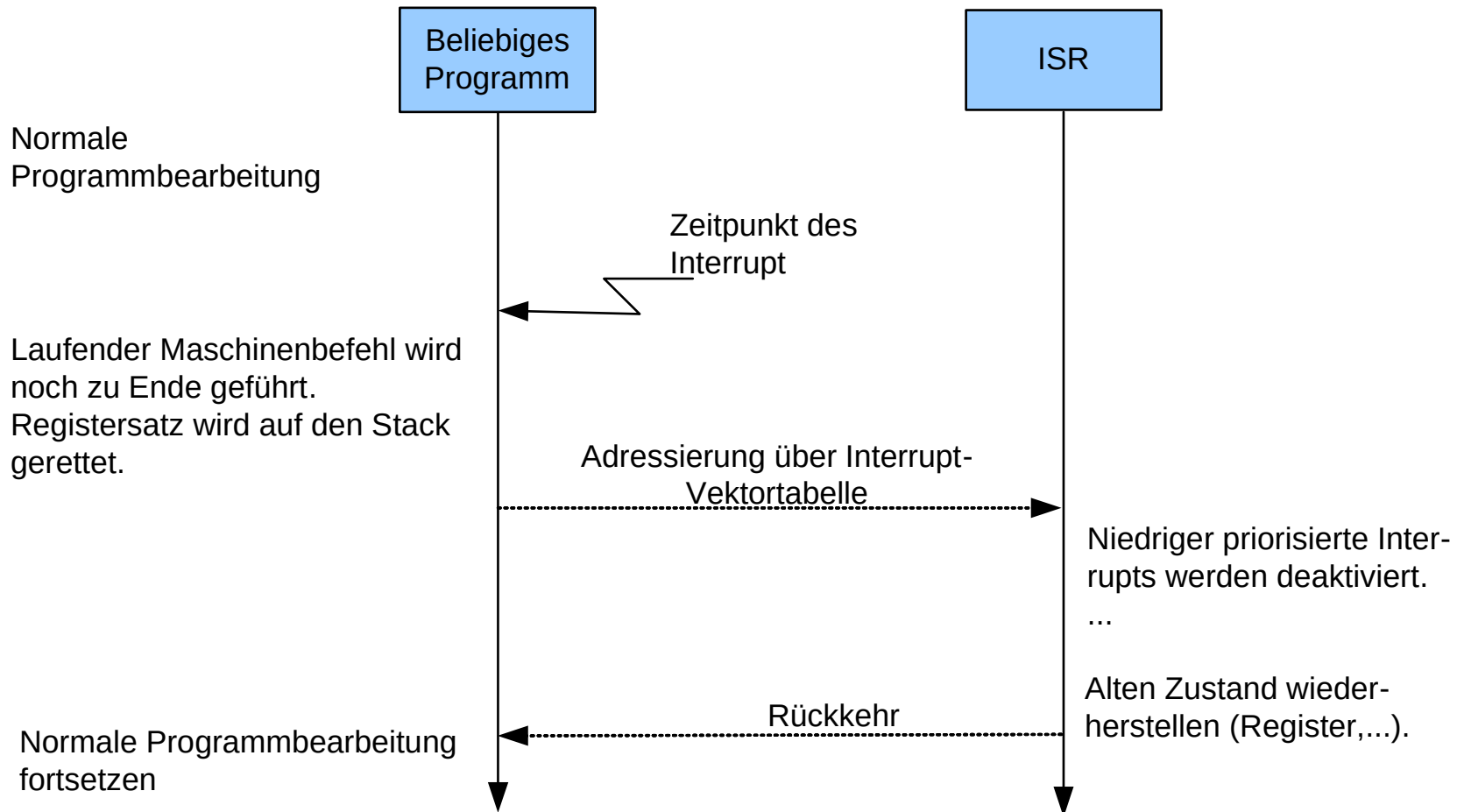
Interrupt-Service-Routine (ISR)



- E/A-Geräte benachrichtigen die CPU, wenn sie einen Dienst benötigen
- Dadurch kann die CPU maximal ausgenutzt werden, da sie parallel zur Ein-/Ausgabe etwas anderes machen kann

ISR = Interrupt Service Routine

Interrupt-Bearbeitung: Ablauf



Speichern des Zustands bei Interrupt

- damit Interrupt bearbeitet werden kann, ohne das ausgeführte Programm zu beeinflussen, muss dessen Zustand abgespeichert werden
- manche Prozessoren machen dies automatisch und haben dafür einen eigenen, speziellen Stack
- bei anderen Prozessoren muss der Interrupt-Handler den Zustand selbst abspeichern

Beispiel: Intel 8259A-Controller

- Intel 8259A PIC = Programmable Interrupt Controller = Multiplexer für Hardware-Interrupts
 - Ein integrierter Schaltkreis zur Verwaltung mehrerer Hardware-Interrupts
 - Aufgabe: überwacht Interrupt-Leitungen (IRQ), speichert sie und gibt sie an die CPUs weiter
 - 8 Interrupt-Eingänge: Eingang 0 hat höchste Priorität
 - Seit IBM PC XT eingesetzt (1983)
 - Oft wurden zwei PICs in einem PC genutzt



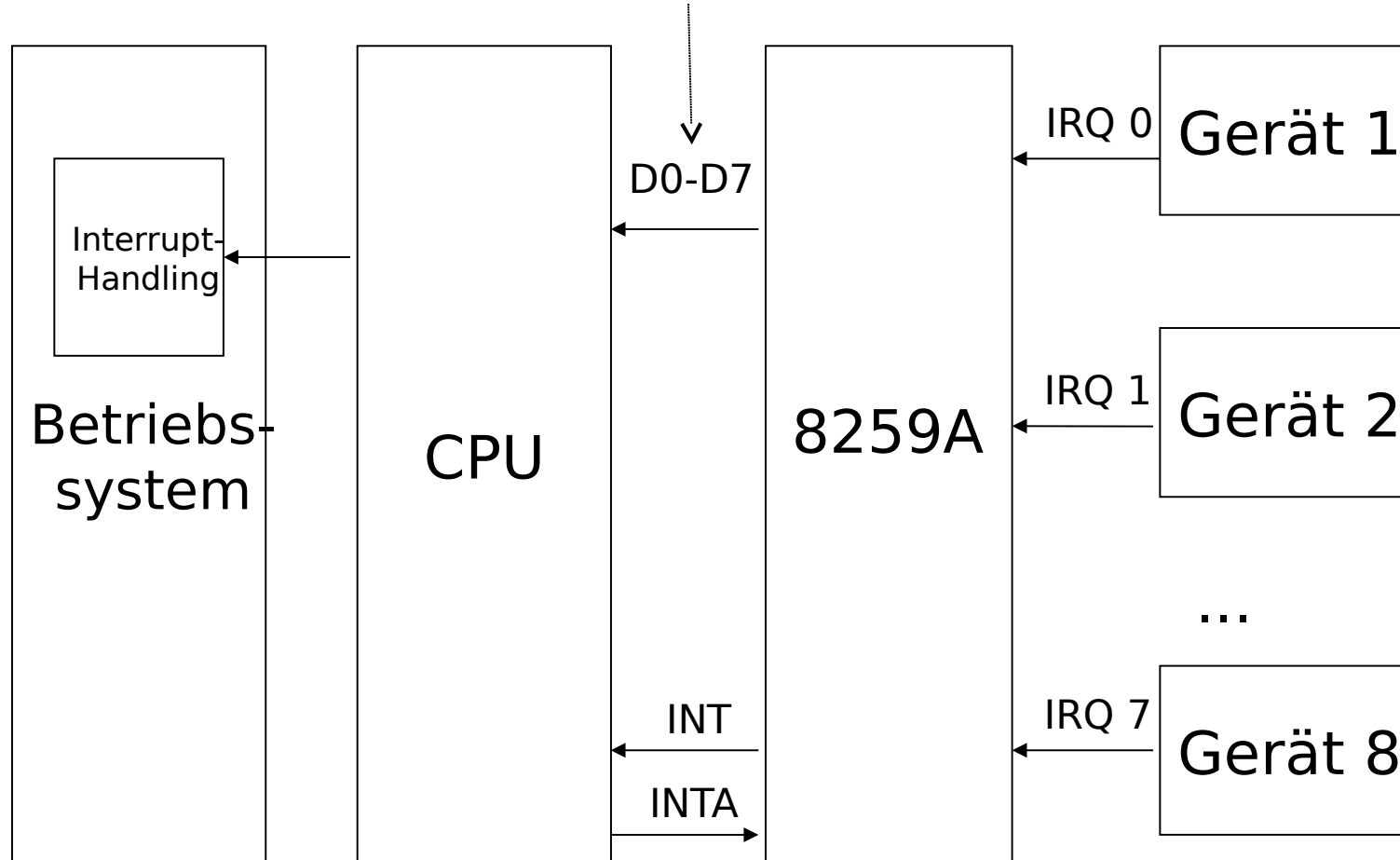
Bild: https://en.wikipedia.org/wiki/File:Ibm_px_xt_color.jpg

