

Übung zu Betriebssysteme

(Ur)Laden des x86er

17. Dezember 2025

Maximilian Ott, Bernhard Heinloth

Lehrstuhl für Informatik 4

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg



Lehrstuhl für Verteilte Systeme
und Betriebssysteme



FRIEDRICH-ALEXANDER
UNIVERSITÄT
ERLANGEN-NÜRNBERG

TECHNISCHE FAKULTÄT

WARNUNG

Die folgende Präsentation zeigt die Untiefen sowie historisch bedingten Grausamkeiten der *Intel x86*-Architektur und deren Vorgänger auf. Unter Berücksichtigung der Weisungen von Experten ist jedoch heutzutage ein weitestgehend gefahrloser Einstieg in die Betriebssystementwicklung möglich. Sollte jedoch dennoch eigenmächtig versucht werden, die nachfolgend dargestellten Programmierstunts nachzuimplementieren, so übernimmt der Lehrstuhl für Informatik 4 keine Haftung für dadurch ausgelöste psychische Belastungen oder Erkrankungen.

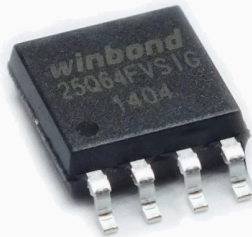






Quelle: allegro.pl

SPI Flash Memory (ROM)



Quelle: allegro.pl



BIOS (Basic Input/Output System)

- von ROM geladen
- automatischer Start
- Power-On Self-Test
- Hardwareinitialisierung
 - u.a. Bootmedium



BIOS (Basic Input/Output System)

- von ROM geladen
- automatischer Start
- Power-On Self-Test
- Hardwareinitialisierung
 - u.a. Bootmedium

oder UEFI (Unified Extensible Firmware Interface)



ROM

Medium

BIOS lädt **Bootsektor** von Bootmedium



ROM

Medium

BIOS lädt **Bootsektor** von Bootmedium

- 1. Sektor von **Floppy**, der *VBR (Volume Boot Record)*
- 1. Sektor von **Festplatte**
 - **MBR** (Master Boot Record)
 - oder **GPT** (GUID-Partitionstabelle, hat *protective MBR*)
- ebenso bei **USB** (wird meist als Festplatte emuliert)



ROM

Medium

BIOS lädt **Bootsektor** von Bootmedium

- 1. Sektor von **Floppy**, der *VBR (Volume Boot Record)*
- 1. Sektor von **Festplatte**
 - **MBR** (Master Boot Record)
 - oder **GPT** (GUID-Partitionstabelle, hat *protective MBR*)
- ebenso bei **USB** (wird meist als Festplatte emuliert)
- CD, DVD und BD (**ISO 9660**)
 - **Boot Record** (nach *El Torito*) zeigt auf Bootprogramm
 - ggf. auch **hybrid** (für USB): 1. Sektor wie Festplatte (da ersten 32K als *System Area* reserviert/ungenutzt)



ROM

Medium

BIOS lädt **Bootsektor** von Bootmedium

- 1. Sektor von **Floppy**, der *VBR (Volume Boot Record)*
- 1. Sektor von **Festplatte**
 - **MBR** (Master Boot Record)
 - oder **GPT** (GUID-Partitionstabelle, hat *protective MBR*)
- ebenso bei **USB** (wird meist als Festplatte emuliert)
- CD, DVD und BD (**ISO 9660**)
 - **Boot Record** (nach *El Torito*) zeigt auf Bootprogramm
 - ggf. auch **hybrid** (für USB): 1. Sektor wie Festplatte (da ersten 32K als *System Area* reserviert/ungenutzt)
- via Netzwerk: **Preboot Execution Environment (PXE)**
 - bekommt Informationen via **DHCP**
 - lädt Bootprogramm von **TFTP**

```
$ sudo dd if=/dev/sda of=/tmp/mbr.bin bs=512 count=1 && xxd /tmp/mbr.bin
```

\$ sudo dd if=/dev/sda of=/tmp/mbr.bin bs=512 count=1 && xxd /tmp/mbr.bin

```
0000:  eb63 9010 8ed0 bc00 b0b8 0000 8ed8 8ec0          .C.....
0010:  fbbe 007c bf00 06b9 0002 f3a4 ea21 0600          ...|.....!..
0020:  00be be07 3804 750b 83c6 1081 fefe 0775          ....8.u.....u
0030:  f3eb 16b4 02b0 01bb 007c b280 8a74 018b          .....|...t..
0040:  4c02 cd13 ea00 7c00 00eb fe00 0000 0000          L.....|.....
0050:  0000 0000 0000 0000 0000 0080 0100 0000          .....
0060:  0000 0000 fffa 9090 f6c2 8074 05f6 c270          .....t...p
0070:  7402 b280 ea79 7c00 0031 c08e d88e d0bc          t....y|..1.....
0080:  0020 fba0 647c 3cff 7402 88c2 52bb 1704          . .d|<.t...R...
0090:  f607 0374 06be 887d e817 01be 057c b441          ...t...}.....|.A
00a0:  bbaa 55cd 135a 5272 3d81 fb55 aa75 3783          ..U..ZRr=..U.u7.
00b0:  e101 7432 31c0 8944 0440 8844 ff89 4402          ..t21..D.@.D..D.
00c0:  c704 1000 668b 1e5c 7c66 895c 0866 8b1e          ....f..\\f.\\.f..
00d0:  607c 6689 5c0c c744 0600 70b4 42cd 1372          `|f.\\.D..p.B..r
00e0:  05bb 0070 eb76 b408 cd13 730d 5a84 d20f          ...p.v....s.Z...
00f0:  83d0 00be 937d e982 0066 0fb6 c688 64ff          .....}...f....d.
0100:  4066 8944 040f b6d1 c1e2 0288 e888 f440          @f.D.....@
0110:  8944 080f b6c2 c0e8 0266 8904 66a1 607c          .D.....f..f.`|
0120:  6609 c075 4e66 a15c 7c66 31d2 66f7 3488          f..uNf.\\|f1.f.4.
0130:  d131 d266 f774 043b 4408 7d37 fec1 88c5          .1.f.t.;D.}7....
0140:  30c0 c1e8 0208 c188 d05a 88c6 bb00 708e          0.....Z....p.
0150:  c331 dbb8 0102 cd13 721e 8cc3 601e b900          .1.....r...`...
0160:  018e db31 f6bf 0080 8ec6 fcf3 a51f 61ff          ...1.....a.
0170:  265a 7cbe 8e7d eb03 be9d 7de8 3400 bea2          &Z|..}....}.4...
0180:  7de8 2e00 cd18 ebfe 4752 5542 2000 4765          }.....GRUB .Ge
0190:  6f6d 0048 6172 6420 4469 736b 0052 6561          om.Hard Disk.Rea
01a0:  6400 2045 7272 6f72 0d0a 00bb 0100 b40e          d. Error.....
01b0:  cd10 ac3c 0075 f4c3 43a9 40ec 0000 8020          ...<.u..C.@....
01c0:  2100 83fe ffff 0008 0000 db00 210b 00fe          !.....!...
01d0:  ffff 82fe ffff db00 210b 332d de00 00fe          .....!.3-....
01e0:  ffff 83fe ffff 0e16 000c a257 7068 0000          .....Wph..
01f0:  0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 55aa          .....U.
```

\$ sudo dd if=/dev/sda of=/tmp/mbr.bin bs=512 count=1 && xxd /tmp/mbr.bin

```
0000:  eb63 9010 8ed0 bc00 b0b8 0000 8ed8 8ec0      .C.....
0010:  fbbe 007c bf00 06b9 0002 f3a4 ea21 0600      ...|.....!..
0020:  00be be07 3804 750b 83c6 1081 fefe 0775      ....8.u.....u
0030:  f3eb 16b4 02b0 01bb 007c b280 8a74 018b      .....|...t..
0040:  4c02 cd13 ea00 7c00 00eb fe00 0000 0000      L.....|.....
0050:  0000 0000 0000 0000 0000 0080 0100 0000      .....
0060:  0000 0000 fffa 9090 f6c2 8074 05f6 c270      .....t...p
0070:  7402 b280 ea79 7c00 0031 c08e d88e d0bc      t....y|..1.....
0080:  0020 fba0 647c 3cff 7402 88c2 52bb 1704      . .d|<.t...R...
0090:  f607 0374 06be 887d e817 01be 057c b441      ...t...}....|.A
00a0:  bbaa 55cd 135a 5272 3d81 fb55 aa75 3783      ..U..ZRr=..U.u7.
00b0:  e101 7432 31c0 8944 0440 8844 ff89 4402      ..t21..D.@.D..D.
00c0:  c704 1000 668b 1e5c 7c66 895c 0866 8b1e      ....f..\\f.\\.f..
00d0:  607c 6689 5c0c c744 0600 70b4 42cd 1372      `|f.\\.D..p.B..r
00e0:  05bb 0070 eb76 b408 cd13 730d 5a84 d20f      ...p.v....s.Z...
00f0:  83d0 00be 937d e982 0066 0fb6 c688 64ff      .....}...f....d.
0100:  4066 8944 040f b6d1 c1e2 0288 e888 f440      @f.D.....@
0110:  8944 080f b6c2 c0e8 0266 8904 66a1 607c      .D.....f..f.`|
0120:  6609 c075 4e66 a15c 7c66 31d2 66f7 3488      f..uNf.\\|f1.f.4.
0130:  d131 d266 f774 043b 4408 7d37 fec1 88c5      .1.f.t.;D.}7....
0140:  30c0 c1e8 0208 c188 d05a 88c6 bb00 708e      0.....Z....p.
0150:  c331 dbb8 0102 cd13 721e 8cc3 601e b900      .1.....r...`...
0160:  018e db31 f6bf 0080 8ec6 fcf3 a51f 61ff      ...1.....a.
0170:  265a 7cbe 8e7d eb03 be9d 7de8 3400 bea2      &Z|..}....}.4...
0180:  7de8 2e00 cd18 ebfe 4752 5542 2000 4765      }.....GRUB .Ge
0190:  6f6d 0048 6172 6420 4469 736b 0052 6561      om.Hard Disk.Rea
01a0:  6400 2045 7272 6f72 0d0a 00bb 0100 b40e      d. Error.....
01b0:  cd10 ac3c 0075 f4c3 43a9 40ec 0000 8020      ...<.u..C.@....
01c0:  2100 83fe ffff 0008 0000 db00 210b 00fe      !.....!...
01d0:  ffff 82fe ffff db00 210b 332d de00 00fe      .....!.3-....
01e0:  ffff 83fe ffff 0e16 000c a257 7068 0000      .....Wph..
01f0:  0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 55aa      .....U.
```

