

Betriebssystemtechnik

Adressräume: Trennung, Zugriff, Schutz

II. Systemaufruf

Wolfgang Schröder-Preikschat

3. Mai 2022



Rekapitulation

- Mehrebenenmaschinen

- Teilinterpretierung

Funktionale Hierarchie

- Analogie

- Abstraktion

Implementierung

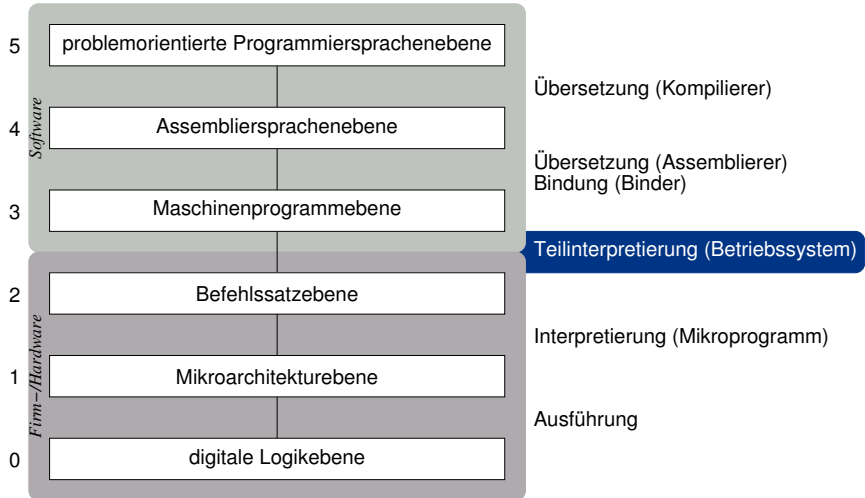
- Entvirtualisierung

- Befehlsarten

- Ablaufkontext

Zusammenfassung

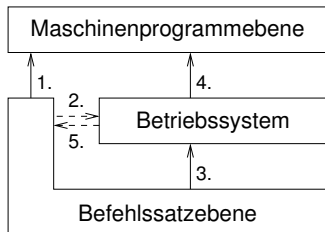




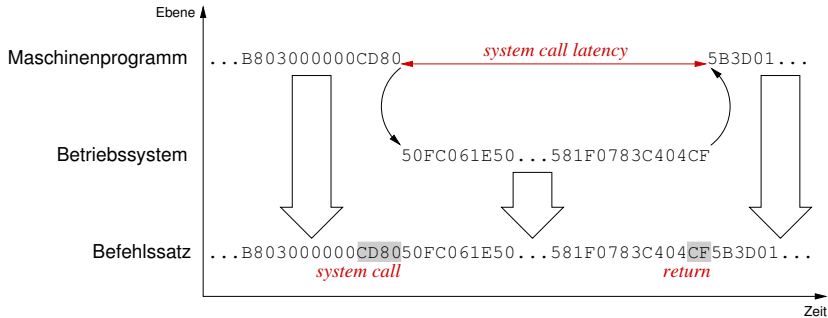
1. Die Befehlssatzebene interpretiert das Maschinenprogramm befehlsweise,
2. setzt dessen Ausführung aus,
 - Ausnahmesituation
 - **Programmunterbrechung**startet das Betriebssystem und
3. interpretiert die Programme des Betriebssystems befehlsweise.

Folge von 3.: **Ausführung von Betriebssystemprogrammen**

4. Das *Betriebssystem interpretiert* das soeben oder zu einem früheren Zeitpunkt unterbrochene Maschinenprogramm¹ befehlsweise und
5. instruiert die Befehlssatzebene, die Ausführung des/eines zuvor unterbrochenen Maschinenprogramms¹ wieder aufzunehmen.



¹Gegebenenfalls teilinterpretiert sich das Betriebssystem selbst partiell!