- Neuere Versionen

- APIC = Advanced PIC mit 256 Interrupt-Eingängen wird bei x86-Architekturen eingesetzt
- SAPIC = Streamlined Advanced Programmable Interrupt Controller wird bei IA64-Architekturen eingesetzt

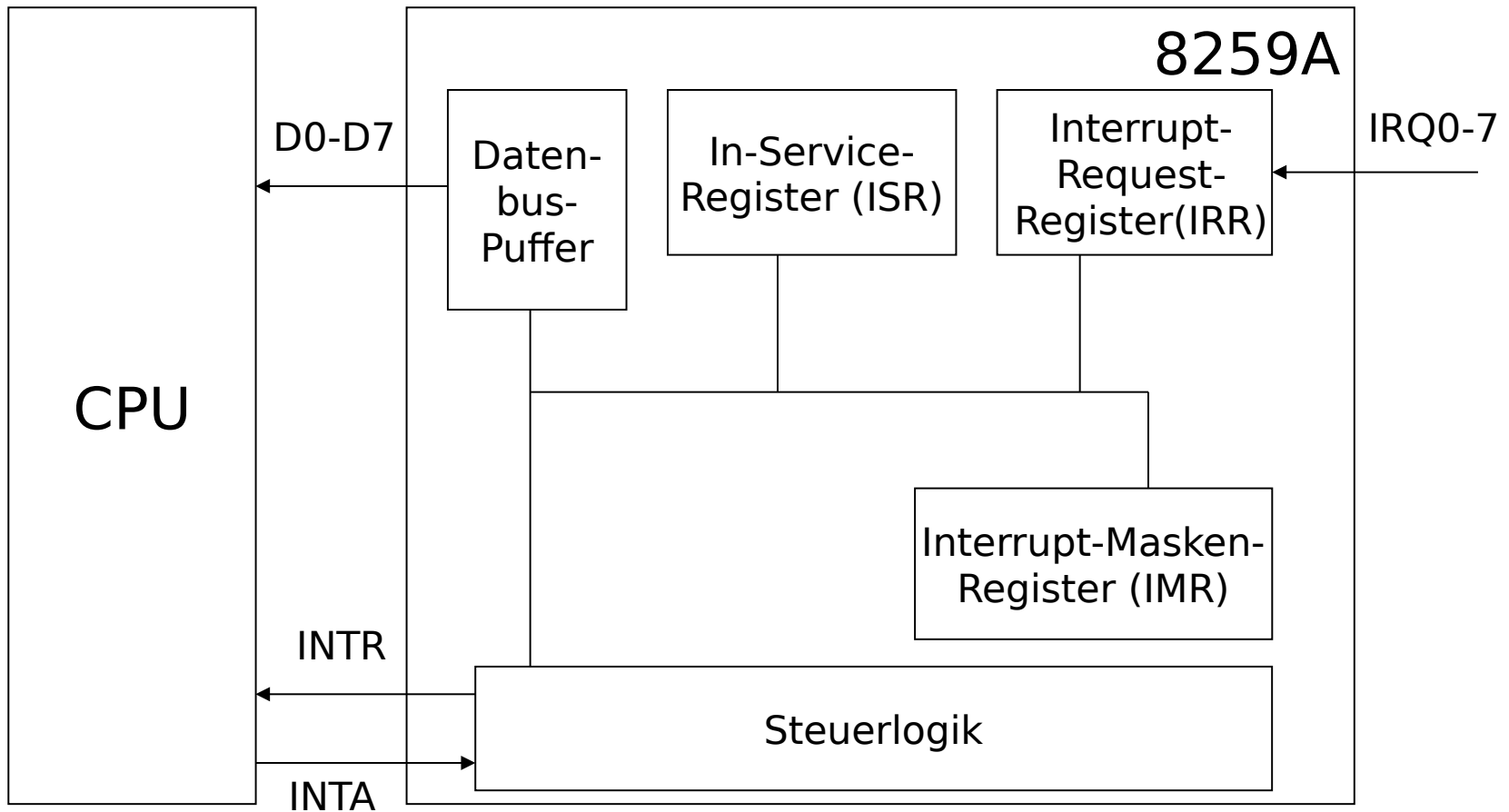
Gerät - Interrupt-Controller - CPU - Betriebssystem

Übertragung der Interrupt-Request-Nummer, Mapping IRQ → Int-Nr.