Boot Signatur

\$ sudo dd if=/dev/sda of=/tmp/mbr.bin bs=512 count=1 && xxd /tmp/mbr.bin

```
0000: eb63 9010 8ed0 bc00 b0b8 0000 8ed8 8ec0          .C.....
0010: fbbe 007c bf00 06b9 0002 f3a4 ea21 0600          ...|.....!..
0020: 00be be07 3804 750b 83c6 1081 fefe 0775          ....8.u.....u
0030: f3eb 16b4 02b0 01bb 007c b280 8a74 018b          .....|...t..
0040: 4c02 cd13 ea00 7c00 00eb fe00 0000 0000          L.....|.....
0050: 0000 0000 0000 0000 0000 0080 0100 0000          .....
0060: 0000 0000 fffa 9090 f6c2 8074 05f6 c270          .....t...p
0070: 7402 b280 ea79 7c00 0031 c08e d88e d0bc          t....y|..1.....
0080: 0020 fba0 647c 3cff 7402 88c2 52bb 1704          . .d|<.t...R...
0090: f607 0374 06be 887d e817 01be 057c b441          ...t...}.....|.A
00a0: bbaa 55cd 135a 5272 3d81 fb55 aa75 3783          ..U..ZRr=..U.u7.
00b0: e101 7432 31c0 8944 0440 8844 ff89 4402          ..t21..D.@.D..D.
00c0: c704 1000 668b 1e5c 7c66 895c 0866 8b1e          ....f..\\f.\\.f..
00d0: 607c 6689 5c0c c744 0600 70b4 42cd 1372          `|f.\\.D..p.B..r
00e0: 05bb 0070 eb76 b408 cd13 730d 5a84 d20f          ...p.v....s.Z...
00f0: 83d0 00be 937d e982 0066 0fb6 c688 64ff          .....}...f....d.
0100: 4066 8944 040f b6d1 c1e2 0288 e888 f440          @f.D.....@
0110: 8944 080f b6c2 c0e8 0266 8904 66a1 607c          .D.....f..f.`|
0120: 6609 c075 4e66 a15c 7c66 31d2 66f7 3488          f..uNf.\\|f1.f.4.
0130: d131 d266 f774 043b 4408 7d37 fec1 88c5          .1.f.t.;D.}7....
0140: 30c0 c1e8 0208 c188 d05a 88c6 bb00 708e          0.....Z....p.
0150: c331 dbb8 0102 cd13 721e 8cc3 601e b900          .1.....r...`...
0160: 018e db31 f6bf 0080 8ec6 fcf3 a51f 61ff          ...1.....a.
0170: 265a 7cbe 8e7d eb03 be9d 7de8 3400 bea2          &Z|..}....}.4...
0180: 7de8 2e00 cd18 ebfe 4752 5542 2000 4765          }.....GRUB .Ge
0190: 6f6d 0048 6172 6420 4469 736b 0052 6561          om.Hard Disk.Rea
01a0: 6400 2045 7272 6f72 0d0a 00bb 0100 b40e          d. Error.....
01b0: cd10 ac3c 0075 f4c3 43a9 40ec 0000 8020          ...<.u..C.@....
01c0: 2100 83fe ffff 0008 0000 db00 210b 00fe          !.....!...
01d0: ffff 82fe ffff db00 210b 332d de00 00fe          .....!.3-....
01e0: ffff 83fe ffff 0e16 000c a257 7068 0000          .....Wph..
01f0: 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 55aa          .....U.
```

Partitionstabelle
(Festplatte)
Boot Signatur

```
$ sudo dd if=/dev/sda of=/tmp/mbr.bin bs=512 count=1 && xxd /tmp/mbr.bin
```

```
0000:  eb63 9010 8ed0 bc00 b0b8 0000 8ed8 8ec0          .C.....
0010:  fbbe 007c bf00 06b9 0002 f3a4 ea21 0600          ...|.....!..
0020:  00be be07 3804 750b 83c6 1081 fefe 0775          ....8.u.....u
0030:  f3eb 16b4 02b0 01bb 007c b280 8a74 018b          .....|...t..
0040:  4c02 cd13 ea00 7c00 00eb fe00 0000 0000          L.....|.....
0050:  0000 0000 0000 0000 0000 0080 0100 0000          .....
0060:  0000 0000 fffa 9090 f6c2 8074 05f6 c270          .....t...p
0070:  7402 b280 ea79 7c00 0031 c08e d88e d0bc          t....y|..1.....
0080:  0020 fba0 647c 3cff 7402 88c2 52bb 1704          . .d|<.t...R...
0090:  f607 0374 06be 887d e817 01be 057c b441          ...t...}.....|.A
00a0:  bbaa 55cd 135a 5272 3d81 fb55 aa75 3783          ..U..ZRr=..U.u7.
00b0:  e101 7432 31c0 8944 0440 8844 fff8 4402          ..t21..D.@.D..D.
00c0:  c704 1000 668b 1e5c 7c66 895c 0866 8b1e          ....f..\\f.\\.f..
00d0:  607c 6689 5c0c c744 0600 70b4 42cd 1372          `|f.\\.D..p.B..r
00e0:  05bb 0070 eb76 b408 cd13 730d 5a84 d20f          ...p.v....s.Z...
00f0:  83d0 00be 937d e982 0066 0fb6 c688 64ff          .....}...f....d.
0100:  4066 8944 040f b6d1 c1e2 0288 e888 f440          @f.D.....@
0110:  8944 080f b6c2 c0e8 0266 8904 66a1 607c          .D.....f..f.`|
0120:  6609 c075 4e66 a15c 7c66 31d2 66f7 3488          f..uNf.\\|f1.f.4.
0130:  d131 d266 f774 043b 4408 7d37 fec1 88c5          .1.f.t.;D.}7....
0140:  30c0 c1e8 0208 c188 d05a 88c6 bb00 708e          0.....Z....p.
0150:  c331 dbb8 0102 cd13 721e 8cc3 601e b900          .1.....r...`...
0160:  018e db31 f6bf 0080 8ec6 fcf3 a51f 61ff          ...1.....a.
0170:  265a 7cbe 8e7d eb03 be9d 7de8 3400 bea2          6Z|..}....}.4...
0180:  7de8 2e00 cd18 ebfe 4752 5542 2000 4765          }.....GRUB .Ge
0190:  6f6d 0048 6172 6420 4469 736b 0052 6561          om.Hard Disk.Rea
01a0:  6400 2045 7272 6f72 0d0a 00bb 0100 b40e          d. Error.....
01b0:  cd10 ac3c 0075 f4c3 43a9 40ec 0000 8020          ...<.u..C.@....
01c0:  2100 83fe ffff 0008 0000 dbe0 210b 00fe          !.....!...
01d0:  ffff 82fe ffff dbe8 210b 332d de00 00fe          .....!3-....
01e0:  ffff 83fe ffff 0e16 000c a257 7068 0000          .....Wph..
01f0:  0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 55aa          .....U.
```

Bootstrap
Programm

Partitionstabelle
(Festplatte)
Boot Signatur


```
$ sudo dd if=/dev/sda of=/tmp/mbr.bin bs=512 count=1 && xxd /tmp/mbr.bin
```

```
0000:  eb63 9010 8ed0 bc00 b0b8 0000 8ed8 8ec0      .C.....
0010:  fbbe 007c bf00 06b9 0002 f3a4 ea21 0600      ...|.....!..
0020:  00be be07 3804 750b 83c6 1081 fefe 0775      ....8.u.....u
0030:  f3eb 16b4 02b0 01bb 007c b280 8a74 018b      .....|...t..
0040:  4c02 cd13 ea00 7c00 00eb fe00 0000 0000      L.....|.....
0050:  0000 0000 0000 0000 0000 0080 0100 0000      .....
0060:  0000 0000 fffa 9090 f6c2 8074 05f6 c270      .....t...p
0070:  7402 b280 ea79 7c00 0031 c08e d88e d0bc      t....y|..1.....
0080:  0020 fba0 647c 3cff 7402 88c2 52bb 1704      . .d|<.t...R...
0090:  f607 0374 06be 887d e817 01be 057c b441      ...t...}.....|.A
00a0:  bbaa 55cd 135a 5272 3d81 fb55 aa75 3783      ..U..ZRr=..U.u7.
00b0:  e101 7432 31c0 8944 0440 8844 ff89 4402      ..t21..D.@.D..D.
00c0:  c704 1000 668b 1e5c 7c66 895c 0866 8b1e      ....f..\\f.\\.f..
00d0:  607c 6689 5c0c c744 0600 70b4 42cd 1372      `|f.\\.D..p.B..r
00e0:  05bb 0070 eb76 b408 cd13 730d 5a84 d20f      ...p.v....s.Z...
00f0:  83d0 00be 937d e982 0066 0fb6 c688 64ff      .....}...f....d.
0100:  4066 8944 040f b6d1 c1e2 0288 e888 f440      @f.D.....@
0110:  8944 080f b6c2 c0e8 0266 8904 66a1 607c      .D.....f..f.`|
0120:  6609 c075 4e66 a15c 7c66 31d2 66f7 3488      f..uNf.\\|f1.f.4.
0130:  d131 d266 f774 043b 4408 7d37 fec1 88c5      .1.f.t.;D.}7....
0140:  30c0 c1e8 0208 c188 d05a 88c6 bb00 708e      0.....Z....p.
0150:  c331 dbb8 0102 cd13 721e 8cc3 601e b900      .1.....r...`...
0160:  018e db31 f6bf 0080 8ec6 fcf3 a51f 61ff      ...1.....a.
0170:  265a 7cbe 8e7d eb03 be9d 7de8 3400 bea2      &Z|..}....}.4...
0180:  7de8 2e00 cd18 ebfe 4752 5542 2000 4765      }.....GRUB .Ge
0190:  6f6d 0048 6172 6420 4469 736b 0052 6561      om.Hard Disk.Rea
01a0:  6400 2045 7272 6f72 0d0a 00bb 0100 b40e      d. Error.....
01b0:  cd10 ac3c 0075 f4c3 43a9 40ec 0000 8020      ...<.u..C.@....
01c0:  2100 83fe ffff 0008 0000 db00 210b 00fe      !.....!...
01d0:  ffff 82fe ffff db00 210b 332d de00 00fe      .....!3-....
01e0:  ffff 83fe ffff 0e16 000c a257 7068 0000      .....Wph..
01f0:  0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 55aa      .....U.
```

BIOS
Parameter
Block

Bootstrap
Programm

Disk Signatur

Partitionstabelle
(Festplatte)
Boot Signatur

Chain Loading

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- BIOS lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- **BIOS** lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00
- **Bootstrap Programm** lädt Bootloader **Stage 1** aus dem *Volume Boot Record* der Zielpartition

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- **BIOS** lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00
- **Bootstrap Programm** lädt Bootloader **Stage 1** aus dem *Volume Boot Record* der Zielpartition – alternativ ist es bereits die **Stage 1** im MBR

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- BIOS lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00
- **Bootstrap Programm** lädt Bootloader **Stage 1** aus dem *Volume Boot Record* der Zielpartition – alternativ ist es bereits die **Stage 1** im MBR
- Bootloader **Stage 1** lädt entweder **Stage 1.5** aus den nachfolgenden Sektoren – oder direkt **Stage 2**

