© 2023 A. Lochmann (TUDO), 2022 P. Ulbrich (TUDO), 2021-16 V.r Sieh (FAU), 2016-07 D. Lohmann (LUHH), 2006 O. Spinczyk (UOS)

Betriebssystembau (BSB)

VL 3 – Unterbrechungen, Hardware

Alexander Krause

Informatik-Rechner-Betriebsgruppe / LS12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware
Technische Universität Dortmund

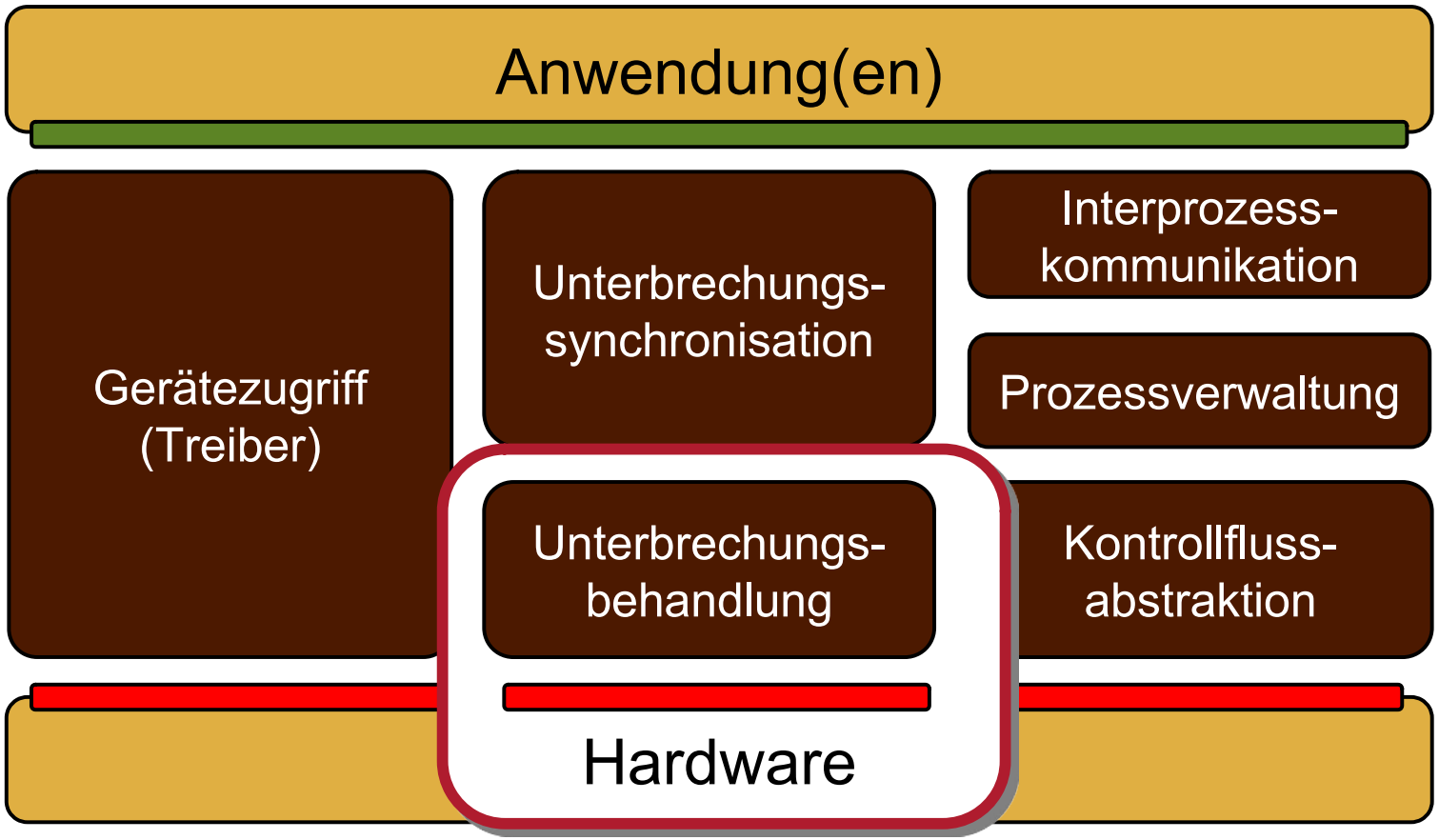
`https://irb.cs.tu-dortmund.de/lehre/ws26/bsb`

WS 26 – 20. Oktober 2026

technische universität dortmund

arbeitsgruppe systemsoftware

Überblick: Einordnung dieser VL



Betriebssystementwicklung

Agenda

Einordnung
Grundlagen
Hardware-Architekturen
Zusammenfassung



Agenda

Einordnung
Grundlagen
Hardware-Architekturen
Zusammenfassung



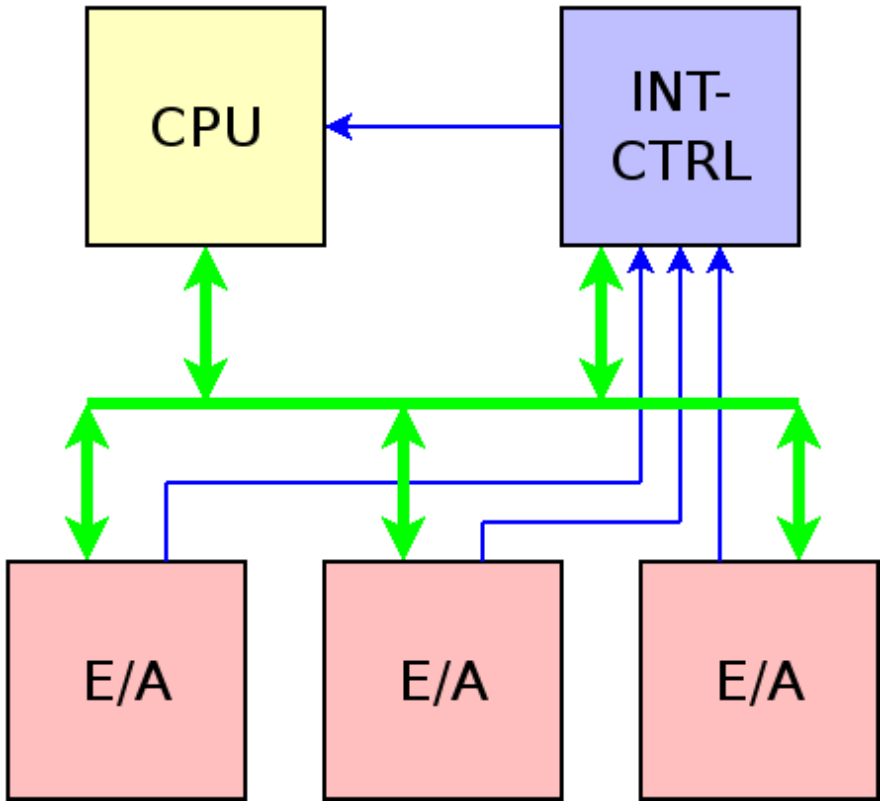
Sinn und Zweck von Unterbrechungen

Ein Blick zurück in die Historie von Betriebssystemen...