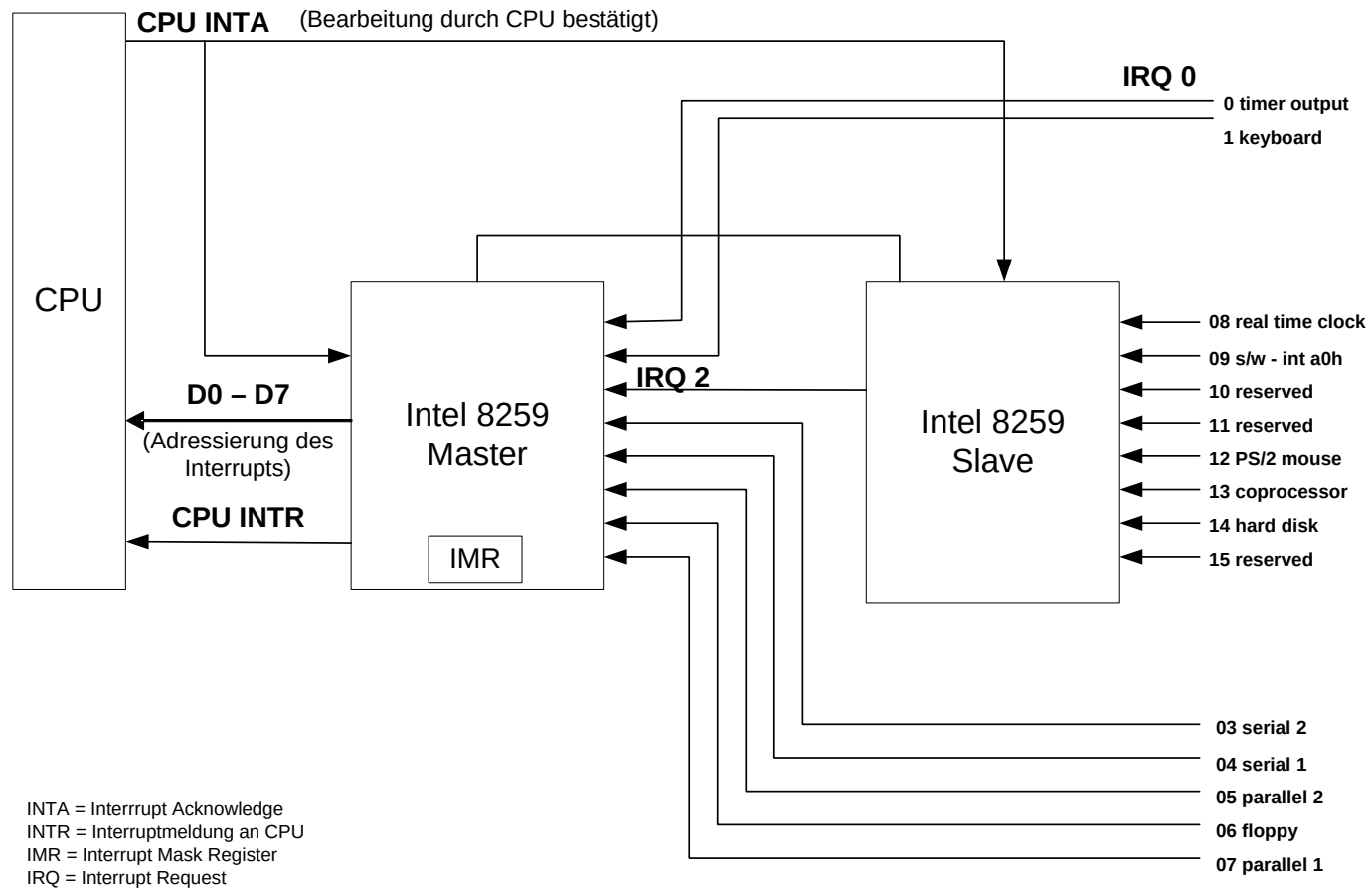


Beispiel: Intel 8259A-Controller

- Innenleben Intel 8259A, vereinfacht

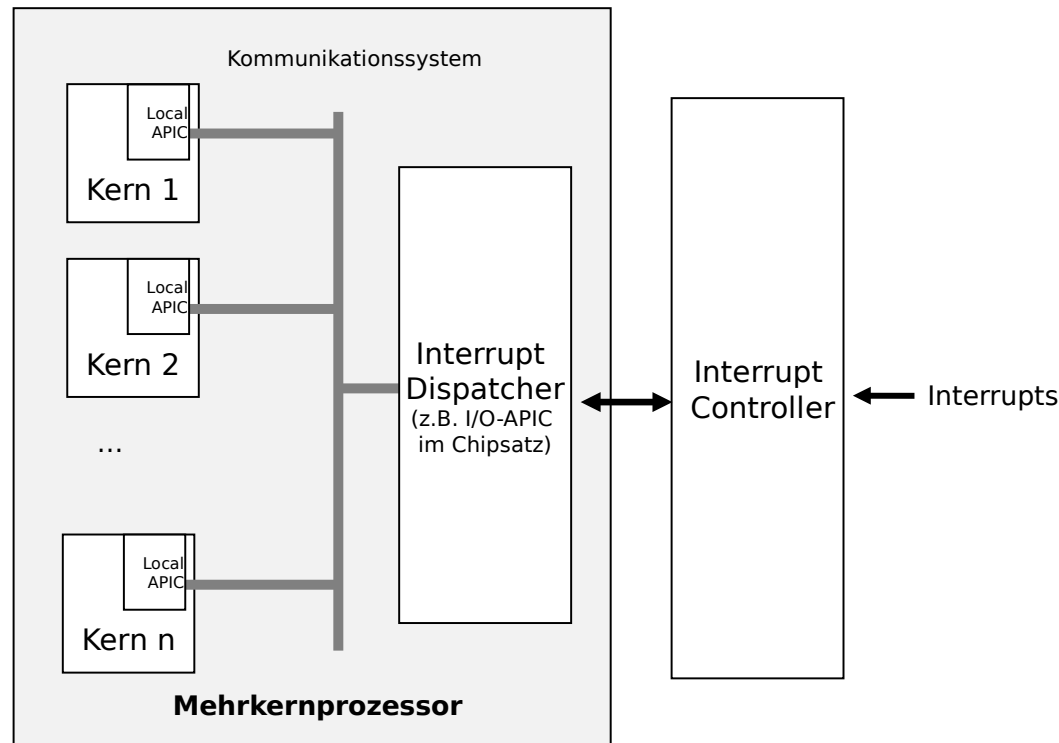


Beispiel: Intel 8259A-Controller kaskadiert

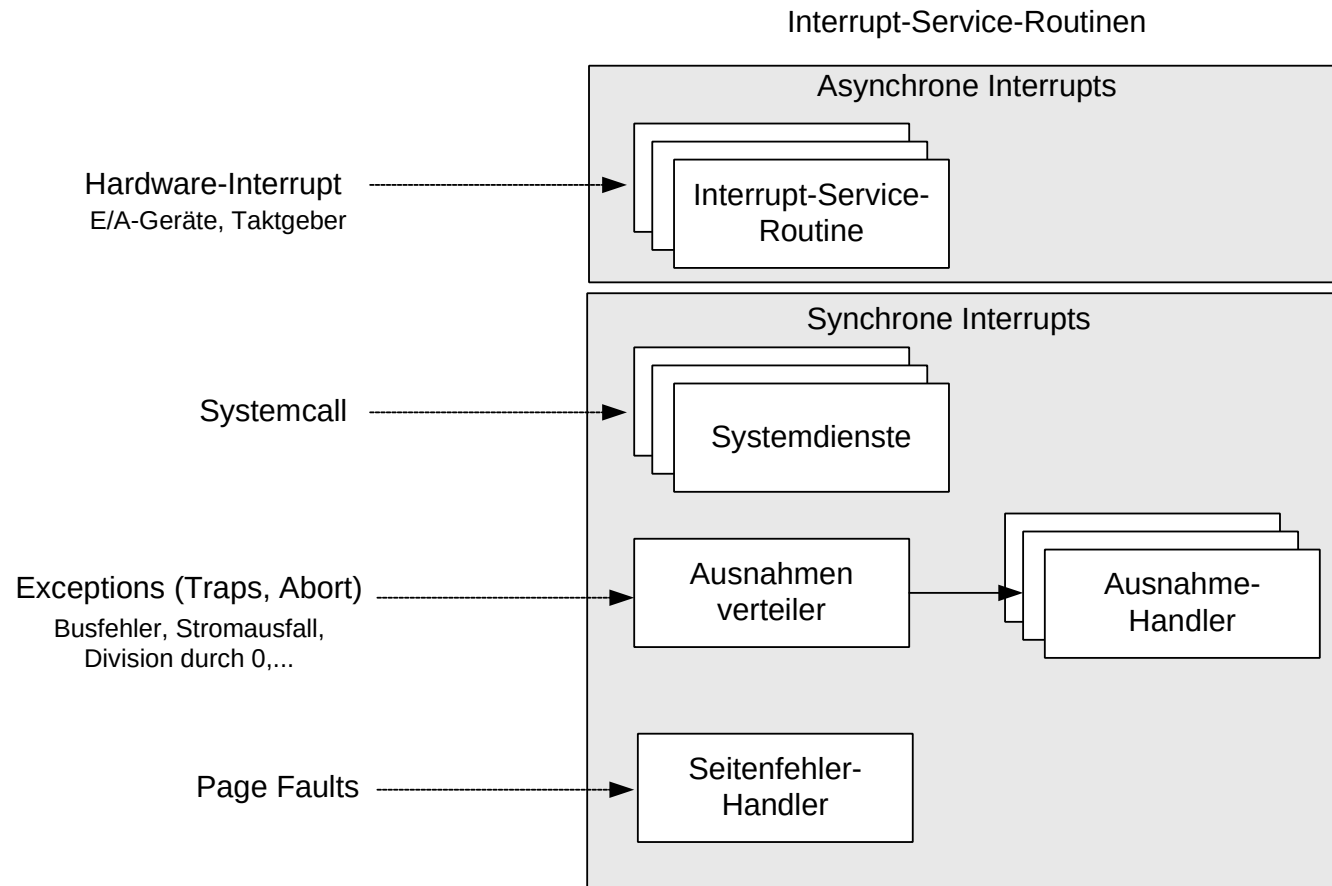


Interrupt-Dispatching bei Mehrkernprozessoren

- Dispatching-Algorithmus im Interrupt-Dispatcher wählt einen Kern aus, der den Interrupt bearbeiten soll



Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (1)



Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (2)

- Windows hat eine eigene Interrupt-Verwaltung
- Über sog. **Interrupt Request Levels** (IRQL) ordnet der Kernel den Interrupts eigene Prioritäten zu
- Nur Interrupts mit höherem IRQL können Interruptbearbeitung auf niedrigerem IRQL unterbrechen
- Über eine Interrupt Dispatch Tabelle (IDT) wird festgehalten, welche ISR für welchen Interrupt zuständig ist

Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (3)

