Betriebssysteme (BS)

VL 2.3 – Betriebssystementwicklung – Debugging

Volkmar Sieh / Daniel Lohmann

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen Nürnberg

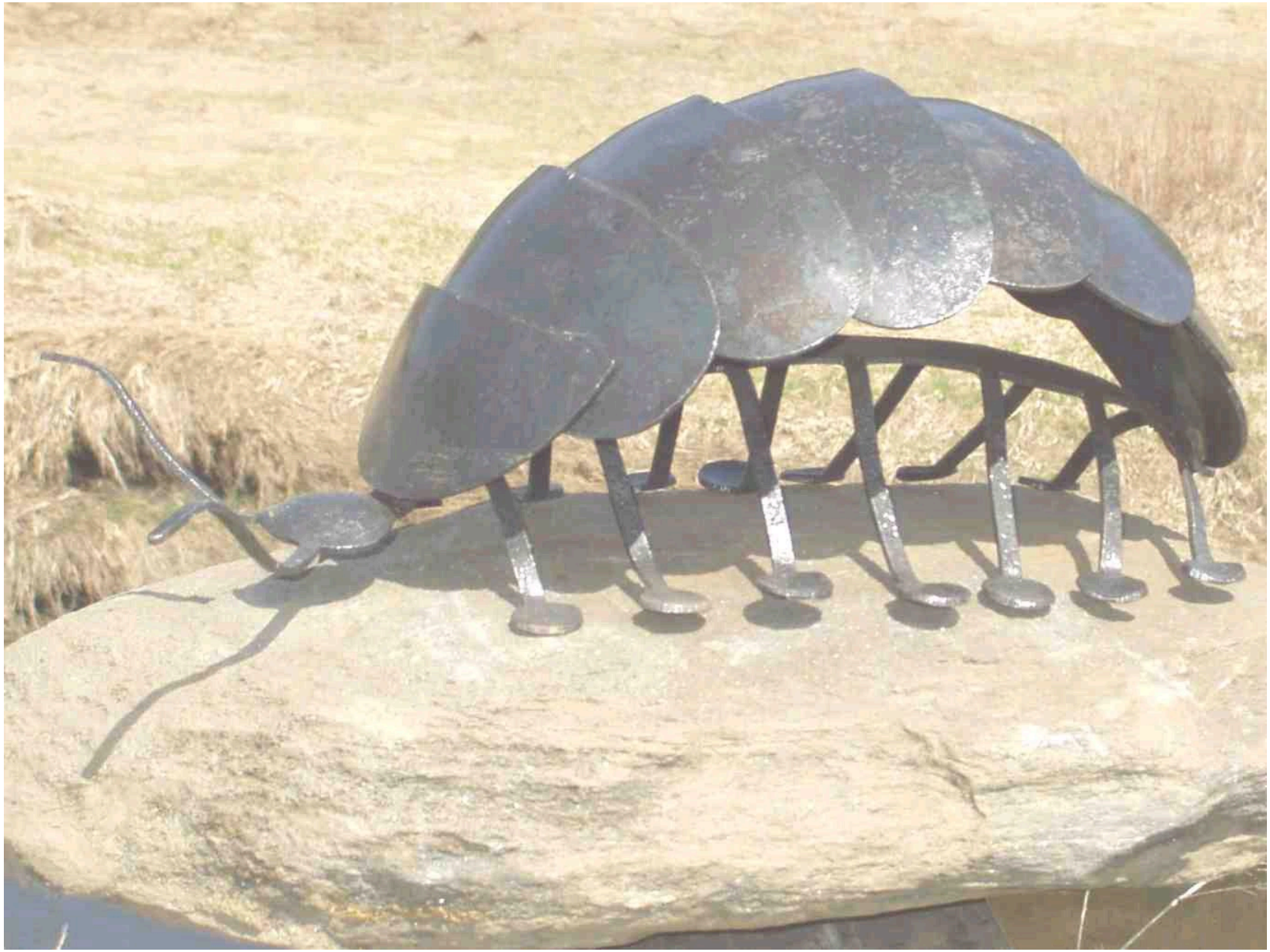
WS 21 – 25. Oktober 2021

https://www4.cs.fau.de/Lehre/WS21/V_BS

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

Debugging



Der erste dokumentierte „Bug“

9/9

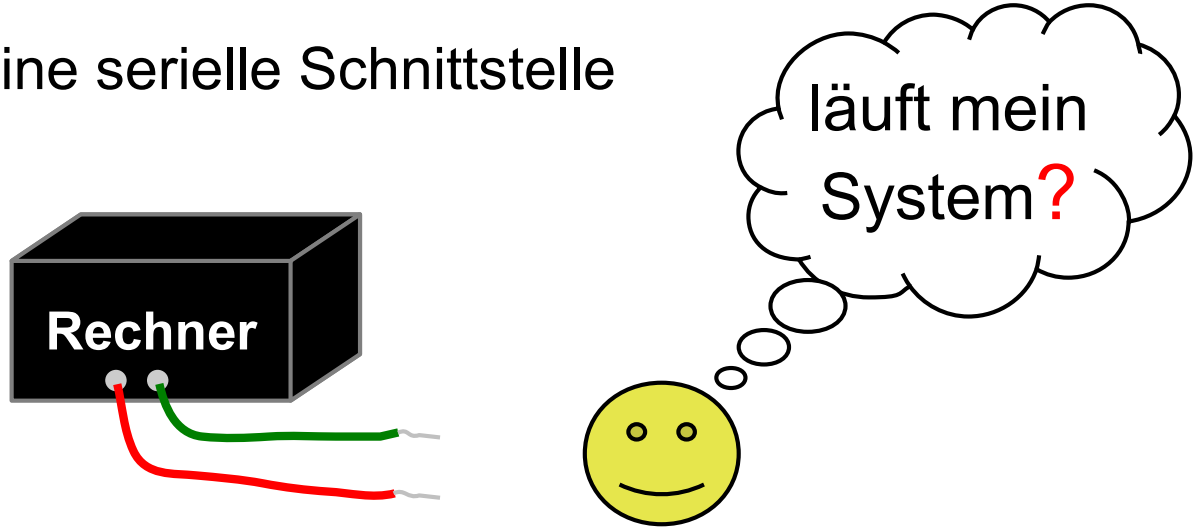
0800 Arctan started
1000 " stopped - arctan ✓
13"UC (032) MP - MC
(033) PRO 2
correct
Relays 6-2 in 033 failed special speed test
In relay " " test.
Relays changed
1100 Started Cosine Tape (Sine check)
