

# Betriebssysteme (BS)

## VL 6 – IA-32: Das Programmiermodell der Intel-Architektur

**Daniel Lohmann**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

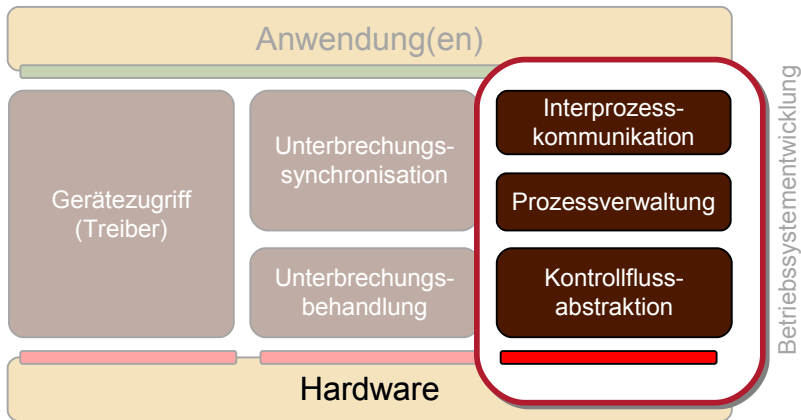
Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg

WS 16 – 24. November 2016



[https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V\\_BS](https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V_BS)

# Überblick: Einordnung dieser VL



# Agenda

---

Einordnung

Historie

Urvater: Der 8086

Die 32-Bit Intel-Architektur

Der Protected Mode

Multitasking

Weitere Merkmale

Zusammenfassung



- 1978: **8086** *der Urvater des PC Prozessors*
- 1982: **80286** *Einführung des Protected Mode*
  - segmentbasierter Speicherschutz
- 1985: **80386** *erster IA-32 Prozessor*
  - seitenbasierter virtueller Speicher
  - Protected Mode
- 1989: **80486** *integrierte FPU, RISC Ansätze*
- 1993: **Pentium** *P5-Architektur*
  - superskalar, 64-Bit Datenbus
  - SMM, MMX, APIC, Dualprozessor-fähig



- 1995: **Pentium Pro** *P6-Architektur*
  - 36-Bit Adressbus (PAE)
  - Level 2 Cache "on chip", RISC-artige Mikroinstruktionen
- 1997: **Pentium II** *Pentium Pro + MMX*
  - Level 2 Cache wieder extern, dafür bessere 16-Bit Performance
- 1999: **Pentium III** *SSE, Pentium M (2003)*
- 2000: **P4** *Netburst-Architektur*
  - SSE2, optimiert für hohe Taktzahlen (angedacht bis zu 10 GHz)
- 2004: **P4 Prescott** *Erweiterte Netburst Architektur*
  - Hyperthreading, Vanderpool, EM64T, 31-stufige Pipeline!



- 2005: **Core** *Ende der Netburst Architektur*
  - geringerer Takt, weniger Strom, aber bessere Performance!
  - Architektur basiert auf P6-Architektur, kein Hyperthreading
- 2006: **Core 2** *Dual Core, Quad Core, 64 Bit*
- 2008: **Atom** *extrem stromsparend*
  - Architektur (wieder) CISC-lastiger, Ähnlichkeiten mit 486/Pentium
- 2009: **Core i7** *Nehalem-Architektur*  
*Sandy-Bridge-Architektur (2011)*  
*Haswell-Architektur (2013)*
  - Hyperthreading, Octa Core, Quick Path Interconnect
  - "Power Control Unit" (PCU) passt Takt der TDP an
- 2012: **Xeon Phi** *Larrabee-Architektur*
  - P54C Manycore (62 cores), SIMD Instruktionen



# Agenda

---

Einordnung

Historie

**Urvater: Der 8086**

    Programmiermodell

    Speichermodell

Die 32-Bit Intel-Architektur

Der Protected Mode

Multitasking

Weitere Merkmale

Zusammenfassung



# 8086: Programmiermodell

- 16-Bit Architektur, little-endian
- 20-Bit Adressbus, d.h. maximal 1 MiB Hauptspeicher
- wenige Register
  - (jedenfalls aus heutiger Sicht)
- 123 Befehle
  - kein orthogonaler Befehlssatz
- Befehls­längen von 1 bis 4 Byte
- segmentierter Speicher
- **noch immer aktuell**
  - obwohl von 1978 noch heute von jeder IA-32 CPU unterstützt
    - *Real Mode, Virtual 8086 Mode*