- Interrupt Request Levels (IRQLs) in der IA32-Architektur

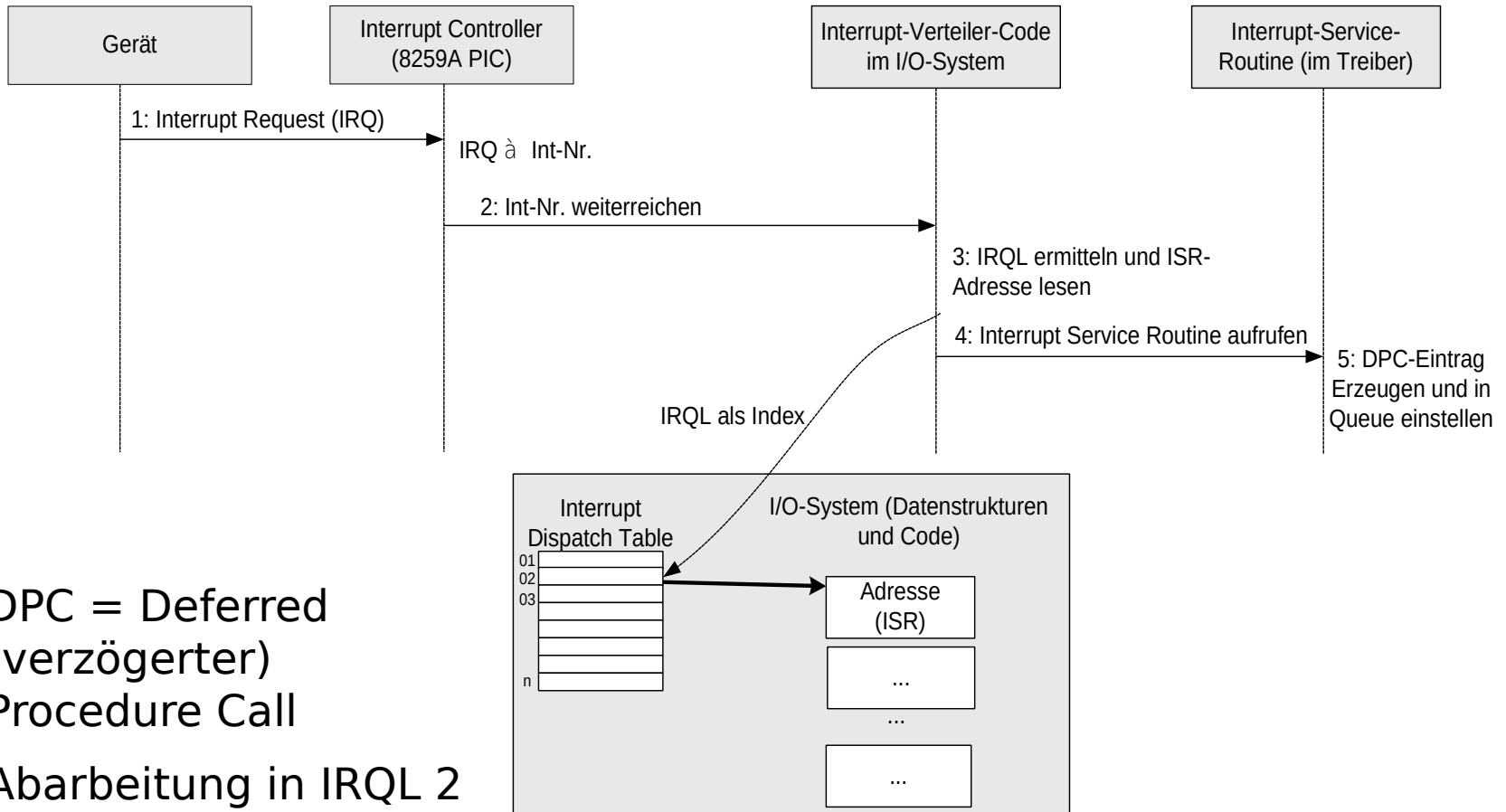
| IRQL | Bezeichnung | Beschreibung |
|------|--------------------|--|
| 31 | High-Level | Maschinen-Check und katastrophale Fehler |
| 30 | Power-Level | Strom/Spannungsproblem |
| 29 | IPI-Level | Interprocessor Interrupt |
| 28 | Clock-Level | Clock-Interrupt |
| 27 | Sync-Level | Prozessorübergreifende Synchronisation |
| 3-26 | Device-Levels | Abbildung auf IRQs der Geräte je nach verbautem Interrupt-Controller |
| 2 | Dispatch/DPC-Level | Dispatching und Ausführung von Deferred Procedure Calls |
| 1 | APC-Level | Ausführung von Asynchronous Procedure Calls nach Ein-/Ausgabe-Requests |
| 0 | Passive-Level | Normale Threadausführung |

Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (4)

- Interrupt Request Levels (IRQLs) in der x64- und der IA64-Architektur

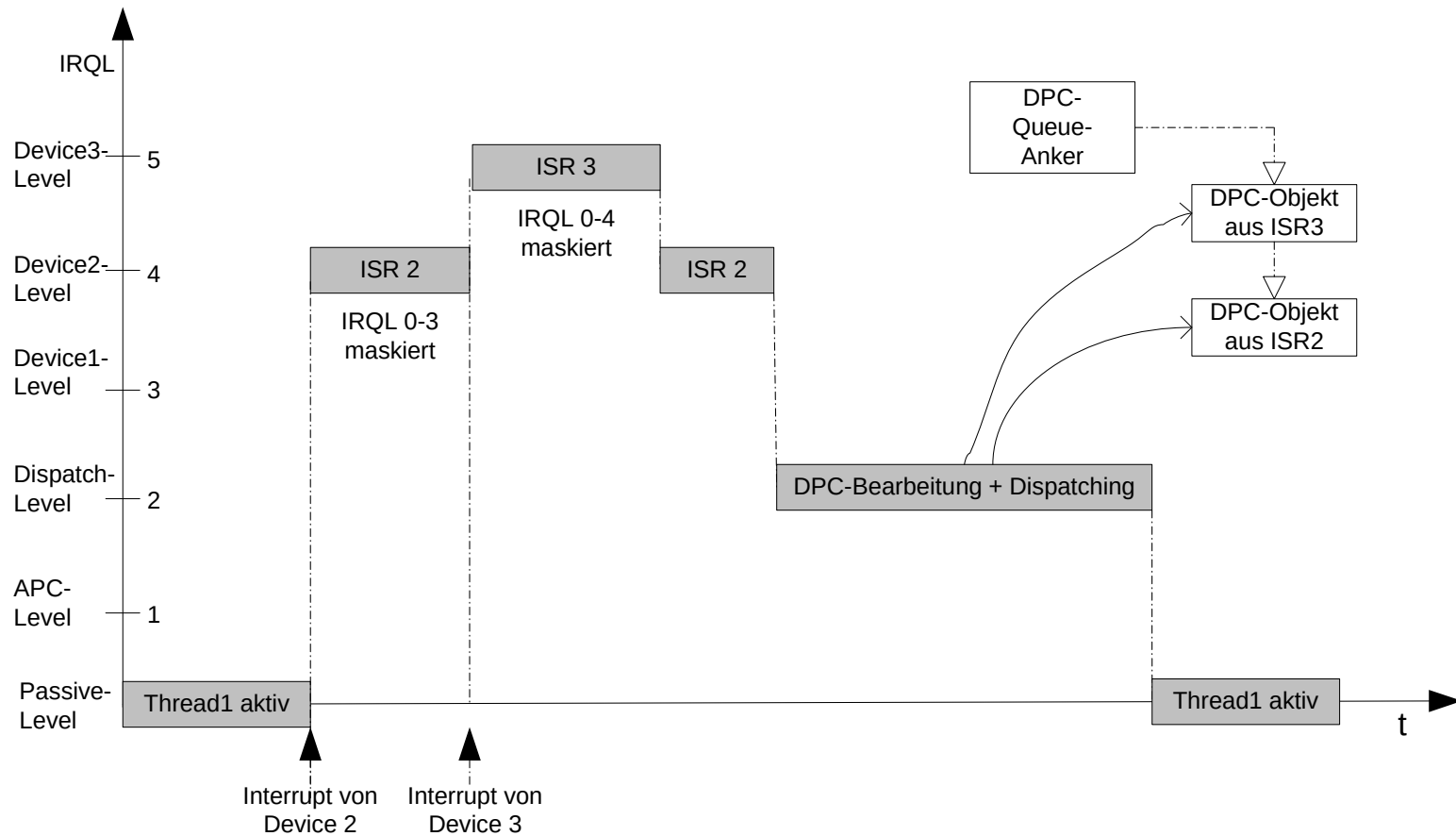
| IRQL | Bezeichnung | Beschreibung |
|------|--------------------|--|
| 15 | High-Level | Maschinen-Check und katastrophale Fehler |
| 14 | Power-Level | Strom/Spannungsproblem und Interprozessor-Interrupt |
| 13 | Clock-Level | Clock-Interrupt |
| 12 | Synch-Level | Prozessorübergreifende Synchronisation |
| 3-11 | Device-Levels | Abbildung auf IRQs der Geräte je nach verbautem Interrupt-Controller |
| 2 | Dispatch/DPC-Level | Dispatching und Ausführung von Deferred Procedure Calls |
| 1 | APC-Level | Ausführung von Asynchronous Procedure Calls |
| 0 | Passive-Level | Normale Threadausführung |

Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (5)



- DPC = Deferred (verzögerter) Procedure Call
- Abarbeitung in IRQL 2

IRQL-Nutzung am Beispiel Singleprozessor



Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (6)