1525 Started Multy Adder Test.
1545 Relay #70 Panel F
(moth) in relay.
First actual case of bug being found.
1700 closed down.

Quelle: Wikipedia

Admiral Grace Hopper

„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

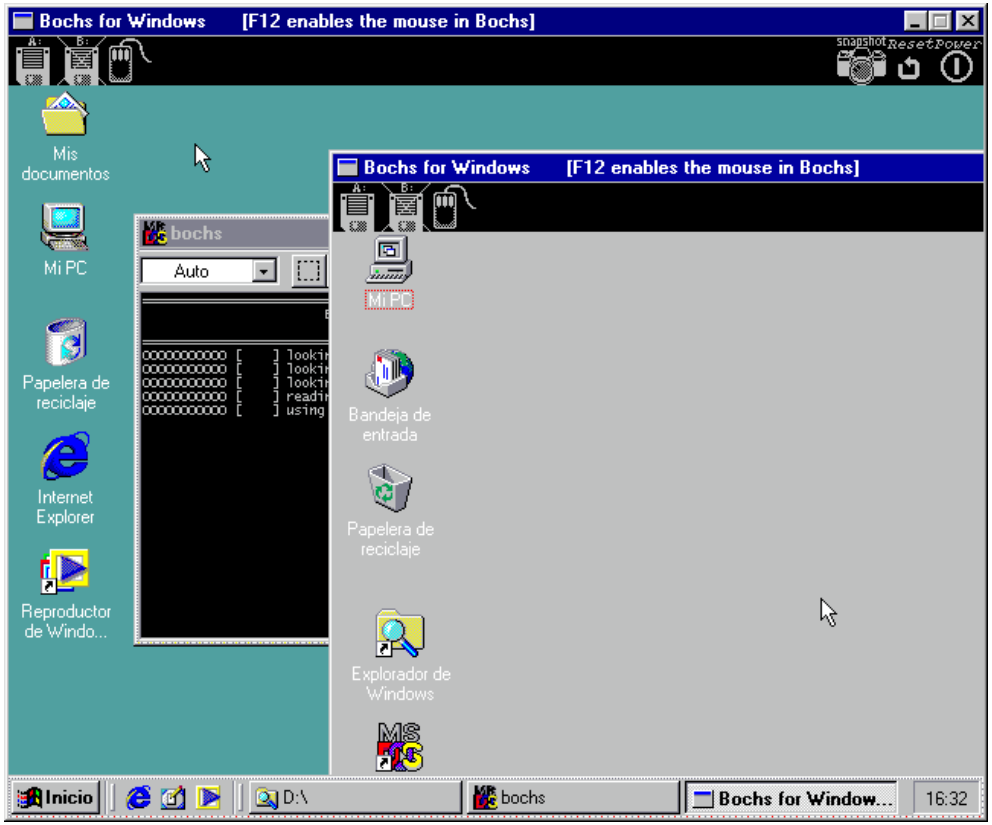


(Software-)Emulatoren

- 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

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

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

Setzen eines Abbruchpunktes

Start des Programms

Ablaufverfolgung im Einzelschritt-modus

Fortsetzung des Programms

```
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
```