- Ausführung eines Maschinenprogramms
- Auslösung eines Systemaufrufs durch den Prozessor
- Verzweigung zum Betriebssystem und Behandlung des Systemaufrufs
- Beendigung des Systemaufrufs
- Rückverzweigung zum Maschinenprogramm



Rekapitulation

Mehrebenenmaschinen

Teilinterpretierung

Funktionale Hierarchie

Analogie

Abstraktion

Implementierung

Entvirtualisierung

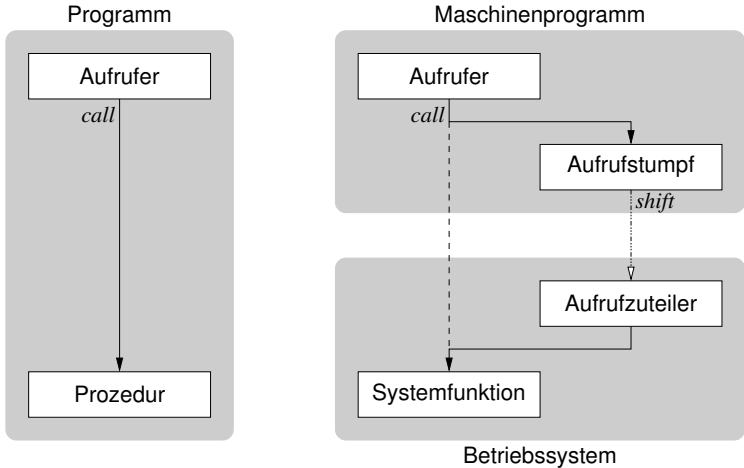
Befehlsarten

Ablaufkontext

Zusammenfassung



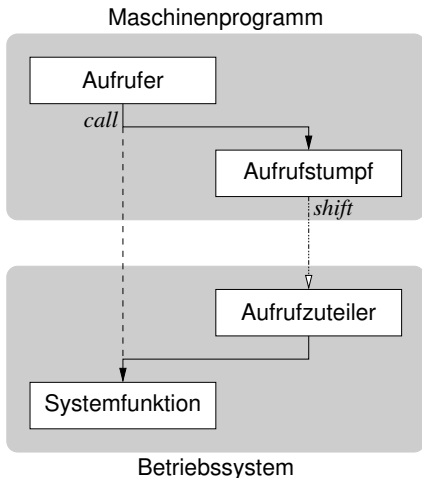
Prozedur- vs. Systemaufruf



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



Abstraktion von Betriebssystemabschottung



Ortstransparenz

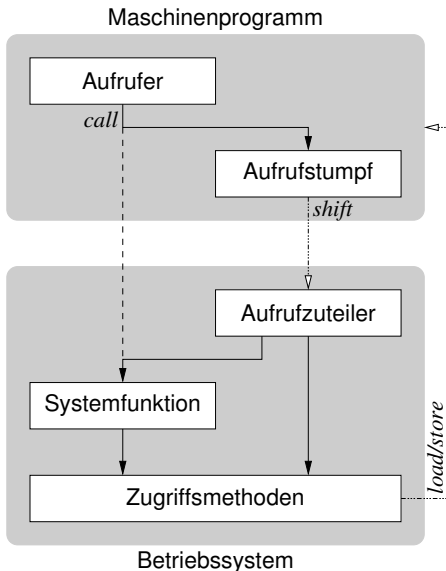
- durch den Aufrufstumpf
 - für den Aufrufer
- durch den Aufrufzuteiler
 - für die Systemfunktion

Entkopplung

- des Maschinenprogramms
 - von Programmen des Betriebssystems
- ↪ ursprüngliches Anliegen



Abstraktion von Maschinenprogrammabschottung



Ortstransparenz

- durch den Aufrufstumpf
 - für den Aufrufer
- durch den Aufrufzuteiler
 - für die Systemfunktion

Entkopplung

- des Maschinenprogramms
- von Programmen des Betriebssystems

Zugriffstransparenz

- durch Zugriffsmethoden
 - für den Aufrufzuteiler
 - für die Systemfunktion



Standard ist die **synchrone Programmunterbrechung** (*trap*)

- Ausnahme (*exception*) von der „normalen“ Programmausführung

OS/360 ■ `svc`, für System/360 und danach

Unix V6 ■ `trap`, für PDP 11

Windows ■ `int $0x2e`

Linux ■ `int $0x80`, für x86

■ `swi`, für ARM

■ `t`, für SPARC

MacOS ■ `$0xa`, für m68k: *A-traps*, illegaler Operationskode²

■ `int $0x80`, für x86

- im Vergleich zum normalen Prozeduraufruf, sehr kostspielig (S. 27)

Avantgarde sind Ansätze, die im Grunde frei von Aufrufsemantik sind

- der Fokus liegt auf **Moduswechsel**: `sysenter/syscall` (x86-64)

²Motorola verwendete Befehle beginnend mit `11112` (reserviert für 68881, FPU-Koprozessor) und `10102` niemals in Prozessoren der 68000-Familie.