- Bei x86-Systemen unterbricht der Interrupt-Controller (meist 8259-Baustein) die CPU auf einer Leitung (Hardware)
- Die CPU fragt den Controller ab, um eine Unterbrechungsanforderung (IRQ) zu erhalten (Hardware)
- Interrupt-Controller übersetzt IRQ in eine Interrupt-Nummer (Hardware)
- Aus Interrupt-Nummer wird IRQL ermittelt (Software, Windows)
- Die IDT enthält Adresse der anzustoßenden Interruptverteiliroutine

Fallbeispiel: Windows, Interrupt-Bearbeitung (7)

- Interruptverteilroutine wird aufgerufen und ermittelt die Adresse der ISR
- ISR wird aufgerufen
- ISR erzeugt meist nur ein **DPC-Objekt** (Deferred Procedure Call) und hängt es in eine DPC-Queue ein
 - Kurze Bearbeitungszeiten in der ISR wird angestrebt
 - Kurze Bearbeitung in hoher Prioritätsstufe (IRQL)
 - Systembelastung gering halten
- DPC-Routine wird dann später mit niedrigerer Priorität (IRQL = 2) aufgerufen und ist unterbrechbar(er)

Fallbeispiel: Windows, APC-Bearbeitung (8)

- APC = Asynchronous Procedure Call
- Anwendungsbeispiel:
 - Bei read-Aufrufen an eine Festplatte wird die Threadbearbeitung zunächst unterbrochen
 - Nachdem der read-Aufruf vom Kernel abgearbeitet wurde, wird ein **APC-Objekt** erzeugt und in die APC-Queue des rufenden Threads eingehängt
 - Die nachfolgende Bearbeitung der APC-Queue erfolgt dann mit **IRQL 1**
- Je eine **APC-Queue** pro Thread im Kernel- und im Usermodus, je nachdem, von wo der read-Aufruf abgesetzt wurde

Hinweis: Threads sind leichtgewichtige Prozesse (später mehr dazu)

Fallbeispiel: Linux

- Linux nutzt auch eine Tabelle mit Referenzen auf die Interrupt-Handler (ISR)
- Jeder Interrupt-Request wird auf eine Interrupt-Nummer (= Index in der Tabelle) abgebildet
- Meist wird in der ISR nur ein **Tasklet** erzeugt
- Tasklets dienen der schnellen Behandlung von Interrupts (ähnlich dem Windows-DPC-Mechanismus)

Fallbeispiel: Linux, Interrupt-Vektor-Tabelle

Die Interrupt-Vektor-Tabelle ist im System wie folgt definiert:

```
extern irq_desc_t irq_desc [NR_IRQS];
```

Aufbau eines Tabelleneintrags:

```
typedef struct {  
    unsigned int status;           // IRQ-Status  
    hw_irq_controller *handler;    // Zeiger auf verantwortlichen  
                                   // (Hardware-)Controller  
    struct irqaction *action;      // Zeiger auf Action-Liste  
    unsigned int depth;            // Spezielles Feld zum  
                                   // Aktivieren und  
                                   // Deaktivieren des IRQ  
} ____cacheline_aligned irq_desc_t;
```


Fallbeispiel: Linux, Action-Liste

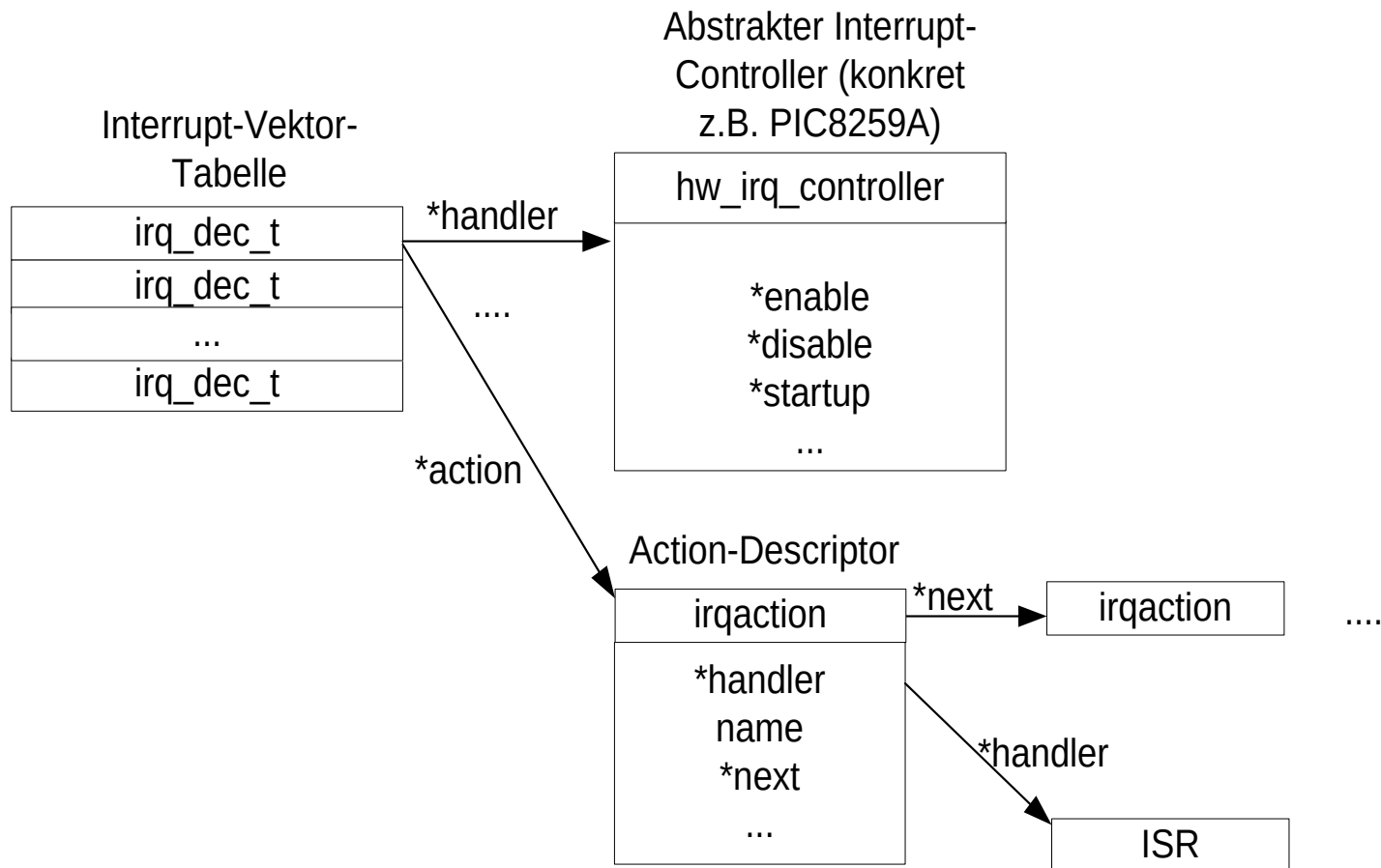
- action = Action-Descriptor, Struktur mit Verweis auf eigentliche ISR
- Verkettete Liste

```
// vereinfacht  
struct irqaction {
```

```
    // Verweis auf Interrupt-Service-Routine  
    void (*handler)(int, void *, struct pt_regs *);
```

```
    unsigned long flags;           // Eigenschaften des Interrupt-Handlers  
    const char *name;             // Name des Interrupt-Handlers  
    void *dev_id;                 // Eindeutige Identifikation des  
                                // Interrupt-Handlers  
    struct irqaction *next;       // Verweis auf nächsten Eintrag in der  
                                // Action-Liste bei shared Interrupts  
};
```