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

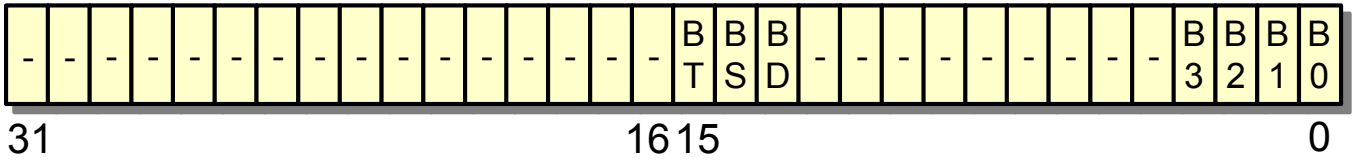
Debugging – Funktionsweise (2)

die Debug Register des 80386

Breakpoint Register

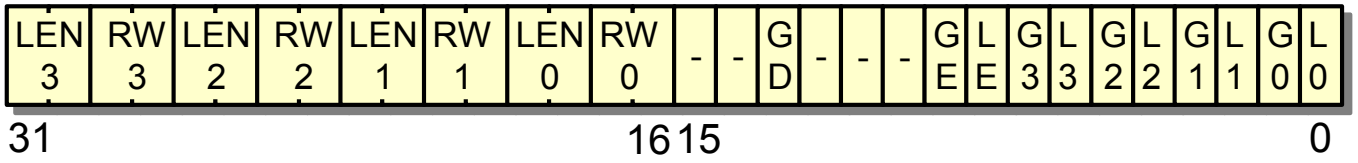
breakpoint 0: lineare Adresse	DR0
breakpoint 1: lineare Adresse	DR1
breakpoint 2: lineare Adresse	DR2
breakpoint 3: lineare Adresse	DR3
reserviert	DR4
reserviert	DR5

Debug Statusregister



DR6

Debug Steuerregister



DR7

Debugging – Funktionsweise (2)

