

Systemprogrammierung

Grundlage von Betriebssystemen

Teil B – V.2 Rechnerorganisation: Maschinenprogramme

Jürgen Kleinöder

28. Mai 2019



Agenda

Einführung
Hybrid

Programmhierarchie
Hochsprachenkonstrukte
Assemblersprachenanweisungen
Betriebssystembefehle

Organisationsprinzipien
Funktionen
Komponenten

Zusammenfassung



Gliederung

Einführung
Hybrid

Programmhierarchie
Hochsprachenkonstrukte
Assemblersprachenanweisungen
Betriebssystembefehle

Organisationsprinzipien
Funktionen
Komponenten

Zusammenfassung



- Maschinenprogramm als Entität einer **hybriden Schicht** verstehen
 - Instruktionen an die Befehlssatzebene, die direkt ausgeführt werden
 - Instruktionen an das Betriebssystem, die partiell interpretiert werden
- Ebene_[2,3] als **Programmhierarchie** virtueller Maschine vertiefen
 - indem exemplarisch für x86 und Linux das Zusammenspiel dieser Maschinen zur Diskussion gestellt wird
 - dabei die prinzipielle Funktionsweise von Systemaufrufen erkennen
- **Grobstruktur** von Maschinenprogrammen im Ansatz kennenlernen
 - mit dem Laufzeitsystem und den Systemaufrufstümpfen als zwei zentrale Bestandteile der Systemsoftware
 - inklusive Anwendungsroutinen zusammengebunden zum **Lademodul**

Auch wenn wir die Programmbeispiele symbolisch dargestellt sehen, ist zu beachten, dass Maschinenprogramme letztlich numerischer Natur sind. (vgl. [3, S. 18])



Hybride Schicht in einem Rechensystem

- Maschinenprogramme enthalten zwei Sorten von Befehlen:
 - i **Maschinenbefehle** der Befehlssatzebene (ISA)
 - normalerweise direkt interpretiert durch die Zentraleinheit¹
 - ausnahmsweise partiell interpretiert durch das Betriebssystem
 - ii **Systemaufrufe** an das Betriebssystem
 - normalerweise partiell interpretiert durch das Betriebssystem

Hybrid (lat. *hybrida* Bastard, Mischling, Frevelkind)^a

^agr. *hýbris* Übermut, Anmaßung

„etwas Gebündeltes, Gekreuztes oder Gemischtes“ [6]

- ein System, in dem zwei Techniken miteinander kombiniert werden:
 - i Interpretation von Programmen der Befehlssatzebene
 - ii partielle Interpretation von Maschinenprogrammen
- ein Maschinenprogramm ist **Hybridsoftware**, die auf Ebene_[2,3] läuft

¹*central processing unit*, CPU



Betriebssystem $\equiv$ Programm der Befehlssatzebene

- ein Betriebssystem implementiert die Maschinenprogrammzebene
 - es zählt damit selbst nicht zur Klasse der Maschinenprogramme
 - es setzt normalerweise keine Systemaufrufe (an sich selbst) ab
 - es interpretiert die eigenen Programme nur eingeschränkt partiell

Teilinterpretation von Betriebssystemprogrammen

*Bewirkt **indirekt rekursive Programmausführungen** im Betriebssystem^a und erfordert daher die Fähigkeit zum **Wiedereintritt** (re-entrance). Je nach Operationsprinzip^b des Betriebssystems ist dies zulässig oder (temporär) unzulässig.*

^aausgelöst durch synchrone/asynchrone Unterbrechungen

^bnichtblockierende/blockierende Synchronisation

- gleichwohl sollten Betriebssysteme es zulassen, in der Ausführung eigener Programme unterbrochen werden zu können
 - nicht durch Systemaufrufe aber durch *Traps* oder *Interrupts*...



Gliederung

Einführung

Hybrid

Programmhierarchie

Hochsprachenkonstrukte

Assemblersprachenanweisungen

Betriebssystembefehle

Organisationsprinzipien

Funktionen

Komponenten

Zusammenfassung

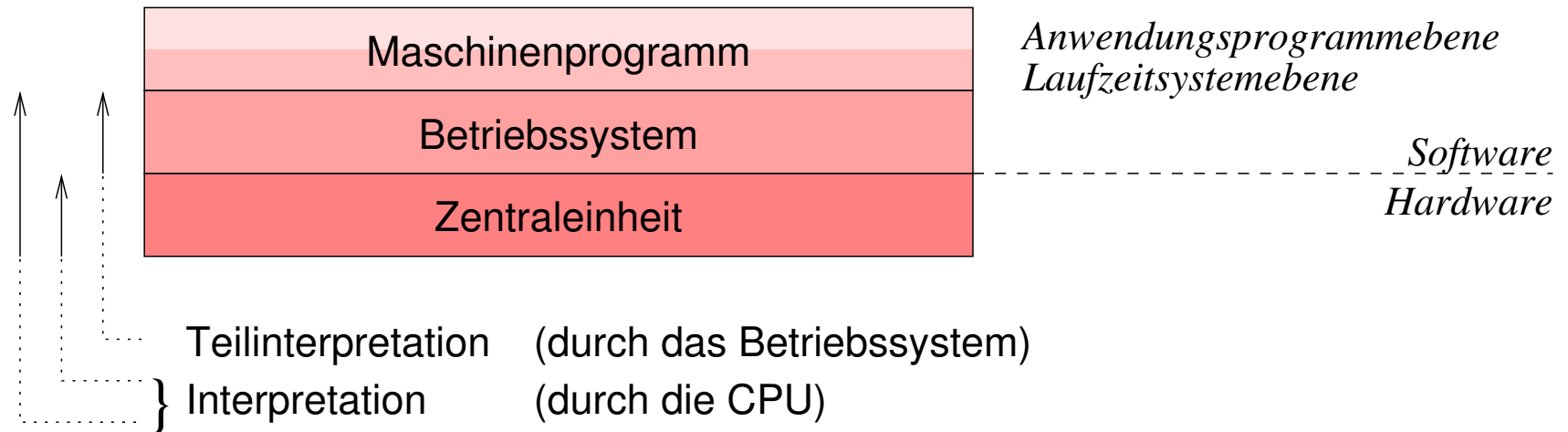


Maschinensprache(n)