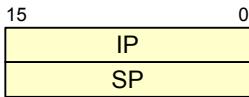
Aufwärtskompatibilität wird bei Intel groß geschrieben





# 8086: Registersatz

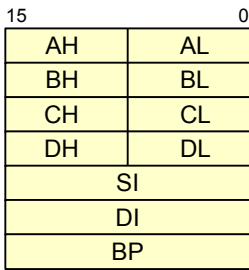
## Befehls- und Stapelzeiger



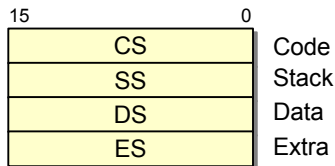
## Flag Register



## Vielzweckregister

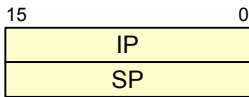


## Segmentregister

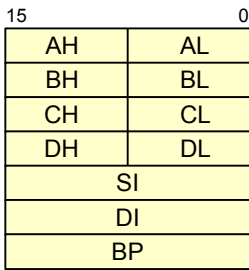


# 8086: Registersatz

## Befehls- und Stapelzeiger



## Vielzweckregister



### AX: Accumulator Register

- arithmetisch-logische Operationen
- I/O
- kürzester Maschinencode

### BX: Base Address Register

### CX: Count Register

- für LOOP Befehl
- für *String* Operationen mit REP
- für Bit *Shift* und *Rotate*

### DX: Data Register

- DX:AX sind 32 Bit für MUL/DIV
- Portnummer für IN und OUT

### SI, DI: Index Register

- für Array-Zugriffe (Displacement)

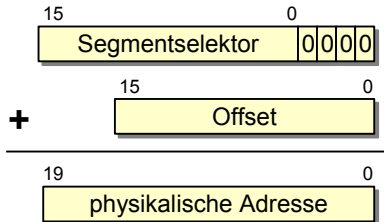
### BP: Base Pointer

Jedes „Vielzweckregister“ erfüllt seinen speziellen Zweck



# 8086: Segmentierter Speicher

- logische Adressen bestehen beim 8086 aus
  - Segmentsektor (i.d.R. der Inhalt eines Segmentregisters)
  - Offset (i.d.R. aus einem Vielzweckregister oder dem Befehl)
- Berechnung der physikalischen Adresse:



die 16 Bit Konkurrenz konnte i.d.R. nur 64KB adressieren



# 8086: Segmentierter Speicher

- logische Adressen bestehen beim 8086 aus
  - Segmentselektor (i.d.R. der Inhalt eines Segmentregisters)
  - Offset (i.d.R. aus einem Vielzweckregister oder dem Befehl)
- Bei

*„640K ought to be enough for anybody“*

angeblich ein Zitat von Bill Gates, 1981

physikalische Adresse

die 16 Bit Konkurrenz konnte i.d.R. nur 64KB adressieren



- Programme können Adressen unterschiedlich bilden. Das Ergebnis waren unterschiedliche Speichermodelle:
  - **Tiny**
    - Code-, Daten- und Stacksegment sind identisch: 64K insgesamt
  - **Small**
    - Trennung des Codes von Daten und Stack: 64K + 64K
  - **Medium**
    - 32(20) Bit Zeiger für Code, Daten- und Stapelseg. aber fest (64K)
  - **Compact**
    - Festes Code Segment (64K), 32(20) Bit Zeiger für Daten und Stack
  - **Large**
    - „far“ Zeiger für alles: 1MB komplett nutzbar
  - **Huge**
    - wie „Large“, aber mit normalisierten Zeigern



# 8086: Fazit

---

- Urvater der PC-Prozessoren
  - bildete den Kern der ersten PCs
  - noch heute sind IA32-Prozessoren kompatibel
- Segmentregister brachten Vorteile
  - trotz 16-Bit-Architektur 1 MB Speicher
  - Trennung von logischen Modulen im Hauptspeicher
- Programm- und Übersetzerentwicklung ist aber vergleichsweise schwierig
  - verschiedene Speichermodelle
  - nicht orthogonaler Befehlssatz



