

# 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

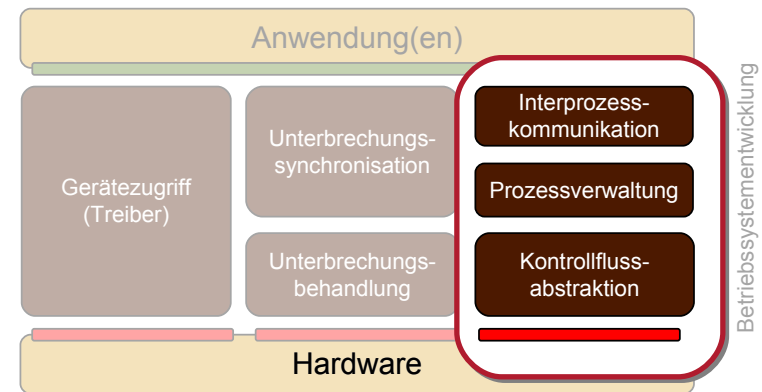
 [https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V\\_BS](https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS16/V_BS)


## Agenda

Einordnung  
Historie  
Urvater: Der 8086  
Die 32-Bit Intel-Architektur  
Der Protected Mode  
Multitasking  
Weitere Merkmale  
Zusammenfassung

 dl Betriebssysteme (VL 6 | WS 16) 6 IA-32 – Einordnung 6-3

## Überblick: Einordnung dieser VL



 dl Betriebssysteme (VL 6 | WS 16) 6 IA-32 – Einordnung 6-2

## Historie der Intel x86-Prozessoren

- 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

 dl Betriebssysteme (VL 6 | WS 16) 6 IA-32 6-4

## Historie der Intel x86-Prozessoren (Forts.)

- 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 Taktfrequenzen (angekündigt bis zu 10 GHz)
- 2004: **P4 Prescott** *Erweiterte Netburst Architektur*
  - Hyperthreading, Vanderpool, EM64T, 31-stufige Pipeline!



## Agenda

- Einordnung
- Historie
- Urvater: Der 8086
  - Programmiermodell
  - Speichermodell
- Die 32-Bit Intel-Architektur
- Der Protected Mode
- Multitasking
- Weitere Merkmale
- Zusammenfassung



## Historie der Intel x86-Prozessoren (Forts.)

- 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



## 8086: Programmiermodell

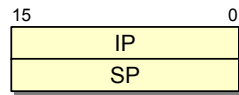
- 16-Bit Architektur, little-endian
- 20-Bit Adressbus, d.h. maximal 1 MiB Hauptspeicher
- wenige Register
  - (jedenfalls aus heutiger Sicht)
- 123 Befehle
  - kein orthogonaler Befehlssatz
- Befehlsgrößen von 1 bis 4 Byte
- segmentierter Speicher
- **noch immer aktuell**
  - obwohl von 1978 noch heute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

