

# Betriebssysteme (BS)

## VL 2 – Einstieg in die Betriebssystementwicklung

**Volkmar Sieh / Daniel Lohmann**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg

WS 18 – 25. Oktober 2018



[https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS18/V\\_BS](https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS18/V_BS)

### Agenda

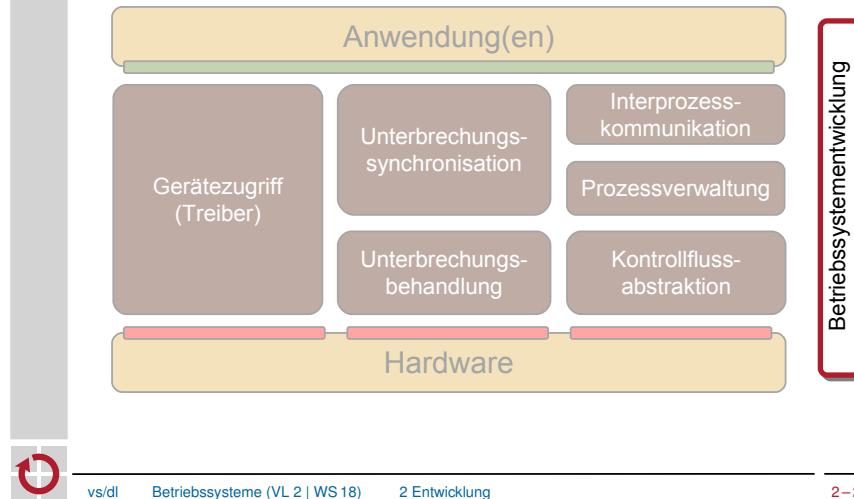
- Einordnung
- Übersetzen und Linken
- Booten
- Debugging
- Zusammenfassung



vs/dl Betriebssysteme (VL 2 | WS 18) 2 Entwicklung

2-3

## Überblick: Einordnung dieser VL



vs/dl Betriebssysteme (VL 2 | WS 18) 2 Entwicklung

2-2

### Agenda

- Einordnung
- Übersetzen und Linken
- Booten
- Debugging
- Zusammenfassung



vs/dl Betriebssysteme (VL 2 | WS 18) 2 Entwicklung – Einordnung

2-4

## BS-Entwicklung (oft ein harter Kampf)

- Erste Schritte  
wie bringt man sein System auf die Zielhardware?
  - Übersetzung
  - Bootvorgang
- Testen und *Debugging*  
was tun, wenn das System nicht reagiert?
  - „printf“ *debugging*
  - Emulatoren
  - *Debugger*
  - *Remote-Debugger*
  - Hardwareunterstützung



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Einordnung

2-5

## Übersetzung – *Hello, World?*

```
#include <iostream>

int main () {
    std::cout << "Hello, World" << std::endl;
}

> g++ -o hello hello.cc
```

- Annahme:
  - das Entwicklungssystem läuft unter Linux/x86
  - das Zielsystem ist ebenfalls ein PC
- Läuft dieses Programm auch auf der „nackten“ Hardware?
- Kann man Betriebssysteme überhaupt in einer Hochsprache entwickeln?

## Agenda

Einordnung  
Übersetzen und Linken  
Booten  
Debugging  
Zusammenfassung



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Übersetzen und Linken

2-6

## Übersetzung – Probleme u. Lösungen

- kein dynamischer Binder vorhanden  
→ alle nötigen **Bibliotheken statisch einbinden**.
- libstdc++ und libc benutzen Linux Systemaufrufe (insbesondere `write`)  
→ die normalen C/C++ **Laufzeitbibliotheken können nicht benutzt werden**. Andere haben wir (meistens) nicht.
- generierte Adressen beziehen sich auf virtuellen Speicher!  
("nm hello | grep main" liefert "0804846c T main")  
→ die Standardeinstellungen des Binders können nicht benutzt werden.  
**Man benötigt eine eigene Binderkonfiguration**.
- der Hochsprachencode stellt Anforderungen  
(Registerbelegung, Adressabbildung, Laufzeitumgebung, Stapel, ...)  
→ ein eigener **Startup-Code** (in Assembler erstellt) muss die Ausführung des Hochsprachencodes vorbereiten