- Überlappte Ein-/Ausgabe:
  - Eingaben: Verschwendung von anderweitig nutzbaren Prozessorzyklen bei (oft nicht vorhersagbar langem) *aktivem Warten*
  - Ausgaben: selbständiges Agieren der E/A-Geräte (z.B. durch *DMA*) entlastet die CPU
- Timesharing Betrieb:
  - Zeitgeber-Unterbrechungen geben dem Betriebssystem die Möglichkeit
    - zur *Verdrängung von Prozessen*
    - Aktivitäten zeitgesteuert zu starten



Interrupt-Hardware



Interrupt-Controller ist im einfachsten Fall ein „Oder”-Gatter...

Agenda

Einordnung

Grundlagen

- Priorisierung
- Verlust von IRQs
- Behandlungsroutine
- Zustandssicherung
- Multiprozessorsysteme
- Gefahren

Hardware-Architekturen

Zusammenfassung



Priorisierung

- **Problem**:
  - Mehrere Unterbrechungsanforderungen können gleichzeitig signalisiert werden. Welche ist wichtiger?
  - Während die CPU auf die wichtigste Anforderung reagiert, können weitere Anforderungen signalisiert werden.



Priorisierung

- **Problem**:
  - Mehrere Unterbrechungsanforderungen können gleichzeitig signalisiert werden. Welche ist wichtiger?
  - Während die CPU auf die wichtigste Anforderung reagiert, können weitere Anforderungen signalisiert werden.
- **Lösung**: ein **Priorisierungsmechanismus** ...
  - **in Software**: die CPU hat nur einen IRQ (*interrupt request*) Eingang und fragt die Geräte in bestimmter Reihenfolge ab
  - **in Hardware**: eine Priorisierungsschaltung ordnet Geräten eine Priorität zu und leitet immer nur die dringendste Anforderung zur Behandlung weiter
  - **mit festen Prioritäten**: jedem Gerät wird statisch eine Priorität zugeordnet
  - **mit variablen Prioritäten**: Prioritäten sind dynamisch änderbar oder wechseln zum Beispiel zyklisch



Verlust von IRQs

- **Problem**:
  - während der Behandlung oder Sperrung von Unterbrechungen, kann die CPU keine neuen Unterbrechungen behandeln
  - die Speicherkapazität für Unterbrechungsanforderungen ist endlich.
    - i.d.R. ein Bit pro Unterbrechungseingang



Verlust von IRQs

- **Problem**:
  - während der Behandlung oder Sperrung von Unterbrechungen, kann die CPU keine neuen Unterbrechungen behandeln
  - die Speicherkapazität für Unterbrechungsanforderungen ist endlich.
    - i.d.R. ein Bit pro Unterbrechungseingang
- **Lösung**: in Software
  - die Unterbrechungsbehandlungsroutine sollte möglichst kurz sein (zeitlich!), um die Wahrscheinlichkeit von Verlusten zu minimieren
  - Unterbrechungen sollten nicht unnötig lange gesperrt werden
  - jeder Gerätetreiber sollte davon ausgehen, dass **eine** Unterbrechung **mehr als eine** abgeschlossene E/A Operation anzeigen kann



Zuordnung einer Behandlungsroutine

- **Problem**:
  - die Software soll mit möglichst wenig Aufwand herausfinden können, welches Gerät die Unterbrechung ausgelöst hat
    - eine sequentielle Abfrage der Geräte kostet nicht nur Zeit, sondern verändert die Zustände von E/A Bussen und unbeteiligten Geräten



Zuordnung einer Behandlungsroutine

- **Problem**:
  - die Software soll mit möglichst wenig Aufwand herausfinden können, welches Gerät die Unterbrechung ausgelöst hat
    - eine sequentielle Abfrage der Geräte kostet nicht nur Zeit, sondern verändert die Zustände von E/A Bussen und unbeteiligten Geräten
- **Lösung**:
  - jeder Unterbrechung wird eine Nummer zugeordnet, die als Index in eine Vektortabelle verwendet wird
    - die Vektornummer hat nicht zwangsläufig etwas mit der Priorität zu tun
    - es kommt in der Praxis leider vor, dass Geräte sich eine Vektornummer teilen müssen (*interrupt sharing*)
  - der Aufbau der Vektortabelle variiert je nach Prozessortyp
    - meist enthält sie Zeiger auf Funktionen
    - seltener sind die Einträge selbst bereits Instruktionen



Zustandssicherung

- **Problem**:
  - nach der Ausführung der Behandlungsroutine soll zum normalen Kontext zurückgekehrt werden können
  - die Behandlung soll quasi unbemerkt ablaufen (*transparency*)



Zustandssicherung

- **Problem**:
  - nach der Ausführung der Behandlungsroutine soll zum normalen Kontext zurückgekehrt werden können
  - die Behandlung soll quasi unbemerkt ablaufen (*transparency*)
- **Lösung**:
  - Zustandssicherung durch Hardware
    - nur das Notwendigste: z.B. Rücksprungadresse u. Prozessorstatuswort
    - Wiederherstellung durch speziellen Befehl, z.B. iret, rte, ...
  - Zustandssicherung durch Software
    - da Unterbrechungen jederzeit auftreten können, muss auch die Behandlungsroutine Zustände sichern und wiederherstellen



Geschachtelte Behandlung

- **Problem**:
  - um auf sehr wichtige Ereignisse schnell reagieren zu können, soll auch eine Unterbrechungsbehandlung unterbrechbar sein
  - eine unbegrenzte Schachtelungstiefe muss aber vermieden werden



Geschachtelte Behandlung

- **Problem**:
  - um auf sehr wichtige Ereignisse schnell reagieren zu können, soll auch eine Unterbrechungsbehandlung unterbrechbar sein
  - eine unbegrenzte Schachtelungstiefe muss aber vermieden werden
- **Lösung**:
  - die CPU erlaubt immer nur Unterbrechungen mit höherer Priorität
  - die aktuelle Priorität wird im Prozessorstatuswort gespeichert
  - die vorherige Priorität wird auf einem Stapel abgelegt



Interrupt-Ablauf

HW: E/A-Gerät signalisiert Interrupt an Interrupt-Controller

HW: Interrupt-Controller signalisiert Interrupt an CPU

HW: CPU sichert einige Register (PC, IE, ...)