Aufwärtskompatibilität wird bei Intel groß geschrieben



## 8086: Registersatz

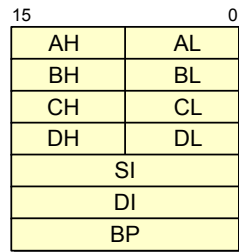
### Befehls- und Stapelzeiger



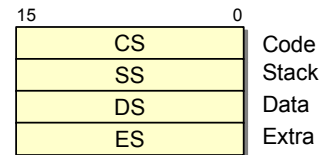
### Flag Register



### Vielzweckregister

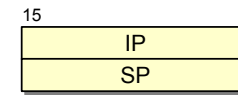


### Segmentregister

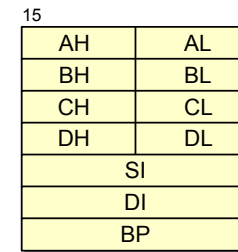


## 8086: Registersatz

### 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)

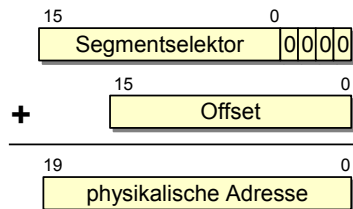
#### BP: Base Pointer

Jedes „Vielzweckregister“ erfüllt seinen speziellen Zweck



## 8086: Segmentierter Speicher

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

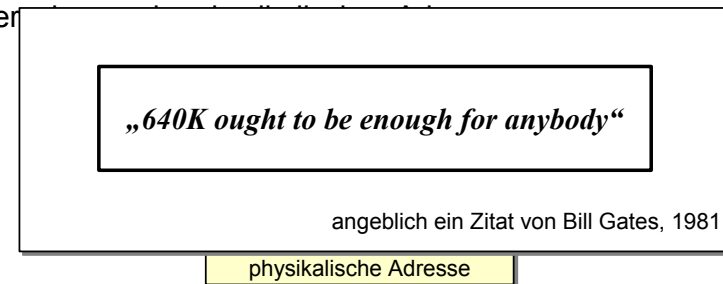


die 16 Bit Konkurrenz konnte i.d.R. nur 64KB adressieren



## 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)
- Berechnung der physikalischen Adresse:



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



## 8086: Speichermodelle

- 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



## Agenda

Einordnung  
Historie  
Urvater: Der 8086  
Die 32-Bit Intel-Architektur  
    Erweiterungen  
    Relikte: Das A20-Gate  
Der Protected Mode  
Multitasking  
Weitere Merkmale  
Zusammenfassung



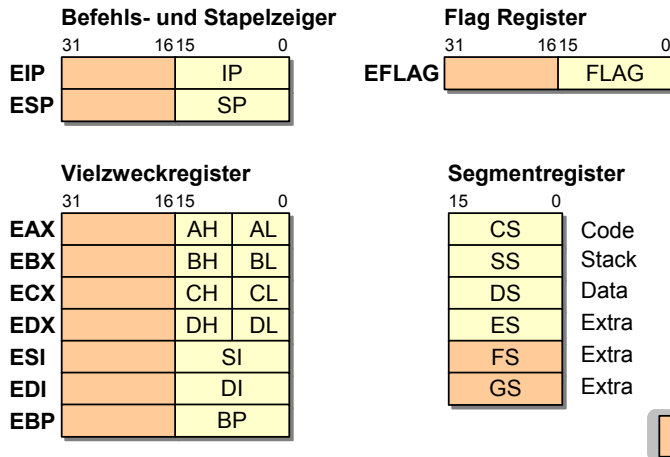
## IA-32 – die 32 Bit Intel Architektur

- 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

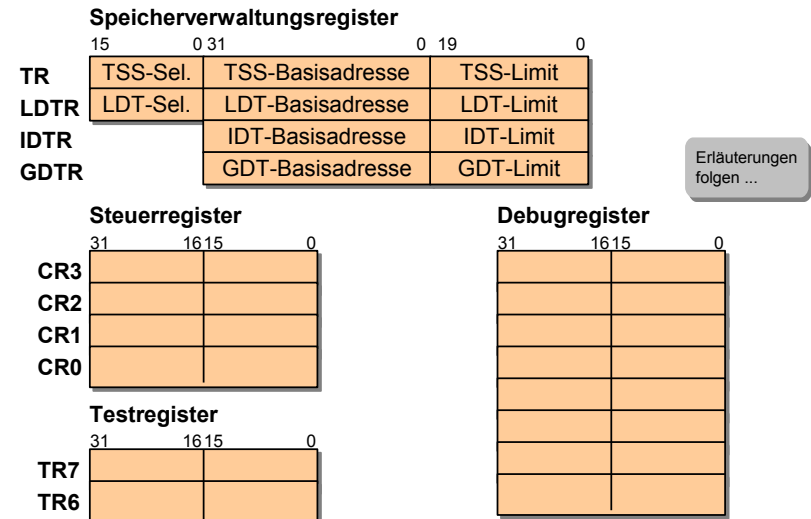


## 80386: Registersatz (Erweiterungen)

- erweiterte Register heißen aus Kompatibilitätsgründen E...