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- BIOS lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00
- **Bootstrap Programm** lädt Bootloader **Stage 1** aus dem *Volume Boot Record* der Zielpartition – alternativ ist es bereits die **Stage 1** im MBR
- Bootloader **Stage 1** lädt entweder **Stage 1.5** aus den nachfolgenden Sektoren – oder direkt **Stage 2**
- **Stage 1.5** bringt Dateisystemtreiber mit und lädt damit die nächste Bootloader **Stage 2**

Chain Loading (*Eiertanz*)

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- BIOS lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00
- **Bootstrap Programm** lädt Bootloader **Stage 1** aus dem *Volume Boot Record* der Zielpartition – alternativ ist es bereits die **Stage 1** im MBR
- Bootloader **Stage 1** lädt entweder **Stage 1.5** aus den nachfolgenden Sektoren – oder direkt **Stage 2**
- **Stage 1.5** bringt Dateisystemtreiber mit und lädt damit die nächste Bootloader **Stage 2**
- **Stage 2** ist endlich unser eigentlicher Bootloader



ROM

Medium

Urlader

Problem: Nur 512 Byte Sektorgröße bei Festplatten und Floppy

Lösung: Stufenweise (*Stages*) hochsteigen

- **BIOS** lädt **Bootstrap Programm** aus **MBR** an 0x7c00
- **Bootstrap Programm** lädt Bootloader **Stage 1** aus dem *Volume Boot Record* der Zielpartition – alternativ ist es bereits die **Stage 1** im MBR
- Bootloader **Stage 1** lädt entweder **Stage 1.5** aus den nachfolgenden Sektoren – oder direkt **Stage 2**
- **Stage 1.5** bringt Dateisystemtreiber mit und lädt damit die nächste Bootloader **Stage 2**
- **Stage 2** ist endlich unser eigentlicher Bootloader

(Beispiel **GRUB Legacy**)

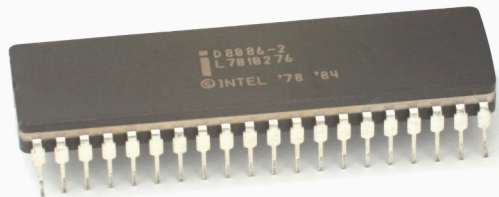
```
$ objdump -D -b binary -Intel -mi8086 /tmp/mbr.bin
```

\$ objdump -D -b binary -Intel -mi8086 /tmp/mbr.bin

00000000 <.data>:

0:	eb 63	jmp	0x65
2:	90	nop	
	...		
65:	fa	cli	
66:	90	nop	
67:	90	nop	
68:	f6 c2 80	test	dl, 0x80
6b:	74 05	je	0x72
6d:	f6 c2 70	test	dl, 0x70
70:	74 02	je	0x74
72:	b2 80	mov	dl, 0x80
74:	ea 79 7c 00 00	jmp	0x0:0x7c79
79:	31 c0	xor	ax, ax
7b:	8e d8	mov	ds, ax
7d:	8e d0	mov	ss, ax
7f:	bc 00 20	mov	sp, 0x2000
82:	fb	sti	
83:	a0 64 7c	mov	al, ds:0x7c64
86:	3c ff	cmp	al, 0xff
88:	74 02	je	0x8c
8a:	88 c2	mov	dl, al
8c:	52	push	dx
8d:	bb 17 04	mov	bx, 0x417
90:	f6 07 03	test	BYTE PTR [bx],0x3
93:	74 06	je	0x9b
95:	be 88 7d	mov	si, 0x7d88
98:	e8 17 01	call	0x1b2
9b:	be 05 7c	mov	si, 0x7c05
9e:	b4 41	mov	ah, 0x41
	... (104 Instruktionen)		
1b7:	c3	ret	



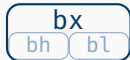
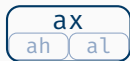


Quelle: Wikipedia

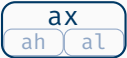
- 16 bit
- Speicher: max. 1 MB
- BIOS Funktionen via Interrupts aufrufbar
- 14 Register

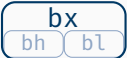
- 16 bit
- Speicher: max. 1 MB durch Segmentierung (20 bit Adressbus)
- BIOS Funktionen via Interrupts aufrufbar
- 14 Register

Real Mode Register



Real Mode Register

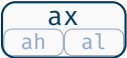
Akkumulator The diagram shows a rounded rectangle labeled 'ax' at the top. Inside, there are two smaller rounded rectangles: 'ah' on the left and 'al' on the right.

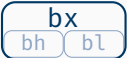
Basisregister The diagram shows a rounded rectangle labeled 'bx' at the top. Inside, there are two smaller rounded rectangles: 'bh' on the left and 'bl' on the right.

Zählerregister The diagram shows a rounded rectangle labeled 'cx' at the top. Inside, there are two smaller rounded rectangles: 'ch' on the left and 'cl' on the right.

Datenregister The diagram shows a rounded rectangle labeled 'dx' at the top. Inside, there are two smaller rounded rectangles: 'dh' on the left and 'dl' on the right.

Real Mode Register

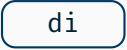
Akkumulator 

Basisregister 

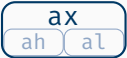
Zählerregister 

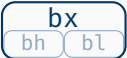
Datenregister 

Quellindex 

Zielindex 

Real Mode Register

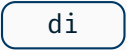
Akkumulator 

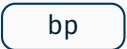
Basisregister 

Zählerregister 

Datenregister 

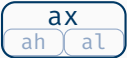
Quellindex 

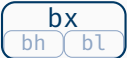
Zielindex 

Basiszeiger für
Stapelrahmen 

Stapelzeiger 

Real Mode Register

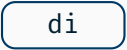
Akkumulator 

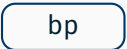
Basisregister 

Zählerregister 

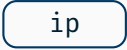
Datenregister 

Quellindex 

Zielindex 

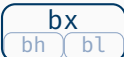
Basiszeiger für
Stapelrahmen 

Stapelzeiger 

Instruktionszeiger 

Real Mode Register

Akkumulator 

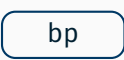
Basisregister 

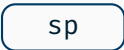
Zählerregister 

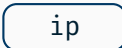
Datenregister 

Quellindex 

Zielindex 

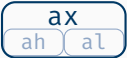
Basiszeiger für
Stapelrahmen 

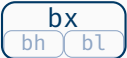
Stapelzeiger 

Instruktionszeiger 

Statusregister 

Real Mode Register

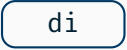
Akkumulator 

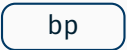
Basisregister 

Zählerregister 

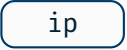
Datenregister 

Quellindex 

Zielindex 

Basiszeiger für
Stapelrahmen 

Stapelzeiger 

Instruktionszeiger 

Statusregister 

Codesegment 

Datensegment 

Stacksegment 

Extrasegment 

Real Mode Segmentierung

- 1 MB Hauptspeicher



Real Mode Segmentierung

- 1 MB Hauptspeicher
- 20 bit Adressbus



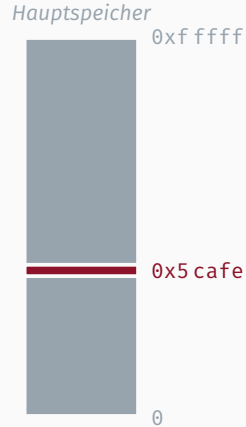
Real Mode Segmentierung

- 1 MB Hauptspeicher
- 20 bit Adressbus
- aber 16 bit CPU (maximal 0xffff)



Real Mode Segmentierung

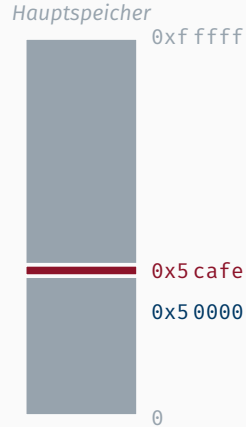
Zugriff auf **Ziel**daten in 0x5 cafe



Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Zieldaten** in 0x5 cafe

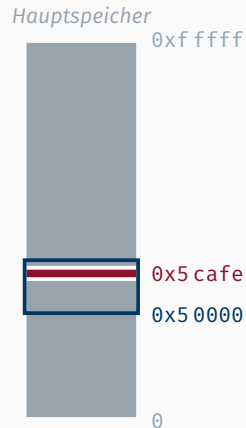
1. Setze **ds** auf 0x5000



Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Zieldaten** in 0x5 cafe

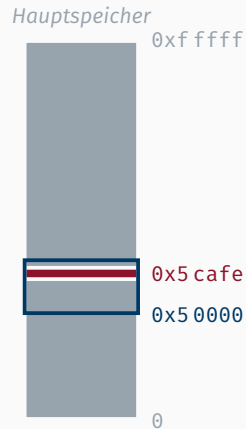
1. Setze **ds** auf 0x5000
(Bereich 0x5 0000 – 0x5 ffff)



Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x5 cafe

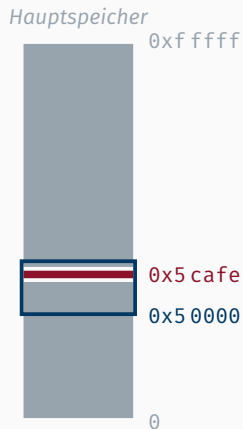
1. Setze **ds** auf 0x5000
(Bereich 0x5 0000 – 0x5 ffff)
2. Zugriff über **ds:0xcafe**



Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x5 cafe

1. Setze **ds** auf 0x5000
(Bereich 0x5 0000 – 0x5 ffff)
2. Zugriff über **ds:0xcafe**
($\text{ds} \times 0x10 + 0xcafe = 0x5\text{ cafe}$)

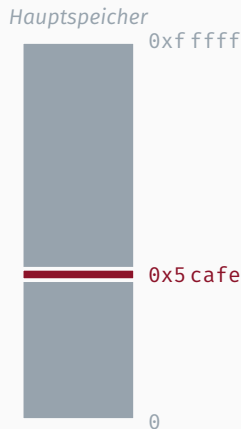


Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x5 cafe

1. Setze **ds** auf 0x5000
(Bereich 0x5 0000 – 0x5 ffff)
2. Zugriff über **ds:0xcafe**
($\text{ds} \times 0x10 + 0xcafe = 0x5\text{ cafe}$)

Alternativ:



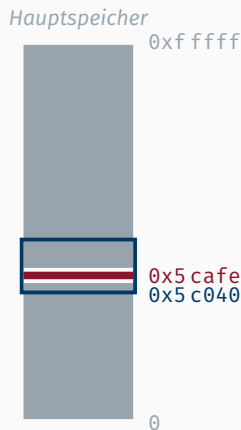
Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x5 cafe

1. Setze **ds** auf 0x5000
(Bereich 0x5 0000 – 0x5 ffff)
2. Zugriff über **ds:0xcafe**
($\text{ds} \times 0x10 + 0xcafe = 0x5\text{ cafe}$)

Alternativ:

1. Setze **ds** auf 0x5c04
(Bereich 0x5 c040 – 0x6 c03f)



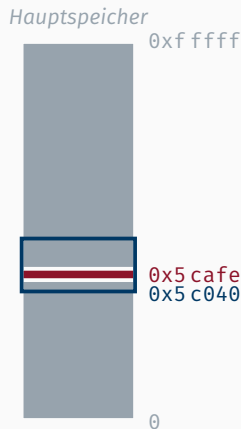
Real Mode Segmentierung

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x5 cafe

1. Setze **ds** auf 0x5000
(Bereich 0x5 0000 – 0x5 ffff)
2. Zugriff über **ds:0xcafe**
($\text{ds} \times 0x10 + 0xcafe = 0x5\text{ cafe}$)

Alternativ:

1. Setze **ds** auf 0x5c04
(Bereich 0x5 c040 – 0x6 c03f)
2. Zugriff über **ds:0xabe**



Real Mode Segmentierung

Besonderheit:



Real Mode Segmentierung

Besonderheit:



Real Mode Segmentierung

Besonderheit: Überlauf ist valid.