Einordnung

Historie

Urvater: Der 8086

**Die 32-Bit Intel-Architektur**

Erweiterungen

Relikte: Das A20-Gate

Der Protected Mode

Multitasking

Weitere Merkmale

Zusammenfassung



- die erste IA-32 CPU war der **80386**
  - wobei der Begriff „IA-32“ erst sehr viel später eingeführt wurde
- 32 Bit Technologie: Register, Daten- und Adressbus
  - ab Pentium Pro: 64 Bit Daten und 36 Bit Adressbus
- zusätzliche Register
- komplexe Schutz- und Multitaskingunterstützung
  - *Protected Mode*
  - ursprünglich schon mit dem 80286 (16-Bit) eingeführt
- Kompatibilität
  - mit älteren Betriebssystemen durch den *Real Mode*
  - mit älteren Anwendungen durch den *Virtual 8086 Mode*
- segmentbasiertes Programmiermodell
- seitenbasierte MMU

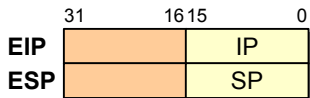




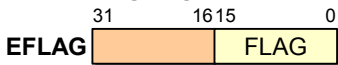
# 80386: Registersatz (Erweiterungen)

- erweiterte Register heißen aus Kompatibilitätsgründen E...

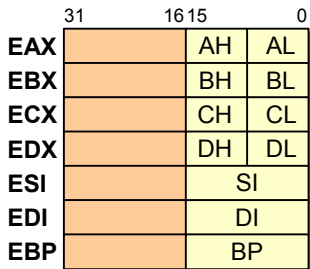
## Befehls- und Stapelzeiger



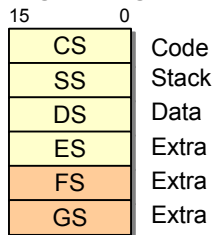
## Flag Register



## Vielzweckregister



## Segmentregister



Erweiterung  
zum 8086



# 80386: Registersatz (neue Register)

## Speicherverwaltungsregister

	15	0 31	0 19	0
TR	TSS-Sel.	TSS-Basisadresse	TSS-Limit	
LDTR	LDT-Sel.	LDT-Basisadresse	LDT-Limit	
IDTR		IDT-Basisadresse	IDT-Limit	
GDTR		GDT-Basisadresse	GDT-Limit	

Erläuterungen  
folgen ...

## Steuerregister

	31	16 15	0
CR3			
CR2			
CR1			
CR0			

## Testregister

	31	16 15	0
TR7			
TR6			

## Debugregister

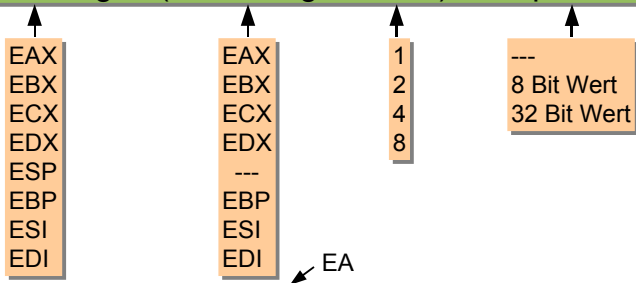
	31	16 15	0



# IA-32: Adressierungsarten

- Effektive Adressen (EA) werden nach einem einfachen Schema gebildet
  - alle Vielzweckregister können dabei gleichwertig verwendet werden

$$\text{EA} = \text{Basis-Reg.} + (\text{Index-Reg.} * \text{Scale}) + \text{Displacement}$$



- Beispiel: MOV EAX, **Feld[ESI \* 4]**
  - Lesen aus Feld mit 4 Byte großen Elementen und ESI als Index



# Das A20-Gate

- ... ist ein Relikt aus der Zeit der 80286 Systeme (IBM AT)
- beim IBM XT (8086) konnte es bei der Adressberechnung zu einem Überlauf kommen. Im Maximalfall:

$$\begin{array}{rcl} & 0\text{xffff0} & \leftarrow \text{Segment} * 16 \\ + & 0\text{x0fff} & \leftarrow \text{Offset} \\ & \underline{\quad\quad\quad} & \\ & \quad\quad\quad 1111 & \\ \text{0x0ffef} & \leftarrow \text{nur 20 Bit!} & \text{0x10ffef} \leftarrow \text{phys. Adresse} \end{array}$$