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Übersetzen und Linken

2-7



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Übersetzen und Linken

2-8

## Agenda

Einordnung  
Übersetzen und Linken  
**Booten**  
Debugging  
Zusammenfassung



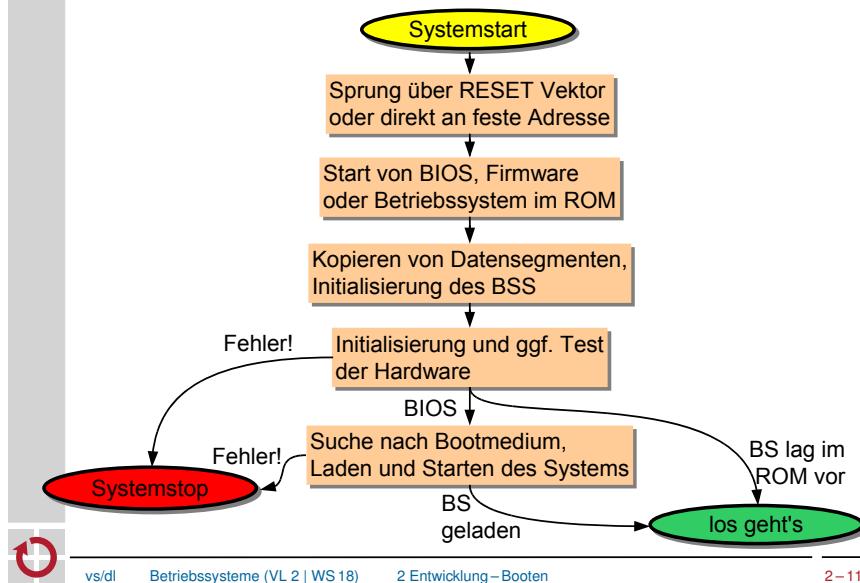
vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Booten

2-9

## Bootvorgang



## Bootvorgang

„**Bootstrapping** (englisches Wort für Stiefelschlaufe) bezeichnet einen Vorgang bei dem ein einfaches System ein komplexeres System startet. Der Name des Verfahrens kommt von der [Münchhausen-Methode](#).“

„Die **Münchhausen-Methode** bezeichnet allgemein, dass ein System sich selbst in Gang setzt. Die Bezeichnung spielt auf die deutsche Legende von [Baron Münchhausen](#) an, der sich an seinen eigenen Haaren aus einem Sumpf gezogen haben soll. In der amerikanischen Fassung benutzte er seine Stiefelschlaufen, was die englische Bezeichnung **Bootstrapping** für diese Methode begründete.“

wikipedia.de



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Booten

2-10

## Bootvorgang beim PC – Bootsektor

- das PC BIOS lädt den 1. Block (512 Bytes) des Bootlaufwerks an die Adresse 0x7c00 und springt dorthin (blind!)
- Aufbau des „Bootsektors“:

FAT Diskette  
(DOS/Windows)

Offset	Inhalt
0x0000	jmp boot; nop; (ebxx90)
0x0003	Systemname und Version
0x000b	Bytes pro Sektor
0x000d	Sektoren pro Cluster
0x000e	reservierte Sektoren (für Boot Record)
0x0010	Anzahl der FATs
0x0011	Anzahl der Stammverzeichniseinträge
0x0013	Anzahl der logischen Sektoren
0x0015	Medium-Deskriptor-Byte
0x0016	Sektoren pro FAT
0x001a	Anzahl der Köpfe
0x001c	Anzahl der verborgenen Sektoren
0x001e	boot: ...
0x01fe	0xaaf5



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Booten

2-12

## Bootvorgang beim PC – Bootsektor

- das PC BIOS lädt den 1. Block (512 Bytes) des Bootlaufwerks an die Adresse 0x7c00 und springt dorthin
- Aufbau des „Bootsektors“:

Alternative  
(OOStuBS):

Wichtig ist eigentlich nur der Start und die „Signatur“ (0xaa55) am Ende. Alles weitere benutzt der **Boot-Loader**, um das eigentliche System zu laden.