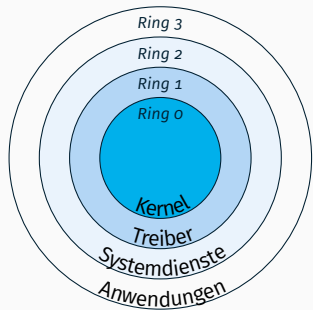




Quelle: Wikipedia

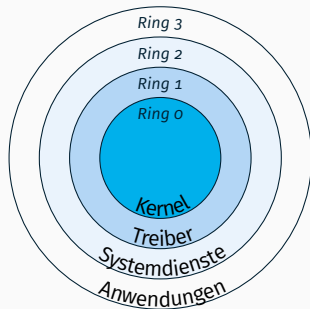
Protected Mode

Name aufgrund der vier Schutzringe
(*Privilege Level*)



Protected Mode

Name aufgrund der vier Schutzringe
(*Privilege Level*)



80286 16 bit, 16 MB Speicher adressierbar

- Segmentierung mit 24 bit Adressbus

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- *MS-DOS 1.25* verlässt sich auf das Überlaufverhalten

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- *MS-DOS 1.25* verlässt sich auf das Überlaufverhalten

Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- *MS-DOS 1.25* verlässt sich auf das Überlaufverhalten
Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!
- Logikgatter zur Steuerung der A20 Leitung

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- *MS-DOS 1.25* verlässt sich auf das Überlaufverhalten
Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!
- Logikgatter zur Steuerung der A20 Leitung
 - Zieht die 20. Adressleitung auf 0

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- MS-DOS 1.25 verlässt sich auf das Überlaufverhalten

Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!

→ Logikgatter zur Steuerung der A20 Leitung

- Zieht die 20. Adressleitung auf 0
- A20 Gate bei Start geschlossen (Leitung deaktiviert)

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- MS-DOS 1.25 verlässt sich auf das Überlaufverhalten

Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!

→ Logikgatter zur Steuerung der A20 Leitung

- Zieht die 20. Adressleitung auf 0
- A20 Gate bei Start geschlossen (Leitung deaktiviert)
- Steuerbar über 8042 Tastaturcontroller

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- MS-DOS 1.25 verlässt sich auf das Überlaufverhalten

Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!

→ Logikgatter zur Steuerung der A20 Leitung

- Zieht die 20. Adressleitung auf 0
- A20 Gate bei Start geschlossen (Leitung deaktiviert)
- Steuerbar über 8042 Tastaturcontroller
- Langsam, komplizierter Zugriff, (anfangs) Zustand nicht lesbar

80286 Adressbus

23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Problem: Zugriff auf `ds:0xcafe` mit `ds = 0xf600` bei 24 bit Adressbus ergibt `0x1c0fe` (statt nur `0xc0fe` nach Überlauf bei 20 bit)

- MS-DOS 1.25 verlässt sich auf das Überlaufverhalten

Abwärtskompatibilität des 80286 sollte jedoch unbedingt gewährleistet sein!

→ Logikgatter zur Steuerung der A20 Leitung

- Zieht die 20. Adressleitung auf 0
- A20 Gate bei Start geschlossen (Leitung deaktiviert)
- Steuerbar über 8042 Tastaturcontroller
- Langsam, komplizierter Zugriff, (anfangs) Zustand nicht lesbar



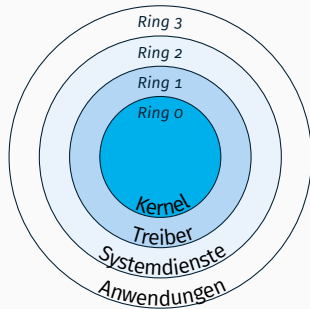
Quelle: Wikipedia



Quelle: Wikipedia

Protected Mode

Name aufgrund der vier Schutzringe
(*Privilege Level*)



80286 16 bit, 16 MB Speicher adressierbar

- Segmentierung mit 24 bit Adressbus

80386 32 bit, 4 GB Speicher adressierbar

- Segmentierung mit 32 bit Adressbus
- zusätzlich auch Paging (ab 80386DX)

32 bit Protected Mode Register

eax ax
 ah al

ebx bx
 bh bl

ecx cx
 ch cl

edx dx
 dh dl

esi si

edi di

ebp bp

esp sp

eip ip

eflags flags

cs

ds

ss

es

fs

gs

Segmentierung im Protected Mode

- Einführung von Deskriptortabellen
 - GDT** Global Descriptor Table
 - LDT** Local Descriptor Table
 - IDT** Interrupt Descriptor Table
 - jeder der Deskriptoren (max. 8 192 pro Tabelle) besteht aus
 - Basisadresse (24 bit bzw. 32 bit)
 - Länge (16 bit bzw. 20 bit)
 - Parameter wie Typ, Berechtigung, Aktiv, ...
- Segmentselektoren zeigen nun auf Einträge in GDT/LDT

Eintrag in 16 bit Global Deskriptor Table



Eintrag in 32 bit Global Deskriptor Table

63		Base Address (high): Oberer Teil der Startadresse
56		
55		Granularity: Byte (0) oder 4 KB-Block (1)
54		Operation Size: 16 bit (0) oder 32 bit (1)
53		
52		Reserviert
51		
48		Segment Limit (high): Oberer Teil der Segmentgröße
47		
46		Present: Eintrag aktiv (1) oder inaktiv (0)
45		Descriptor Privilege Level: Erlaubter Ring
44		Deskriptortyp: System (0) oder Code/Daten (1)
43		
40		Type: Legt Berechtigungen fest (r/w/x)
39		
		Base Address (low): Unterer Teil der Startadresse
16		
15		
		Segment Limit (low): Unterer Teil der Segmentgröße
0		

Protected Mode Segmentierung (32 bit)

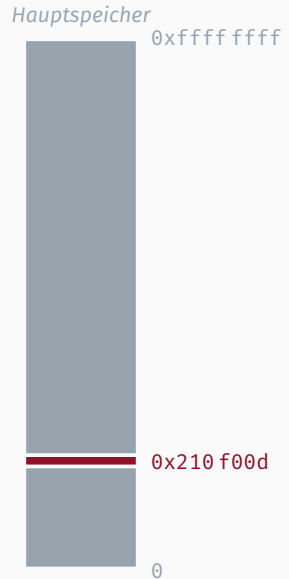
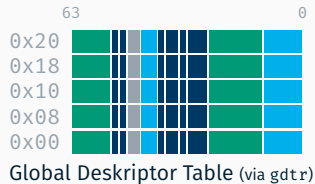
Zugriff auf **Zieldaten** in 0x210 f00d



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x210 f00d

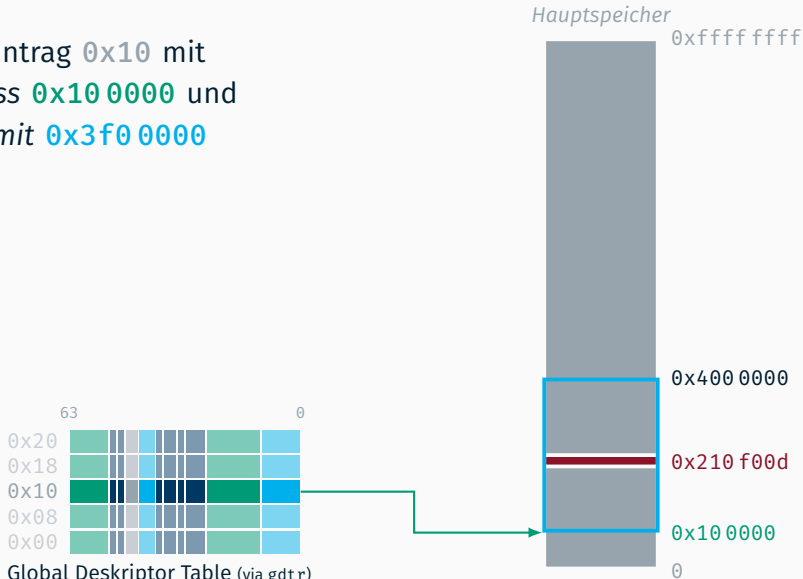
- über GDT



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Zielfdaten** in 0x210 f00d

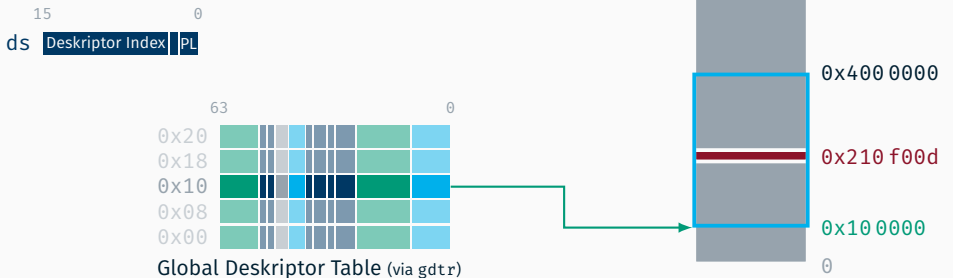
- über **GDT** Eintrag **0x10** mit
Base Address **0x10 0000** und
Segment Limit **0x3f0 0000**



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Zielfdaten** in 0x210 f00d

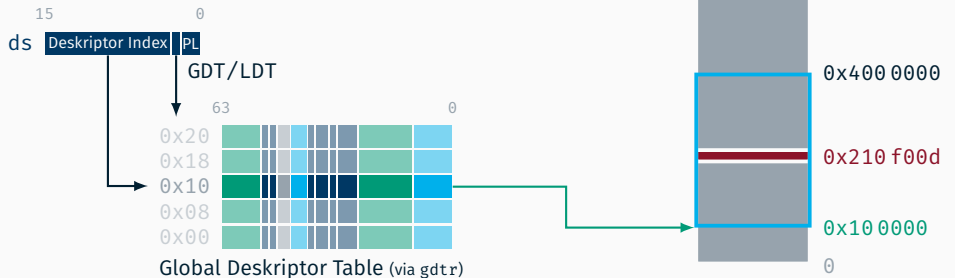
- über **GDT** Eintrag **0x10** mit *Base Address* **0x10 0000** und *Segment Limit* **0x3f0 0000**
- mit Segmentregister **ds**



