

Übung zu Betriebssysteme

Aufgabe 2 - Interrupts

Gabor Drescher

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme
Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

14. November 2016

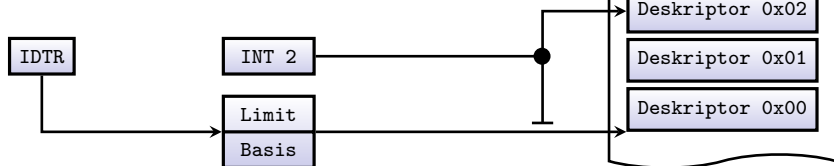


- Interrupts und Traps beim x86 Prozessor
 - Die Interrupt-Deskriptor-Tabelle (IDT)
 - Der Aufbau der IDT
 - Traps und Hardware-IRQs
- Externe Interrupts mit dem APIC
 - Aufbau eines modernen PC-Systems mit Local APIC und IO-APIC
 - Programmierung des IO-APIC
 - Verteilung von Interrupts in Multiprozessorsystemen
- Interruptbehandlung in OOSTuBS/MPStuBS
 - Aufbau und Ablauf
 - Kontextsicherung

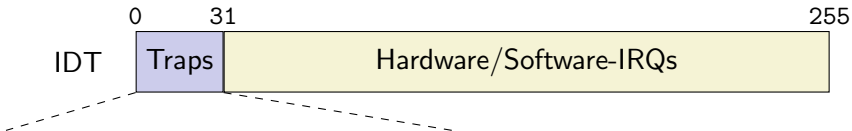


Intel 80386: Interrupt Deskriptor Tabelle (IDT)

- Maximal 256 Einträge
 - Basisadresse und Größe(Limit) in IDTR
- 8 Byte pro Eintrag (Gate)
- Verschiedene Gate-Typen:
 - Task-Gate (Hardwaretasks)
 - Trap-Gate (Ausnahmebehandlung)
 - Interrupt-Gate (Ausnahmebehandlung + cli)



Intel 80386: Interruptvektoren in der IDT



Number	Description
0	Divide-by-Zero
1	Debug Exception
2	Non-Maskable Interrupt(NMI)
3	Breakpoint (INT 3)
4	Overflow Exception
5	Bound Exception
6	Invalid Opcode
7	FPU not Available
8	Double Fault
9	Coprocessor Segment Overrun
10	Invalid TSS
11	Segment not Present
12	Stack Exception
13	General Protection Fault
14	Page Fault
15	Reserved
16	Floating-Point Error
17	Alignment Check
18	Machine Check
19-31	Reserved by Intel

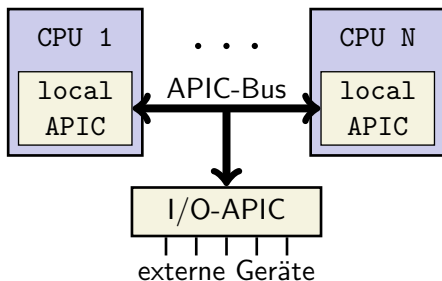
- Einträge 0-31 Traps (fest)
- Traps/Exceptions (Intel 'Lingo')
 - Synchron zum Kontrollfluss
 - Beispiele:
 - Division durch Null
 - Seitenfehler
 - Schutzfehler
 - Breakpoint
 - ...
- Einträge 32-255 für IRQs
- Auslösen durch
 - Software: (int <vec#>)
 - Hardware: Externe Geräte
 - APIC löst zugeordnete Unterbrechung aus



- Traditionell nur eine INT-Leitung (INT) an der CPU
 - INT kann durch Prozessorbefehle maskiert werden
 - cli (Clear Interrupt Enable) Interruptleitung sperren
 - sti (Set Interrupt Enable) Interruptleitung freigeben
 - Anschluss von mehreren externen Geräten durch externen Controller
 - Traditionell ist dies der Programmable Interrupt Controller ([PIC 8259A](#))
 - Bietet u.a. keine Unterstützung für Mehrprozessorsysteme
- APIC-Architektur bei „modernen“ PCs
 - Bietet mehr Anschlussmöglichkeiten für externe Geräte (24 vs. 15)
 - Freie Konfigurierbarkeit des Interruptvektors pro Gerät möglich
 - Wird für Multiprozessorsysteme auf jedenfall benötigt (MPStuBS!)
 - Funktioniert natürlich auch in einem Einprozessorsystem (OOSTuBS)