Offset	Inhalt
0x0000	<code>jmp boot;</code>
0x0004	Anzahl der Spuren
0x0006	Anzahl der Köpfe
0x0008	Anzahl der Sektoren
0x000a	reservierte Sektoren (Setup-Code)
0x000c	reservierte Sektoren (System)
0x000e	BIOS Gerätencode
0x000f	Startspur der Diskette/Partition
0x0010	Startkopf der Diskette/Partition
0x0011	Startsektor der Diskette/Partition
0x0010	<code>boot:</code>
...	
0x01fe	<code>0xaa55</code>



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Booten

2-13

## Agenda

Einordnung  
Übersetzen und Linken  
Booten

### Debugging

Wie entwanzt man ein BS?  
„printf“-Debugging  
Software-Emulatoren  
Debugger  
Source-Level-Debugging  
Remote-Debugging  
Debugging Deluxe

Zusammenfassung



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Debugging

2-15

## Bootvorgang beim PC – Boot Loader

- einfache, systemspezifische *Boot Loader*
  - Herstellung eines definierten Startzustands der Hard- und Software
  - ggf. Laden weiterer Blöcke mit *Boot Loader Code*
  - Lokalisierung des eigentlichen Systems auf dem Boot-Medium
  - Laden des Systems (mittels Funktionen des BIOS)
  - Sprung in das geladene System
- “*Boot Loader*“ auf nicht boot-fähigen Disketten
  - Ausgabe einer Fehlermeldung und Neustart
- Boot Loader* mit Auswahlmöglichkeit (z.B. im *Master Boot Record* einer Festplatte)
  - Darstellung eines Auswahlmenüs
  - Nachbildung des BIOS beim Booten des ausgewählten Systems
    - Laden des jeweiligen Bootblocks nach 0x7c00 und Start



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Booten

2-14

## Debugging



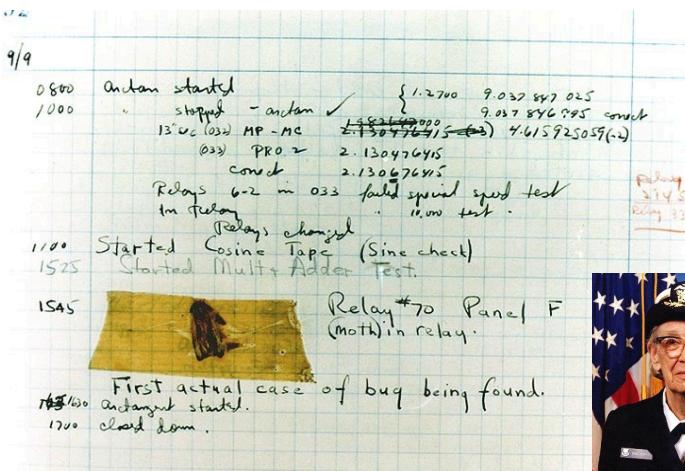
vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Debugging

2-16

## Der erste dokumentierte „Bug“



Quelle: Wikipedia



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Debugging

2-17

## (Software-)Emulatoren

- ahmen reale Hardware in Software nach
  - einfacheres Debugging, da die Emulationssoftware in der Regel kommunikativer als die reale Hardware ist
  - kürzere Entwicklungszyklen
- Vorsicht: am Ende muss das System auf realer Hardware laufen!
  - in Details können sich Emulator und reale Hardware unterscheiden!
  - im fertigen System sind Fehler schwerer zu finden als in einem inkrementell entwickelten System
- Übrigens: "virtuelle Maschinen" und "Emulatoren" sind **nicht** gleichbedeutend
  - in VMware wird z.B. kein x86 Prozessor emuliert, sondern ein vorhandener Prozessor führt Maschinencode in der VM direkt aus



vs/dl

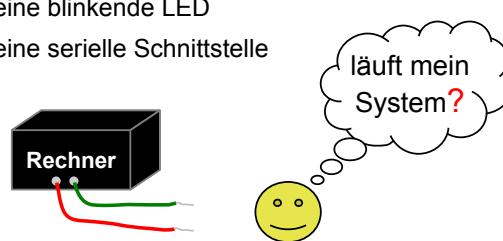
Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Debugging