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x210 f00d

- über **GDT** Eintrag 0x10 mit
Base Address 0x10 0000 und
Segment Limit 0x3f0 0000
- mit Segmentregister **ds** mit
mov ax, 0x10
mov ds, ax

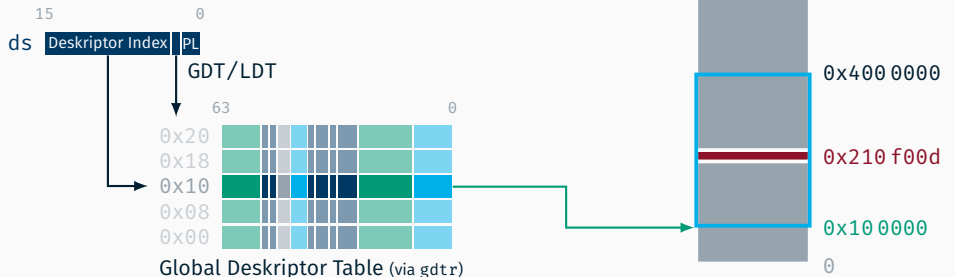


Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x210 f00d

- Offset setzen

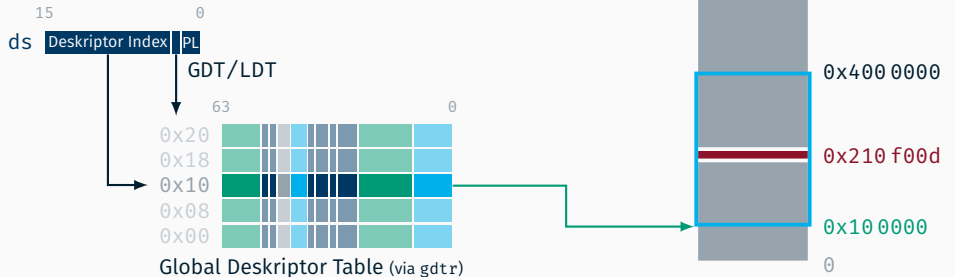
```
mov eax, 0x200f00d
```



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x210 f00d

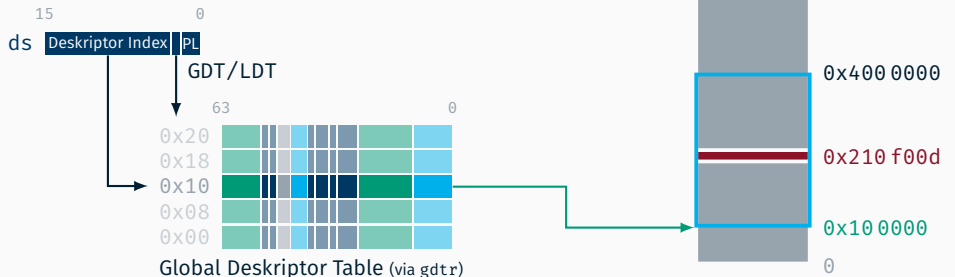
- Offset setzen
`mov eax, 0x200f00d`
- Zugriff via `ds:eax`



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Zieldaten** in 0x210 f00d

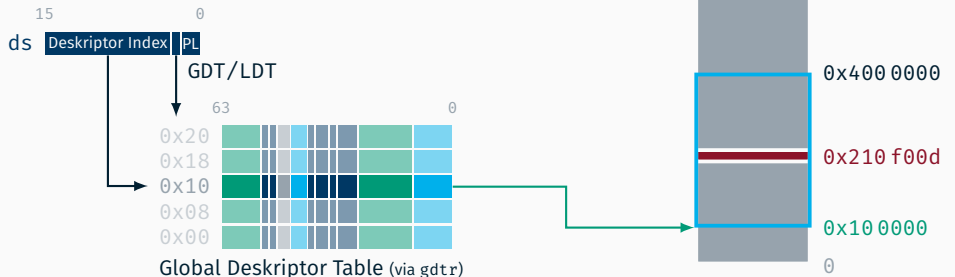
- Offset setzen
`mov eax, 0x200f00d`
- Zugriff via **ds:eax**
(*Base Address* + *Offset* = **Zieldaten**)



Protected Mode Segmentierung (32 bit)

Zugriff auf **Ziel**daten in 0x210 f00d

- Offset setzen
`mov eax, 0x200f00d`
- Zugriff via **ds:eax**
(0x10 0000 + 0x200 f00d = 0x210 f00d)



Aber der 80386 (ab DX) kann noch mehr:
Seitenumlagerung

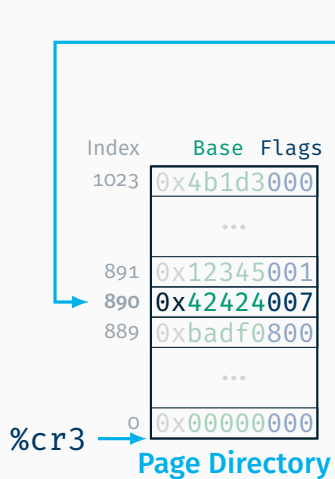
Aber der 80386 (ab DX) kann noch mehr:
Seitenumlagerung (Paging)

Paging

Virtuelle Adresse: 0xdead**be**

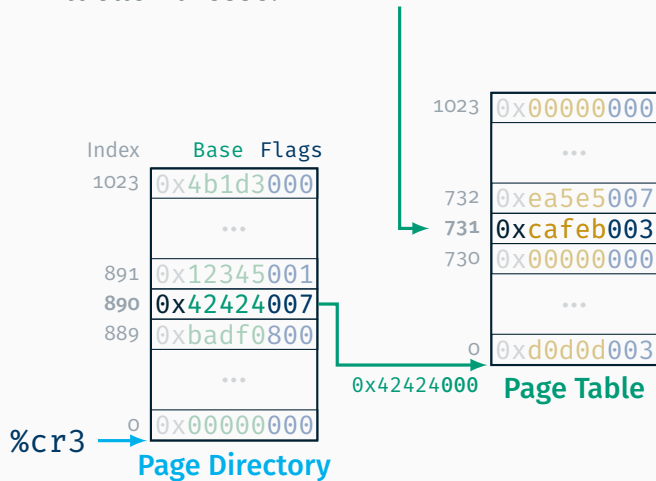
Paging

Virtuelle Adresse: 0xdeadbabe



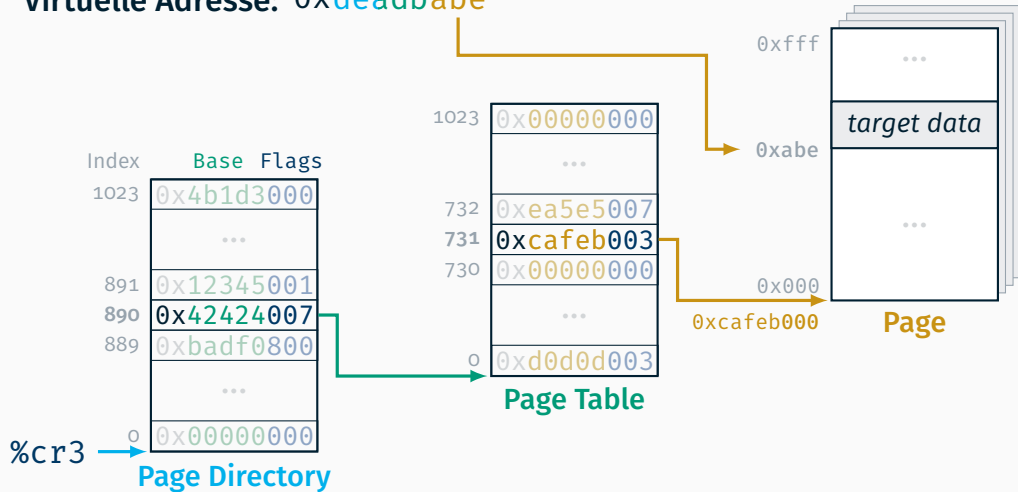
Paging

Virtuelle Adresse: 0xdeadbabe



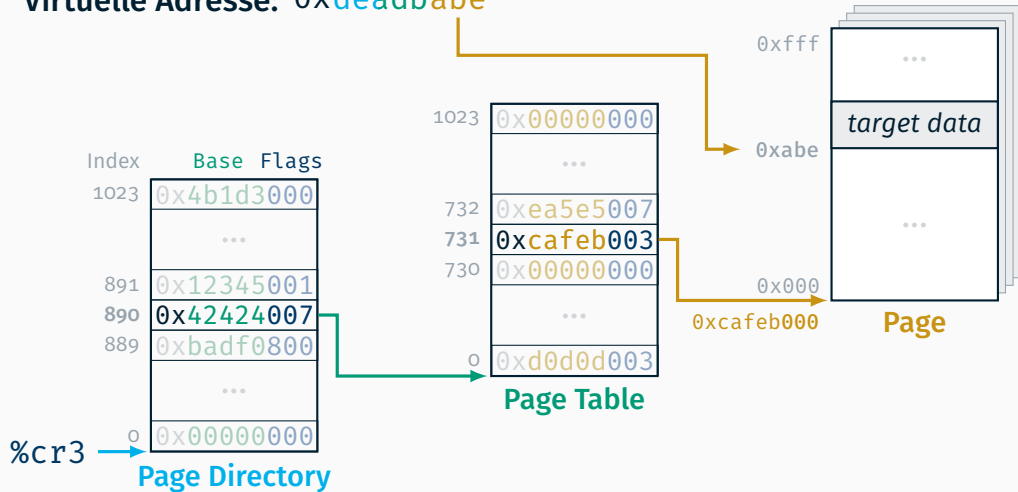
Paging

Virtuelle Adresse: 0xdeadbabe



Paging

Virtuelle Adresse: 0xdeadbabe



Physikalische Adresse: 0xcafebabe

Segmentdeskriptoren heutzutage

Ausgangslage: Paging allein ist eigentlich ausreichend.

Segmentdeskriptoren heutzutage

Ausgangslage: Paging allein ist eigentlich ausreichend.

Problem: Deaktivieren der Segmentierung nicht möglich!

Segmentdeskriptoren heutzutage

Ausgangslage: Paging allein ist eigentlich ausreichend.

Problem: Deaktivieren der Segmentierung nicht möglich!

Lösung: Neutralisieren, indem in der *GDT* alles eingeblendet wird

1. Nulleintrag (*vorgeschrieben*)
2. Kernel Code Segment (von 0 – 4 GB, Ring 0)
3. Kernel Data Segment (von 0 – 4 GB, Ring 0)

Segmentdeskriptoren heutzutage

Ausgangslage: Paging allein ist eigentlich ausreichend.

Problem: Deaktivieren der Segmentierung nicht möglich!