- Maschinenprogramme setzen sich aus Anweisungen zusammen, die **ohne Übersetzung** von einem Prozessor ausführbar sind
 - gleichwohl werden sie (normalerweise) durch Übersetzung generiert
 - nahezu ausschließlich automatisch: Kompilierer, Assemblierer, Binder
 - in seltenen Fällen manuell: **nativer Kode** (*native code*)²
 - sie repräsentieren sich technisch als **Lademodul** (*load module*)
 - erzeugt durch Dienstprogramme (*utilities*): `gcc(1)`, `as(1)`, `ld(1)`
 - geladen, verarbeitet und entsorgt durch Betriebssysteme
 - d.h., als **ausführbares Programm** und in numerischer Form
- Grundlage für die Entwicklung von Maschinenprogrammen bilden Hoch- und Assemblersprachen, und zwar für jede Art Software:
 - Anwendungsprogramme, Laufzeitsysteme und Betriebssysteme
 - symbolisch repräsentiert auf Ebene_[4,5], numerisch auf Ebene₃

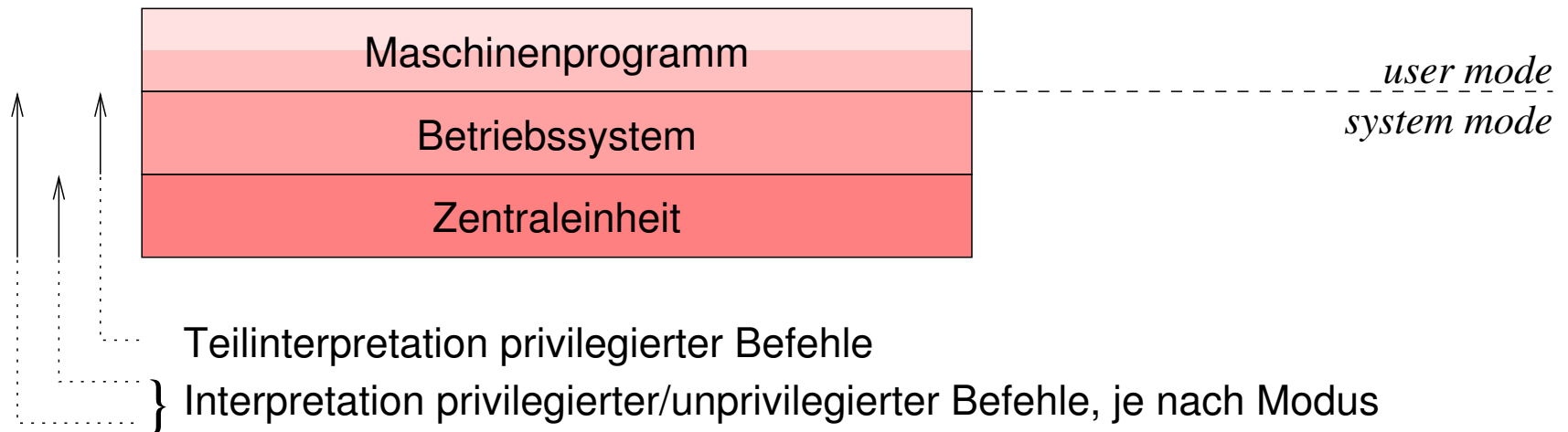
²Binärkode des realen Prozessors, auch: Maschinenkode.





- **Maschinenprogramm** = Anwendungsprogramm + Laufzeitsystem
 - beide Teilebenen liegen im selben **Adressraum**, der zudem (logisch) per **Speicherschutz** von anderen Adressräumen isoliert ist
 - einfache Unterprogrammaufrufe aktivieren das Laufzeitsystem
- **Ausführungsplattform** = Betriebssystem + Zentraleinheit (CPU)
 - Verarbeitung eines Maschinenprogramms durch einen Prozessor, der in Hard- und Software implementiert vorliegt
 - komplexe **Systemaufrufe** (*system calls*) aktivieren das Betriebssystem





- Maschinenprogramm = Benutzerebene (*user level, user space*)
 - eingeschränkter Umgang mit Merkmalen der Befehlssatzebene in Bezug auf Maschinenbefehle, Hardwarekomponenten und Peripheriegeräte
 - nur **unprivilegierte Operationen** werden direkt ausgeführt, privilegierte Operationen erfordern den **Moduswechsel** $\leadsto$ Systemaufruf
- Ausführungsplattform = Systemebene (*system level, kernel space*)
 - uneingeschränkter Umgang mit den Merkmalen der Befehlssatzebene
 - alle Maschinenbefehle werden direkt ausgeführt, alle Operationen gültig



- ein auf Ebene₅ symbolisch repräsentiertes Programm der Ebene₃:

```
1 void echo() {  
2     char c;  
3     while (read(0, &c, 1) == 1) write(1, &c, 1);  
4 }
```

echo.c

Funktion `read(2)` überträgt ein Zeichen von Standardeingabe (0) an die Arbeitsspeicheradresse der lokalen Variablen `c`, deren Inhalt anschließend mit der Funktion `write(2)` zur Standardausgabe (1) gesendet wird. Die Schleife terminiert durch Unterbrechung, unter UNIX z.B. nach Eingabe von `^C`.