2-19

## „printf – Debugging“

- gar nicht so einfach, da es `printf()` per se nicht gibt!
  - oftmals gibt es nicht mal einen Bildschirm
- `printf()` ändert oft auch das Verhalten des *debuggee*
  - mit `printf()` tritt der Fehler nicht plötzlich nicht mehr / anders auf
  - das gilt gerade auch bei der Betriebssystementwicklung
- Strohhalme
  - eine blinkende LED
  - eine serielle Schnittstelle



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Debugging

2-18

## Emulatoren – Beispiel "Bochs"

- emuliert i386, ..., Pentium, AMD64 (Interpreter)
  - optional MMX, SSE, SSE2 und 3DNow! Instruktionen
  - Multiprozessoremulation
- emuliert kompletten PC
  - Speicher, Geräte (selbst Sound- und Netzwerkkarte)
  - selbst Windows und Linux Systeme laufen in Bochs
- implementiert in C++
- Entwicklungsunterstützung
  - Protokollinformationen, insbesondere beim Absturz
  - eingebauter Debugger (GDB-Stub)



Bochs in Bochs



vs/dl

Betriebssysteme (VL 2 | WS 18)

2 Entwicklung – Debugging

2-20

## Debugging

- ein *Debugger* dient dem Auffinden von Softwarefehlern durch Ablaufverfolgung
  - in Einzelschritten (*single step mode*)
  - zwischen definierten Haltepunkten (*breakpoints*), z.B. bei
    - Erreichen einer bestimmten Instruktion
    - Zugriff auf ein bestimmtes Datenelement
- Vorsicht: manchmal dauert die Fehlersuche mit einem Debugger länger als nötig
  - wer gründlich nachdenkt kommt oft schneller zum Ziel
    - Einzelschritte kosten viel Zeit
    - kein Zurück bei versehentlichem Verpassen der interessanten Stelle
  - beim printf-Debugging können Ausgaben besser aufbereitet werden
  - Fehler im Bereich der Synchronisation nebenläufiger Aktivitäten sind interaktiv mit dem Debugger praktisch nicht zu finden
- praktisch: Analyse von "*core dumps*"
  - beim Betriebssystembau allerdings weniger relevant



## Debugging – Beispielsitzung

```
spinczyk@faui48:~> gdb hello
GNU gdb 6.3
...
(gdb) break main
Breakpoint 1 at 0x8048738: file hello.cc, line 5.
(gdb) run
Starting program: hello

Breakpoint 1, main () at hello.cc:5
5      cout << "hello" << endl;
(gdb) next
hello
6      cout << "world" << endl;
(gdb) next
world
7      }
(gdb) continue
Continuing.

Program exited normally.
(gdb) quit
```

Setzen eines  
Abbruchpunktes

Start des  
Programms

Ablaufverfolgung  
im Einzelschritt-  
modus

Fortsetzung des  
Programms



## Debugging – Funktionsweise (1)

- praktisch alle CPUs unterstützen das *Debugging*
- Beispiel: Intels x86 CPUs
  - die **INT3** Instruktion löst "*breakpoint interrupt*" aus (ein *TRAP*)
    - wird gezielt durch den *Debugger* im Code platziert
    - der *TRAP-Handler* leitet den Kontrollfluss in den *Debugger*
  - durch Setzen des **Trap Flags (TF)** im Statusregister (EFLAGS) wird nach **jeder** Instruktion ein "*debug interrupt*" ausgelöst
    - kann für die Implementierung des Einzelschrittmodus genutzt werden
    - der *TRAP-Handler* wird nicht im Einzelschrittmodus ausgeführt
  - mit Hilfe der **Debug Register DR0-DR7** (ab i386) können bis zu vier Haltepunkte überwacht werden, ohne den Code manipulieren zu müssen
    - erheblicher Vorteil bei Code im ROM/FLASH oder nicht-schreibbaren Speichersegmenten
- nächste Folie