HW: CPU disabled Interrupt-Eingang (IE = 0)

HW: CPU holt sich von Interrupt-Controller IRQ-Nummer

HW: CPU lädt Vektor aus Interrupt-Vektor-Tabelle in PC

SW: Interrupt-Handler sichert weitere Register

SW: Interrupt-Handler behandelt Interrupt

SW: Interrupt-Handler restauriert Register

SW: Interrupt-Handler ruft `iret` auf

HW: CPU restauriert PC, IE, ...
Rücksprung in das unterbrochene Haupt-Programm, Interrupt-Eingang wieder enabled



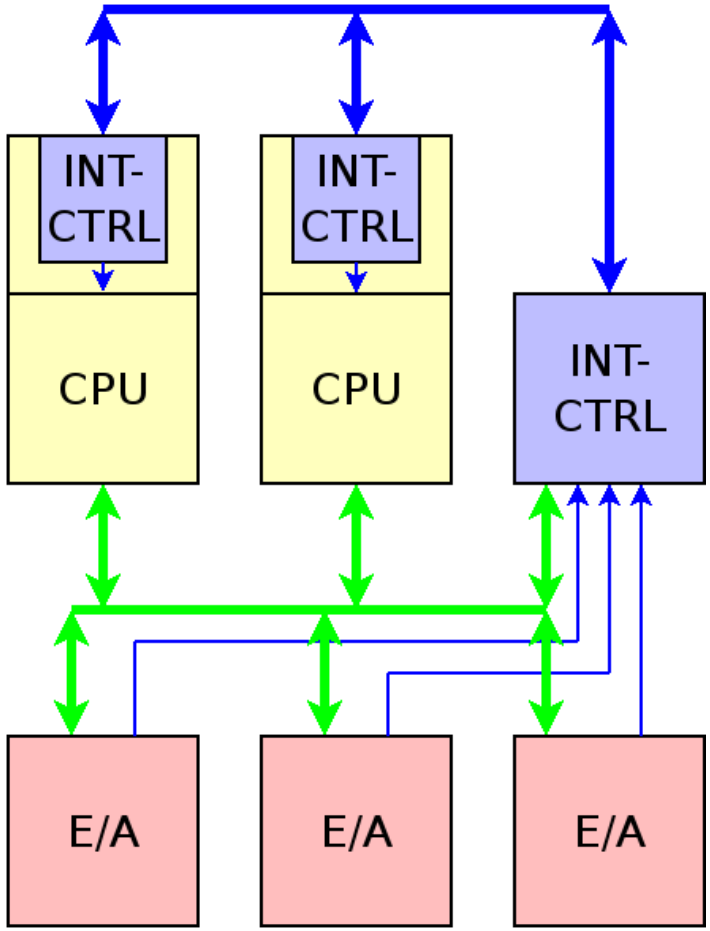
Multiprozessorsysteme

- **Problem**:
  - Unterbrechungen können immer nur von einer CPU behandelt werden. Aber welche?
  - es gibt eine weitere Kategorie von Unterbrechungen: die Interprozessor-Unterbrechungen
- **Lösung**: Unterbrechungsbehandlungshardware komplexer auf Multiprozessorsystemen. Viele Entwurfsvarianten ...
  - feste Zuordnung
  - zufällige Zuordnung
  - programmierbare Zuordnung
  - Zuordnung unter Berücksichtung der Prozessorlast

  ... und Kombinationen davon.



Interrupt-Hardware (SMP)



Interrupt-Controller sind selbständige, konfigurierbare Einheiten...

Gefahr: „unechte Unterbrechungen“

(„*spurious interrupts*“)

- **Problem**: ein technischer Mechanismus zur Unterbrechungsbehandlung birgt die Gefahr von fehlerhaften Unterbrechungsanforderungen, z.B. durch ...
  - Hardwarefehler
  - fehlerhaft programmierte Geräte
- **Lösung**:
  - Hardware- und Softwarefehler vermeiden 
  - Betriebssystem „defensiv“ programmieren
    - mit unechten Unterbrechungen rechnen



Gefahr: „Unterbrechungsstürme“

(„*interrupt storms*“)

- **Problem**:
  - hochfrequente Unterbrechungsanforderungen können einen Rechner lahm legen
  - es handelt sich entweder um unechte Unterbrechungen oder der Rechner ist mit der E/A Last überfordert
  - kann leicht mit Seitenflattern (*thrashing*) verwechselt werden
- **Lösung**: durch das Betriebssystem
  - Unterbrechungsstürme erkennen
  - das verursachende Gerät deaktivieren