- dasselbe Programm symbolisch repräsentiert auf Ebene 4

■ `gcc -O4 -fomit-frame-pointer -m32 -S echo.c ~ echo.s:`

```
1  .file "echo.c"
2  .text
3  .p2align 4,,15
4  .globl echo
5  .type echo, @function
6  echo:
7      pushl %ebx
8      subl $40, %esp
9      leal 28(%esp), %ebx
10     jmp .L2
11     .p2align 4,,7
12     .p2align 3
13     .L3:
14         movl $1, 8(%esp)
15         movl %ebx, 4(%esp)
16         movl $1, (%esp)
17         call write
18     .L2:
19         movl $1, 8(%esp)
20         movl %ebx, 4(%esp)
21         movl $0, (%esp)
22         call read
23         cmpl $1, %eax
24         je .L3
25         addl $40, %esp
26         popl %ebx
27         ret
```

- **unaufgelöste Referenzen** der Systemfunktionen `read(2)` und `write(2)` werden vom Binder `ld(1)` aufgelöst $\mapsto$ `libc.a`



■ Stümpfe der Systemfunktionen auf Ebene 3, symbolisch aufbereitet:

```

1  read:
2      push %ebx
3      movl 16(%esp),%edx
4      movl 12(%esp),%ecx
5      movl 8(%esp),%ebx
6      mov $3,%eax
7      int $0x80
8      pop %ebx
9      cmp $-4095,%eax
10     jae __syscall_error
11     ret
    
```

```

12  write:
13     push %ebx
14     movl 16(%esp),%edx
15     movl 12(%esp),%ecx
16     movl 8(%esp),%ebx
17     mov $4,%eax
18     int $0x80
19     pop %ebx
20     cmp $-4095,%eax
21     jae __syscall_error
22     ret
    
```

- gcc -O4 -fomit-frame-pointer -m32 -static echo.c
- Verwendung der disassemble-Operation von gdb(1)

■ Systemaufruf wird durch `int $0x80` (*software interrupt*) ausgelöst

- Operationskode in %eax
- Parameter in %ebx, %ecx und %edx
- Resultat in %eax zurück

```

23  __syscall_error:
24     neg %eax
25     mov %eax,errno
26     mov $-1,%eax
27     ret
28
29     .comm errno,16
    
```



■ Systemaufrufzuteiler (*system call dispatcher*):

- ein auf Ebene₄ symbolisch repräsentiertes Programm der Ebene₂
- kernel-source-2.4.20/arch/i386/kernel/entry.S (Auszug)

Prolog

```
1 system_call:
2   pushl %eax
3   cld
4   pushl %es
5   pushl %ds
6   pushl %eax
7   pushl %ebp
8   pushl %edi
9   pushl %esi
10  pushl %edx
11  pushl %ecx
12  pushl %ebx
13  ...
```

Abruf und Ausführung

```
14  ...
15  cmpl $(NR_syscalls),%eax
16  jae badsys
17  call *sys_call_table(,%eax,4)
18  movl %eax,24(%esp)
19  ret_from_sys_call:
20  ...
21  jmp restore_all
22  badsys:
23  movl $-ENOSYS,24(%esp)
24  jmp ret_from_sys_call
```

Epilog

```
25 restore_all:
26  popl %ebx
27  popl %ecx
28  popl %edx
29  popl %esi
30  popl %edi
31  popl %ebp
32  popl %eax
33  popl %ds
34  popl %es
35  addl $4,%esp
36  iret
```

- 4–12 ■ Sicherung des Prozessorzustands des Maschinenprogramms
- 7–12 ■ Übernahme der aktuellen Parameter von Systemaufrufen
- 15–18 ■ Überprüfung des Operationskodes und Aufruf der Systemfunktion
- 26–34 ■ Wiederherstellung des gesicherten Prozessorzustands
- 36 ■ Wiederaufnahme der Ausführung des Maschinenprogramms



Betriebssystem: Interpreter

- **Befehlsabruf- und -ausführungszyklus** (*fetch-execute cycle*) zur Ausführung von Systemaufrufen
 1. Prozessorstatus des unterbrochenen Programms sichern Prolog
 - Aufforderung der CPU zur Teilinterpretation nachkommen
 2. Systemaufruf interpretieren Abruf und Ausführung
 - i Systemaufrufnummer (Operationskode) abrufen
 - ii auf Gültigkeit überprüfen und ggf. Fehlerbehandlung auslösen
 - iii bei gültigem Operationskode, zugeordnete Systemfunktion ausführen
 3. Prozessorstatus wiederherstellen und zurückspringen Epilog
 - Beendigung der Teilinterpretation der CPU „mitteilen“
 - Ausführung des unterbrochenen Programms wieder aufnehmen
- mangels **Systemimplementierungssprache**³ ist in dem Kontext der Einsatz von Assemblersprache erforderlich
 - Teilinterpretation erfordert kompletten Zugriff auf den Prozessorstatus
 - dieser ist nicht mehr Teil des Programmiermodells einer Hochsprache

³Höhere Programmiersprache mit hardwarenahen Sprachelementen.