## Debugging – Funktionsweise (2)

### die Debug Register des 80386

Breakpoint Register

breakpoint 0: lineare Adresse	DR0
breakpoint 1: lineare Adresse	DR1
breakpoint 2: lineare Adresse	DR2
breakpoint 3: lineare Adresse	DR3
reserviert	DR4
reserviert	DR5

Debug Statusregister

31	1615	0	DR6
- - -	- - -	- - -	- - -

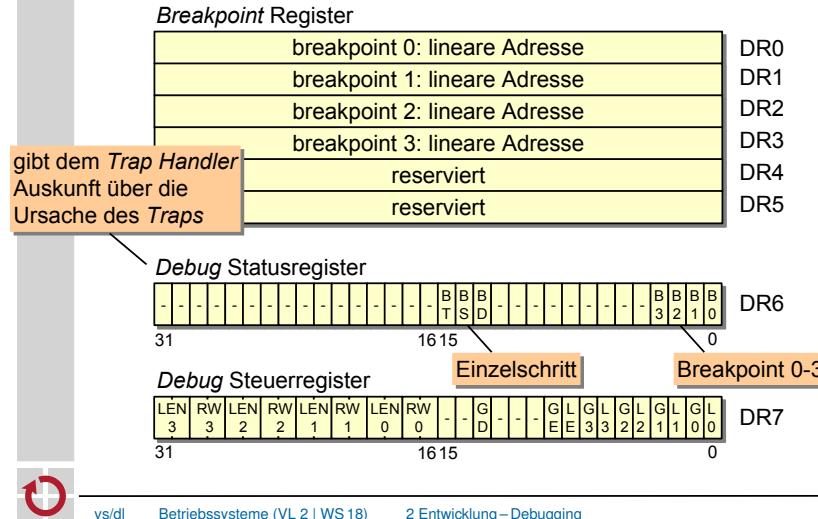
Debug Steuerregister

31	1615	0	DR7
LEN 3	RW 3	LEN 2	RW 2



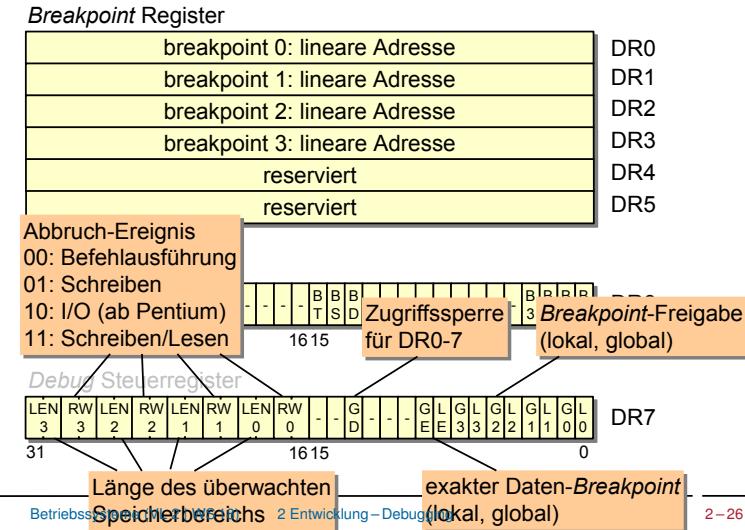
## Debugging – Funktionsweise (2)