Agenda

Einordnung

Grundlagen

Hardware-Architekturen

- Motorola/Freescale 68k
- Intel x86

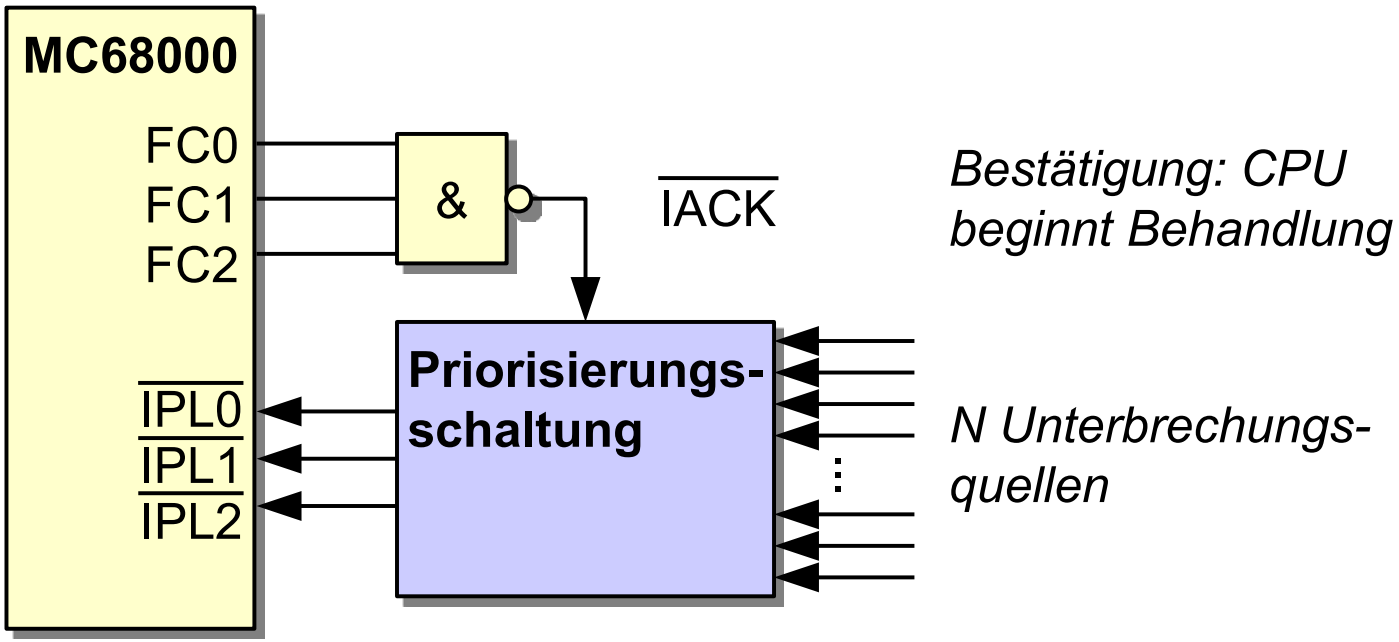
Zusammenfassung



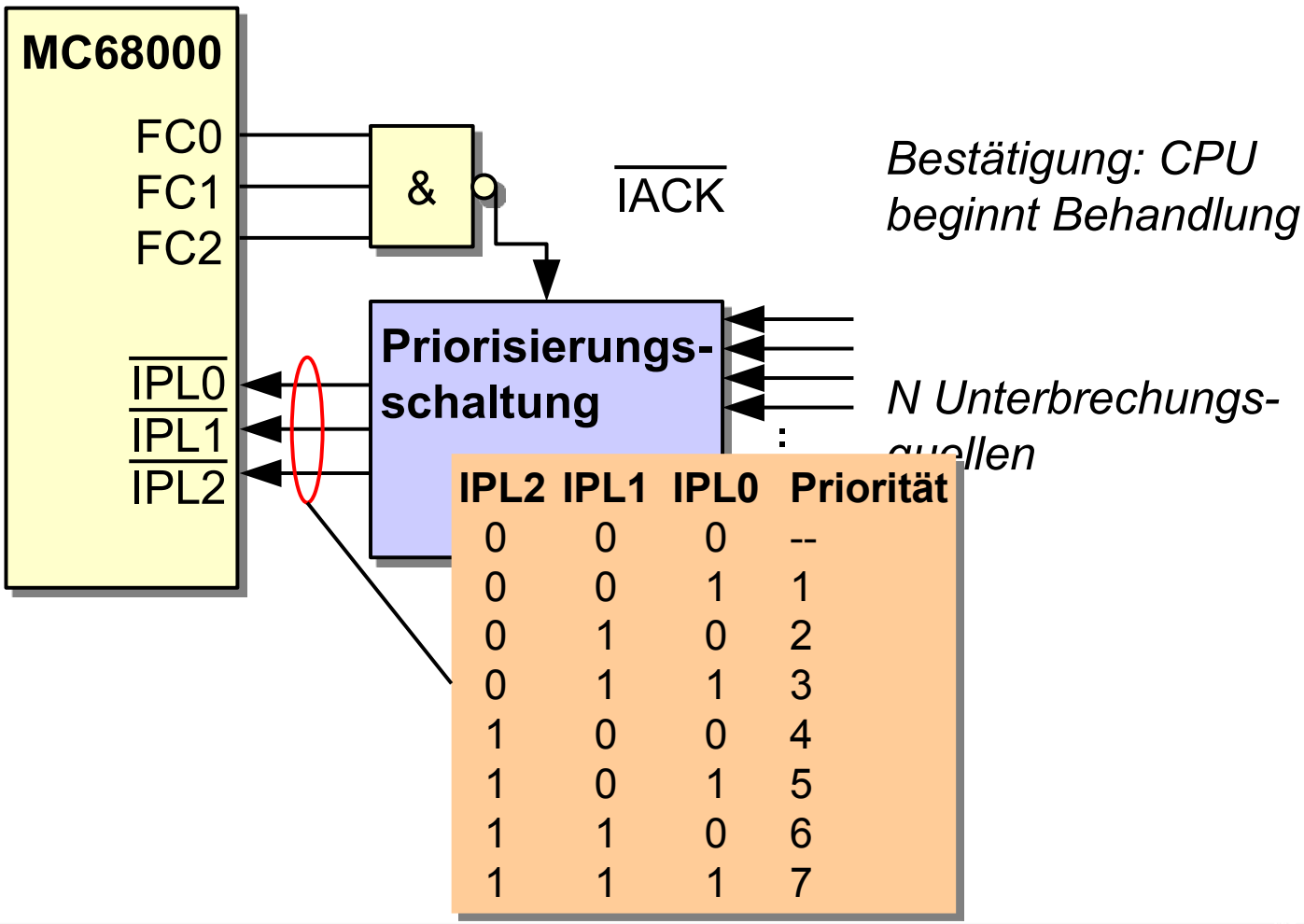
Unterbrechungen beim MC68000



Unterbrechungen beim MC68000

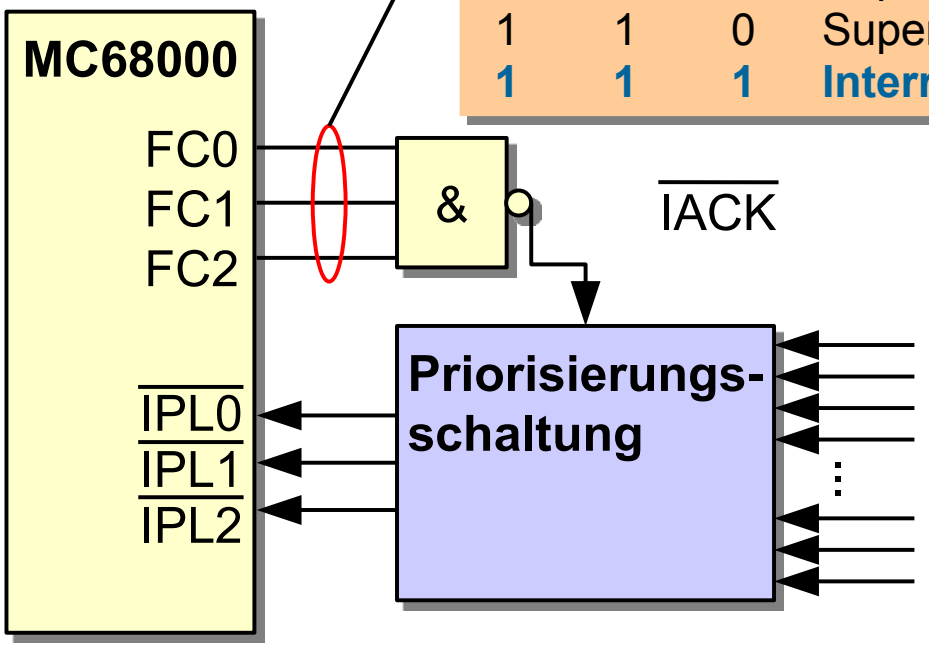


Unterbrechungen beim MC68000



Unterbrechungen

FC2	FC1	FC0	Zyklustyp
0	0	0	reserviert
0	0	1	Anwender-Daten
0	1	0	Anwender-Program
0	1	1	reserviert
1	0	0	reserviert
1	0	1	Supervisor-Daten
1	1	0	Supervisor-Programm
1	**1**	**1**	**Interrupt aufgetreten**