- MS-DOS (und andere Systeme) verwenden diesen „Trick“.
- Aus Kompatibilitätsgründen wurde im IBM AT die A20-Leitung über das „A20 Gate“ (Register im **Tastaturcontroller**) maskiert.
  - A20 muss explizit freigeschaltet werden, um Speicher > 1 MiB zu adressieren
- Ab dem 486 hat Intel das A20-Gate in die CPU integriert!



# Agenda

---

Einordnung

Historie

Urvater: Der 8086

Die 32-Bit Intel-Architektur

**Der Protected Mode**

    Segmente

    MMU

    Schutz

Multitasking

Weitere Merkmale

Zusammenfassung

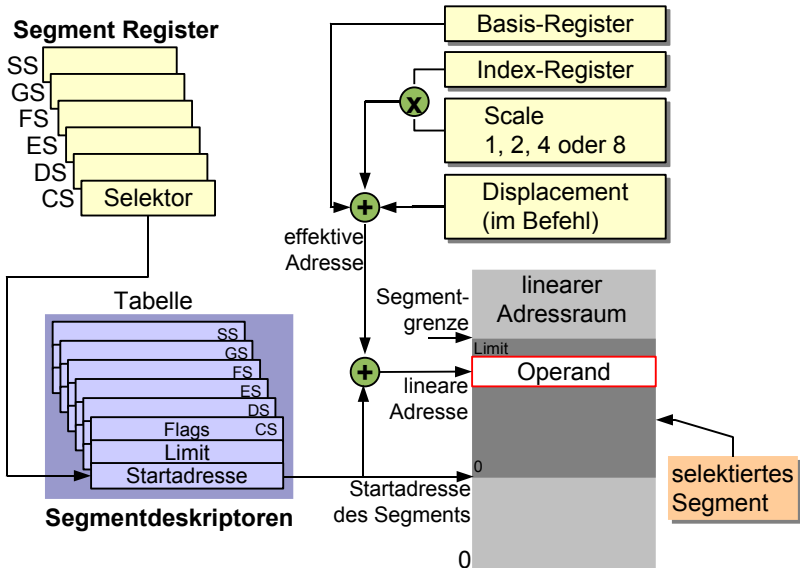


## IA-32: Protected Mode – Segmente

- ein Programm (in Ausführung) besteht aus mehreren Speichersegmenten
  - mindestens CODE, DATEN und STACK
  - Segmentselektoren beschreiben (indirekt) Adresse und Länge
- „Lineare Adresse“ ist Segmentstartadresse + EA
  - Segmente dürfen sich im linearen Adressraum überlappen, z.B. dürfen die Segmentstartadressen bei 0 liegen. Dadurch wird ein „flacher“ Adressraum nachgebildet.
  - „Lineare Adresse“ entspricht der physikalischen Adresse, falls die Paging Unit nicht eingeschaltet ist.