### die Debug Register des 80386



## Debugging – Funktionsweise (2)

### die Debug Register des 80386



## Debugging – Funktionsweise (3)

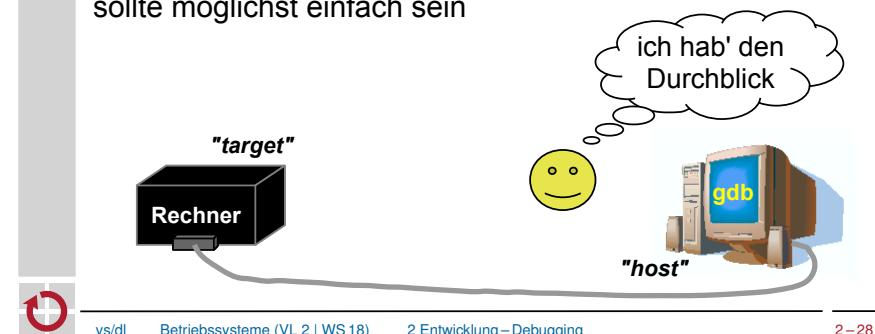
- besonders effektiv wird Debugging, wenn das Programm im Quelltext visualisiert wird (*source-level debugging*)
  - erfordert Zugriff auf den Quellcode und Debug-Informationen
  - muss durch den Übersetzer unterstützt werden

```
1ohmann@faui48:~> g++ -o hello -g hello.cc
1ohmann@faui48:~> objdump --section-headers hello
hello:      file format elf32-i386
Sections:
Idx Name      Size      VMA      LMA      File off  Algn
...
26 .debug_aranges 00000098 00000000 00000000 00000ca0 2**3
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
27 .debug_pubnames 00000100 00000000 00000000 00000d38 2**0
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
28 .debug_info   000032b8 00000000 00000000 00000e38 2**0
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
29 .debug_abbrev 00000474 00000000 00000000 000040f0 2**0
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
30 .debug_line   000003ac 00000000 00000000 00004564 2**0
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
31 .debug_frame 0000008c 00000000 00000000 00004910 2**2
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
32 .debug_str   000001c7 00000000 00000000 0000499c 2**0
              CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
1ohmann@faui48:~>
```



## Remote Debugging

- bietet die Möglichkeit Programme auf Plattformen zu **debuggen**, die (noch) kein interaktives Arbeiten erlauben
  - setzt eine Kommunikationsverbindung voraus (seriell, Ethernet, ...)
  - erfordert einen Gerätetreiber
  - der Zielrechner kann auch ein Emulator sein (z.B. Bochs)
- die **Debugging-Komponente auf dem Zielsystem (stub)** sollte möglichst einfach sein



## Remote Debugging – Beispiel gdb (1)

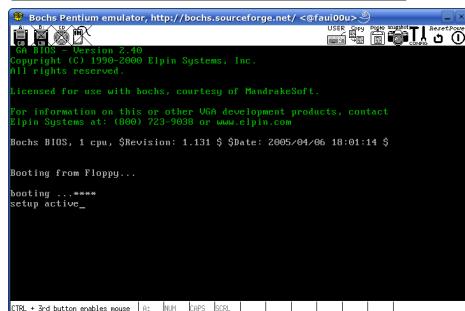
- das Kommunikationsprotokoll ("GDB Remote Serial Protocol" - RSP)
  - spiegelt die Anforderungen an den gdb *stub* wieder
  - basiert auf der Übertragung von ASCII Zeichenketten
  - Nachrichtenformat: **\$<Kommando oder Antwort>#<Prüfsumme>**
  - Nachrichten werden unmittelbar mit + (OK) oder - (Fehler) beantwortet
- Beispiele:
  - **\$g#67** ► Lesen aller Registerinhalte
    - Antwort: + \$123456789abcdef0...#... ► Reg. 1 ist 0x12345678, 2 ist 0x9...
  - **\$G123456789abcdef0...#...** ► Setze Registerinhalte
    - Antwort: + \$OK#9a ► hat funktioniert
  - **\$m4015bc,2#5a** ► Lese 2 Bytes ab Adresse 0x4015bc
    - Antwort: + \$2f86#06 ► Wert ist 0x2f86



## Remote Debugging – mit Bochs

- durch geeignete Konfigurierung vor der Übersetzung kann der Emulator Bochs auch einen gdb *stub* implementieren

```
> bochs-gdb build/bootdisk.img
...
Waiting for gdb connection on
localhost:10452
```



## Remote Debugging – Beispiel gdb (2)

- das Kommunikationsprotokoll – kompletter Umfang
  - Register- und Speicherbefehle
    - lese/schreibe alle Register
    - lese/schreibe einzelnes Register
    - lese/schreibe Speicherbereich
  - Steuerung der Programmausführung
    - letzte Unterbrechungsursache abfragen
    - Einzelschritt
    - mit Ausführung fortfahren
  - Sonstiges
    - Ausgabe auf der Debug Konsole
    - Fehlernachrichten
- allein "schreibe einzelnes Register", "lese/schreibe Speicherbereich" und "mit Ausführung fortfahren" müssen notwendigerweise vom *stub* implementiert werden