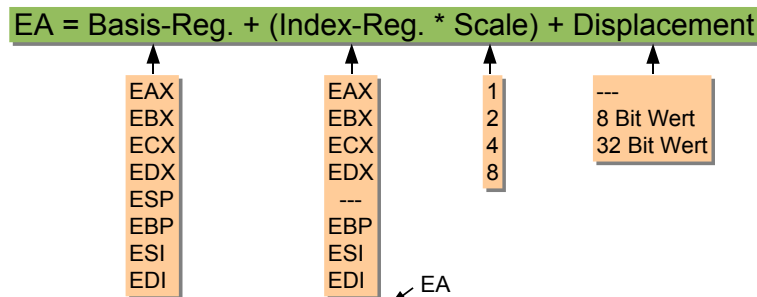


## 80386: Registersatz (neue Register)



## IA-32: Adressierungsarten

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

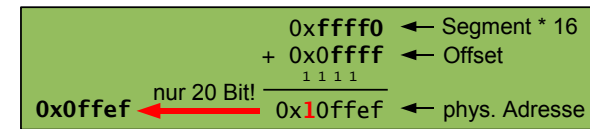


- Beispiel: `MOV EAX, Feld[ESI * 4]`
  - Lesen aus Feld mit 4 Byte großen Elementen und ESI als Index



## 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:



- 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

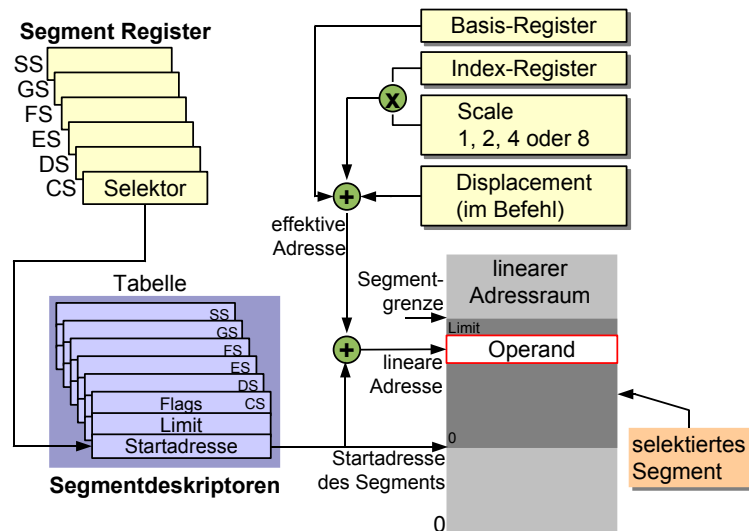


## IA-32: Protected Mode – Segmente

- 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.