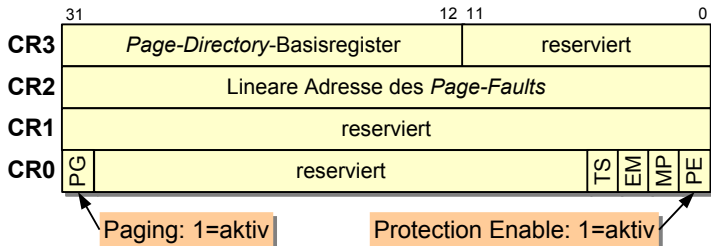


# IA-32: Protected Mode – Segmente



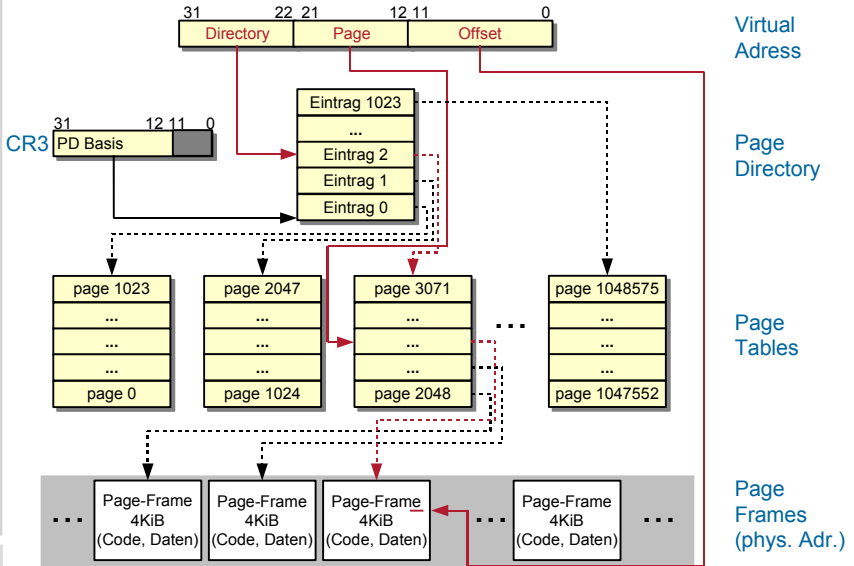
# IA-32: Seitenbasierte MMU (1)

- Ein- und Auslagerung von Speicher (zwecks virtuellem Speicher) ist bei Segmentierung aufwändig. Daher bieten viele andere CPUs lediglich eine seitenbasierte Speicherverwaltung.
- ab dem 80386 kann eine **Paging Unit** (PU) optional hinzugeschaltet werden.
- die wichtigsten Verwaltungsinformationen stehen in den CRx Steuerregistern:





# IA-32: Seitenbasierte MMU (2)



- Problem: bei aktiver *Paging Unit* wäre eine IA-32 CPU erheblich langsamer, wenn bei jedem Speicherzugriff das *Page Directory* und die *Page Table* gelesen werden müssten
- Lösung: der ***Translation Lookaside Buffer*** (TLB):
  - vollassoziativer Cache
    - Tag: 20 Bit Wert aus *Page Directory* und *Page Table* Index
    - Daten: *Page Frame* Adresse
    - Größe beim 80386: 32 Einträge
  - bei normalen Anwendungen erreicht der TLB eine Trefferrate von etwa 98%
  - Schreiben in das CR3 Register invalidiert den TLB

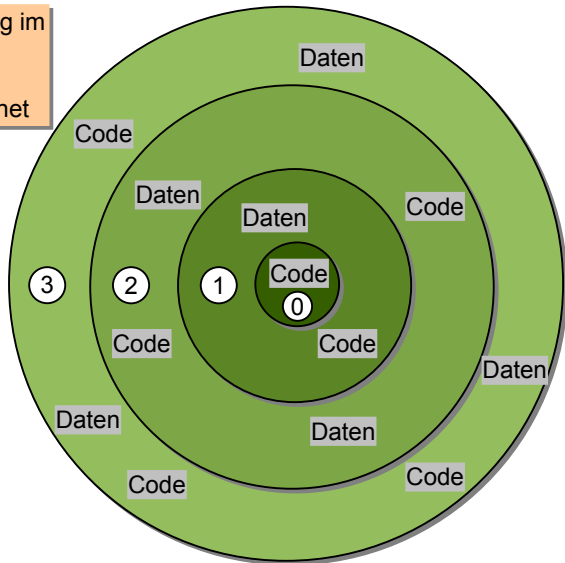


- die wichtigste Eigenschaft des IA-32 Protected Mode ist das Schutzkonzept
- **Ziel:** fehlerhaften oder nicht vertrauenswürdigen Code isolieren
  - Schutz vor Systemabstürzen
  - Schutz vor unberechtigten Datenzugriffen
  - keine unberechtigten Operationen, z.B. I/O Port Zugriffe
- Voraussetzungen: Code und Daten ...
  - werden hinsichtlich der Vertrauenswürdigkeit kategorisiert
  - bekommen einen Besitzer (siehe "Multitasking")