## Remote Debugging – mit Bochs

```
> gdb build/system
GNU gdb 6.3-debian
...
(gdb) break main
Breakpoint 1 at 0x11fd8: file main.cc, line 38.
(gdb) target remote localhost:10452
Remote debugging using localhost:10452
0x0000ffff in ?? ()
(gdb) continue
Continuing.

Breakpoint 1, main () at main.cc:38
38      Application application(appl_stack+sizeof(appl_stack));
(gdb) next
43      for (y=0; y<25; y++)
(gdb) next
44      for (x=0; x<80; x++)
(gdb) next
45          kout.show (x, y, ' ', CGA_Screen::STD_ATTR);
(gdb) continue
Continuing.
```

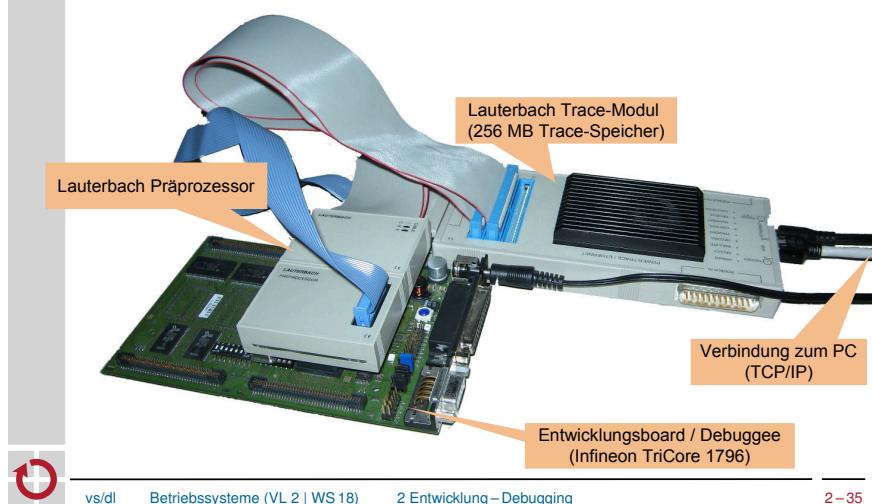


# *Debugging Deluxe*

- viele Prozessorhersteller integrieren heute Hardwareunterstützung für *Debugging* auf ihren Chips (*OCDS – On Chip Debug System*)
    - BDM, OnCE, MPD, JTAG
  - i.d.R. einfaches serielles Protokoll zwischen *Debugging*-Einheit und externem *Debugger* (Pins sparen!)
  - Vorteile:
    - der *Debug Monitor* (z.B. *gdb stub*) belegt keinen Speicher
    - Implementierung eines *Debug Monitors* entfällt
    - Haltepunkte im ROM/FLASH durch Hardware-Breakpoints
    - Nebenläufiger Zugriff auf Speicher und CPU Register
    - mittels Zusatzhardware ist zum Teil auch das Aufzeichnen des Kontrollflusses zwecks nachträglicher Analyse möglich