Rekapitulation

Mehrebenenmaschinen

Teilinterpretierung

Funktionale Hierarchie

Analogie

Abstraktion

Implementierung

Entvirtualisierung

Befehlsarten

Ablaufkontext

Zusammenfassung



- Systemaufruf als Konstrukt **problemorientierter Programmiersprache**

```
1 int done;  
2 char buf[1];  
3  
4 done = read(0, buf, sizeof(buf));
```

- seine semantisch äquivalente Umsetzung in Assemblersprache (x86)

- `gcc -O -m32 -fomit-frame-pointer -fno-pic -S`

```
1 subl $16, %esp      ; dispose parameter block:  
2 pushl $1           ;   input buffer: length (in bytes)  
3 pushl $buf         ;   input buffer: address  
4 pushl $0           ;   file descriptor: standard input  
5 call read          ; execute system function  
6 movl %eax, done    ; save return code  
7 addl $28, %esp     ; release parameter block
```



- Systemaufruf als Konstrukt der **Maschinenprogrammzebene**:

```
1 read:
2   pushl %ebx           ; backup callee-save register
3   movl  16(%esp), %edx ; pass 3rd input parameter
4   movl  12(%esp), %ecx ; pass 2nd input parameter
5   movl  8(%esp), %ebx  ; pass 1st input parameter
6   scar  $3             ; perform system call and return
7   popl  %ebx           ; restore callee-save register
8   ret
```

- problemspezifische Varianten, je nach **Betriebssystembefehlsart**:

- Primitivbefehl (RISC-artig), im Beispiel hier (Linux-artig) und *ff*.
 - Anzahl der zu sichernden nichtflüchtigen (*callee-save*) Register
 - Hauptspeicher oder flüchtige (*caller-save*) Register als Sicherungspuffer
 - stapel- oder registerbasierte Parameterübergabe
 - rückkehrende oder rückkehrlose Interaktion mit dem Betriebssystem
- Komplexbefehl (CISC-artig), vgl. auch S. 21



- rückkehrender Systemaufruf mit zwei Eingabeparametern:

```
1 kill:
2   movl %ebx, %edx    ; backup into caller-save register
3   movl 8(%esp), %ecx ; pass 2nd input parameter
4   movl 4(%esp), %ebx ; pass 1st input parameter
5   scar $37          ; perform system call and return
6   movl %edx, %ebx   ; restore from caller-save register
7   ret
```

- rückkehrloser Systemaufruf mit einem Eingabeparameter:

```
1 _exit:
2   movl 4(%esp), %ebx ; pass input parameter
3   sc   $252          ; perform system call, no return
```

- rückkehrender parameterloser Systemaufruf:

```
1 getpid:
2   scar $20           ; perform system call and return
3   ret
```



■ Absetzen des Systemaufrufs

```
1 .macro sc scn
2     movl  \scn, %eax    ; pass system call number
3     int   $128         ; cause software interrupt
4 .endm
```

■ Systemaufruf und Fehlerbehandlung nach Rückkehr

```
1 .macro scar scn
2     sc     \scn        ; perform system call and return
3     cmpl  $-4095, %eax ; check for system call error
4     jb    .s\@         ; normal operation, if applicable
5     neg   %eax         ; derive (positiv) error code
6     movl  %eax, errno  ; put aside for possibly reworking
7     movl  $-1, %eax    ; indicate failure of operation
8 .s\@:          ; come here if error free
9 .endm
```

■ Platzhalter für den Fehlercode (im Datensegment, .data)

```
1 .long  errno
```



- Problem: Schutzdomänen überschreitende **Ausnahmeauslösung**
 - normale Funktionsergebnisse von ausnahmebedingten unterscheiden
 - eine für das gesamte Rechensystem **effiziente Umsetzung** durchsetzen
- Lösungen dazu hängen ab von Betriebssystem und Befehlssatzebene
 - Wertebereich für Funktionsergebnisse beschneiden (z. B. Linux)
 - Wert im Rückgaberegister (%eax) zeigt den Ausnahme- oder Normalfall an
$$\begin{array}{lll} v \in [-1, -4095] & \Rightarrow & v \text{ ist Fehlercode} & \geq & 0xffffffff000 \text{ (x86)} \\ \text{sonst} & \Rightarrow & v \text{ ist Funktionsergebnis} & < & 0xffffffff000 \text{ (x86)} \end{array}$$
 - betriebssystemseitig einfach, sofern *alle* Funktionsergebnisse dazu passen
 - Übertragsmerker (*carry flag*) im Statusregister setzen³
 - Stapelrahmen (*stack frame*) des Systemaufrufs so manipulieren, dass bei Rückkehr der Merker den Ausnahme- (1) oder Normalfall (0) anzeigt
 - betriebssystemseitig mit größerem Mehraufwand (*overhead*) verbunden
- als **Befehlssatzebenerweiterung** wäre der Merkeransatz konsequent