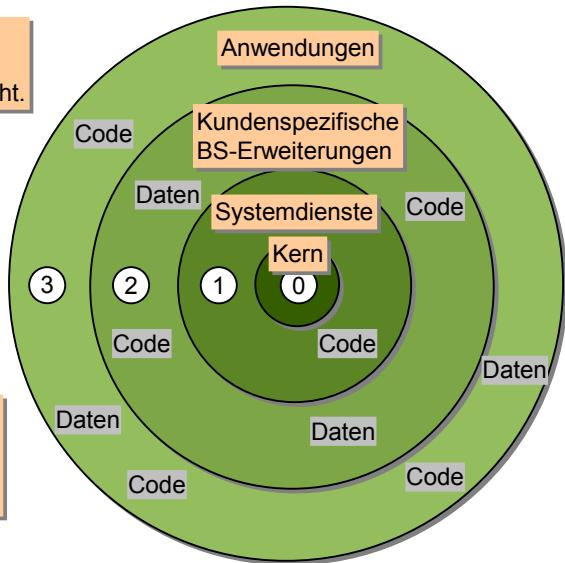
# Schutzringe und Gates

Durch einen 2 Bit Eintrag im Segmentdeskriptor wird jedes Segment einer Privileg-Ebene zugeordnet



# Schutzringe und Gates

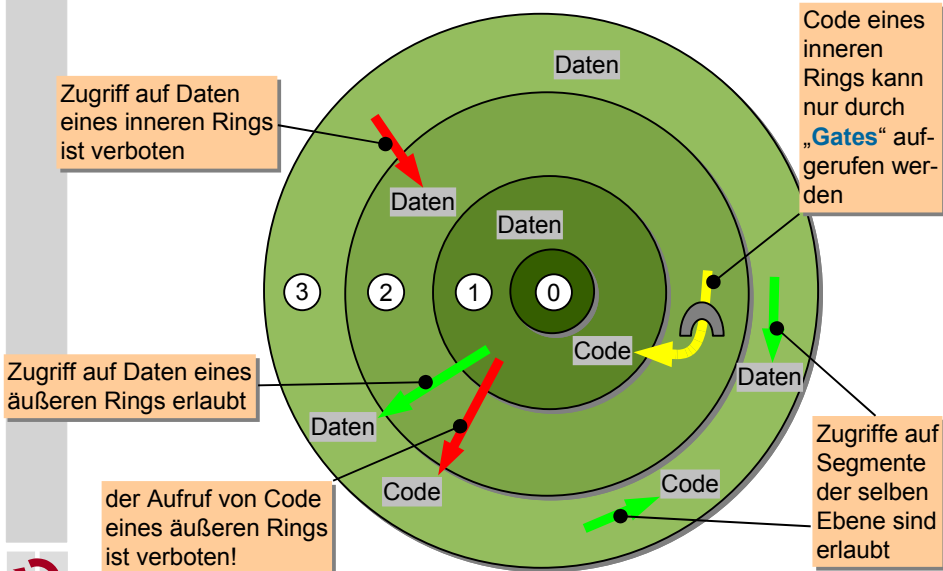
Privileg-Ebene 3 ist die niedrigste und für Anwendungen gedacht.



Privileg-Ebene 0 ist die höchste und dem Betriebssystemkern vorbehalten.



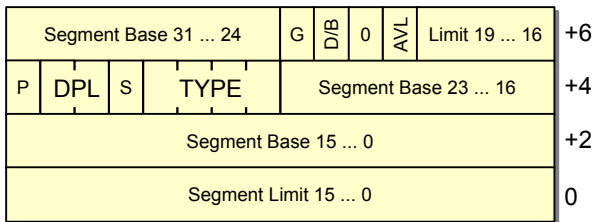
# Schutzringe und Gates



# Segmentdeskriptoren

- weitere Informationen über die Schutzanforderungen der Segmente enthalten die Deskriptoren
  - jede Verletzung führt zum Auslösen einer Ausnahme