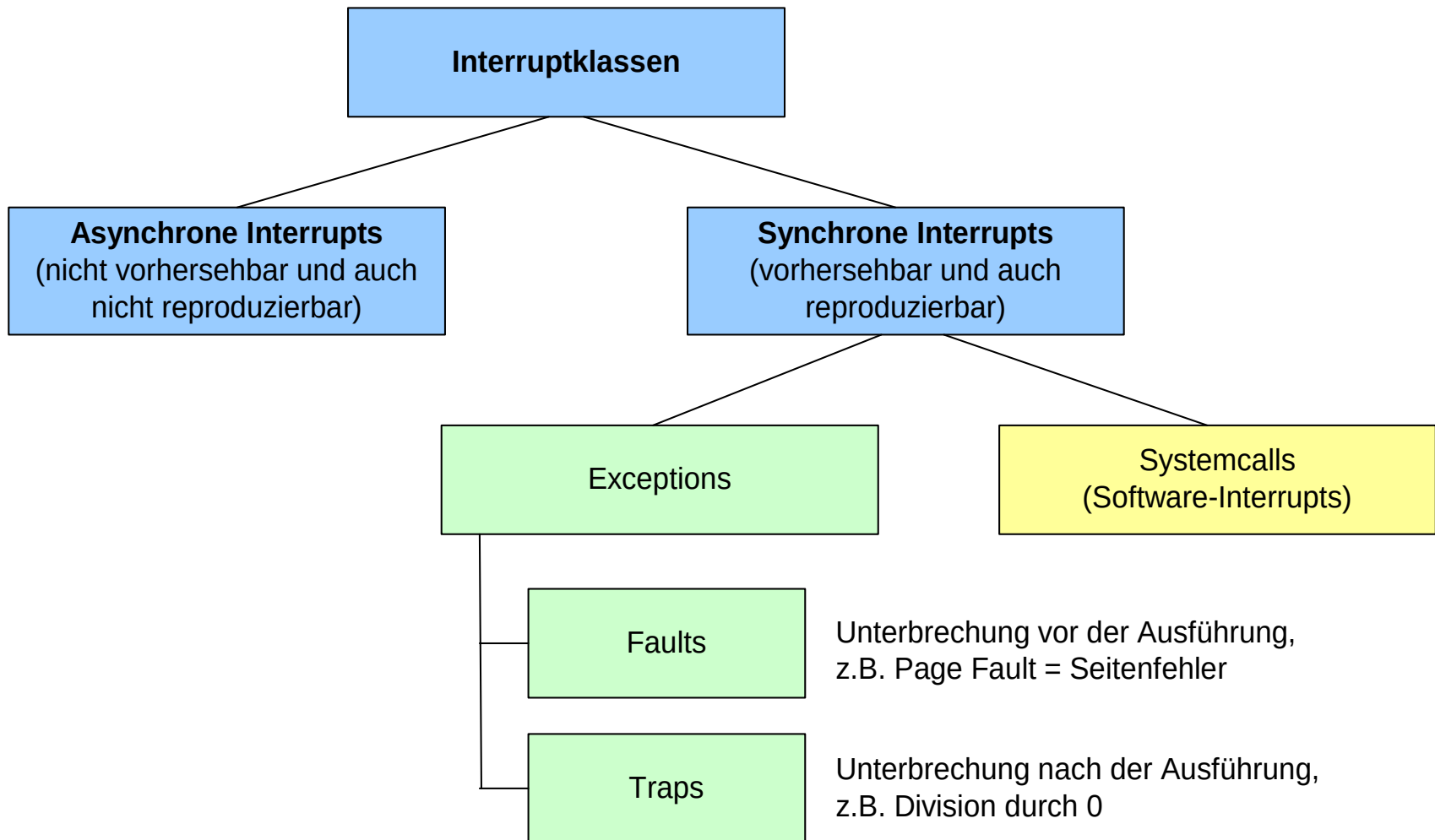
Fallbeispiel: Linux, Datenstrukturen im Kernel



Überblick

1. Begriffe und Klassifizierung
2. Zusammenspiel der Komponenten
- 3. Systemdienste und Systemcalls**

Wiederholung: Interrupt-Klassifizierung

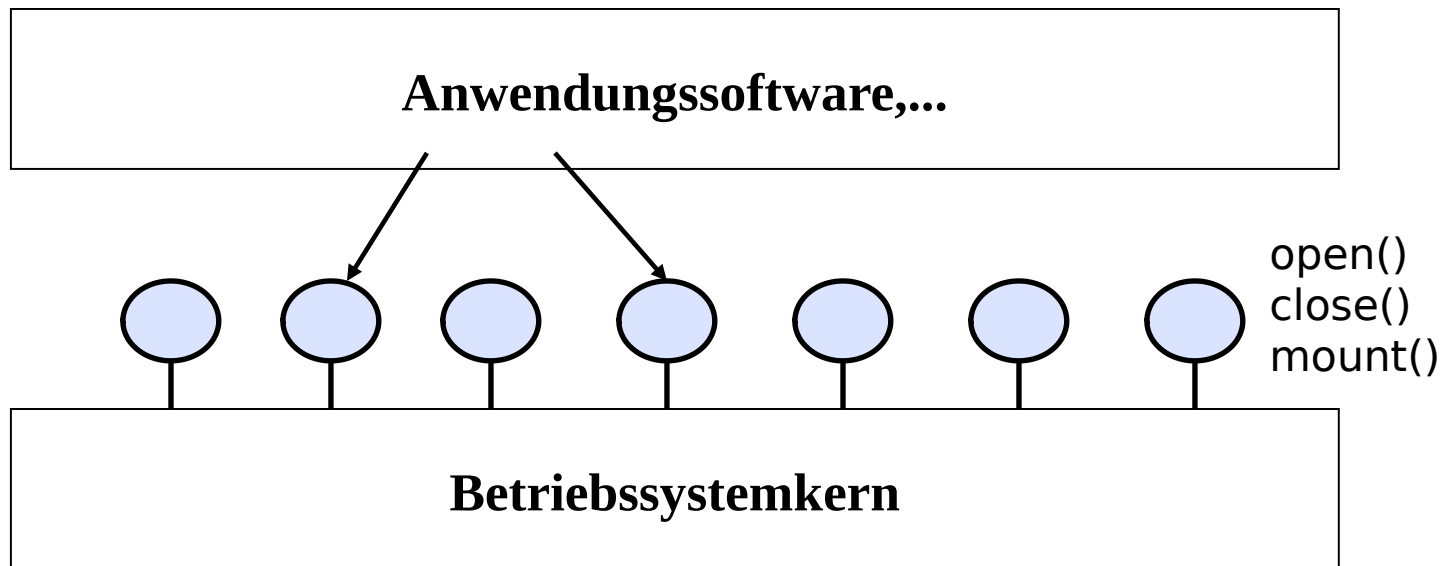


Dienste des Betriebssystems

- Anwendungsprogramme nutzen die **Dienste** des Betriebssystems, die über sog. Systemcalls aufgerufen werden
- Wohldefinierte Einsprungpunkte ins Betriebssystem
- Spezieller Aufrufmechanismus für einen Systemcall
 - **Software-Interrupt** (als **Trap** bezeichnet) oder **Supervisor Call** (SVC)
 - Vorteil: Anwendungsprogramm muss Adressen der Systemroutinen nicht kennen
- Alle Systemcalls zusammen bilden die Schnittstelle der Anwendungsprogramme zum Betriebssystemkern
 - Zugang zu Systemcalls wird meist in Bibliotheken bereitgestellt