³Jeder Merker zur Steuerung bedingter Sprünge eignet sich dafür.


```
1  scd :
2    pushl %ebp
3    pushl %edi
4    pushl %esi
5    pushl %edx
6    pushl %ecx
7    pushl %ebx
8    cmpl  $NJTE,%eax
9    jae   scd_fault
10   call  *jump_table(,%eax,4)
11  scd_leave :
12   popl  %ebx
13   popl  %ecx
14   popl  %edx
15   popl  %esi
16   popl  %edi
17   popl  %ebp
18   iret
```

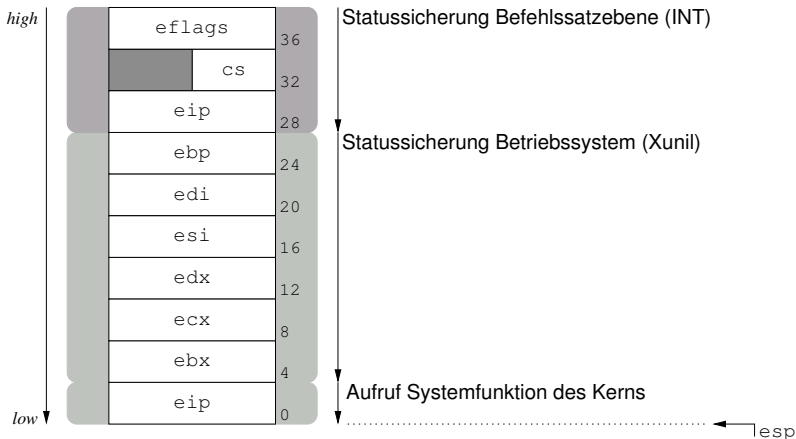
system call dispatcher:

- 2–7 i Sicherung
- ii Parametertransfer
- 8–9 Überprüfung
- 10 Ausführung
- 12–17 Wiederherstellung
- 18 Wiederaufnahme

Fehlerbehandlung

```
1  scd_fault :
2    movl  $-ENOSYS,%eax
3    jmp   scd_leave
```





- Stapelaufbau⁴ nach Aufruf der Systemfunktion über die Sprungtabelle
 - `call *jump_table(,%eax,4)`

⁴x86 real-address mode



```
1 extern int sys_ni_syscall(void);
2 extern int sys_exit(int);
3 extern int sys_fork(void);
4 extern int sys_read(int, void*, int);
5 extern int sys_write(int, void*, int);
6 ...
7
8 #define NJTE 326 /* number of jump table entries */
9
10 int (*jump_table[NJTE])() = { /* opcode */
11     sys_ni_syscall, /* 0 */
12     sys_exit, /* 1 */
13     sys_fork, /* 2 */
14     sys_read, /* 3 */
15     sys_write, /* 4 */
16     ...
17 };
```



```
1  asmlinkage
2  ssize_t sys_read(unsigned 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 }
```

asmlinkage

Instruiert gcc, die Funktionsparameter auf dem Stapel zu erwarten und nicht in Prozessorregistern.

```
1  asmlinkage long sys_ni_syscall(void) {
2      return -ENOSYS;
3  }
```



■ Primitivbefehl (x86)

```

1  movl  op6, %ebp
2  movl  op5, %edi
3  movl  op4, %esi
4  movl  op3, %edx
5  movl  op2, %ecx
6  movl  op1, %ebx
7  movl  opc, %eax
8  int   $42

```

Beachte

- bei Primitivbefehlen erfolgt die Auswertung der Operanden dynamisch, zur Laufzeit
 - Prozessorregister müssen freigemacht werden
- bei Komplexbefehlen geschieht dies statisch, zur Assembler-/Bindezeit, und registerlos

■ Komplexbefehl (x86): uniforme (li.) oder individuelle (re.) Operanden

```

1      int $42
2  .long  opc
3  .long  op1
4  .long  op2
5  further operands
6  .long  opn