## ein Segment-Deskriptor



### TYPE – Data:

ED - Expansion  
Direction  
W - Writable  
A - Accessed

### TYPE – Code:

C - Conforming  
R - Readable  
A - Accessed

P - Present Bit  
DPL - Descriptor Privilege Level  
S - System Segment

G - Granularity  
D/B - 16/32 Bit Seg.  
AVL - Available for OS



# Beispiel: Das "flache" Speichermodell

- die meisten PC Betriebssysteme nutzen die Segmentierung nicht.
  - 32 Bit *Offset* der logischen Adresse = lineare Adresse
  - trotzdem müssen zwei Segmentdeskriptoren angelegt werden:

```
;
; Descriptor-Tabellen
;
gdt:
    dw    0,0,0,0    ; NULL Deskriptor

    dw    0xFFFF    ; 4Gb - (0x100000*0x1000 = 4Gb)
    dw    0x0000    ; base address=0
    dw    0x9A00    ; code read/exec
    dw    0x00CF    ; granularity=4096,
                    ; 386 (+5th nibble of limit)

    dw    0xFFFF    ; 4Gb - (0x100000*0x1000 = 4Gb)
    dw    0x0000    ; base address=0
    dw    0x9200    ; data read/write
    dw    0x00CF    ; granularity=4096,
                    ; 386 (+5th nibble of limit)
```





# Agenda

---

Einordnung

Historie

Urvater: Der 8086

Die 32-Bit Intel-Architektur

Der Protected Mode

**Multitasking**

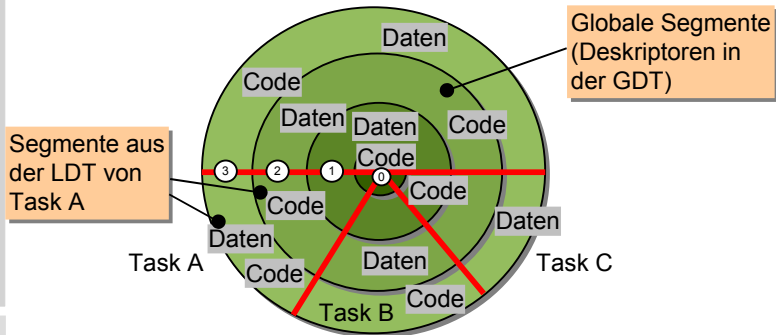
Weitere Merkmale

Zusammenfassung



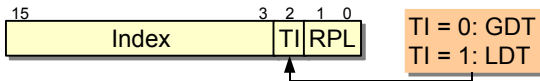
# Multitasking

- neben dem Schutz vor unberechtigten "vertikalen" Zugriffen zwischen Segmenten unterschiedlicher Ebenen unterstützt IA-32 auch ein Task-Konzept ("horizontale Trennung")
- die Zuordnung von Segmenten zu Tasks erfolgt über "Lokale Deskriptortabellen" (LDTs)



# Lokale Segmentdeskriptortabellen

- ... sind nötig, wenn der Segmentselektor (z.B. aus einem Segmentregister) sich auf die LDT bezieht:



- ... werden mit Hilfe des **LDTR** gefunden, das bei jedem Taskwechsel ausgetauscht wird:

## Speicherverwaltungsregister

	15	0 31	0 19	0
TR	TSS-Sel.	TSS-Basisadresse	TSS-Limit	
<b>LDTR</b>	LDT-Sel.	LDT-Basisadresse	LDT-Limit	
IDTR		IDT-Basisadresse	IDT-Limit	
GDTR		GDT-Basisadresse	GDT-Limit	



# Der Task-Zustand: TSS Segmente

- das Task-Register TR verweist auf eine Datenstruktur, die den kompletten Task-Zustand aufnimmt
- bei einem Task-Wechsel (siehe nächste Seite) wird der komplette Zustand gesichert und der Zustand des Ziel-Tasks geladen
  - alles in Hardware!

I/O Map Base Address	T
LDT Segment Sel.	
	GS
	FS
	DS
	SS
	CS
	ES
EDI	
ESI	
EBP	
ESP	
EBX	
EDX	
ECX	
EAX	
EFLAGS	
EIP	
CR3 (PDBR)	
	SS2
ESP2	
	SS1
ESP1	
	SS0
ESP0	
Prev. Task Link	



- für einen Task-Wechsel benötigt man entweder ...
  - ein Task-Gate in der GDT, einer LDT oder der IDT (Task-Wechsel bei Unterbrechungen!)
  - oder einfach nur einen TSS Deskriptor in der GDT
- ausgelöst werden kann ein Wechsel durch ...
  - eine JMP Instruktion
  - eine CALL Instruktion
  - eine Unterbrechung
  - eine IRET Instruktion
- Nested Tasks
  - bei Unterbrechungen und CALLs wird das NT Flag im EFLAGS Register und der "Prev. Task Link" im TSS gesetzt.
  - Wenn dies der Fall ist, springt IRET zum vorherigen Task zurück.