Lösung: Neutralisieren, indem in der *GDT* alles eingeblendet wird

1. Nulleintrag (*vorgeschrieben*)
2. Kernel Code Segment (von 0 – 4 GB, Ring 0)
3. Kernel Data Segment (von 0 – 4 GB, Ring 0)
4. User Code Segment (von 0 – 4 GB, Ring 3)
5. User Data Segment (von 0 – 4 GB, Ring 3)

Wechsel in 32 bit Protected Mode

Im Real Mode

- Interrupts (inklusive NMI) ausschalten
- A20 Gate aktivieren
- GDT laden
- *Protection Enable*-bit (PE) im Kontrollregister 0 (**cr0**) setzen

Wechsel in 32 bit Protected Mode (Assembler)

```
cli                ; Unterbrechungen sperren
mov al, 0x80        ; NMI verbieten
out 0x70, al

in al, 0x92         ; Fast A20 (neuere CPUs)
or al, 2
out 0x92, al

lgdt [gdt_pm]       ; vorübergehende GDT setzen

mov eax, cr0
or  eax, 1           ; Setze PE im Kontrollregister 0
mov cr0, eax

jmp dword 0x08:startup ; Weiter Sprung in die 32 bit-Funktion
```



Quelle: KnowYourMeme



ROM

Medium

Urlader

Resultat:



ROM

Medium

Urlader

Resultat: Wir wollen keinen eigenen Bootloader schreiben!



ROM

Medium

Urlader

Resultat: Wir wollen keinen eigenen Bootloader schreiben!

Kein Problem, gibt genug:

- GNU **GRUB** (Grand Unified Bootloader)
 - GRUB Legacy
 - GRUB 2



ROM

Medium

Urlader

Resultat: Wir wollen keinen eigenen Bootloader schreiben!

Kein Problem, gibt genug:

- GNU **GRUB** (Grand Unified Bootloader)
 - GRUB Legacy
 - GRUB 2
- **SYSLINUX** (PXELINUX)
- **QEMU**-intern (via `-kernel` Parameter)



ROM

Medium

Urlader

Resultat: Wir wollen keinen eigenen Bootloader schreiben!

Kein Problem, gibt genug:

- GNU **GRUB** (Grand Unified Bootloader)
 - GRUB Legacy
 - GRUB 2
- **SYSLINUX** (PXELINUX)
- **QEMU**-intern (via `-kernel` Parameter)

Aber wie verwenden?



ROM

Medium

Urlader

Resultat: Wir wollen keinen eigenen Bootloader schreiben!

Kein Problem, gibt genug:

- GNU **GRUB** (Grand Unified Bootloader)
 - GRUB Legacy
 - GRUB 2
- **SYSLINUX** (PXELINUX)
- **QEMU**-intern (via `-kernel` Parameter)

Aber wie verwenden?

Alle unterstützen (mehr oder weniger) den **Multiboot Standard**

Überblick zur MULTIBOOT SPECIFICATION

- offener PC **Bootloader Standard**, ab 1995 entwickelt

Überblick zur MULTIBOOT SPECIFICATION

- offener PC **Bootloader Standard**, ab 1995 entwickelt
- Betriebssystem muss als **32 bit ELF** oder **a.out** vorliegen

Überblick zur MULTIBOOT SPECIFICATION

- offener PC **Bootloader Standard**, ab 1995 entwickelt
- Betriebssystem muss als **32 bit ELF** oder **a.out** vorliegen
- übernimmt die [hässliche] Initialisierung eines x86 PCs in einen **wohl definierten Zustand**
 - 32 bit Protected Mode
 - nur BSP (*Bootstrap Processor*)
 - A20 Gate aktiviert
 - setzt optional auch Grafikmodus

Überblick zur MULTIBOOT SPECIFICATION

- offener PC **Bootloader Standard**, ab 1995 entwickelt
- Betriebssystem muss als **32 bit ELF** oder **a.out** vorliegen
- übernimmt die [hässliche] Initialisierung eines x86 PCs in einen **wohl definierten Zustand**
 - 32 bit Protected Mode
 - nur BSP (*Bootstrap Processor*)
 - A20 Gate aktiviert
 - setzt optional auch Grafikmodus
- übergibt dem BS „**vitale**“ **Informationen** über das System

Überblick zur MULTIBOOT SPECIFICATION

- offener PC **Bootloader Standard**, ab 1995 entwickelt
- Betriebssystem muss als **32 bit ELF** oder **a.out** vorliegen
- übernimmt die [hässliche] Initialisierung eines x86 PCs in einen **wohl definierten Zustand**
 - 32 bit Protected Mode
 - nur BSP (*Bootstrap Processor*)
 - A20 Gate aktiviert
 - setzt optional auch Grafikmodus
- übergibt dem BS „**vitale**“ **Informationen** über das System
- lädt ggf. auch die **initiale Ramdisk** in den Speicher

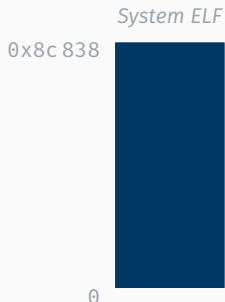
Überblick zur MULTIBOOT SPECIFICATION

- offener PC **Bootloader Standard**, ab 1995 entwickelt
- Betriebssystem muss als **32 bit ELF** oder **a.out** vorliegen
- übernimmt die [hässliche] Initialisierung eines x86 PCs in einen **wohl definierten Zustand**
 - 32 bit Protected Mode
 - nur BSP (*Bootstrap Processor*)
 - A20 Gate aktiviert
 - setzt optional auch Grafikmodus
- übergibt dem BS „**vitale**“ **Informationen** über das System
- lädt ggf. auch die **initiale Ramdisk** in den Speicher
- Referenzimplementierung ist **GRUB**

Aufbau einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Beispiel:

make generiert eine 563K große .build/system ELF.

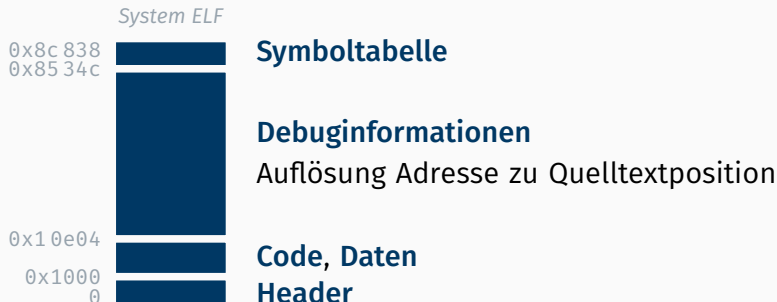


Aufbau einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Beispiel:

make generiert eine 563K große .build/system ELF.

Analyse mittels `readelf` offenbart folgende Struktur

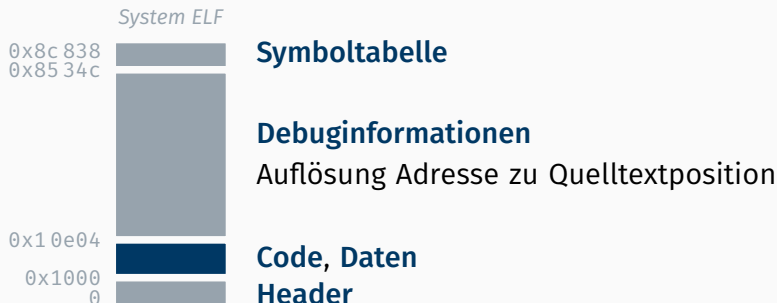


Aufbau einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Beispiel:

make generiert eine 563K große .build/system ELF.

Analyse mittels readelf offenbart folgende Struktur, für uns ist jedoch nur die (durch das Linkerskript) zusammengefasste Code- (.text) und Datensektion (. [ro]data) interessant

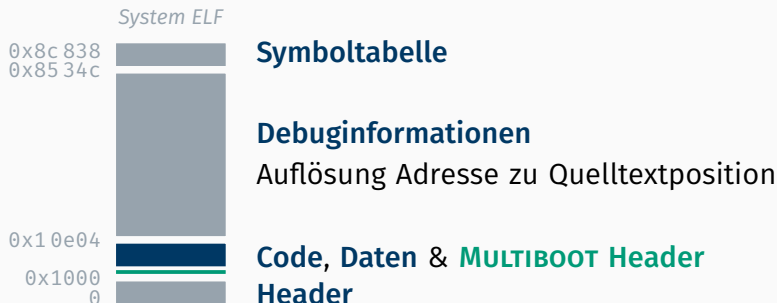


Aufbau einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Beispiel:

make generiert eine 563K große .build/system ELF.

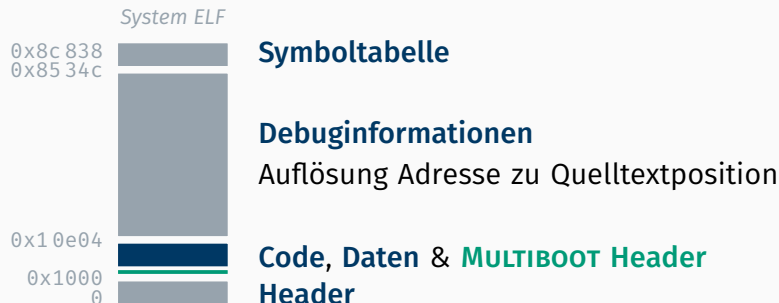
Analyse mittels readelf offenbart folgende Struktur, für uns ist jedoch nur die (durch das Linkerskript) zusammengefasste Code- (.text) und Datensektion (. [ro]data) interessant, in welcher auch der **MULTIBOOT Header** liegt



Aufbau einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

MULTIBOOT Header

- Erkennung durch Wert 0x1bad b002 (und Prüfsumme)
- muss in den ersten 8192 Bytes (der ELF) liegen
- bei uns in boot/multiboot/header.asm definiert
- beinhaltet Konfiguration (via Flags)




```
[SECTION .multiboot_header]
; Konstanten definiert in boot/multiboot/config.inc
MULTIBOOT_MAGIC      equ 0x1badb002    ; Magischer Header

MULTIBOOT_PAGE_ALIGN equ 1<<0          ; initrd an 4K ausrichten
MULTIBOOT_MEM_INFO    equ 1<<1          ; Speicher Informationen
MULTIBOOT_FLAGS equ MULTIBOOT_PAGE_ALIGN | MULTIBOOT_MEM_INFO

MULTIBOOT_CHKSUM equ -(MULTIBOOT_MAGIC + MULTIBOOT_FLAGS)

align 4                ; Ausrichten an 4K
multiboot_header:
    dd MULTIBOOT_MAGIC
    dd MULTIBOOT_FLAGS
    dd MULTIBOOT_CHKSUM
```

```
ENTRY(startup_bsp)                /* Einsprungsfunktion */

SECTIONS {
    . = 16M;                       /* Startadresse des Systems */

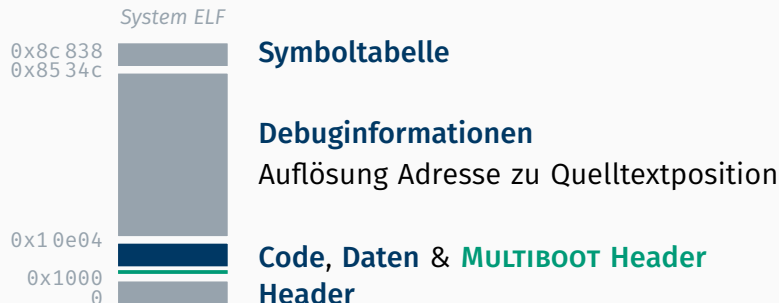
    .boot : {
        *(.multiboot_header)      /* Multiboot am Anfang */
    }

    .text : {
        *(".text")                 /* Programmcode */
        *(".text$")
        *(".init")
        *(".fini")
        *(".gnu.linkonce.*")
    }
}
```