```

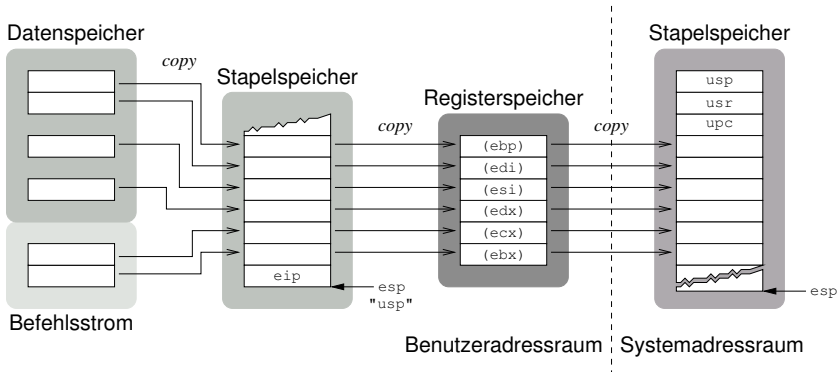
```

1      int $42
2  .byte  opc
3  .align 4
4  .long  op1
5  .long  op2
6  further operands/alignments
7  .long  opn

```

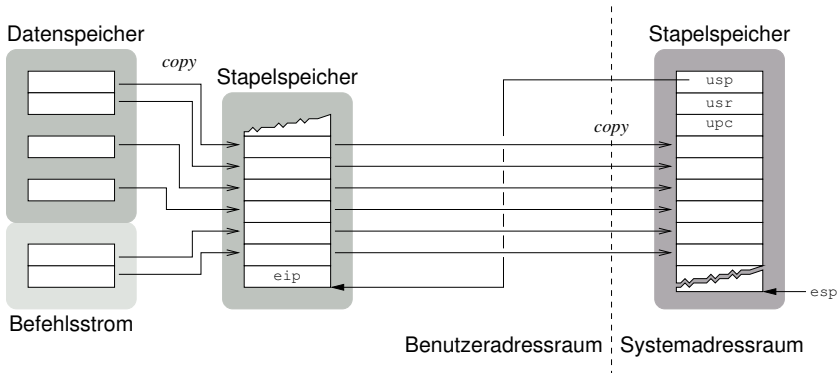


Parametertransfer: Primitivbefehl (Xunil_{x86})



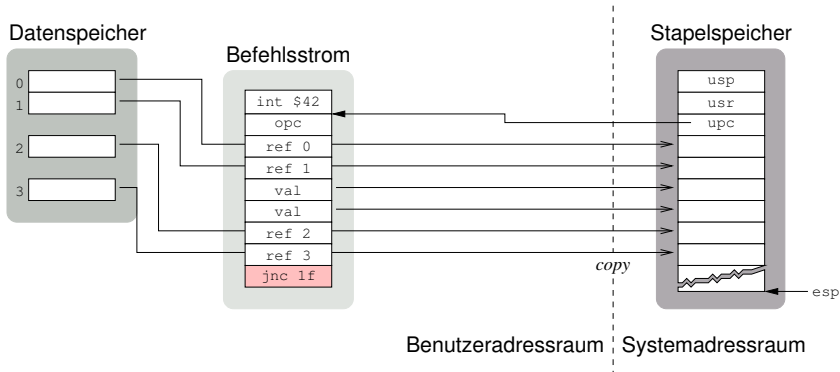
- **Werteübergabe** (*call by value*) für alle Parameter
 - Variable: Befehlsoperand ist Adresse im Datenspeicher inkl. Register
 - Direktwert: Bestandteil des Befehls im Befehlsstrom
- Systemaufrufe als Primitivbefehle sind (meist) **Unterprogramme**





- Systemaufrufparameter werden nicht (mehr) in Registern transferiert
 - Systemaufrufe sind Unterprogramme, Parameter werden gestapelt
 - in Ergänzung zum Registeransatz, falls die Parameteranzahl zu groß ist
- das Betriebssystem lädt Parameter direkt vom Benutzerstapel





- das Betriebssystem lädt Parameter direkt vom Benutzeradressraum
 - **Werteübergabe** (*call by value*) für alle Direktwerte
 - **Referenzübergabe** (*call by reference*) sonst
- Systemaufrufe als Komplexbefehle sind (meist) **Makroanweisungen**