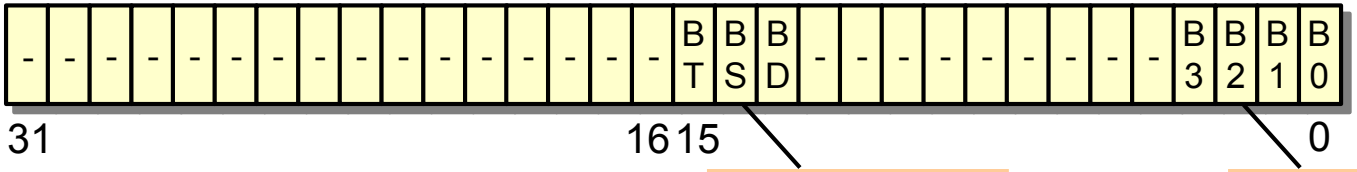
die Debug Register des 80386

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

gibt dem *Trap Handler* Auskunft über die Ursache des *Traps*

Debug Statusregister

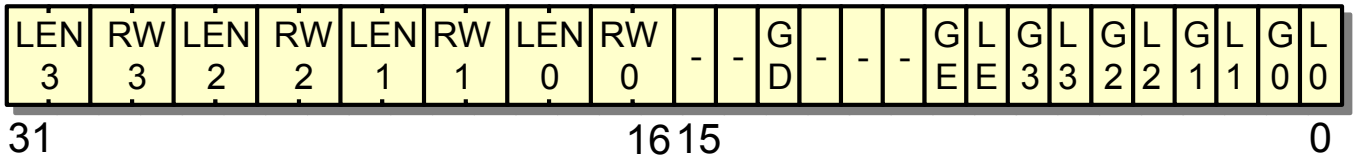


DR6

Einzelschritt

Breakpoint 0-3

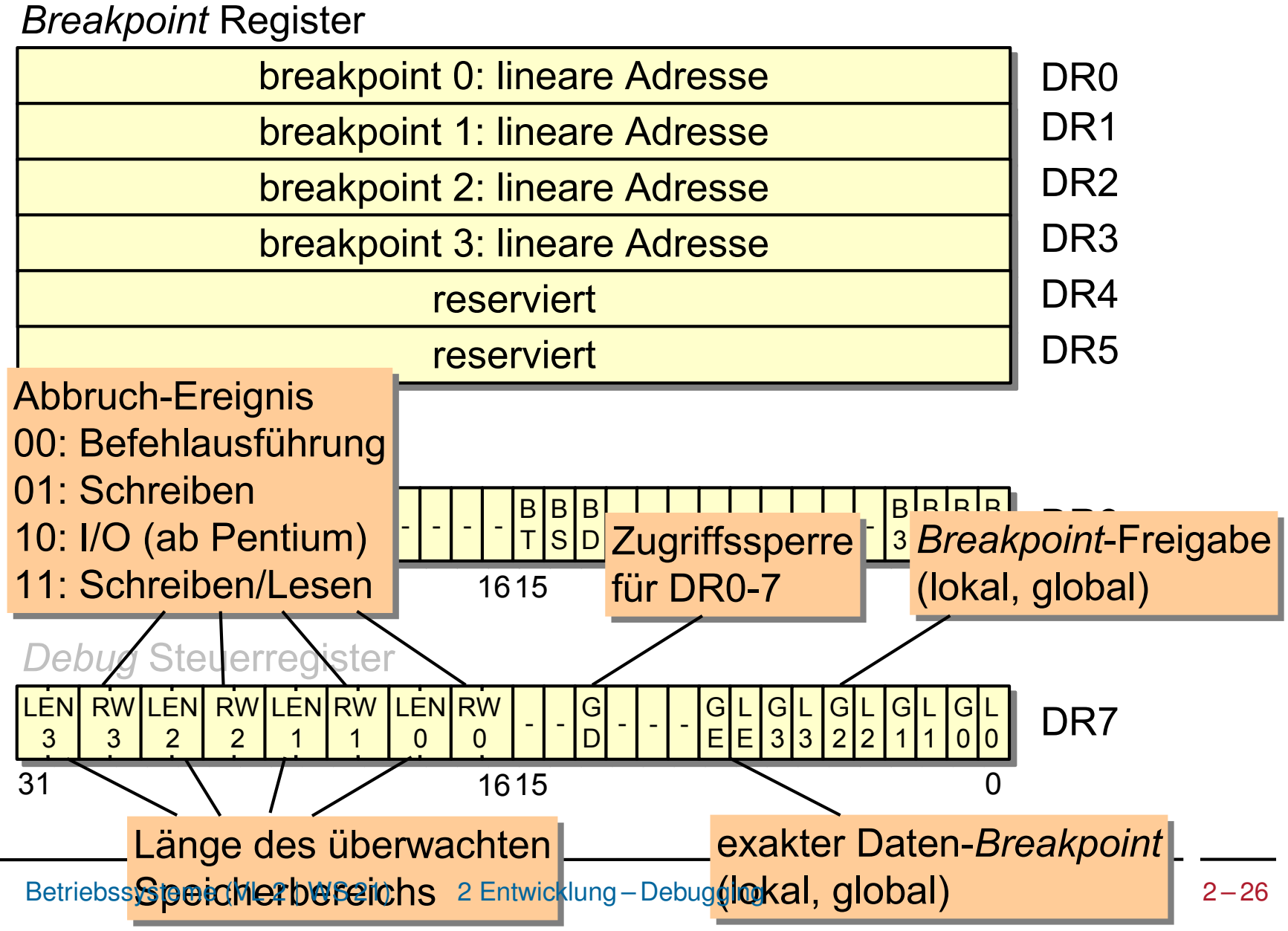
Debug Steuerregister



DR7

Debugging – Funktionsweise (2)

die Debug Register des 80386



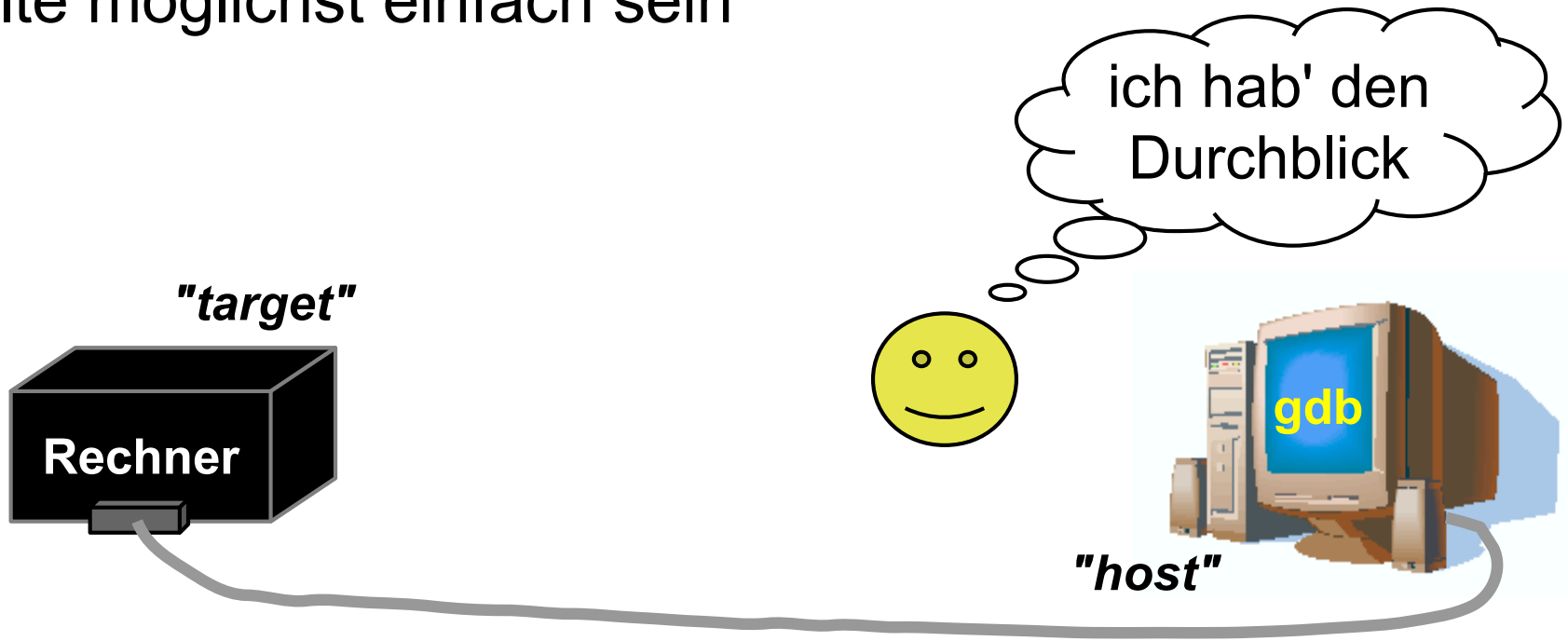
Debugging – Funktionsweise (3)