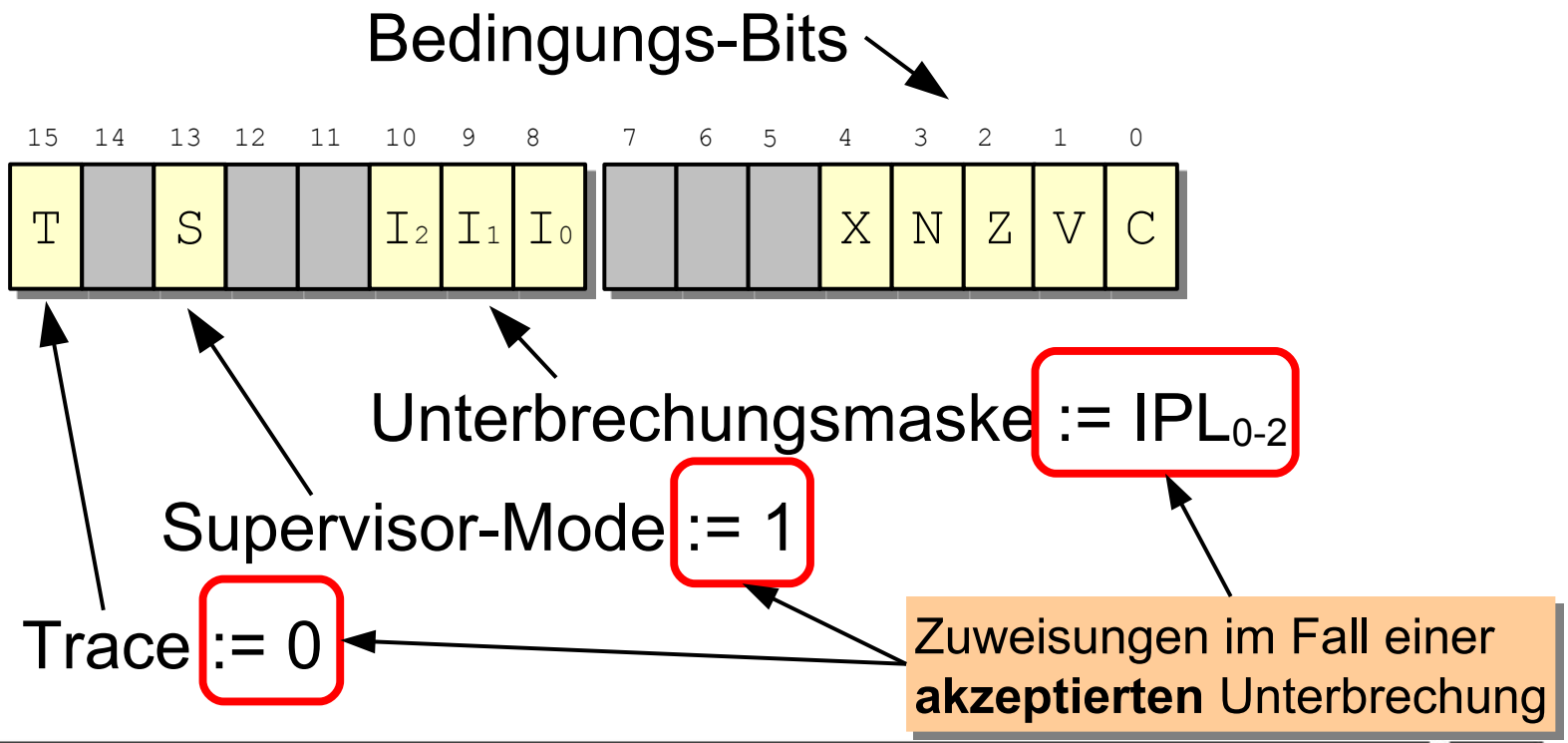


Bestätigung: CPU beginnt Behandlung

N Unterbrechungs-quellen

Das Statusregister (SR) des MC68000

- enthält u.A. die aktuelle Unterbrechungsmaske
  - bei einer Unterbrechung wird geprüft, ob $IPL_{0-2} > I_{0-2}$ ist. Wenn nein, wird der Anforderung (noch) nicht stattgegeben.
  - eine Unterbrechung mit $IPL_{0-2} = 7$ wird aber immer bearbeitet (NMI)



Vektortabelle des MC68000

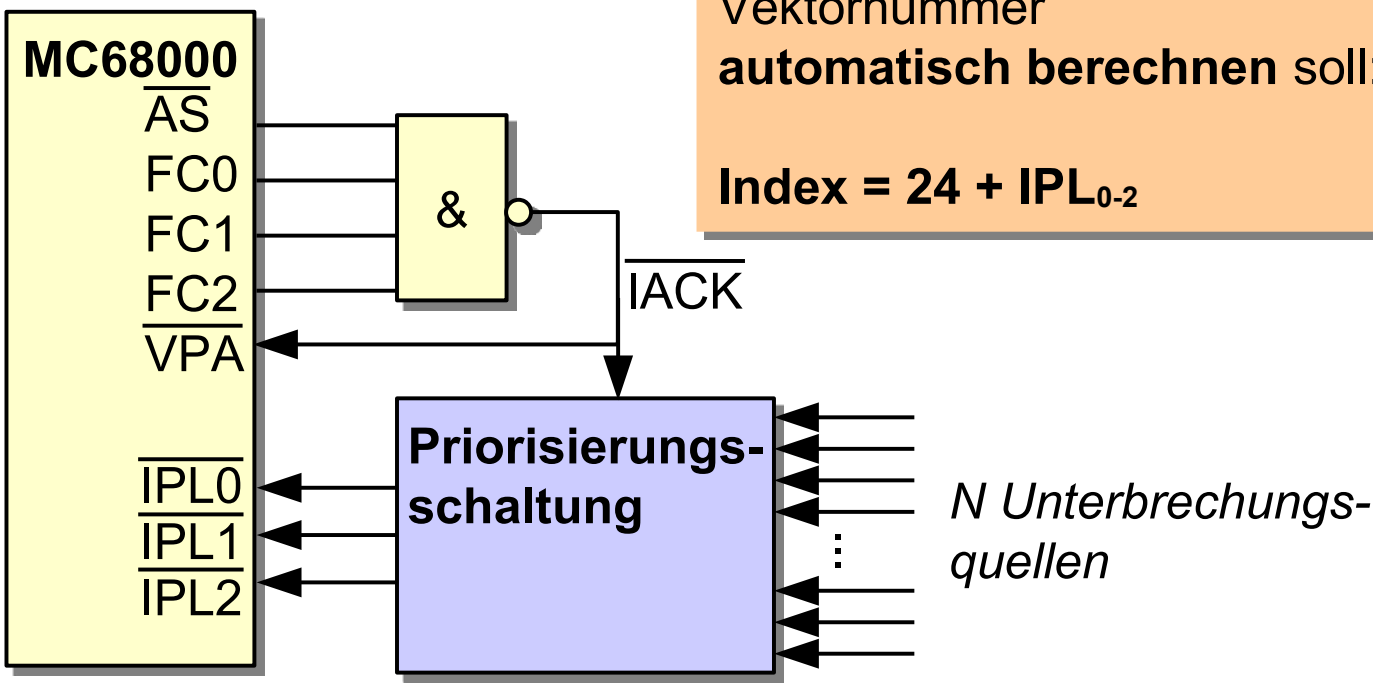
Index	Adresse	Bedeutung
0	0x000	Reset: Supervisor-Stapelzeiger
1	0x004	Reset: PC
2	0x008	Busfehler
3	0x00c	Adressfehler
4	0x010	Illegaler Befehl
5	0x014	Division durch Null
...		
24	0x060	unechte Unterbrechung
25	0x064	**autovektorielle Unterbrechung, Ebene 1**
26	0x068	**autovektorielle Unterbrechung, Ebene 2**
...		
30	0x078	**autovektorielle Unterbrechung, Ebene 6**
31	0x07c	**autovektorielle Unterbrechung, Ebene 7 (NMI)**
32-47	0x080	TRAP-Befehlsvektoren
48-63	0x0c0	reserviert
64-255	0x100	**Anwender-Unterbrechungsvektoren**



Autovektorielle Unterbrechungen

über **VPA** signalisiert die externe Schaltung, dass die CPU die Vektornummer **automatisch berechnen** soll:

Index = 24 + IPL_{0-2}

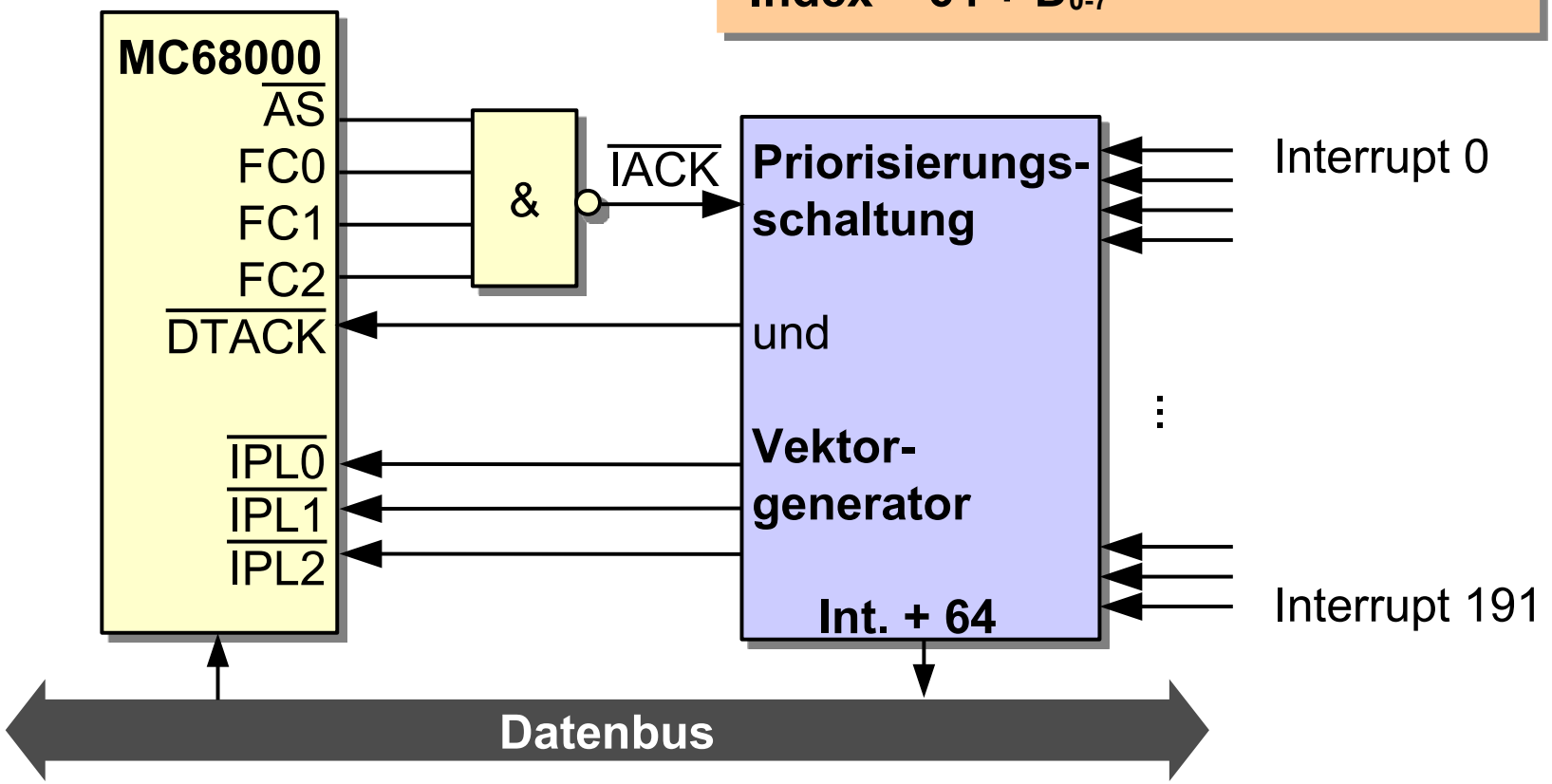


Problem: Es stehen nur 6 Vektoren für Geräte bereit. Bei mehr Geräten ist „*sharing*“ nicht zu vermeiden.

Nicht-autovektorielle Unterbrechungen

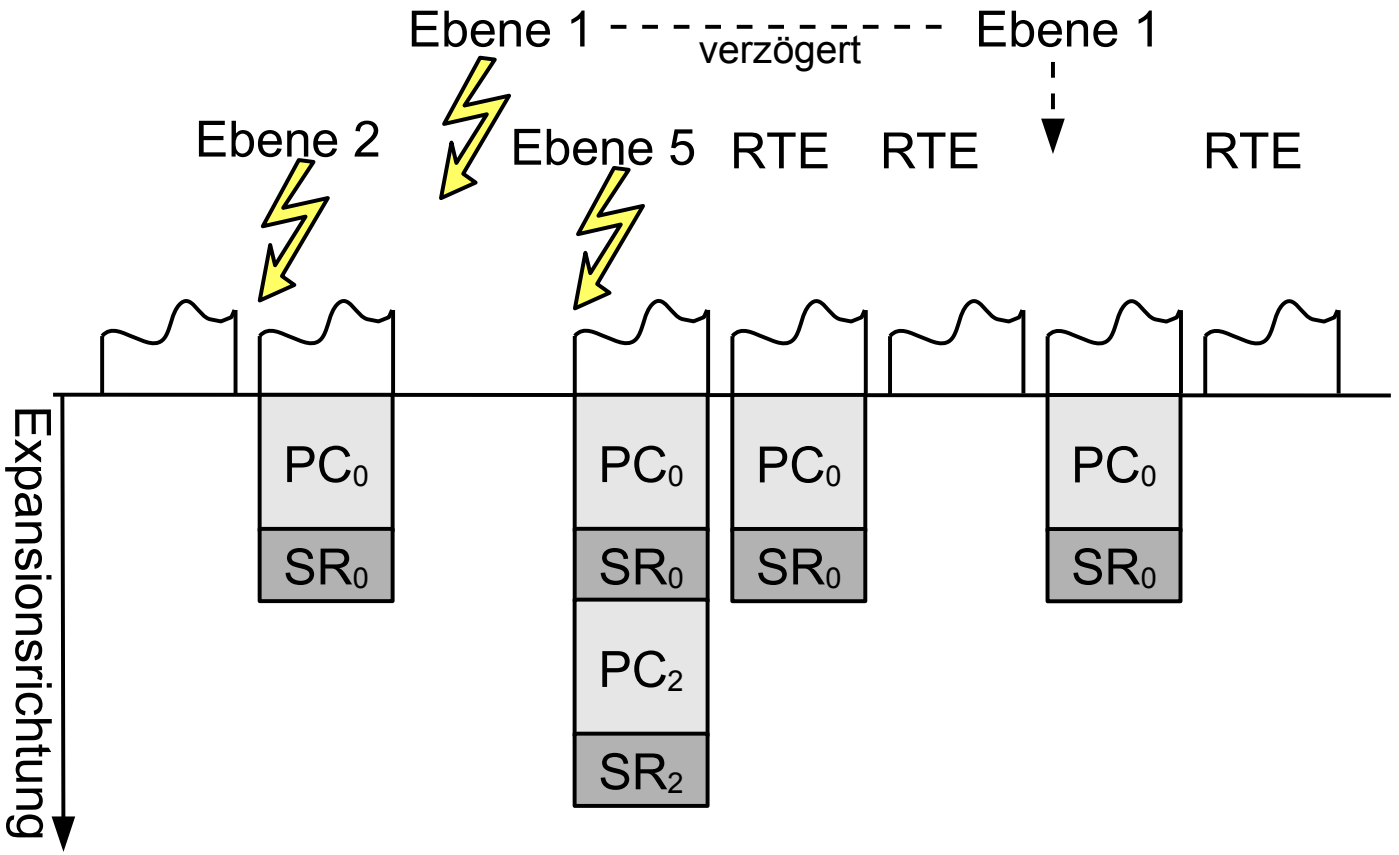
über **DTACK** signalisiert die externe Schaltung, dass die CPU die Vektornummer
über den Datenbus lesen soll.