- Primitivbefehl
 - +/- Werteübergabe von Operanden im Maschinenprogramm
 - +/- dynamische Operandenauswertung (Laufzeit)
 - durch Prozessorregistersatz begrenzte Operandenanzahl
 - betriebssystemseitig bestenfalls teilweise Zustandssicherung
 - maschinenprogrammseitiger Mehraufwand zum Operandenabruf
- Komplexbefehl
 - + entspricht dem (statischen) Befehlsformat der Befehlssatzebene
 - + kompakte Darstellung/Kodierung von Systemaufrufen
 - + vollständige betriebssystemseitige Zustandssicherung
 - +/- statische Operandenauswertung (Assembler- oder Bindezeit)
 - Referenzübergabe von Operanden im Maschinenprogramm
 - betriebssystemseitiger Mehraufwand zum Operandenabruf
- wie gravierend die Negativpunkte sind, hängt vom Anwendungsfall ab



- reale Sicht: ursprünglicher Zweck von Systemaufrufen (um 1955)
 - transiente Maschinenprogramme und residente Systemsoftware trennen
- logische Sicht: Systemaufrufe aktivieren einen privilegierten Kontext
 - Abschottung des Betriebssystemadressraums
 - Wechsel hin zum eigenen Adressraum des Betriebssystems
 - Erweiterung um den Adressraum des aufrufenden Maschinenprogramms
 - Erlaubnis zur (eingeschränkten) Durchführung bevorzogter Funktionen
 - Speicher-/Geräteverwaltung, Ein-/Ausgabe, . . . , Betriebssystemdienste
 - allgemein: direkte Ausführung von Programmen der Befehlssatzebene
 - Zusicherung eigener Softwarebetriebsmittel zur Programmausführung
 - Stapelspeicher: $1 : 1 \rightsquigarrow$ prozessbasierter, $N : 1 \rightsquigarrow$ ereignisbasierter Kern
 - Prozessorregistersatz: Sicherung/Wiederherstellung oder Spiegelung



Abschottung und bevorrechtigte Ausführung

Systemaufrufe als eine synchrone Programmunterbrechung (*trap*) zu realisieren, ist ein mögliches Mittel zum Zweck und kein Muss

- effektiv müssen mit dem Mittel zwei Eigenschaften durchsetzbar sein:
 - i **privilegierter Arbeitsmodus** für den Betriebssystemkern
 - ii **Integrität** – Verhinderung einer Infiltration⁵ ersterer Eigenschaft
- ein *Trap* ist hinreichendes Mittel, aber auch vergleichsweise teuer
 - Zustandssicherung, Speicher- bzw. Tabellensuchen (*table look-up*)

Systemaufrufbeschleunigung durch **Spezialbefehle** (Intel, Pentium II)

- privilegierten Programmtext nahezu „in Reihe“ (*inline*) anordnen: x86

```
1     movl $1f, %edx ; user mode continuation address
2     movl %esp, %ecx ; user mode stack pointer
3     sysenter      ; enlist in priviledged mode
4 1:
```

- vgl. auch VDSO (*virtual dynamic shared object*) in Linux

⁵Im Sinne von „verdeckte Spionage und Sabotage in anderen Strukturen“.

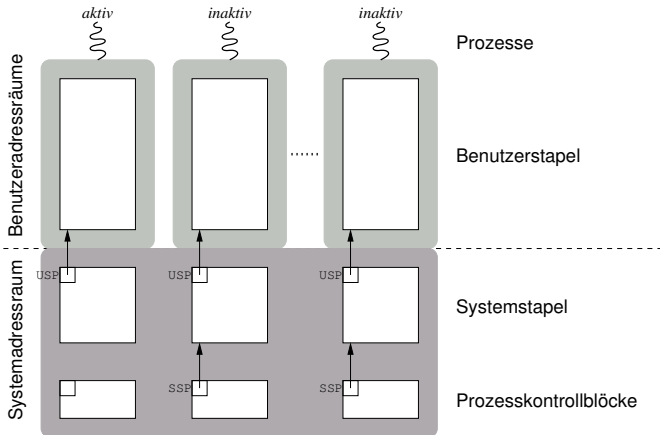
- Kontextwechsel der CPU ohne Kontextsicherung und Tabellensuche
 - `sysenter`
 - setzt CS, EIP und SS, ESP auf systemsspezifische Werte
 - schaltet Segmentierung ab (CS und SS: $[0..2^{32} - 1]$)
 - sperrt asynchrone Programmunterbrechungen (IRQ)
 - aktiviert Schutzring 0
 - `sysexit`
 - setzt CS und SS auf prozessspezifische Werte
 - setzt EIP/ESP auf die in EDX/ECX stehenden Werte
 - aktiviert Schutzring 3 – nur von Ring 0 aus ausführbar
- das Betriebssystem belegt **modellspezifische Register** der CPU vor
 - MSR (*model-specific register*) 174h, 175h, 176h: CS, ESP und EIP, resp.
 - bei `sysenter`: $SS = MSR[174h] + 8$
 - bei `sysexit`: $CS = MSR[174h] + 16$, $SS = MSR[174h] + 24$
 - mit $MSR[174h]$ als eine Art „Basisindexregister“ in die Segmenttabelle
- Kontextsicherung liegt komplett in Hand des Benutzerprozesses. . .
- alternativ: `syscall/sysret` (ursprünglich AMD; aber auch Intel 64)