- 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

```
lohmann@faui48:~> g++ -o hello -g hello.cc
lohmann@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
lohmann@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

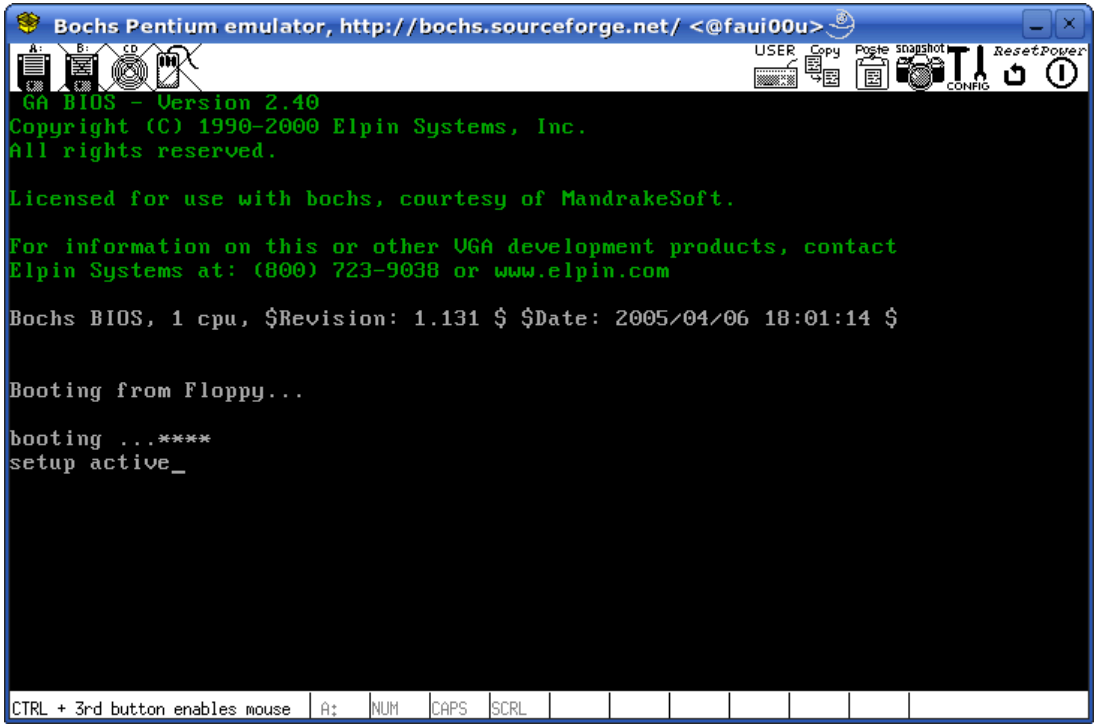
Remote Debugging – Beispiel gdb (2)

- 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

- 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 – 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