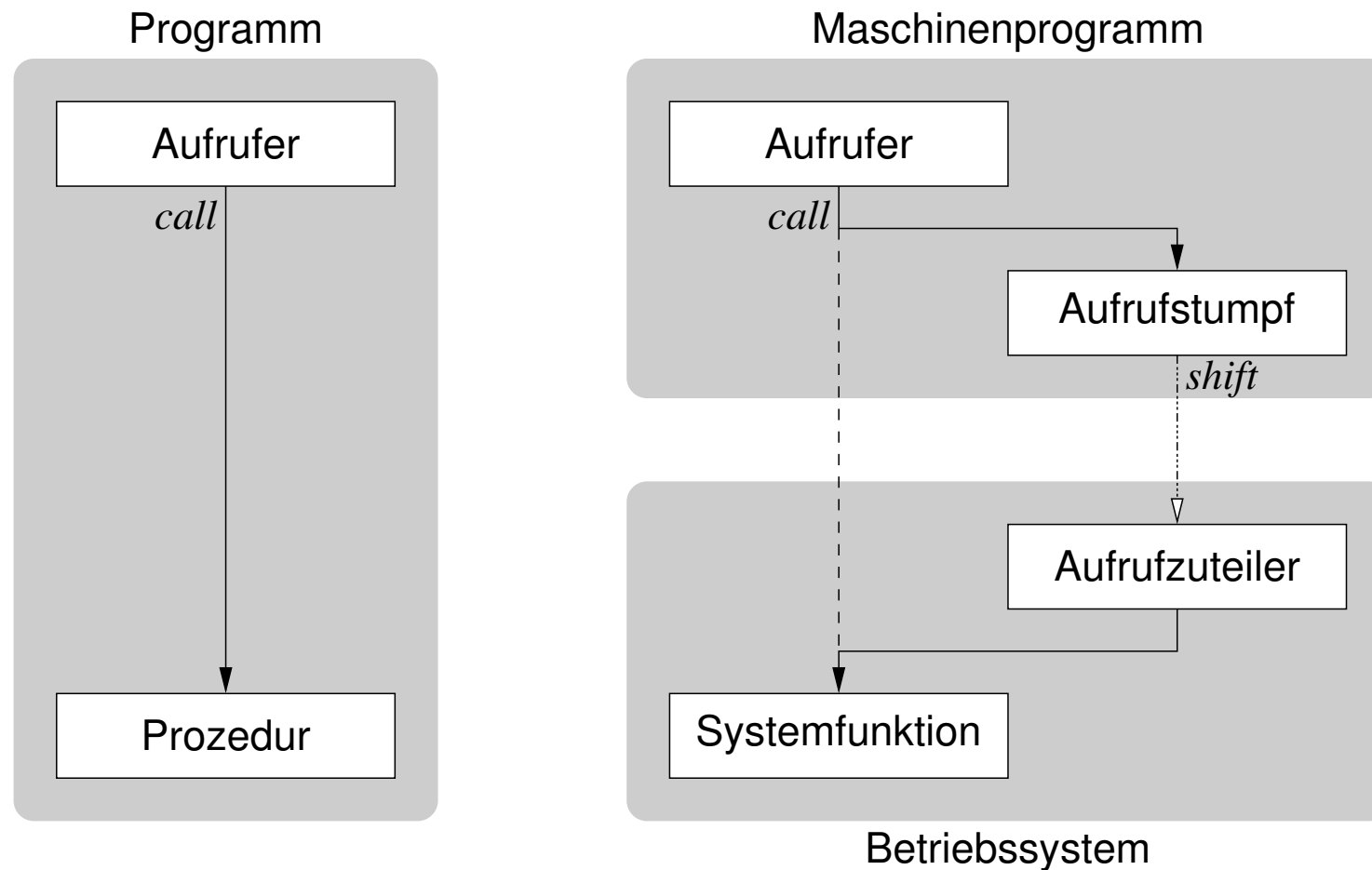
- ein auf Ebene₅ symbolisch repräsentiertes Programm der Ebene₂:
 - kernel-source-2.4.20/fs/read_write.c (Auszug)

```
1  asmlinkage
2  ssize_t sys_read(unsigned int fd, char *buf, size_t count) {
3      ssize_t ret;
4      struct file *file;
5
6      ret = -EBADF;
7      file = fget(fd);
8      if (file) {
9          ...
10     }
11     return ret;
12 }
13
14 asmlinkage ssize_t sys_write ...
```

- **Systemfunktion** (Implementierung) innerhalb des Betriebssystems
 - aktiviert durch `call *sys_call_table(,%eax,4)` (S. 14, Zeile 17)



Prozedur- vs. Systemaufruf



- Systemaufruf als adressraumübergreifender Prozeduraufruf
 - verlagert (*shift*) die weitere Prozedurausführung ins Betriebssystem



Gliederung

Einführung
Hybrid

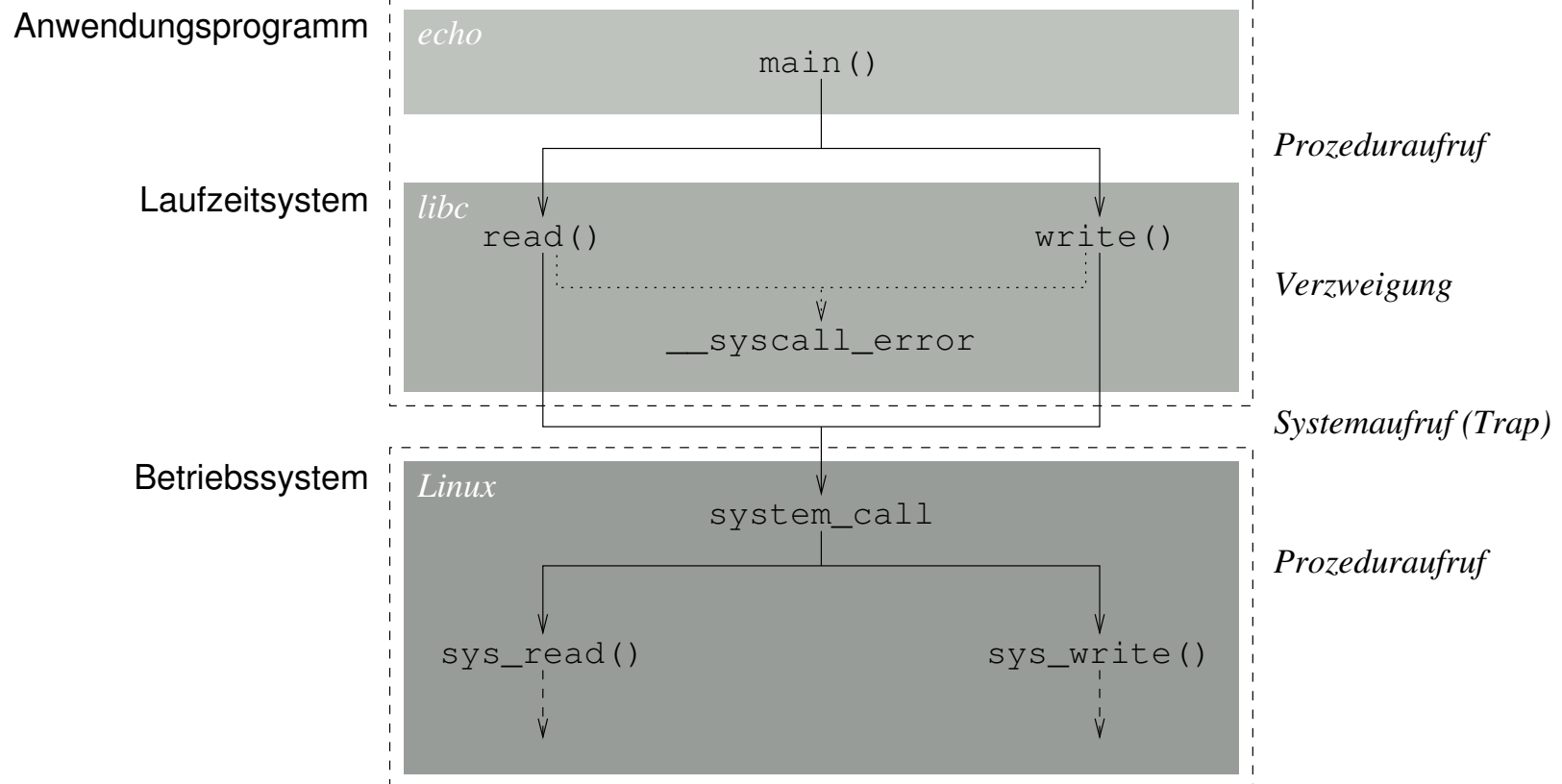
Programmhierarchie
Hochsprachenkonstrukte
Assemblersprachenanweisungen
Betriebssystembefehle