- Prozessorregistersatz
 - im Regelfall durch Sicherung und Wiederherstellung von Registerinhalten
 - etwa der Stapelzeiger bei x86 [2]: Tupel (SS, ESP) sichern⁶
 - Statusregister und Befehlszeiger (*program counter*) sichern
 - alle, nur flüchtige oder wirklich verwendete Arbeitsregister sichern [4]
 - ↪ dazu den Stapelspeicher des Betriebssystemkerns nutzen \leadsto Stapelwechsel
 - verschiedentlich auch (zusätzlich) durch Spiegelung einzelner Register
 - etwa der Stapelzeiger beim MC68020: A7 \Leftrightarrow SP und USP [3]
- Stapelspeicher
 - dem Systemaufruf einen Stapel für den Betriebssystemkern zuteilen
 - ↪ logische Konsequenz, wenn der Betriebssystemadressraum abgeschottet ist
 - einen Stapel im Betriebssystem für alle Kernfäden im Maschinenprogramm
 - ↪ typisch für ereignisbasierte Kerne ($N : 1$)
 - einen Stapel im Betriebssystem pro Kernfaden im Maschinenprogramm
 - ↪ typisch für prozessbasierte Kerne ($1 : 1$)
 - ähnlich wird (oft) bei asynchronen Programmunterbrechungen verfahren

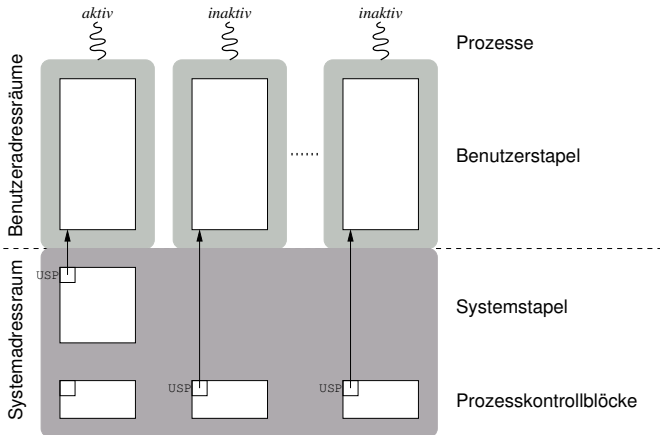
⁶Ausnahme *real-address mode*.





- Prozessverdrängung/-blockierung im Kern ist (fast) überall möglich





- Prozessverdrängung/-blockierung im Kern ist bedingt möglich [1]



Rekapitulation

Mehrebenenmaschinen

Teilinterpretierung

Funktionale Hierarchie

Analogie

Abstraktion

Implementierung

Entvirtualisierung

Befehlsarten

Ablaufkontext

Zusammenfassung



- Rekapitulation
 - Maschinenprogramme werden durch Betriebssysteme teilinterpretiert
 - Teilinterpretierung wird (insb. auch) durch Systemaufrufe ausgelöst
- funktionale Hierarchie
 - Systemaufrufstümpfe trennen Maschinenprogramm von Betriebssystem
 - im Betriebssystem aktiviert ein Systemaufrufzuteiler die Systemfunktionen
 - der Systemaufruf ist ein adressraumübergreifender Prozeduraufruf
- Implementierung
 - ein Systemaufruf ist als Primitiv- oder Komplexbefehl realisiert
 - Primitivbefehle nutzen (ausschließlich) Register zur Parameterübergabe
 - Komplexbefehle erlauben einen unverfälschten Zustandsabzug
 - Fehler werden durch spezielle Rückgabewerte oder Merker signalisiert
 - einem Systemaufruf ist ein Betriebssystemstapel 1 : 1 oder $N : 1$ zugeteilt