0x0000fff0 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

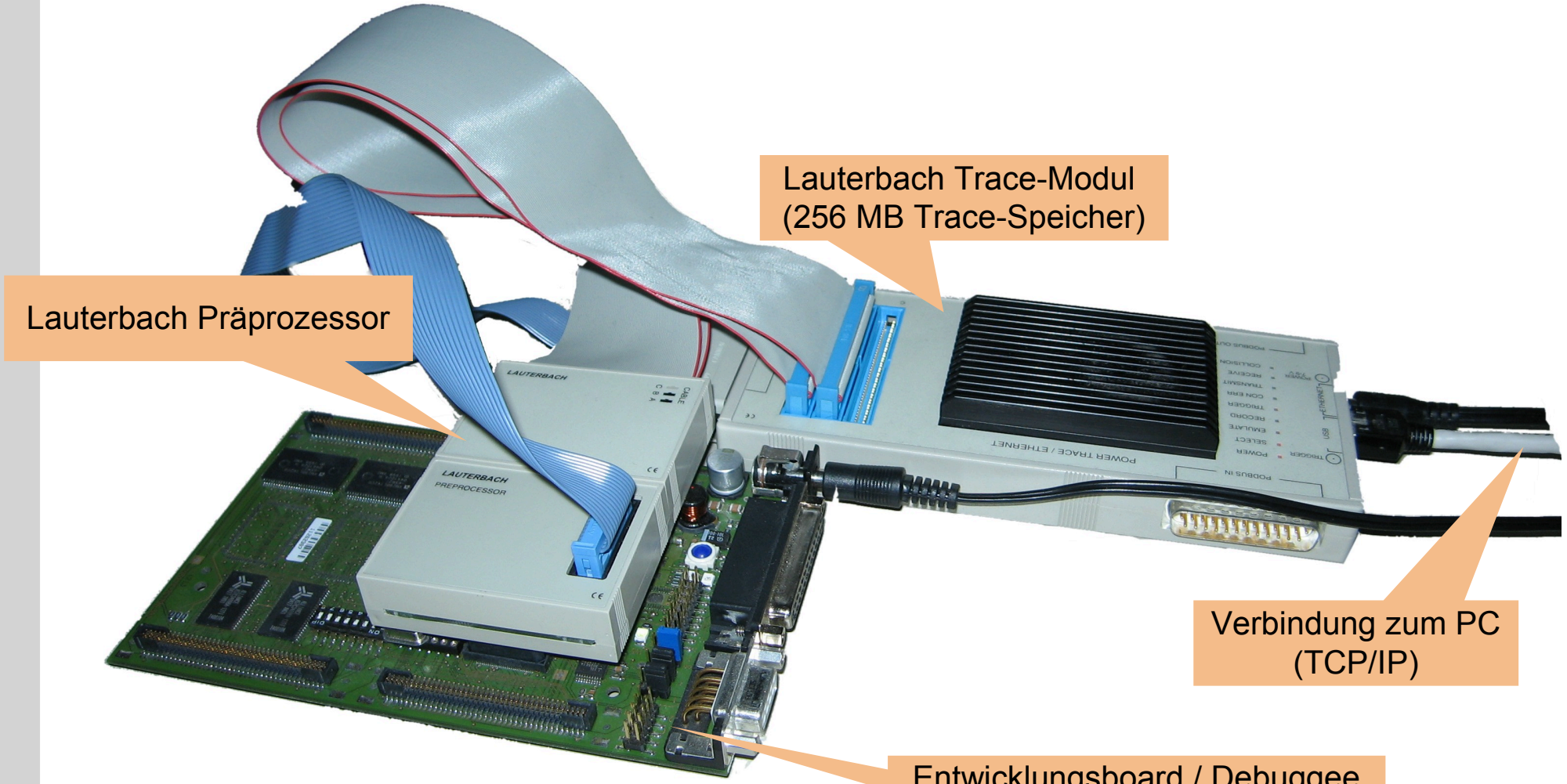
- viele Prozessorhersteller integrieren heute Hardwareunterstützung für *Debugging* auf ihren Chips (*OCDS – On Chip Debug System*)
  - BDM, OnCE, MPD, JTAG
- i.d.R. einfaches serielles Protokoll zwischen *Debugging*-Einheit und externem *Debugger* (Pins sparen!)
- Vorteile:
  - der *Debug Monitor* (z.B. 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

Debugging Deluxe – Beispiel BDM

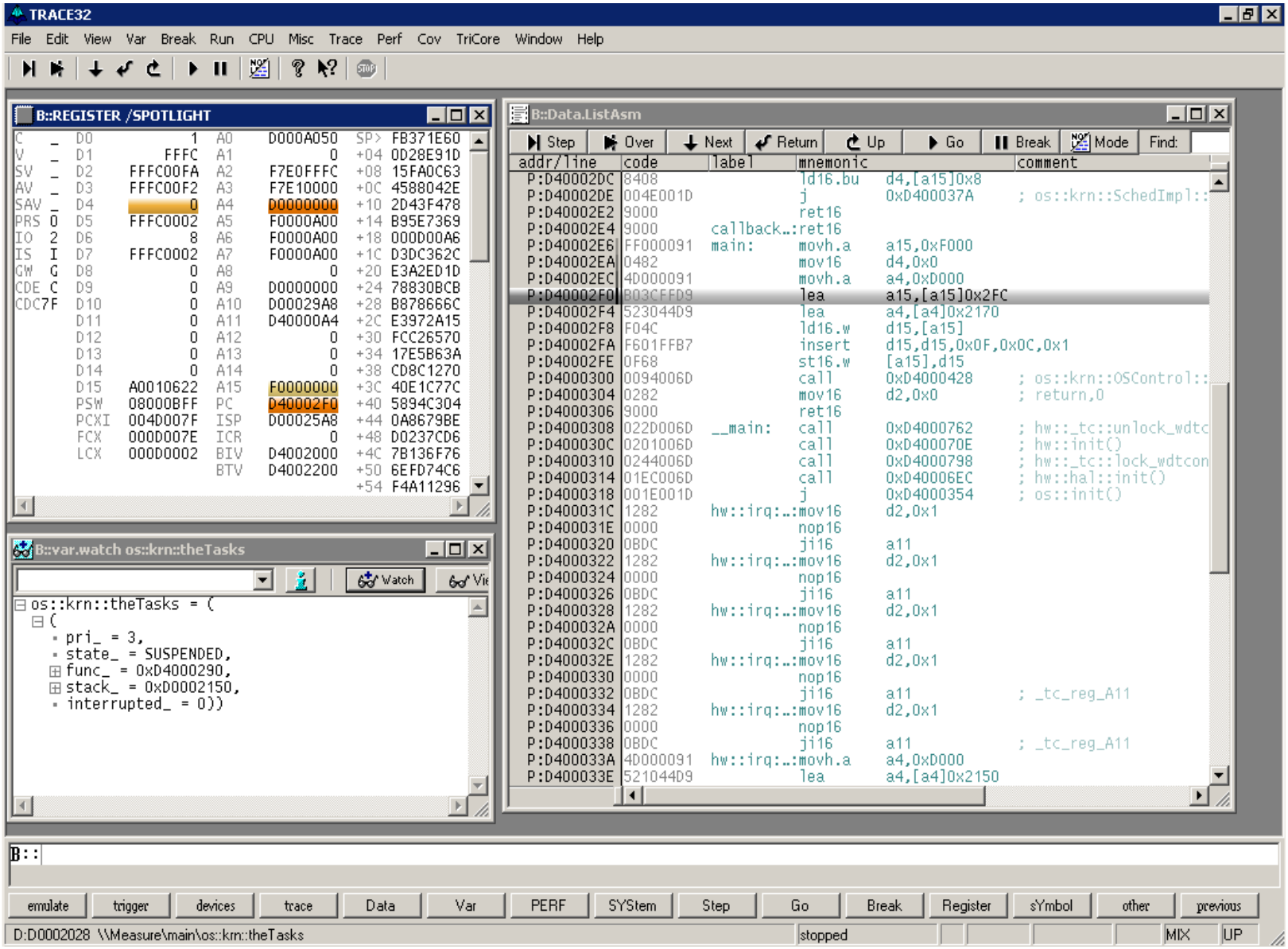