Index = 64 + D_{0-7}



Zustandssicherung beim MC68000

- der vorherige SR Inhalt und der PC werden bei einer Unterbrechung auf dem Supervisor-Stapel gesichert
- der RTE Befehl macht den Vorgang rückgängig



MC68000 - Zusammenfassung

- **6 Prioritätsebenen** für Hardware-Unterbrechungen + NMI
  - Unterbrechungsebene 1-6, NMI Ebene 7
  - „Maskierung“ über I_{0-2} im Statusregister möglich
- Unterbrechung laufender Behandlung nur durch höhere Priorität oder NMI
  - Statusregister wird automatisch angepasst
- Automatische Zustandssicherung auf dem *Supervisor*-Stapel
  - Geschachtelte Behandlung möglich
- Vektornummern werden enzeugt...
  - autovektoriell: Index = Priorität + 24
  - nicht-autovektoriell (durch externe Hardware): Index = 64 ... 255
- Keine Multiprozessorunterstützung



Unterbrechungen bei x86 CPUs



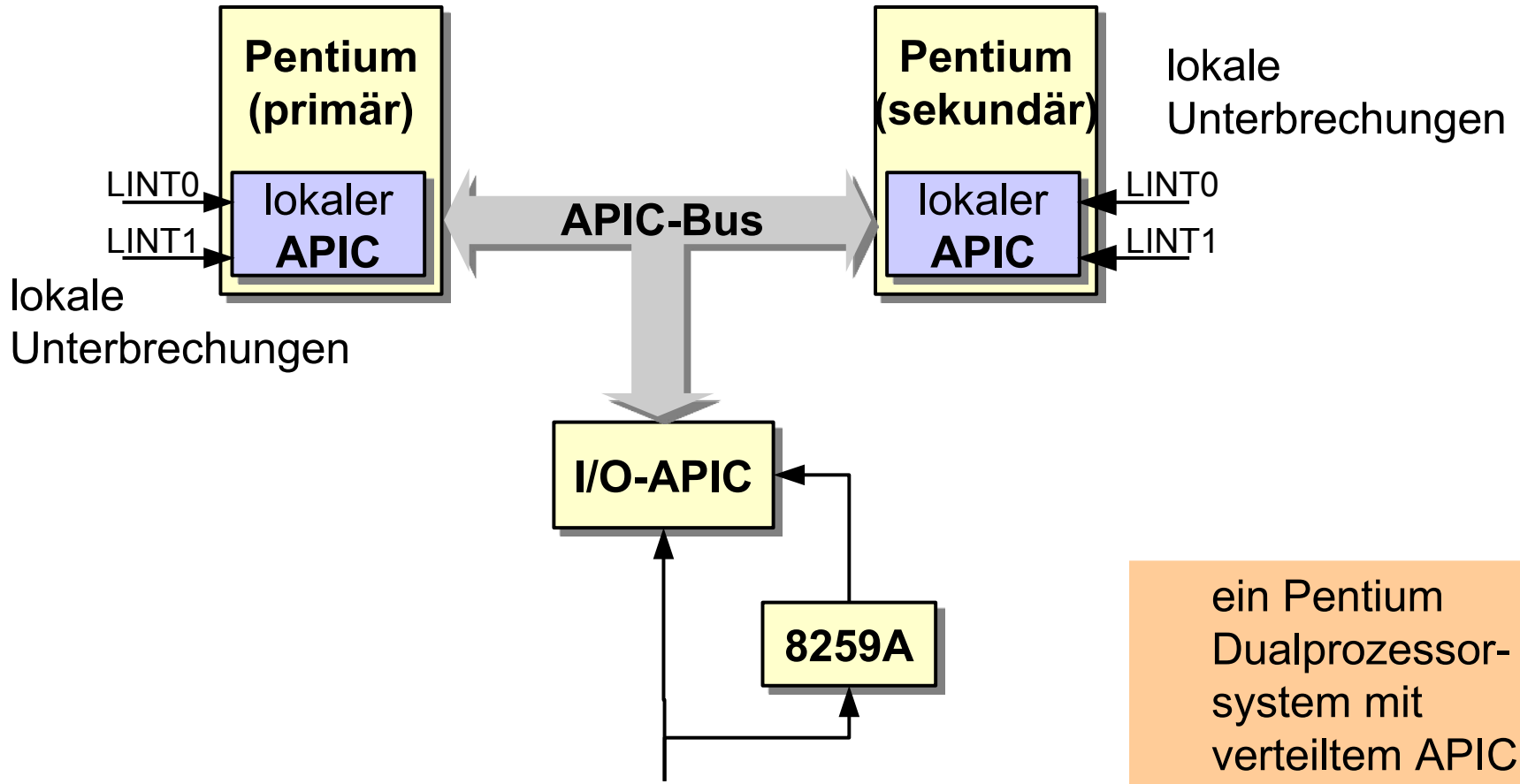
Unterbrechungen bei x86 CPUs

- bis einschließlich i486 hatten x86 CPUs nur einen IRQ und einen NMI Eingang
- externe Hardware sorgte für die Priorisierung und Vektornummerngenerierung
  - durch einen Chip namens **PIC 8259A**
    - 8 Interrupt-Eingänge
    - 15 Eingänge bei Kaskadierung von zwei PICs
    - keine Multiprozessorunterstützung
- heutige x86 CPUs enthalten den weit leistungsfähigeren **„Advanced Programmable Interrupt Controller“ (APIC)**
  - notwendig für **Multiprozessorsysteme**
  - inzwischen aber auch in allen Einprozessorsystemen aktiv
    - natürlich gibt es den PIC 8259A noch immer



Die APIC Architektur

- ein APIC *Interrupt*-System besteht aus lokalen APICs auf jeder CPU und einem I/O APIC



ein Pentium Dualprozessor-system mit verteiltem APIC Interrupt-System

Der I/O APIC

- heute typischerweise in der *Southbridge* von PC Chipsätzen integriert
- normalerweise 24 *Interrupt*-Eingänge
  - zyklische Abfrage (Round-Robin Priorisierung)
- für jeden Eingang gibt es einen 64 Bit Eintrag in der ***Interrupt Redirection Table***
  - beschreibt das Unterbrechungssignal
  - dient der Generierung der APIC-Bus Nachricht