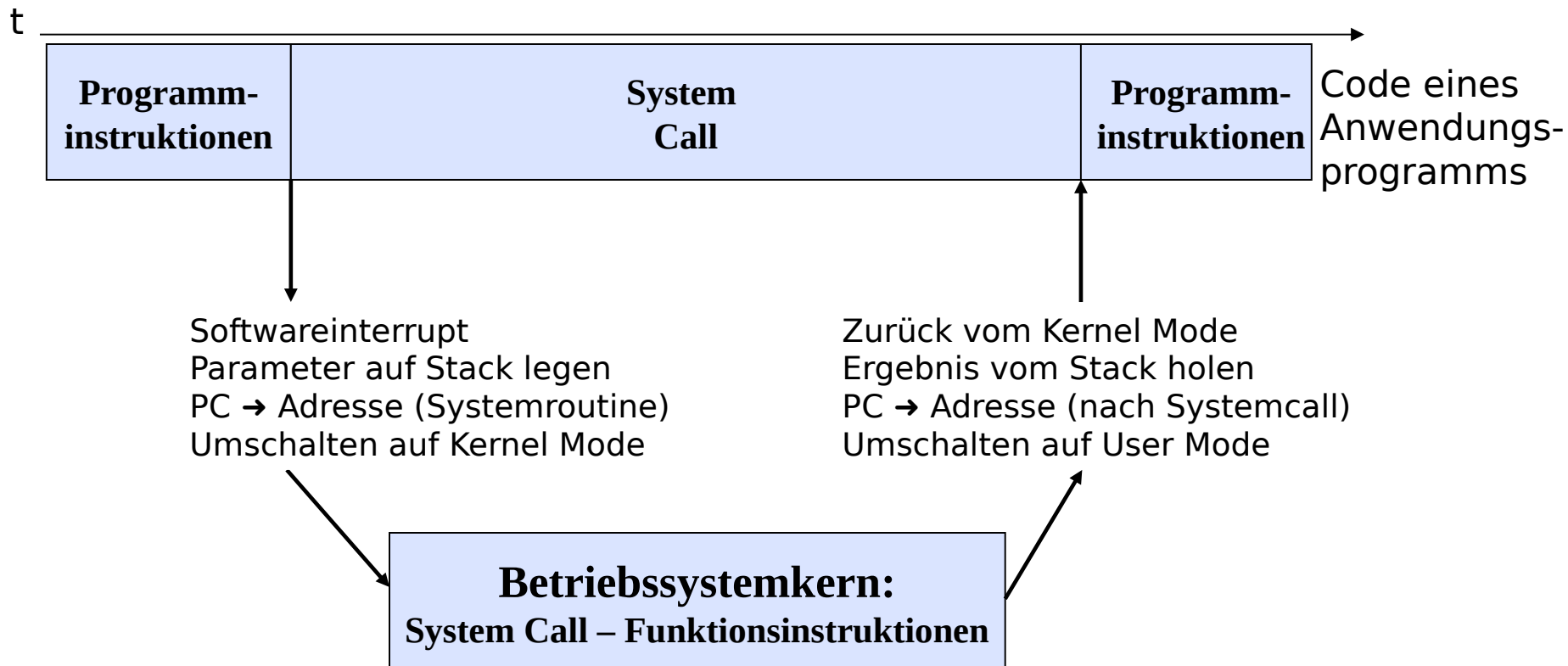
Umschaltung in den Kernelmodus

- Systemcalls werden im **Kernelmodus** ausgeführt
- Beim Aufruf wird durch den Prozessor vom Usermodus in den Kernelmodus **umgeschaltet**



Systemcall-Ablauf

■ Befehlsfolge eines Systemaufrufs



Systemcall-Ablauf unter Linux/x86-CPUs (1)

x86-Befehl:

```
int n           // Aufruf des Interrupts mit der Interrupt-Vektor-Nummer n
int $0x80       // Trap, Systemcall
```

C-Code:

```
#include <stdio.h>
main()
{
    open("mandl.txt",1);    // Datei zum Lesen öffnen
}
```

Maschinencode (gcc -S datei.c):

```
.LCO:
.string "mandl.txt"
.text
.globl main
main:
...
call open
...
```


Systemcall-Ablauf unter Linux/x86-CPUs (2)

Open-Routine in der Linux C-Library

(gcc -static ..., 386 Architektur):

`__libc_open:`

```
...  
mov 0xc(%esp,1), %edi // Parameter für Open in Register laden  
mov ...  
mov $0x5, %eax        // Systemcall-Code für open-Funktion  
int $0x80              // Systemcall (auf x86_64: `syscall`)  
                        // - CS (Code Segment) Register auf Stack gepusht  
                        // - IP (Instruction Pointer) auf Stack gepusht
```

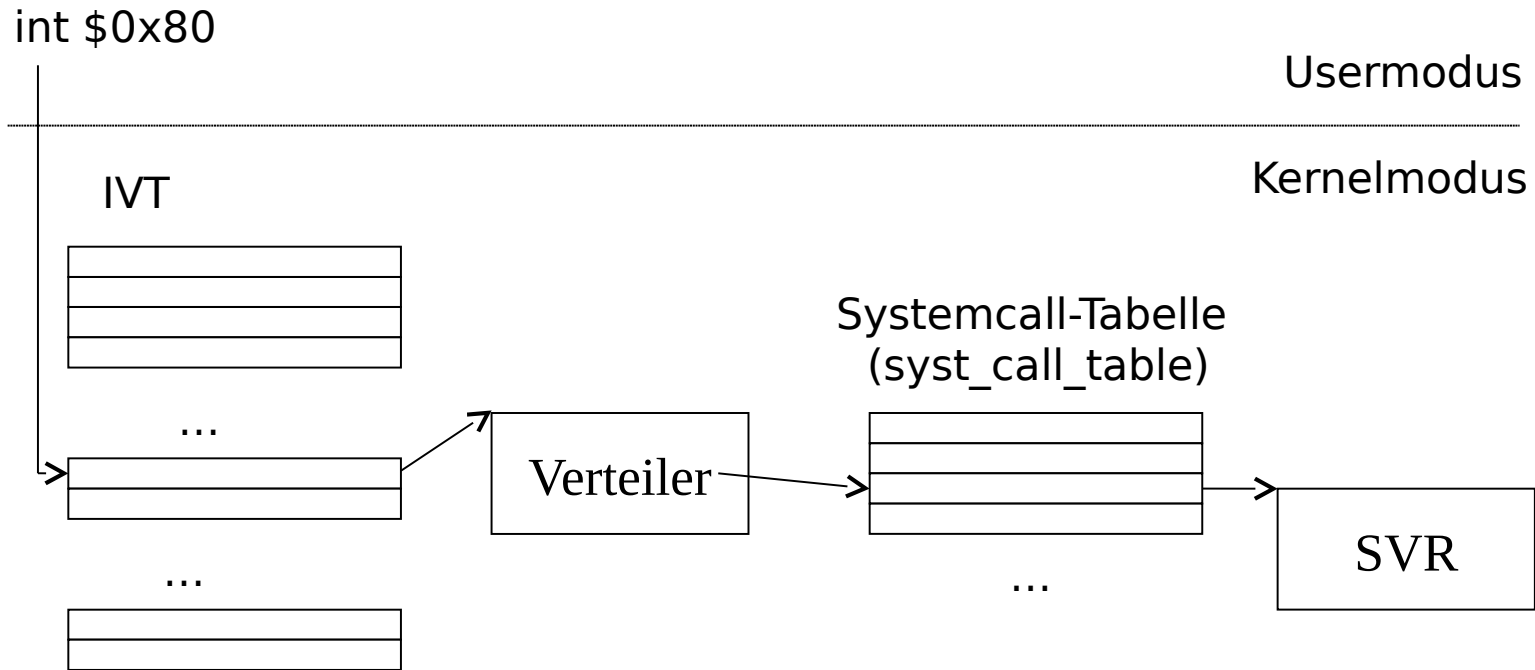
...

im Kernel:

```
...  
iret                // zurück aus dem Interrupt zum Aufrufer  
                        // - CS und IP werden von Stack gepopt
```

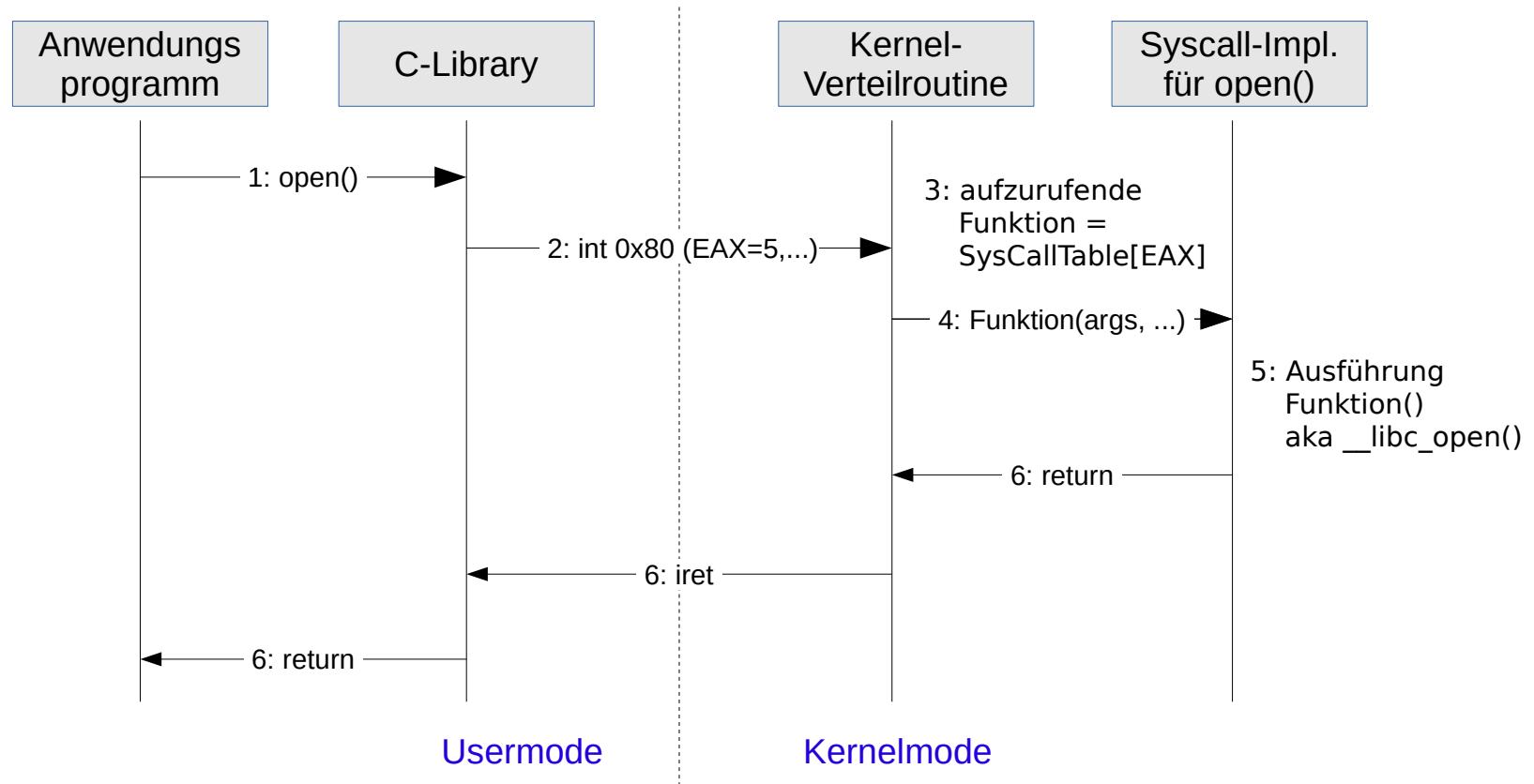
- Interrupt-Vektor-Nummer \$0x80 ist Index für die Adressierung der Interrupt-Vektor-Tabelle (IVT)
- (CS,IP) → Adresse der nächsten Anweisung