Aufbau einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

MULTIBOOT Header

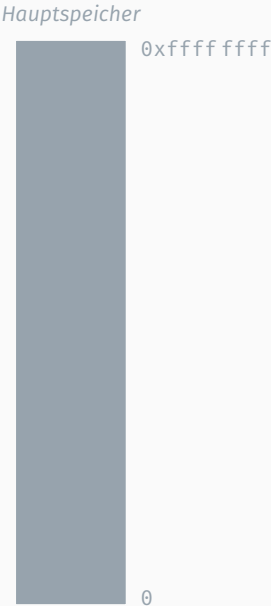
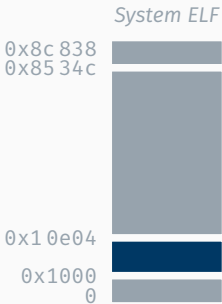
- Erkennung durch Wert 0x1bad b002 (und Prüfsumme)
- muss in den ersten 8192 Bytes (der ELF) liegen
- bei uns in boot/multiboot/header.asm definiert
- beinhaltet Konfiguration (via Flags)



Laden einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Ablauf im Bootloader

- 1. liest *System ELF*

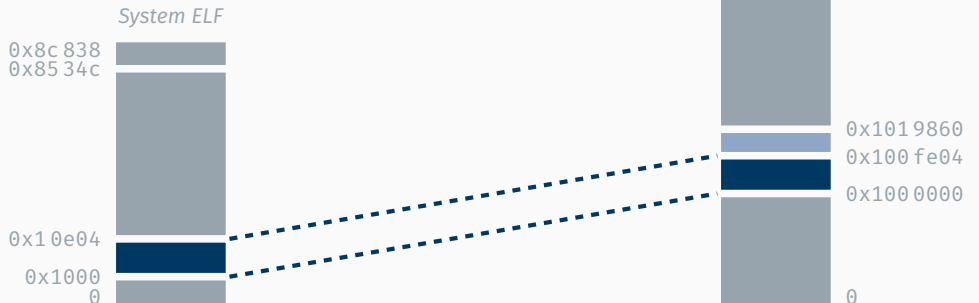


Laden einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Ablauf im Bootloader

1. liest *System ELF*
2. kopiert **Code** & **Datensektion** und erstellt **BSS**

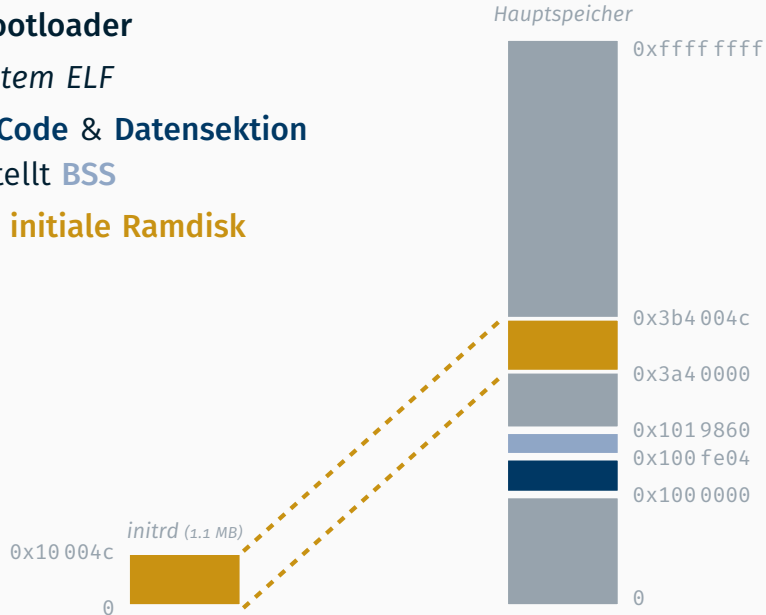
Hauptspeicher



Laden einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Ablauf im Bootloader

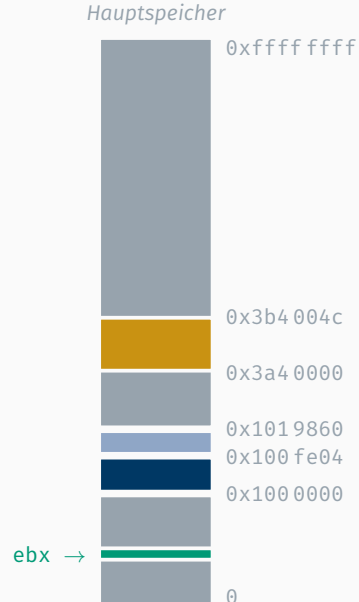
1. liest *System ELF*
2. kopiert **Code** & **Datensektion** und erstellt **BSS**
3. lädt ggf. **initiale Ramdisk**



Laden einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Ablauf im Bootloader

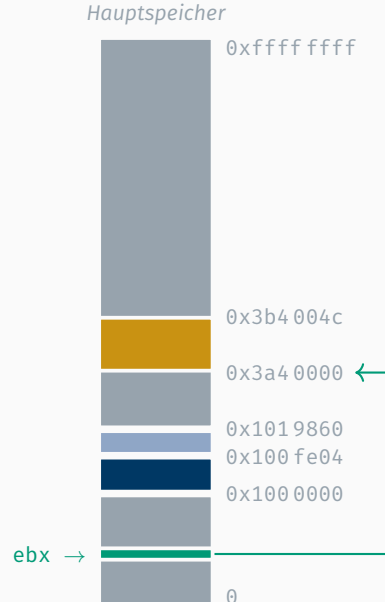
1. liest *System ELF*
2. kopiert **Code & Datensektion** und erstellt **BSS**
3. lädt ggf. **initiale Ramdisk**
4. setzt `eax` auf `0x2bad b002` sowie `ebx` als Zeiger auf Struktur mit **MULTIBOOT Information**



Laden einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Ablauf im Bootloader

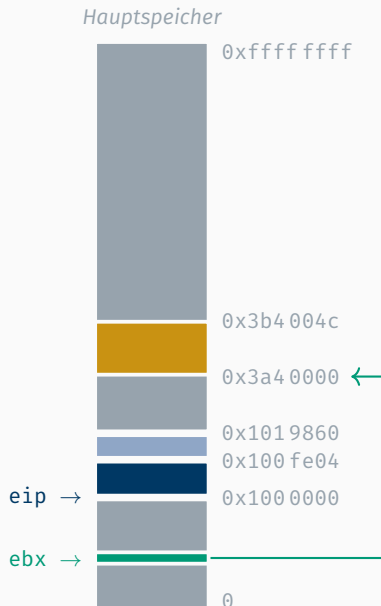
1. liest *System ELF*
2. kopiert **Code** & **Datensektion** und erstellt **BSS**
3. lädt ggf. **initiale Ramdisk**
4. setzt `eax` auf `0x2bad b002` sowie `ebx` als Zeiger auf Struktur mit **MULTIBOOT Information**



Laden einer MULTIBOOT-kompatiblen Binärdatei

Ablauf im Bootloader

1. liest *System ELF*
2. kopiert **Code** & **Datensektion** und erstellt **BSS**
3. lädt ggf. **initiale Ramdisk**
4. setzt `eax` auf `0x2bad b002` sowie `ebx` als Zeiger auf Struktur mit **MULTIBOOT Information**
5. Springt an den **Einsprungpunkt** (und übergibt somit an das Betriebssystem)



Was fehlt?

Was fehlt?

- Wechsel in 64 bit-Modus
- Initialisierung der Umgebung
- *optional* Mehrkernunterstützung aktivieren



ROM

Medium

Urlader

Initialisierung

Was fehlt?

- Wechsel in 64 bit-Modus
- Initialisierung der Umgebung
- *optional* Mehrkernunterstützung aktivieren



ROM

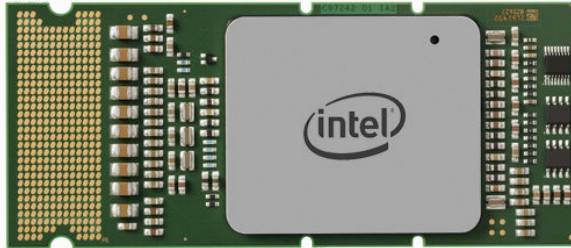
Medium

Urlader

Initialisierung

Was fehlt?

- **Wechsel in 64 bit-Modus**
- Initialisierung der Umgebung
- *optional* Mehrkernunterstützung aktivieren



Quelle: Intel

Itanium (IA-64)

- 64 bit
- *Explicitly Parallel Instruction Computing* (EPIC),
Variante von *Very Long Instruction Word* (VLIW)
- designierter x86 Nachfolger
- **Neudesign ohne Altlasten**

Itanium (IA-64)

- 64 bit
 - *Explicitly Parallel Instruction Computing* (EPIC),
Variante von *Very Long Instruction Word* (VLIW)
 - designierter x86 Nachfolger
 - **Neudesign ohne Altlasten**
- **Nicht (direkt) abwärtskompatibel!**
(Ausführung von x86 Code nur via Emulation → langsam)

Itanium (IA-64)

- 64 bit
- *Explicitly Parallel Instruction Computing* (EPIC),
Variante von *Very Long Instruction Word* (VLIW)
- designierter x86 Nachfolger
- **Neudesign ohne Altlasten**
- **Nicht (direkt) abwärtskompatibel!**
(Ausführung von x86 Code nur via Emulation → langsam)
- Fehlgeschlagen
(Im Mai 2017 hat Intel das Ende der Prozessorfamilie bekannt gegeben)



Quelle: Wikipedia

Long Mode

Namen: x64, x86_64, AMD64, Intel 64, IA-32e, EM64T

Namen: x64, x86_64, AMD64, Intel 64, IA-32e, EM64T (*aber nicht IA-64!*)

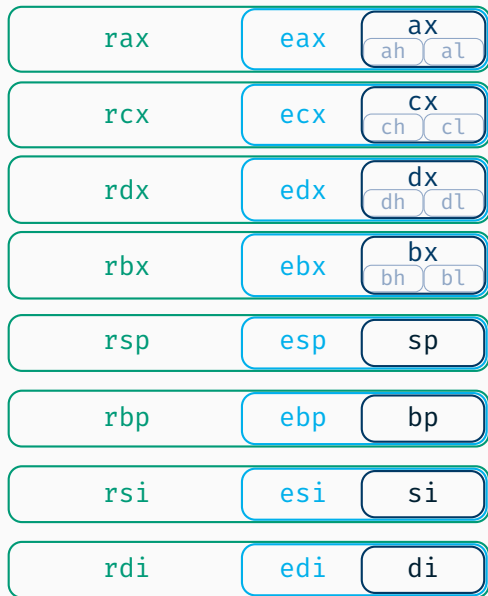
- 64 bit
- **abwärtskompatibel**
- Speicher: Adressbus 48-bit (256 TB)
- Verdopplung der Registeranzahl
- *Streaming SIMD Extensions* (SSE)

Long Mode

Namen: x64, x86_64, AMD64, Intel 64, IA-32e, EM64T (*aber nicht IA-64!*)

- 64 bit
 - **abwärtskompatibel**
 - Speicher: Adressbus 48-bit (256 TB)
 - Verdopplung der Registeranzahl
 - *Streaming SIMD Extensions* (SSE)
 - **keine Speichersegmentierung** im Long Mode
- vierstufiges Paging

Long Mode Register



+ 16× SSE Register (XMM, 128 bit)

+ Kontrollregister + Debugregister

(Kann doch nicht so kompliziert sein?)