Der I/O APIC

Aufbau (Bits) eines Eintrags in der *Interrupt Redirection Table*

63:56	**Destination Field** je nach Bit 11:	– R/W. 8 Bit Zieladresse. APIC ID der CPU (*Physical Mode*) oder CPU Gruppe (*Logical Mode*)
55:17	<reserviert>	
16	**Interrupt-Mask**	– R/W. Unterbrechungssperre.
15	**Trigger Mode**	– R/W. *Edge*- oder *Level-Triggered*
14	**Remote IRR**	– RO. Art der erhaltenen Bestätigung
13	**Interrupt Pin Polarity**	– R/W. Signalpolarität
12	**Delivery Status**	– RO. Interrupt-Nachricht unterwegs?
11	**Destination Mode**	– R/W. *Logical Mode* oder *Physical Mode*
10:8	**Delivery Mode**	– R/W. Wirkung bei Ziel-APIC
	000 – *Fixed*:	Signal an alle Zielprozessoren ausliefern
	001 – *Lowest Priority*:	Liefern an CPU mit aktuell niedrigster Prio.
	010 – SMI:	*System Management Interrupt*
	100 – NMI:	*Non-Maskable Interrupt*
	101 – INIT:	Ziel-CPUs initialisieren (Reset)
	111 – ExtINT:	Antwort an PIC 8259A
7:0	**Interrupt Vector**	– R/W. **8 Bit Vektornummer (16 – 254)**

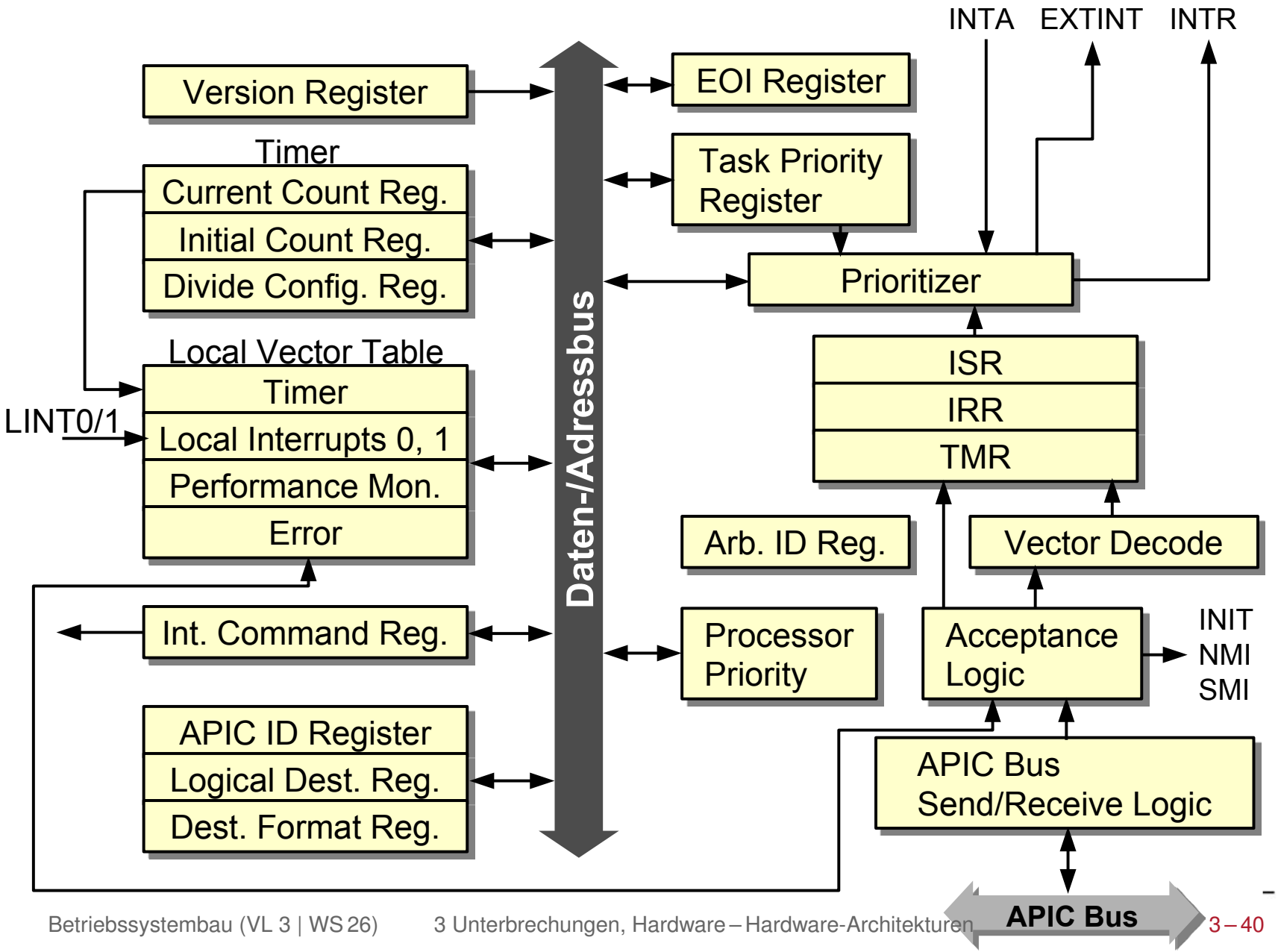


Local APICs

- empfangen Unterbrechungsanforderungen vom APIC Bus
- führen die Auswahl und Priorisierung durch
- können zwei lokale Unterbrechungen direkt verarbeiten
- enthalten weitere Funktionseinheiten
  - Eingebauten *Timer*, *Performance Counter*
  - *Command*-Register
    - um selber APIC-Nachrichten zu verschicken
    - insbesondere Inter-Prozessor-Interrupt (IPI)
- programmierbar über 32 Bit Register ab 0xfee00000
  - memory mapped (ohne externe Buszyklen)
  - jede CPU programmiert „ihren“ *Local APIC*



Local APICs - Register



APIC Architektur - Zusammenfassung

- flexible Verteilung an CPUs im x86 Multiprozessorsystem
  - fest, Gruppen, an die CPU mit der geringsten Priorität
  - Liegen mehrere IRQs an, so wird nach Vektornummer priorisiert
- Vektornummer 16-254 können frei zugeordnet werden
  - sollte (an sich) reichen, um „sharing“ zu vermeiden
- *Local* APIC erwartet explizites EOI
  - dafür muss die Software sorgen
- Mit APIC unterstützt x86 prinzipiell auch Prioritätsebenen
  - Systemsoftware muss jedoch entsprechend agieren (Unterbrechungen freigeben, evtl. *Task-Priority-Register* verwenden)



Agenda

Einordnung

Grundlagen

Hardware-Architekturen

Zusammenfassung



Zusammenfassung und Ausblick

- Unterbrechungsbehandlungshardware befasst sich mit ...
  - Priorisierung
  - Zuordnung und Ausführung einer Behandlungsroutine
  - Zustandssicherung und geschachtelter Ausführung
- moderne Unterbrechungsbehandlungshardware kann ...
  - Unterbrechungsvektoren frei zuordnen
  - „*sharing*“ von Unterbrechungsvektoren vermeiden
  - Unterbrechungen im Multiprozessorsystem flexibel zuordnen
- das Betriebssystem muss ...
  - Probleme wie „*spurious interrupts*“ und „*interrupt storms*“ einkalkulieren.
  - das eingetretene Ereignis aus der Behandlungsroutine an die höheren Ebenen und letztendlich zum Anwendungsprozess weiterleiten.