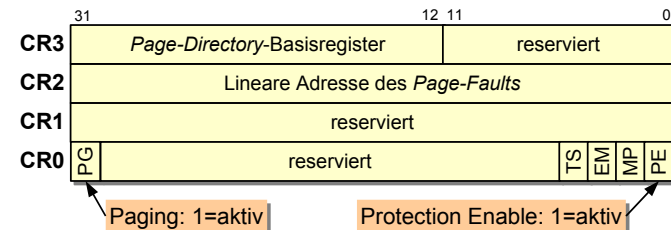


## IA-32: Protected Mode – Segmente

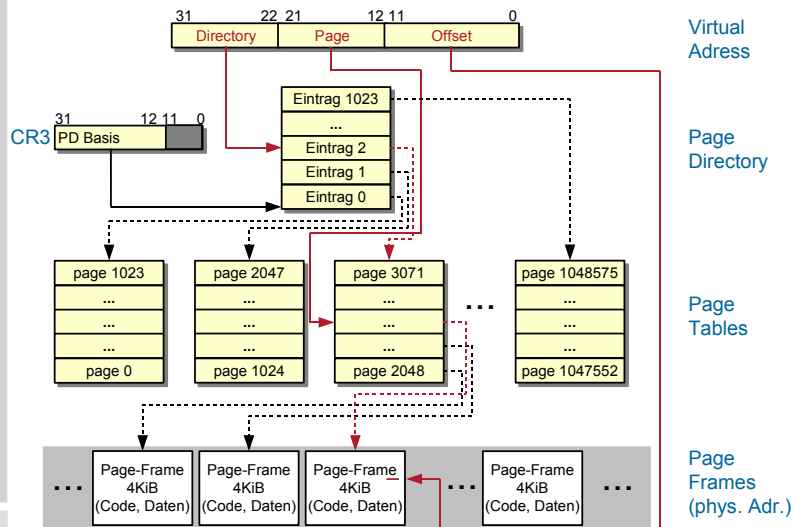


## IA-32: Seitenbasierte MMU (1)

- 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)



## IA-32: TLB

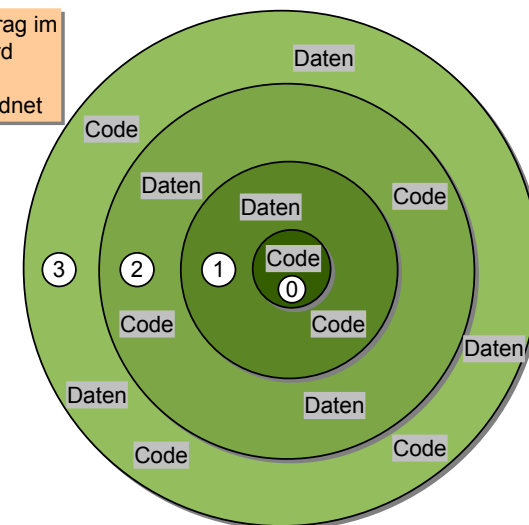
- Problem: bei aktiver *Paging Unit* wäre eine IA-32 CPU erheblich langsamer, wenn bei jedem Speicherzugriff das *Page Directory* und die *Page Table* gelesen werden müssten
- Lösung: der **Translation Lookaside Buffer (TLB)**:
  - vollassoziativer Cache
    - Tag: 20 Bit Wert aus *Page Directory* und *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

## Schutz

- 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")