Organisationsprinzipien
Funktionen
Komponenten

Zusammenfassung



Domänenübergreifende Aufrufhierarchie



■ „obere“ Domäne (Ebene₃, $\sqcup$)

- Anwendungsmodus
- unprivilegiert (graduell)
- räumlich isoliert (total)
- transient (logisch)

■ „untere“ Domäne (Ebene₂, $\sqcap$)

- Systemmodus
- privilegiert (graduell)
- räumlich isoliert (partiell)
- resident (logisch)



Systemaufrufchnittstelle (*system call interface*)⁴

```
1 read:
2   push %ebx
3   movl 16(%esp),%edx
4   movl 12(%esp),%ecx
5   movl 8(%esp),%ebx
6   mov $3,%eax
7   int $0x80
8   pop %ebx
9   cmp $-4095,%eax
10  jae __syscall_error
11  ret
```

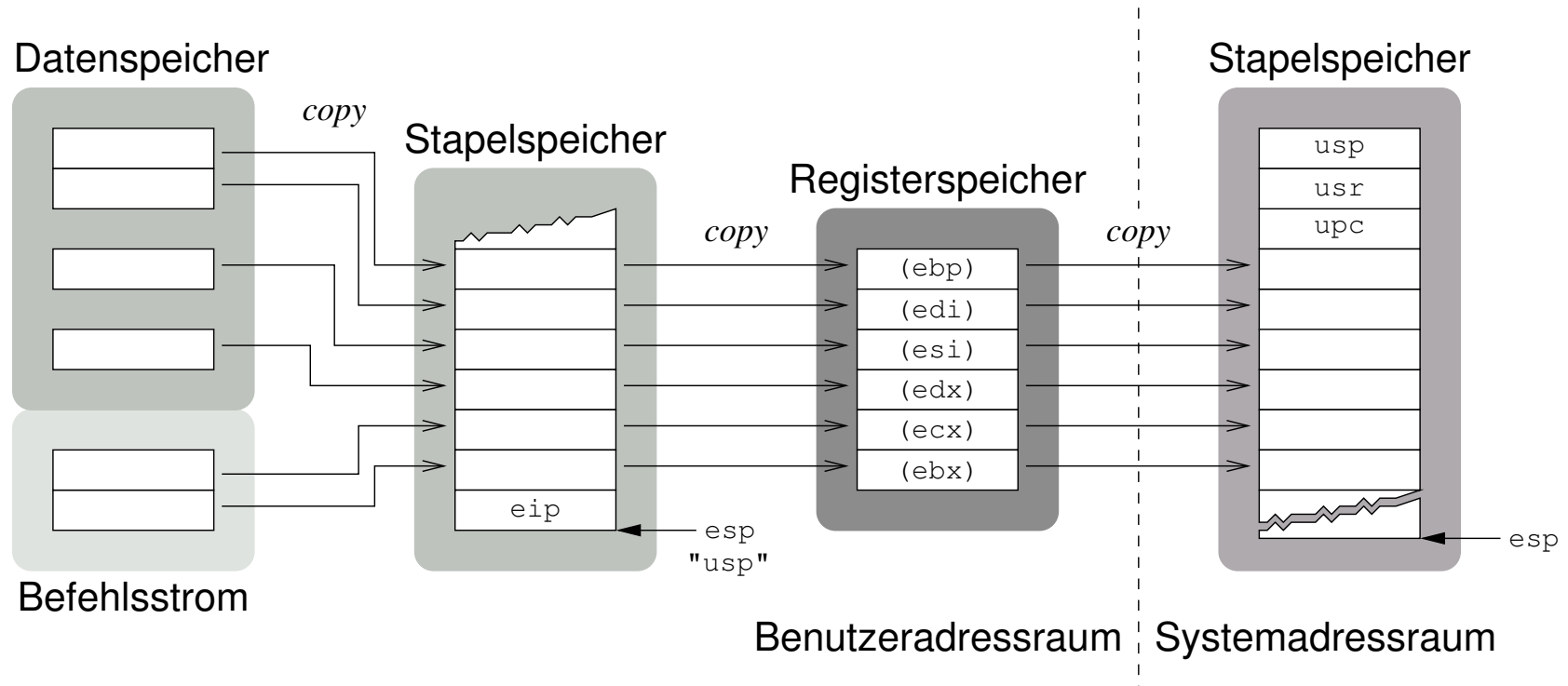
- „Grenzübergangsstelle“ **Aufrufstumpf**
 - einerseits erscheint ein Systemaufruf als normaler **Prozeduraufruf**
 - andererseits bewirkt der Systemaufruf einen **Moduswechsel**
- sorgt für **Ortstransparenz** (funktional)
 - die Lokalität der aufgerufenen Systemfunktion muss nicht bekannt sein