Systemcall-Ablauf unter Linux/x86-CPUs (3)



- IVT = Interrupt-Vektor-Tabelle,
- SVR = Serviceroutine, bearbeitet Systemcall
- Systemcall-Tabelle verweist auf Implementierungen der Systemdienste

Systemcall-Ablauf unter Linux: Sequenzdiagramm



- Systemcall-Tabelle enthält alle Verweise auf Systemcalls (struct sys_call_table)

Vergleichbare Befehle in anderen Prozessoren

- **EPC-Befehl** = Enter Privileged Mode in IA64
 - Übergabe von max. 8 Parametern in Registern und die restlichen Parameter im Kernelstack
- **syscall-Befehl** in x64
 - Übergabe der Systemcall-Nr. im EAX-Register
 - Max. 8 Parameter in Registern und die restlichen Parameter im Kernelstack
- **sysenter-Befehl** in x86 Pentium II
- **SVC-Befehl** in ARM-Architektur
 - früher SWI = Software-Interrupt

Systemcalls bei POSIX

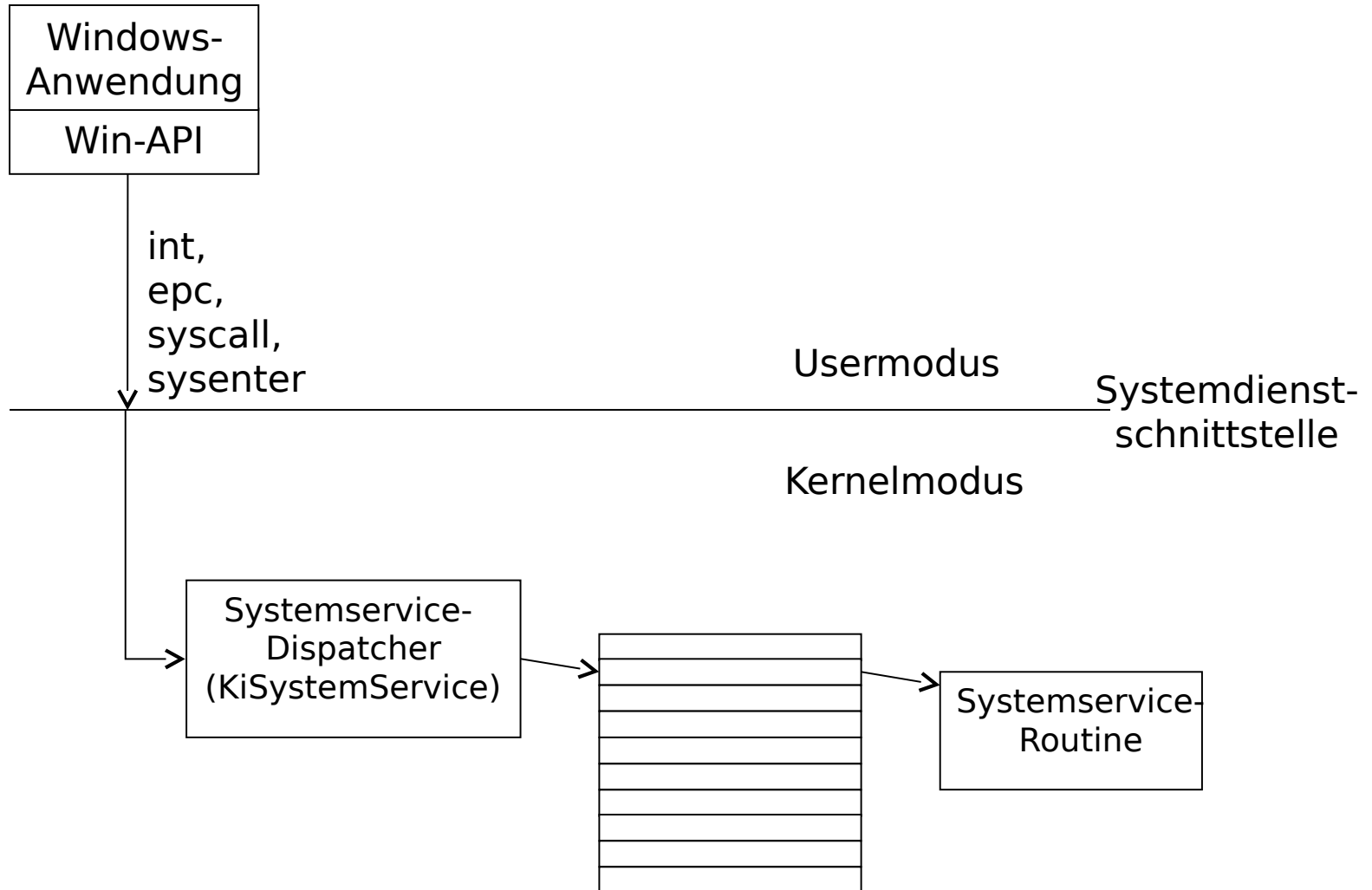
- Systemcalls sind standardisiert in ISO 9945-1
- POSIX-Konformität erfüllen die meisten Unix-Derivate
- Beispiele:
 - fork() : Prozesserzeugung
 - execve() : Aufruf eines Programms
 - exit() : Beenden eines Prozesses
 - open() : Datei öffnen
 - close() : Datei schließen
 - read() : Daten aus Datei lesen
 - write() : Daten in Datei schreiben

POSIX = **P**ortable **O**perating **S**ystem **U**nix

Systemcalls bei Win32-API

- In Windows-Systemen sind die Systemcalls in der Windows-API (Application Programming Interface) definiert
- Es gibt einige 1000 API-Funktionen, einige davon sind Systemcalls
- Beispiele:
 - CreateProcess(): Prozesserzeugung
 - exitProcess(): Beenden eines Prozesses
 - CreateFile(): Erzeugen und Öffnen einer Datei
 - CloseHandle(): Datei schließen
 - ReadFile(): Daten aus Datei lesen
 - WriteFile(): Daten in Datei schreiben

Systemcall-Ablauf unter Windows



Überblick

1. Begriffe und Klassifizierung
2. Zusammenspiel der Komponenten
3. Systemdienste und Systemcalls

Zusammenfassung Interruptverarbeitung

- Polling und Interrupts
- Synchrone und asynchrone Interrupts
- Interrupt-Requests (IRQ) und Interrupt-Bearbeitung
- Interrupt-Vektor-Tabelle (IVT) zur Adressierung von Interrupt-Service-Routinen (ISR) für synchrone und asynchrone Interrupts
- Systemcalls = synchrone Software-Interrupts, (oft auch, etwas verwirrend als Traps bezeichnet)

Gesamtüberblick

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