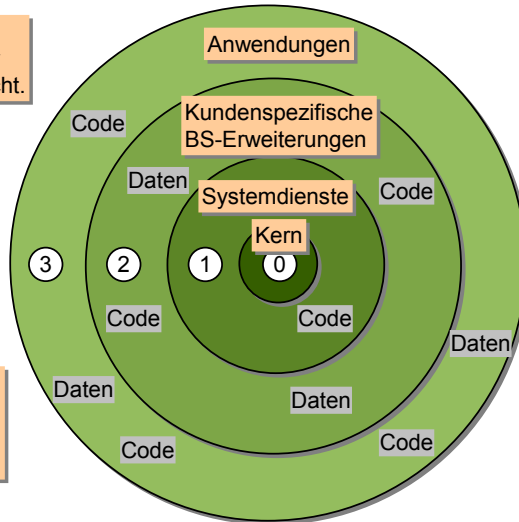
## Schutzringe und Gates

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



## Schutzringe und Gates

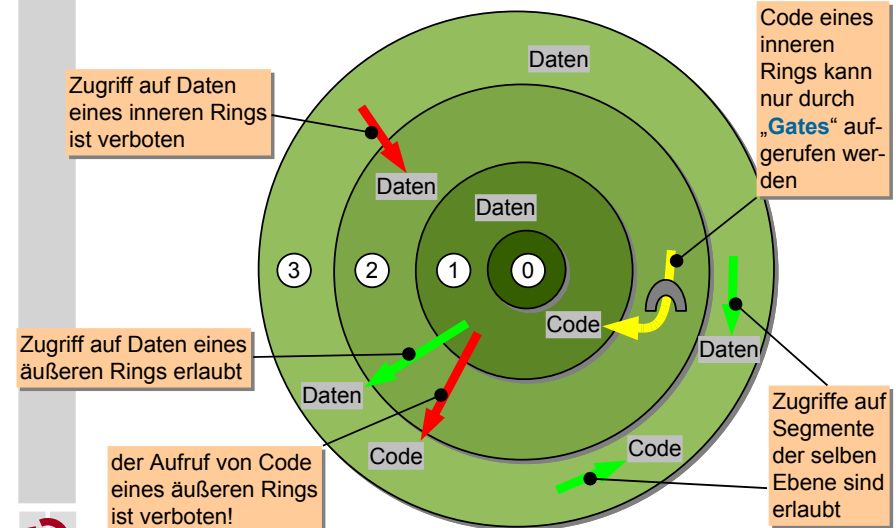
Privileg-Ebene 3 ist die niedrigste und für Anwendungen gedacht.



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



## Schutzringe und Gates



Zugriff auf Daten eines inneren Rings ist verboten

Code eines inneren Rings kann nur durch „Gates“ aufgerufen werden

Zugriff auf Daten eines äußeren Rings erlaubt

der Aufruf von Code eines äußeren Rings ist verboten!

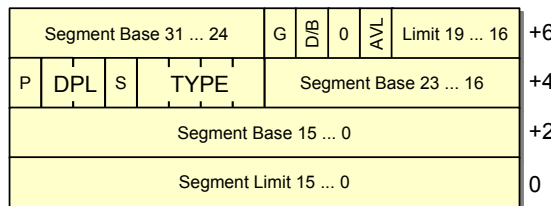
Zugriffe auf Segmente der selben Ebene sind erlaubt



## 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)
    
```



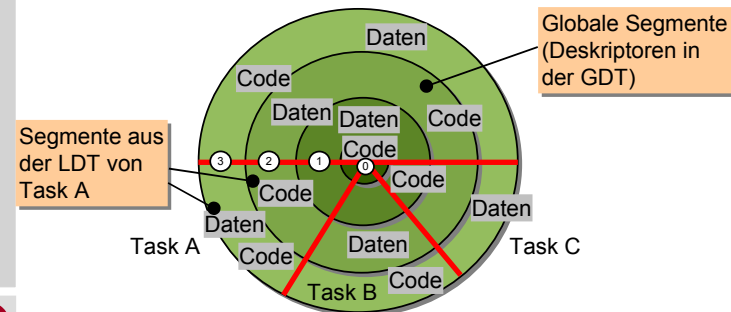
## Agenda

- Einordnung
- Historie
- Urvater: Der 8086
- Die 32-Bit Intel-Architektur
- Der Protected Mode
- Multitasking**
- Weitere Merkmale
- Zusammenfassung



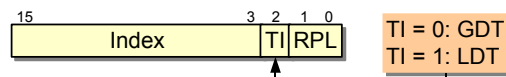
## Multitasking

- 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



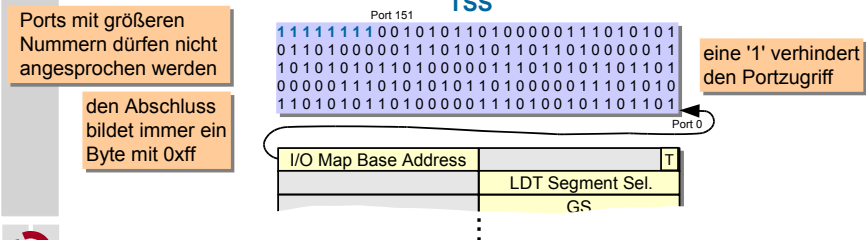
## Task-Wechsel

- 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:



## 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 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!" 😊
- 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