- Systemaufrufe sind **Prozedurfernaufrufe**, um **Prozessdomänen** in kontrollierter Weise zu überwinden

- 3–5 ■ tatsächliche Parameter (Argumente) in Registern übergeben
- 6 ■ Systemaufrufnummer (Operationskode) in Register übergeben
- 7 ■ Domänenwechsel ($\text{Ebene}_3 \mapsto \text{Ebene}_2$) auslösen
 - Aufruf abfangen (*trap*) und dem Betriebssystem zustellen
- 9–10 ■ Status überprüfen und ggf. Fehlerbehandlung durchführen

⁴UNIX Programmers Manual (UPM), Lektion 2 — `man(2)`





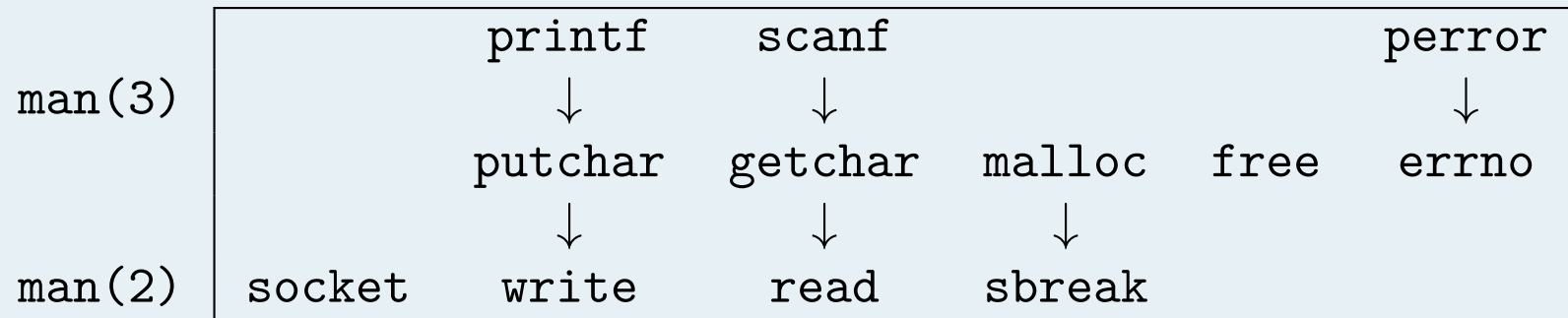
- **Werteübergabe** (*call by value*) für alle Parameter
 - Variable: Befehlsoperand ist Adresse im Datenspeicher inkl. Register
 - Direktwert: Bestandteil des Befehls im Befehlsstrom
- stark abhängig vom **Pogrammiermodell** der Befehlssatzebene
 - die Registeranzahl bestimmt die Anzahl direkter Parameter
 - ggf. sind weitere Parameter indirekt über den Stapelzeiger zu laden



Laufzeitumgebung (*runtime environment*)⁵

- **Programmbausteine** in Form eines zur Laufzeit zur Verfügung gestellten universellen Satzes von Funktionen und Variablen
 - Lesen/Schreiben von Dateien, Ein-/Ausgabegeräte steuern
 - Daten über Netzwerke transportieren oder verwalten
 - formatierte Ein-/Ausgabe, ...

Laufzeitbibliothek von C unter UNIX (Auszug)



⁵UNIX *Programmers Manual* (UPM), Lektion 3 — man(3)