- *"Background Debug Mode"* - eine *on-chip debug* Lösung von Motorola
- serielle Kommunikation über drei Leitungen (DSI, DSO, DSCLK)
- BDM Kommandos der 68k und ColdFire Prozessoren
  - RAREG/RDREG – Read Register
    - lese bestimmtes Daten- oder Adressregister
  - WAREG/WDREG – Write Register
    - 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: Hardware-Lösung

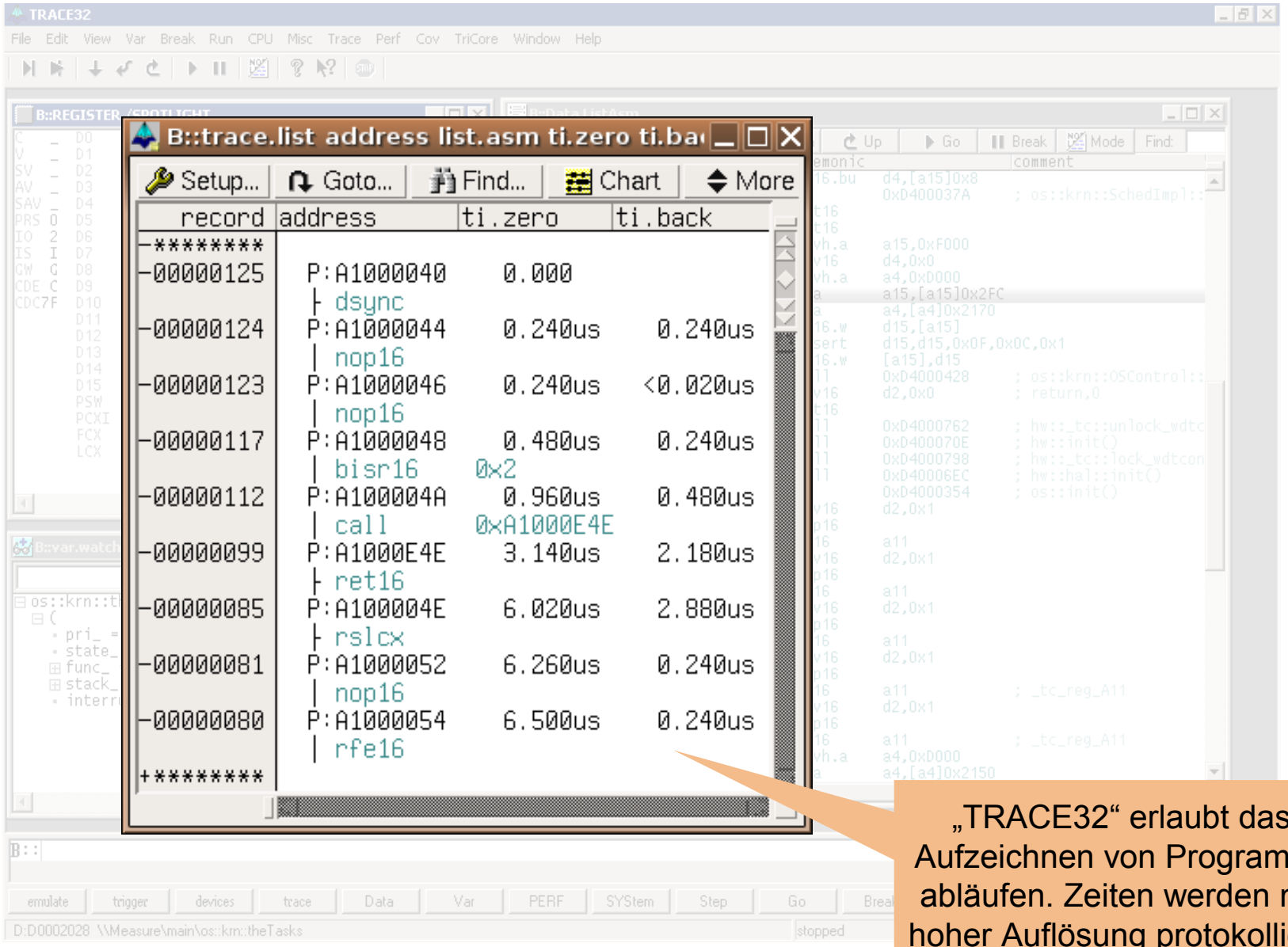
- Lauterbach Hardware-Debugger



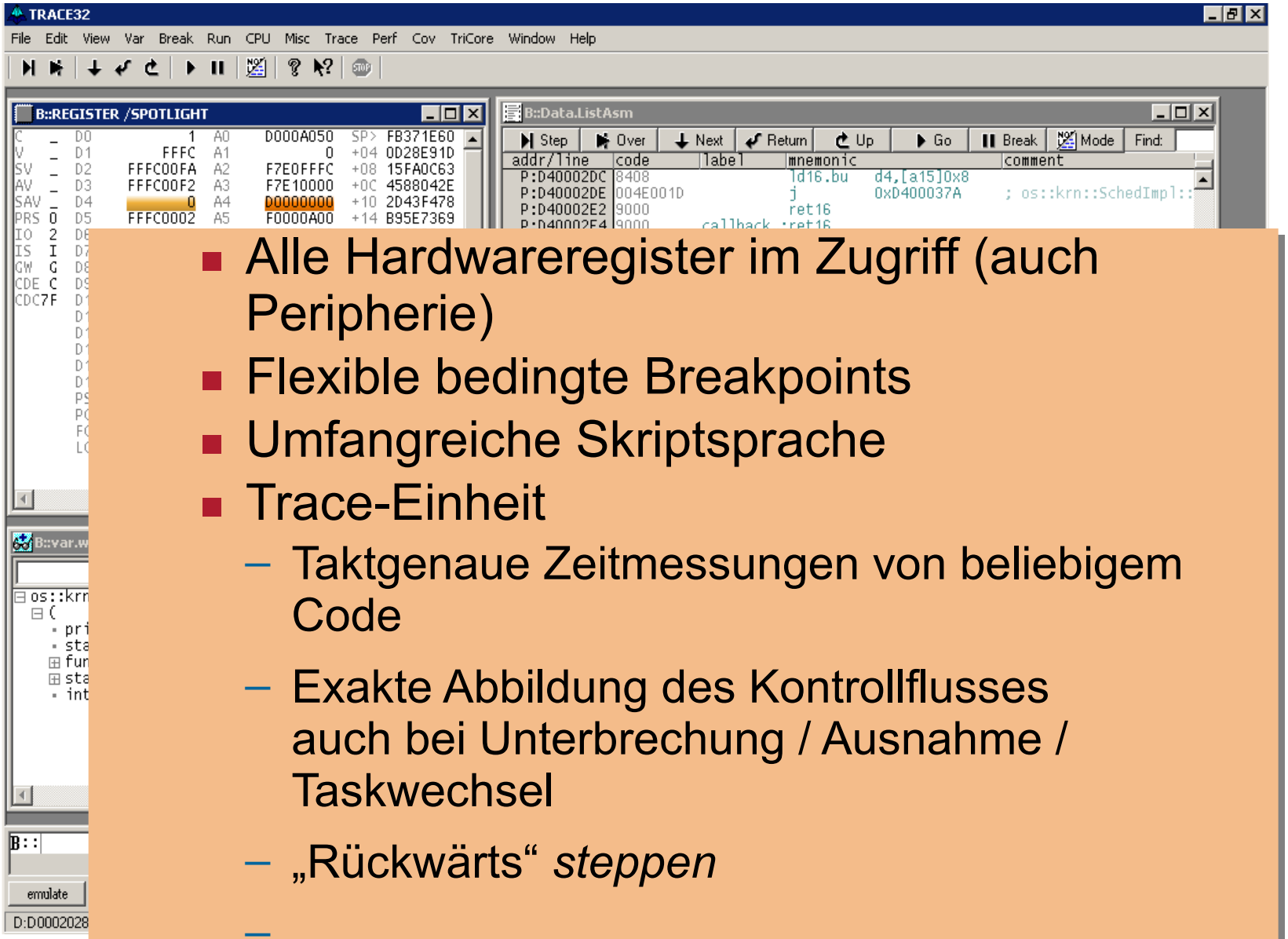
Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



- Alle Hardwareregister im Zugriff (auch Peripherie)
- Flexible bedingte Breakpoints
- Umfangreiche Skriptsprache
- Trace-Einheit
  - Taktgenaue Zeitmessungen von beliebigem Code
  - Exakte Abbildung des Kontrollflusses auch bei Unterbrechung / Ausnahme / Taskwechsel
  - „Rückwärts“ *steppen*
  - *...*

Agenda

Einordnung
Übersetzen und Linken
Booten
Debugging
Zusammenfassung

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