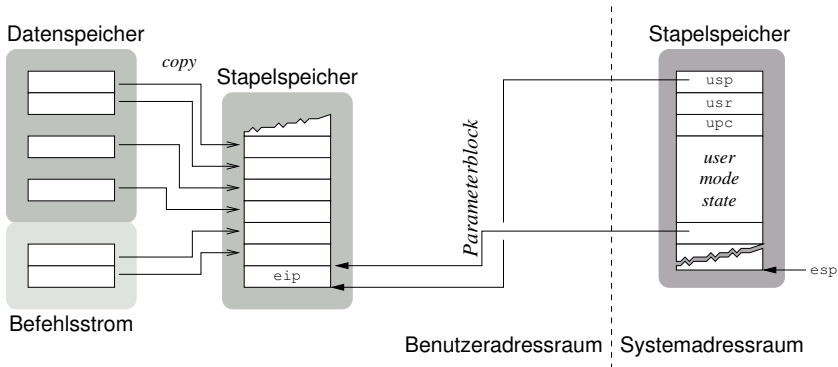


- [1] DRAVES, R. ; BERSHAD, B. N. ; RASHID, R. F. ; DEAN, R. W.:
Using Continuations to Implement Thread Management and Communication in Operating Systems.
In: *Proceedings of the Thirteenth ACM Symposium on Operating System Principles (SOSP 1991)*, ACM Press, 1991. – ISBN 0-89791-447-3, S. 122-136
- [2] INTEL CORPORATION (Hrsg.):
Intel 64 and IA-32 Architectures: Software Developer's Manual.
Order Number: 325462-045US.
Santa Clara, California, USA: Intel Corporation, Jan. 2013
- [3] MOTOROLA SEMICONDUCTOR PRODUCTS INC. (Hrsg.):
MC68020-MC68EC02009E Microprocessors User's Manual.
First Edition.
Phoenix, Arizona, USA: Motorola Semiconductor Products Inc., 1992
- [4] SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. ; KLEINÖDER, J. :
Systemprogrammierung.
http://www4.informatik.uni-erlangen.de/Lehre/WS08/V_SP, 2008 ff.



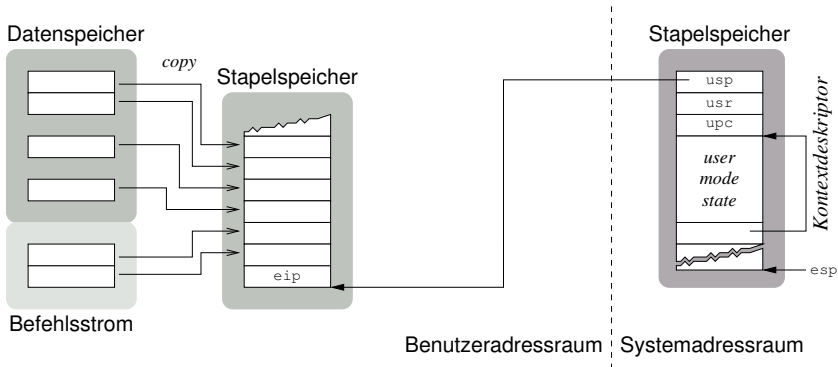
- [5] TANENBAUM, A. S.:
Multilevel Machines.
In: *Structured Computer Organization.*
Prentice-Hall, Inc., 1979. –
ISBN 0-130-95990-1, Kapitel 7, S. 344-386





- die Systemfunktion lädt Parameter direkt vom Benutzerstapel
 - indirekte Adressierung durch einen Zeiger auf den Parameterblock
 - Verzicht auf Ortstransparenz in der Systemfunktion
- der Prozessorstatus ist komplett betriebssystemseitig gesichert





- Systemaufrufparameter indirekt über einen Kontextdeskriptor laden
 - den Parameterblock vom Benutzerstapelzeiger ableiten
 - unterstützt insb. die merkerbasierte Signalisierung von Fehlercodes
- Offenlegung des durch die CPU gesicherten Prozessorzustands