Aufbau der APIC-Architektur



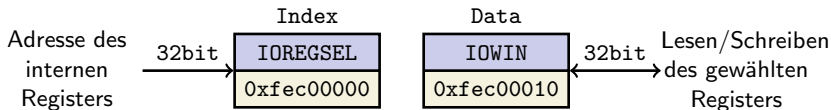
Aufteilung in lokalen APIC und I/O APIC:

- I/O-APIC dient zum Anschluss der Geräte
 - Zuweisung von beliebigen Vektornummern
 - Aktivieren und Deaktivieren von einzelnen Interruptquellen
 - Zuweisung von Zielprozessoren für einzelnen Interrupts in MP-Systemen
- Interrupts werden zu Nachrichten auf dem APIC-Bus
- Local APIC
 - Verbindet eine CPU mit dem APIC-Bus
 - Liest Nachrichten vom APIC-Bus und unterbricht die CPU
 - Muss Interrupts explizit quittieren (ACK)

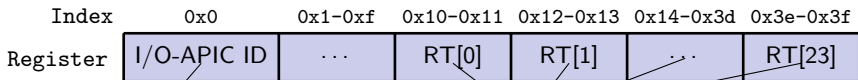


Programmierung des Intel I/O-APIC

- Zugriff auf die internen Register über memory-mapped Ein-/Ausgabe
 - Jedoch keine direkte Abbildung von internen Registern auf Adressen
 - „Umweg“ über ein Index- und Datenregister

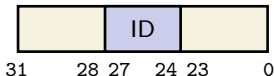


- Interne Register des I/O-APICs



ID auf dem APIC-Bus

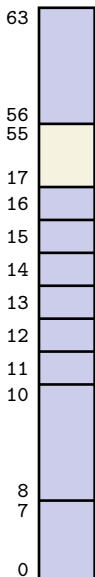
Aufbau:



Redirection Table

- Ein Eintrag für jede Interruptquelle
- Konfiguration dadurch pro Interruptquelle
- Zwei interne Register pro Eintrag (64bit)

Aufbau eines Redirection Table Eintrags



Destination Field: Zieladresse des IRQs

- APIC ID der Ziel-CPU falls Dest. Mode == Physical
- Gruppe von Ziel-CPU's falls Dest. Mode == Logical

reserviert

Interrupt-Mask: Interrupt aktiv (0) oder inaktiv (1)

Trigger Mode: Flanken-(0) oder Pegel-(1)steuerung

Remote IRR: Art der erhaltenen Bestätigung

Interrupt Polarity: Active High (0) bzw. Active Low (1)

Delivery Status: Interrupt Nachricht noch unterwegs?

Destination Mode: Physical (0) oder Logical (1) Mode

Delivery Mode: Modus der Nachrichtenzustellung

- 0: Fixed - Signal allen Zielprozessoren zustellen
- 1: Lowest Priority - CPU mit niedrigster Priorität ist Ziel
- ...

Interrupt Vektor: Nummer in der Vektortabelle (32-255)



- Wo ist welches Gerät angeschlossen?
 - Das kann evtl. unterschiedlich sein von Rechner zu Rechner!
 - Steht in der Systemkonfiguration, heutzutage typischerweise ACPI
 - Klasse APICSystem stellt die relevanten Teile diese Informationen bereit:
 - Methode APICSystem::getIOAPICSlot liefert für jedes Gerät den Index in die Redirection Table
 - Methode APICSystem::getIOAPICID liefert die ID des IOAPICs
- Adressierung der APIC Nachrichten in OOSTuBS/MPStuBS
 - Zusammenspiel mehrerer Faktoren:
 - Destination Mode, Destination Field und Delivery Mode im I/O-APIC
 - Prozessor Priorität in den Local APICs der einzelnen CPUs
 - Ziel: Gleichverteilung der Interrupts auf alle CPUs
 - Priorität der Prozessoren im Local APIC fest auf 0 einstellen
 - Im I/O-APIC Lowest Priority als Delivery Mode verwenden
 - Verwendung des Logical Destination Mode; bis zu 8 CPUs adressierbar
 - Destination Field auf 0xff: Potentiell jede CPU kann Empfänger sein



Aufbau eines Redirection Table Eintrags

63	0xff
56	
55	0
17	
16	0/1
15	0
14	RO
13	0
12	RO
11	1
10	1
8	
7	
0	

Destination Field: Zieladresse des IRQs

- APIC ID der Ziel-CPU falls Dest. Mode == Physical
- Gruppe von Ziel-CPU's falls Dest. Mode == Logical

reserviert

Interrupt-Mask: Interrupt aktiv (0) oder inaktiv (1)

Trigger Mode: Flanken-(0) oder Pegel-(1)steuerung

Remote IRR: Art der erhaltenen Bestätigung

Interrupt Polarity: Active High (0) bzw. Active Low (1)

Delivery Status: Interrupt Nachricht noch unterwegs?