## Debugger Deluxe: Hardware-Lösung

- Lauterbach Hardware-Debugger

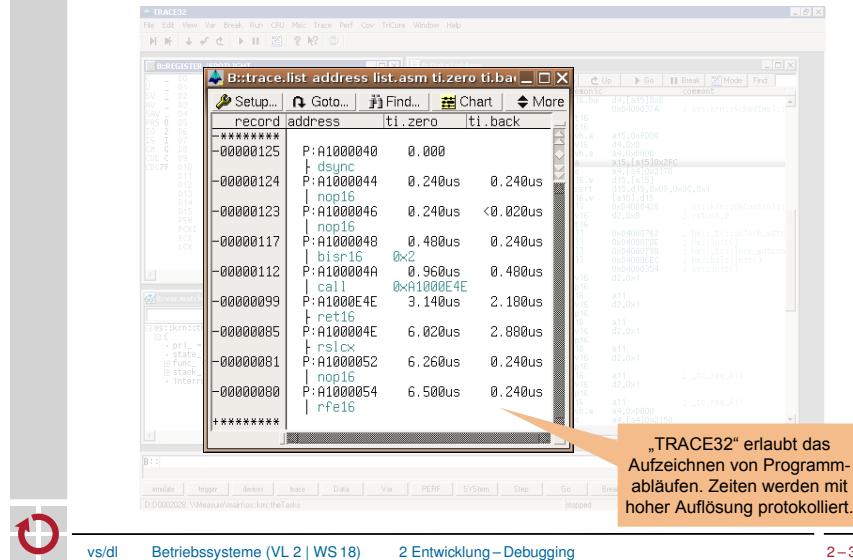


## Debugging Deluxe – Beispiel BDM

- "Background Debug Mode" - eine *on-chip debug* Lösung von Motorola
  - serielle Kommunikation über drei Leitungen (DSI, DSO, DSCLK)
  - BDM Kommandos der 68k und ColdFire Prozessoren
    - RAREG/RDREG – Read Register
      - lese bestimmtes Daten- oder Adressregister
    - WAREG/WDREG – Write Register
      - schreibe bestimmtes Daten- oder Adressregister
    - READ/WRITE – Read Memory/Write Memory
      - lese/schreibe eine bestimmte Speicherstelle
    - DUMP/FILL – Dump Memory/Fill Memory
      - lese/fülle einen ganzen Speicherblock
    - BGND/GO – Enter BDM/Resume
      - Ausführung stoppen/wieder aufnehmen

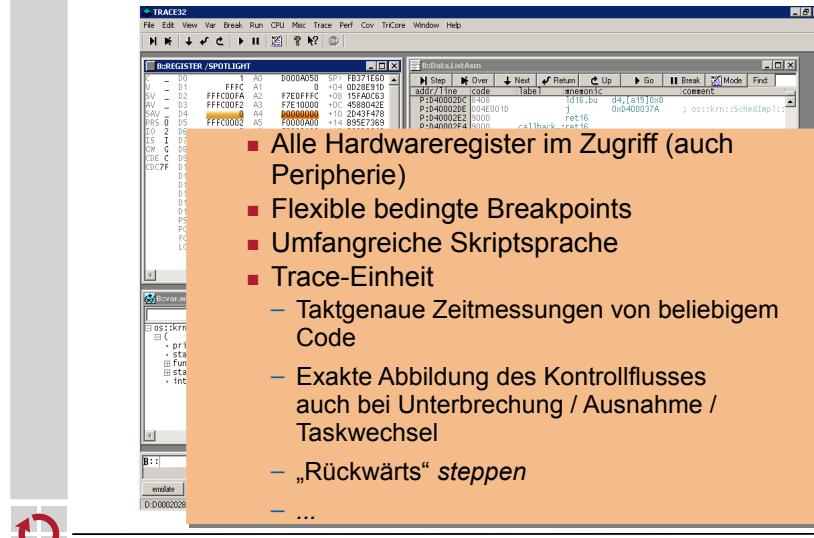
## *Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend*

## Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



2-37

## Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



2-38

## Agenda

- Einordnung
- Übersetzen und Linken
- Booten
- Debugging
- Zusammenfassung



2-39

## Zusammenfassung

- Betriebssystementwicklung unterscheidet sich deutlich von gewöhnlicher Applikationsentwicklung:
  - Bibliotheken fehlen
  - die „nackte“ Hardware bildet die Grundlage
- die ersten Schritte sind oft die schwersten
  - Übersetzung
  - Bootvorgang
  - Systeminitialisierung
- komfortable Fehlersuche erfordert eine Infrastruktur
  - Gerätetreiber für printf-Debugging
  - STUB und Verbindung/Treiber für Remote Debugging
  - Hardware Debugging-Unterstützung wie mit BDM
  - Optimal: Hardware-Debugger wie Lauterbach



2-40