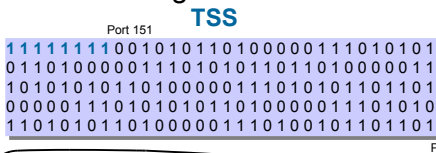


# Ein-/Ausgaben im Protected Mode

- nicht jeder beliebige Task darf Ein-/Ausgabe durchführen!
- Zugriffe auf Geräte im Speicher (memory-mapped I/O) können über Speicherschutz abgefangen werden
- Zugriffe auf I/O Ports werden eingeschränkt:
  - die I/O Privilege Level Bits im EFLAGS Register erlauben Ein- und Ausgaben auf bestimmten Schutzringen
  - auf den anderen Ebenen regelt die I/O Permission Bitmap für jeden Task und Port der Zugriff:

Ports mit größeren Nummern dürfen nicht angesprochen werden

den Abschluss bildet immer ein Byte mit 0xff



eine '1' verhindert den Portzugriff

I/O Map Base Address	T
	LDT Segment Sel.
	GS

⋮



# Agenda

---

Einordnung

Historie

Urvater: Der 8086

Die 32-Bit Intel-Architektur

Der Protected Mode

Multitasking

**Weitere Merkmale**

Zusammenfassung



# IA-32: Was gibt es sonst noch?

- Physical Address Extension (PAE)
  - ab Pentium Pro: 36-Bit Adressen (physikalisch)
  - erweiterte *Page Table* Einträge
  - weitere *Page Directory* Ebene
- System Management Mode (SMM)
  - gibt dem BIOS Kontrolle über das System
  - das Betriebssystem merkt davon nichts!
- Virtualisierung der CPU
  - der Virtual 8086 Mode
    - 16 Bit Anwendungen oder Betriebssysteme laufen als IA-32 Task in einer geschützten Umgebung
  - Vanderpool Technology
    - Hardwareunterstützung für virtuelle Maschinenlösungen wie VmWare, VirtualPC oder Xen
    - erlaubt die Ausführung von E0 Protected Mode Code in einer VM





# Agenda

---

Einordnung

Historie

Urvater: Der 8086

Die 32-Bit Intel-Architektur

Der Protected Mode

Multitasking

Weitere Merkmale

**Zusammenfassung**



# Zusammenfassung

- die IA-32 Architektur ist ausgesprochen komplex
  - segmentbasierter und seitenbasierter Speicherschutz
  - Hardwareunterstützung für Multitasking
  - Task-Aktivierung bei Unterbrechungen
  - Schutz von I/O Ports pro Task
  - ...
- viele dieser Features werden von heutigen Betriebssystemen nicht genutzt
  - typisch ist der flache Adressraum mit aktiver Paging Unit
  - Hardware-Tasks sind kaum portierbar
- bemerkenswert ist auch die konsequente Kompatibilität mit älteren Prozessorversionen
  - Stichwort "PIC" und "A20 Gate"! 😊



# Zusammenfassung

- die IA-32-Architektur wird erweitert
  - Was ist mit 64-Bit? ↪ AMD64 (x86-64)
    - 64-Bit-Erweiterung von x86, propagiert von AMD
      - offizielle Intel-Bezeichnung: x86-64
      - **Achtung:** IA-64 bezeichnet Intels (tote?) Itanium-Architektur
    - Wesentliche Features
      - 64-Bit-Register und -Adressen
      - 16 (statt bisher 8) General-Purpose Register
    - Viele IA-32-Features sind weggefallen!
      - Segmentierung (außer FS und GS Register)
        - ↪ MMU *muss* benutzt werden
      - Task-Modell
      - Ring-Modell (außer -1, 0, 3)
      - Virtual-X86-Modus
  - Stichwort "PIC" und "A20 Gate"! 😊