Destination Mode: Physical (0) oder Logical (1) Mode

Delivery Mode: Modus der Nachrichtenzustellung

- 0: Fixed - Signal allen Zielprozessoren zustellen
- 1: Lowest Priority - CPU mit niedrigster Priorität ist Ziel
- ...

Interrupt Vektor: Nummer in der Vektortabelle (32-255)

Einstellung in OOSTuBS/MPStuBS (RO: Read Only)

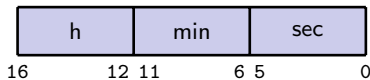


Einschub: Ansprechen von einzelnen Bits

- Mittels Bitmasken und logischen Bitoperationen
(Das solltet ihr kennen oder zumindest schon gesehen haben)
- Weniger verbreitet sind Bitfelder in C/C++:

```
struct time {  
    unsigned int  sec : 6,  
                  min : 6,  
                  h  : 5;  
};  
int foo(struct time* t) {  
    t->sec = 42;  
    return t->h;  
}
```

Layout mit GCC auf x86:

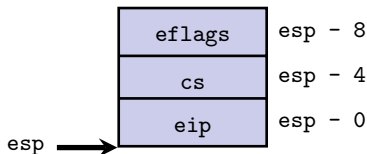


- Anordnung der Member jedoch compilerspezifisch
- Dies gilt jedoch für Systemsoftware (in gewissen Maßen) sowieso!



Zustandssicherung beim Auftreten von Interrupts

- Minimaler zu sichernder Zustand?
- CPU sichert automatisch:
 - Condition Codes (eflags)
 - Aktuelles Code Segment (cs)
 - Programmzeiger/Rücksprungadresse (eip)



- Wiederherstellung des ursprünglichen Prozessorzustandes
 - Spezieller Befehl (iret) stellt den gesicherten Zustand wieder her.



- eflags, cs und eip wurden bereits von der CPU gesichert
- Was ist mit den restlichen Registern?
- Müssen durch den Interrupthandler selbst gesichert werden.
 - entweder im Assembler-Teil
 - oder der Compiler generiert bereits entsprechend Code
- Kontextsicherung beim Aufruf von Funktionen
 - Lösung 1: *Aufrufende* Funktion sichert alle Register, die sie braucht
 - Lösung 2: *Aufgerufene* Funktion sichert alle Register, die sie verändert
 - Lösung 3: Ein Teil der Register wird vom Aufrufer, ein anderer Teil vom Aufgerufenen gesichert



- In der Praxis wird Lösung 3 verwendet
 - Aufteilung ist grundsätzlich compilerspezifisch
 - CPU-Hersteller definiert jedoch Konventionen, damit Interoperabilität auf Binärcodeebene sichergestellt ist
- Aufteilung der Register in 2 Subsets
 - Flüchtige Register („scratch registers“)
 - Compiler geht davon aus, dass Unterprogramm den Inhalt verändert
 - *Aufrufer* muss Inhalt gegebenenfalls sichern
 - Beim x86 sind **eax**, **ecx**, **edx** und **eflags** als flüchtig definiert
 - Nicht-flüchtige Register („non-scratch registers“)
 - Compiler geht davon aus, dass der Inhalt nicht verändert wird
 - *Aufgerufene* Funktion muss Inhalt gegebenenfalls sichern
 - Beim x86 sind alle sonstigen Register als nicht-flüchtig definiert: **ebx**, **esi**, **edi**, **ebp** und **esp**

Interrupt-Handler müssen auch flüchtige Register sichern!



- Behandlung startet in der Funktion `guardian(int)`

- bekommt die IRQ-Nummer als **Parameter**:

```
void guardian(unsigned int vector) {  
    ...//IRQ-Handler (Gate) aktivieren  
}
```

- Interrupts sind während der Abarbeitung gesperrt
 - können mit `sti` manuell wieder zugelassen werden
 - werden automatisch wieder zugelassen, wenn `guardian(int)` terminiert

- Die eigentlichen (spezifischen) IRQ-Handler

- sind Instanzen der Klasse *Gate*
 - werden an- und abgemeldet über die Klasse *Plugbox*



Interrupthandler in OOSTuBS/MPStuBS