1. Ist **cpuid** vorhanden?

(21. Bit im flags Register versuchen umzudrehen – über Stack.
Falls das geht gibt es den cpuid-Befehl)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
(cpuid mit Parameter 0x8000 0000 gibt die Nummer der höchsten unterstützten Funktion zurück)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
(cpuid mit Parameter 0x8000 0001 – falls vorhanden – gibt die erweiterten Prozessor-Informationen zurück. Falls dann in edx das 29. Bit gesetzt ist, ist *Long Mode* vorhanden)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
4. Tabellen für Paging aufsetzen
(bei uns Identitätsabbildung der ersten 4 GB unter Verwendung von 2 MB *Huge Pages*, damit brauchen wir nur 6 Tabellen)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
4. Tabellen für Paging aufsetzen
5. Paging vorbereiten
(Adresse der obersten Tabelle (Level 4) in Kontrollregister 3 (**cr3**) schreiben und Physikalische Adresserweiterung (PAE) durch das Setzen des 5. Bit in Kontrollregister 4 (**cr4**) aktivieren)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
4. Tabellen für Paging aufsetzen
5. Paging vorbereiten
6. *Long Mode* aktivieren
(über das *Model-Specific Register* (MSR) Nummer 0xC000 0080 – *Extended Feature Enable Register* (EFER) – das 8. Bit setzen, via `wrmsr`)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
4. Tabellen für Paging aufsetzen
5. Paging vorbereiten
6. *Long Mode* aktivieren
7. Paging aktivieren
(das 31. Bit in Kontrollregister 0 (**cr0**) setzen)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
4. Tabellen für Paging aufsetzen
5. Paging vorbereiten
6. *Long Mode* aktivieren
7. Paging aktivieren
8. vorübergehende GDT laden
(Neben dem 0 Eintrag gibt es nur noch einen weiteren Eintrag für das globale Codesegment)

1. Ist **cpuid** vorhanden?
2. Kann **cpuid** erweiterte Funktionen?
3. Unterstützt die CPU den *Long Mode*?
4. Tabellen für Paging aufsetzen
5. Paging vorbereiten
6. *Long Mode* aktivieren
7. Paging aktivieren
8. vorübergehende GDT laden
9. *Weiter Sprung* in den 64 bit Code
(via `jmp 0x8:long_mode_start`, dort Segmentregister auf 0 setzen und Hochsprachenfunktion `kernel_init()` aufrufen)

Long Mode mit Multiboot

Ausgangslage: Wir haben nun unseren Kernel als 64 bit ELF
(.build/system64)

Long Mode mit Multiboot

Ausgangslage: Wir haben nun unseren Kernel als 64 bit ELF
(.build/system64)

Problem: MULTIBOOT akzeptiert nur 32 bit ELF

Long Mode mit Multiboot

Ausgangslage: Wir haben nun unseren Kernel als 64 bit ELF
(.build/system64)

Problem: MULTIBOOT akzeptiert nur 32 bit ELF

Lösung: ELF mittels objcopy umschreiben
(nur Metadaten, Programmcode bleibt gleich)

Ausgangslage: Wir haben nun unseren Kernel als 64 bit ELF
(.build/system64)

Problem: MULTIBOOT akzeptiert nur 32 bit ELF

Lösung: ELF mittels objcopy umschreiben
(nur Metadaten, Programmcode bleibt gleich)

via Makefile Target:

```
.build/system: .build/system64  
    objcopy -I elf64-x86-64 -O elf32-i386 $< $@
```



```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
→ Übung zu Aufgabe 2

```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
2. Initialisierungsroutinen der C Laufzeitumgebung ausführen
(Aufruf der durch den Übersetzer erstellten Funktion `_init()` via `CSU::initializer()` in 📁 compiler/libc.cc.
Prologe der *C Runtime Objects* liegen in 📁 compiler/crti.asm)


```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
2. Initialisierungsroutinen der C Laufzeitumgebung ausführen

Initialisierung globaler Objekte

(Übersetzer legt Array `__init_array_start[]` mit Funktionspointer an)

```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
2. Initialisierungsroutinen der C Laufzeitumgebung ausführen
Initialisierung globaler Objekte
3. *Advanced Configuration and Power Interface* (ACPI) abfragen
(Informationen zu APIC und den vorhandenen Kernen bekommen
📁 machine/apic.cc)

```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
2. Initialisierungsroutinen der C Laufzeitumgebung ausführen
Initialisierung globaler Objekte
3. *Advanced Configuration and Power Interface* (ACPI) abfragen
4. *Local APIC* konfigurieren
(u.a. Logische ID setzen, alle Interrupts zulassen)

```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
2. Initialisierungsroutinen der C Laufzeitumgebung ausführen
Initialisierung globaler Objekte
3. *Advanced Configuration and Power Interface* (ACPI) abfragen
4. *Local APIC* konfigurieren
5. **main()** aufrufen
(unser Betriebssystem ist in der `main()` implementiert und sollte daher nicht zurückkehren, deswegen brauchen die Destruktoren eigentlich nicht mehr aufgerufen werden)



ROM

Medium

Urlader

Initialisierung

main()

```
extern "C" [[noreturn]] void kernel_init()
```

1. Interruptdeskriptortabelle installieren
2. Initialisierungsroutinen der C Laufzeitumgebung ausführen
Initialisierung globaler Objekte
3. *Advanced Configuration and Power Interface* (ACPI) abfragen
4. *Local APIC* konfigurieren
5. **main()** aufrufen

Wie kompliziert kann das schon sein?

Mehrkernelunterstützung: Start der CPUs

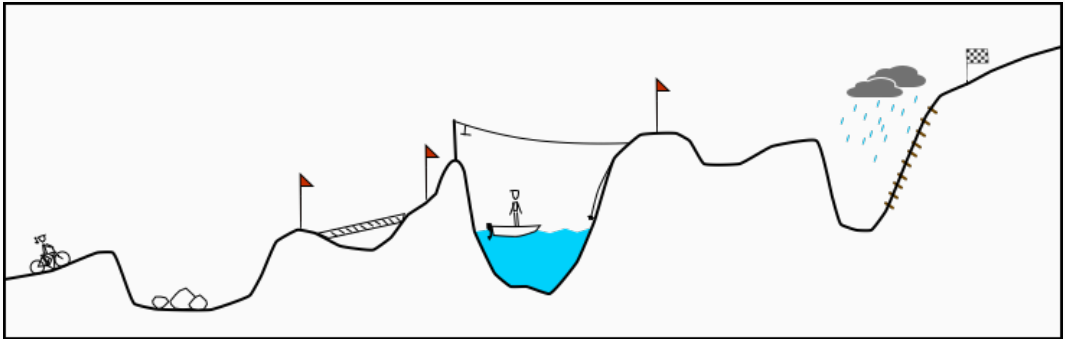
Erwartung



Quelle: DogHouseDiaries

Mehrkernelunterstützung: Start der CPUs

Realität



Quelle: DogHouseDiaries

Bootstrap-Prozessor (BSP, CPU 0)

1. Aufruf von `ApplicationProcessor::boot()`

Bootstrap-Prozessor (BSP, CPU 0)

1. Aufruf von `ApplicationProcessor::boot()`
2. Startroutine und GDT an eine Adresse unterhalb 1 MB relocieren
(*Application Processors* (AP) starten im *Real Mode*, deshalb platzieren wir die Routine an 0x4 0000. Theoretisch kann dies auch per Linkerskript im ELF geschehen, aber die Multibootimplementierung von Qemu ignoriert dies)

Bootstrap-Prozessor (BSP, CPU 0)

1. Aufruf von `ApplicationProcessor::boot()`
2. Startroutine und GDT an eine Adresse unterhalb 1 MB relocieren
3. Spezielle Interprozessorunterbrechung (*Startup IPI*) an alle Prozessorkerne schicken
(Der Interruptvektor verweist auf die Einsprungsroutine: 0x40 – Adresse um 12 Bits nach rechts geschoben ergibt Vektor)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
(in der Einsprungsroutine an 0x4 0000)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
2. Wechsel in den *Protected Mode*
(Interrupts deaktivieren, vorübergehende 16 bit GDT laden, 1. Bit in cr0 setzen – A20 Gate bereits durch Bootstrapprozessor aktiviert/geöffnet)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
2. Wechsel in den *Protected Mode*
3. Segmente initialisieren
(vorübergehende 32 bit GDT laden, Segmentregister initialisieren)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
2. Wechsel in den *Protected Mode*
3. Segmente initialisieren
4. Eigenen Stapel suchen
(damit keine zwei gleichzeitig startenden APs auf den gleichen Stack zugreifen, wird atomar Speicher aus einem vorhandenen Stackarray reserviert)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
2. Wechsel in den *Protected Mode*
3. Segmente initialisieren
4. Eigenen Stapel suchen
5. Wechsel in den *Long Mode*
(cpuid, Paging, GDT, ..., Hochsprachenfunktion)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
2. Wechsel in den *Protected Mode*
3. Segmente initialisieren
4. Eigenen Stapel suchen
5. Wechsel in den *Long Mode*
6. *Local APIC* konfigurieren
(der LAPIC muss für jede CPU konfiguriert werden!)

Applikationsprozessor (AP)

1. Start im *Real Mode*
2. Wechsel in den *Protected Mode*
3. Segmente initialisieren
4. Eigenen Stapel suchen
5. Wechsel in den *Long Mode*
6. *Local APIC* konfigurieren
7. **main_ap()** aufrufen
(sollte auch nicht zurückkehren)



ROM

Medium

Urlader

Initialisierung

`main[_ap]()`



ROM

Medium

Urlader

Initialisierung

`main[_ap]()`

(Beginn der eigentlichen Betriebssystementwicklung)

Fragen?

Frohe Weihnachten und guten Rutsch!