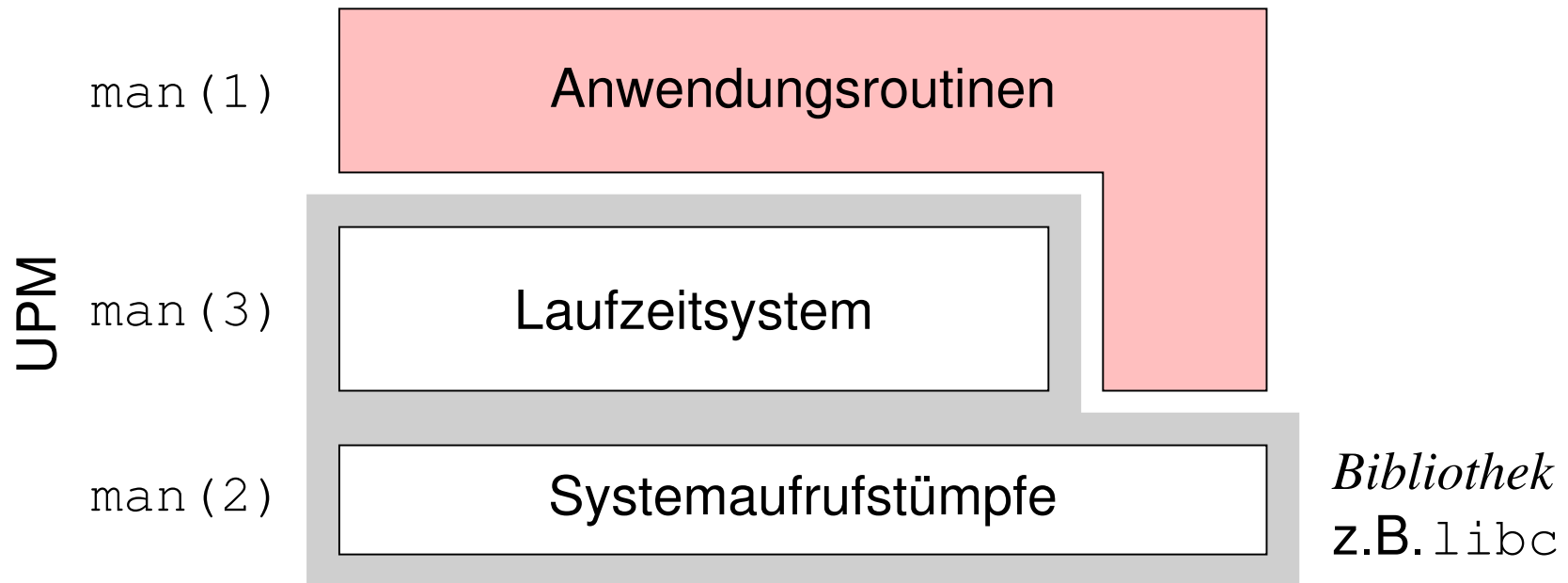


Ensemble problemspezifischer Prozeduren

- **Anwendungsroutinen** (des Rechners)
 - bei C/C++ die Funktion `main()` und anderes Selbstgebautes
 - setzen u.a. Betriebssystem- oder Laufzeitsystemaufrufe ab
- **Laufzeitsystemfunktionen** (des Kompilierers/Betriebssystems)
 - bei C z.B. die Bibliotheksfunktionen `printf(3)` und `malloc(3)`
 - setzt Betriebssystem- oder (andere) Laufzeitsystemaufrufe ab
- **Systemaufrufstümpfe** (des Betriebssystems)
 - bei UNIX z.B. die Bibliotheksfunktionen `read(2)` und `write(2)`
 - setzen Aufrufe an das Betriebssystem ab
 - Systemaufruf $\mapsto$ Abfangstelle im Betriebssystem $\sim$ *Trap*
- bilden zusammengebunden das **Maschinenprogramm** (Lademodul)



Grobstruktur von Maschinenprogrammen I

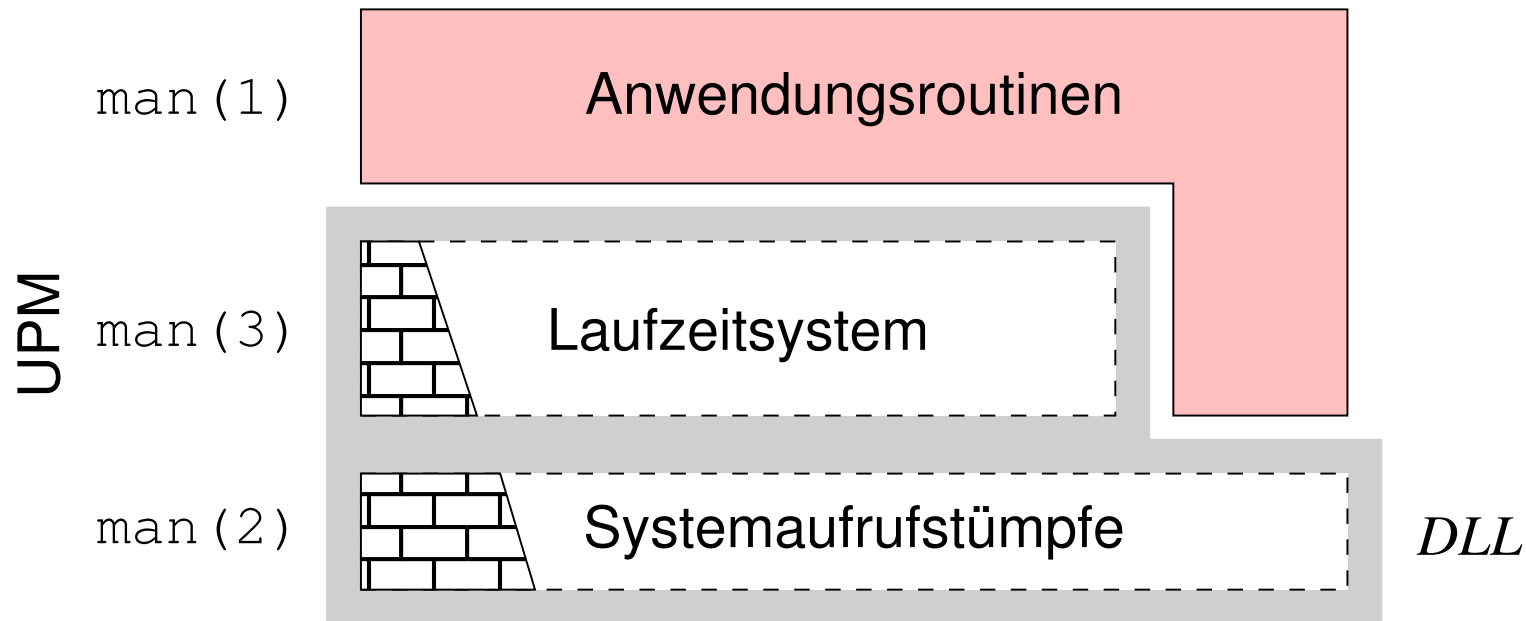


- statisch gebundenes Programm
 - zum Ladezeitpunkt des Programms sind alle Referenzen aufgelöst
 - Compiler und Assembler lösen lokale (interne) Referenzen auf
 - der Binder löst globale (`extern`, `.globl`) Referenzen auf
 - Schalter `-static` bei `gcc(1)` oder `ld(1)`

Laufzeitüberprüfung von Bibliotheksreferenzen entfällt



Grobstruktur von Maschinenprogrammen II



- dynamisch gebundenes Programm
 - Bibliotheksfunktionen erst bei Bedarf (vom Betriebssystem) einbinden
 - Ebene_[2,3] erkennt einen **Bindungsfehler** (*link trap*, Multics [4])
 - den ein **bindender Lader** (*linking loader*) im Betriebssystem behandelt
 - dynamische Bibliothek (*shared library*, *dynamic link library* (DLL))
- Laufzeitüberprüfung von Bibliotheksreferenzen $\leadsto$ **Teilinterpretation**



Gliederung

Einführung
Hybrid

Programmhierarchie
Hochsprachenkonstrukte
Assemblersprachenanweisungen
Betriebssystembefehle

Organisationsprinzipien
Funktionen
Komponenten

Zusammenfassung



- Bedeutung der Maschinenprogrammzebene als **Hybrid** skizziert
 - **Maschinenbefehle** der Befehlssatzebene und **Betriebssystembefehle**
 - letztere als **Systemaufrufe** abgesetzt und partiell interpretiert
 - Betriebssysteme als Programme der Befehlssatzebene eingeordnet
- Ebene_[2,3] als **Programmhierarchie** virtueller Maschinen erklärt
 - Repräsentation einer **Systemfunktion** in Hochsprache, Assemblersprache und symbolischen Maschinenkode behandelt
 - in dem Zusammenhang die Implementierung von Systemaufrufen erörtert: **Systemaufrufstumpf** und **Systemaufrufzuteiler**
 - Befehlsabruf- und ausführungszyklus eines Betriebssystems und damit die Funktion als **Interpreter** (von Betriebssystembefehlen) verdeutlicht
- **Organisationsprinzipien** von Maschinenprogrammen präsentiert
 - domänenübergreifende **Aufrufhierarchie** von Funktionen verschiedener Abstraktionsebenen im Zuge der Ausführung eines Systemaufrufs
 - Ebene₃-Programme sind ein Ensemble von (a) Anwendungsroutinen und (b) Laufzeitsystem und Systemaufrufstümpfen
 - Komplex (b) ist Teil einer statischen/dynamischen **Programmbibliothek**



Literaturverzeichnis I

- [1] FOG, A. :
Optimization Manuals.
4. Instruction Tables.
Technical University of Denmark, Dez. 2014

- [2] INTEL CORPORATION (Hrsg.):
Addendum—Intel Architecture Software Developer's Manual.
2: Instruction Set Reference.
Intel Corporation, 1997.
(243689-001)

- [3] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Virtuelle Maschinen.
In: LEHRSTUHL INFORMATIK 4 (Hrsg.): *Systemprogrammierung.*
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien), Kapitel 5.1

- [4] ORGANICK, E. I.:
The Multics System: An Examination of its Structure.
MIT Press, 1972. –
ISBN 0-262-15012-3



- [5] VASUDEVAN, A. ; YERRABALLI, R. ; CHAWLA, A. :
A High Performance Kernel-Less Operating System Architecture.
In: ESTIVILL-CASTRO, V. (Hrsg.) ; Australian Computer Society (Veranst.):
Proceedings of the Twenty-Eighth Australasian Computer Science Conference
(ACSC2005) Bd. 38 Australian Computer Society, CRPIT, 2005. –
ISBN 1-920682-20-1, S. 287-296
- [6] WIKIPEDIA:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Hybrid>.
2015



Systemaufrufbeschleunigung I

- einen Systemaufruf konventionell über eine **Abfangstelle** (*trap*) laufen zu lassen, ist vergleichsweise „schwergewichtig“
 - Systemaufruf (`int n/iret`) in Relation zu Prozeduraufruf (`call/ret`)
 - je nach x86-Modell, Faktor 3–30 mehr an Latenz (Prozessortakte, [1])
- im Zusammenhang mit der Funktionsweise gängiger Betriebssysteme (z.B. Linux) ist dies zudem unzweckmäßig
 - der im Rahmen der Unterbrechungsbehandlung gesicherte Prozessorstatus entspricht nicht der Wirklichkeit des unterbrochenen Prozesses
 - vielmehr geschieht diese Statussicherung, bevor die Prozessorregister zur Argumentenübergabe verwendet werden (vgl. S. 20, Zeile 2)
 - die Statussicherung durch das Betriebssystem bleibt **inkonsistent** (S. 14)
- der eigentlich bedeutsame Aspekt eines Systemaufrufs ist jedoch der **Domänenwechsel**, der „leichtgewichtig“ bewirkt werden kann
 - für x86-Prozessoren wurden hierfür dedizierte Ebene₂-Befehle eingeführt
 - `sysenter/sysexit` (Intel, [2]) und `syscall/sysret` (AMD)
 - diese ändern lediglich den **Arbeitsmodus** des Ebene₂-Prozessors (CPU)



`sysenter/syscall` unprivilegiert $\mapsto$ privilegiert (d.h., Ebene₃ $\mapsto$ 2)
`sysexit/sysret` privilegiert $\mapsto$ unprivilegiert (d.h., Ebene₂ $\mapsto$ 3)

- Verwendung im Maschinenprogramm (Ebene₃) für Linux:

Umschaltung hin zur Ebene₂

```
1  __kernel_vsycall:
2      pushl %ecx
3      pushl %edx
4      pushl %ebp
5      movl  %esp,%ebp
6      sysenter
```

Fortsetzung auf Ebene₃

```
7  SYSENTER_RETURN:
8      popl  %ebp
9      popl  %edx
10     popl  %ecx
11     ret
```

Sysexit erwartet den PC in %edx und den SP in %ecx, Werte die der Kern definiert:
► %ecx $\leftarrow$ %ebp und
► %edx $\leftarrow$ &Zeile 7.
Die Registerinhalte müssen daher auf Ebene₃ gesichert und wiederhergestellt werden.

- Aufruf ersetzt `int $0x80` im Systemaufrufstumpf
- `sysenter` bewirkt Sprung zu `sysenter_entry` im Kern
- Ausführung von `sysexit` auf Ebene₂ bewirkt Rücksprung an Zeile 7
- der Wert von `SYSENTER_RETURN` ist eine „Betriebssystemkonstante“

- der Mechanismus kann die Systemaufruf Latenz des Ebene₂-Prozessors signifikant verringern (z.B. von 181 auf 92 Taktzyklen [5])

