

# Systemprogrammierung

*Grundlagen von Betriebssystemen*

Teil B – IV. Einleitung

Wolfgang Schröder-Preikschat

12. Mai 2020



# Agenda

---

Einordnung

Fallstudie

Speicherbelegung

Analyse

Begriffsdeutung

Literaturauszüge

Zusammenfassung



# Gliederung

---

Einordnung

Fallstudie

Speicherbelegung

Analyse

Begriffsdeutung

Literaturauszüge

Zusammenfassung



# Systemprogrammierung $\rightsquigarrow$ Betriebssysteme

- Infrastruktursoftware für Rechensysteme
  - was Betriebssysteme sind, hat schon „Glaubenskriege“ hervorgerufen
    - das Spektrum reicht von „Winzlingen“ bis hin zu „Riesen“
    - simple Prozeduren  $\Leftrightarrow$  komplexe Programmsysteme
  - entscheidend ist, dass Betriebssysteme nie dem Selbstzweck dienen
- jedes Rechensystem wird durch ein Betriebssystem betrieben
  - Ausnahmen bestätigen die Regel...



# „Sein oder Nichtsein, das ist hier die Frage“

1

- Betriebssysteme sind unerlässliches **Handwerkszeug** der Informatik
  - mit dem umzugehen ist zur Benutzung eines Rechensystems
  - das gelegentlich zu beherrschen, anzupassen und auch anzufertigen ist



- IBM: z/VM (vormals VM/CMS), z/OS



- DEC: VAX/VMS



- DOS (16-/32-Bit)-, NT- und CE-Linie



-      

<sup>1</sup>Shakespeare zur Unabänderlichkeit oder Beeinflussbarkeit des Schicksals.



- funktionale und nichtfunktionale Eigenschaften von Betriebssystemen werden durch die **Anwendungsdomäne** vorgegeben
    - gelegentlich passen bestehende „unspezifische“ Lösungen (z.B. Linux)
    - viel häufiger sind jedoch **anwendungsspezifische Lösungen** erforderlich
  - Systeme für den **Allgemeinzw**eck
    - Rechensysteme für die gängigsten Aufgaben einer Anwendungsdomäne
    - *die* Domäne der umseitig (S. 5) genannten Vertreter
  - Systeme für den **Spezialzweck**
    - Rechensysteme zur Steuerung oder Regelung „externer“ Prozesse
    - für gewöhnlich mit vorhersagbarem Laufzeitverhalten (**Echtzeitsysteme**)
- ↔ **eingebettete Systeme** (vgl. [11])
- das „Klugfon“ nicht mitgerechnet



# Gliederung

---

Einordnung

**Fallstudie**

Speicherbelegung

Analyse

Begriffsdeutung

Literaturauszüge

Zusammenfassung



Die Funktionsweise (auch) von Betriebssystemen zu verstehen, hilft **bemerkenswerte Erscheinungen** innerhalb eines Rechensystems zu begreifen und in ihrer Bedeutung besser einzuschätzen.

- **Eigenschaften** (*features*) von Betriebssystemen erkennen:
  - funktionale** ■ Verwaltung der Betriebsmittel (Prozessor, Speicher, Peripherie) für eine Anwendungsdomäne
  - nichtfunktionale** ■ dabei anfallender Zeit-, Speicher-, Energieverbrauch
    - d.h., **Gütemerkmale** einer Implementierung
- aus den funktionalen Eigenschaften resultierendes **Systemverhalten** unterscheiden von Fehlern (*bugs*) des Systems
  - um Fehler kann ggf. „herum programmiert“ werden
  - um zum Anwendungsfall unpassende Eigenschaften oft jedoch nicht

---

<sup>2</sup>Analytische Lernmethode, die die Vermittlung eines Stoffes als Gesamtheit in den Mittelpunkt stellt, um dann konstituierende Elemente weiter zu untersuchen.



- **zeilenweises Vorgehen:** Spaltenelemente  $j$  von Zeile  $i$  aufzählen

```
1 void by_row (int mx[], unsigned int n, int v) {
2     unsigned int i, j;
3     for (i = 0; i < n; i++)
4         for (j = 0; j < n; j++)
5             mx[i * n + j] = v;           /* "mx[i][j]" = v */
6 }
```

- **spaltenweises Vorgehen:** Zeilenelemente  $i$  von Spalte  $j$  aufzählen

```
7 void by_column (int mx[], unsigned int n, int v) {
8     unsigned int i, j;
9     for (j = 0; j < n; j++)
10        for (i = 0; i < n; i++)
11            mx[i * n + j] = v;           /* "mx[i][j]" = v */
12 }
```

**Gemeinsamkeit und Unterschied** (von vertauschten Zeilen abgesehen)

**funktional** erfüllen beide Varianten denselben Zweck

**nichtfunktional** unterscheiden sie sich ggf. im Laufzeitverhalten

<sup>3</sup>Erst zur Laufzeit bekannte Feldgrenzen (vgl. S. 34). Beachte:  $\text{mx}[] \equiv *mx.$



# Instanzenbildung und Initialisierung der Matrix

```
13 #include <stdlib.h>
14
15 main (int argc, char *argv[]) {
16     if (argc == 3) {
17         unsigned int n = atol(argv[2]);
18         if (n != 0) {
19             int *mx = (int*)calloc(n*n, sizeof(int));
20             if (mx != 0) {
21                 if (*argv[1] == 'R') by_row(mx, n, 42);
22                 else by_column(mx, n, 42);
23                 free(mx);
24             }
25         }
26     }
27 }
```

16 Verwendung: *<name>* *<way>* *<count>*

17 Größe einer Zeile bzw. Spalte einlesen

19 Matrixspeicher anfordern und löschen

21–22 zeilen-/spaltenweise Initialisierung mit 42

23 Matrixspeicher der Halde zurückgeben



# Laufzeitverhalten<sup>4</sup>

$N \times N$  Matrix, mit  $N = 11\,174 \approx 500$  MB

Betriebssystem	Zentraleinheit	Speicher	by_row()	by_column()	
Solaris	2 × 1 GHz UltraSPARC IIIi	8 GB	3.64r	27.07r	(a)
			2.09u	24.68u	
			1.11s	1.10s	
Windows XP (Cygwin)	2 × 3 GHz Pentium 4 XEON	4 GB	0.87r	11.94r	(b)
			0.65u	11.62u	
			0.21s	0.21s	
Linux 2.6.20	2 × 3 GHz Pentium 4 XEON	4 GB	0.89r	14.73r	(c)
			0.48u	14.34u	
			0.40s	0.39s	
	2 × 2.8 GHz Pentium 4	512 MB	51.23r	39.84r	(d)
			0.47u	14.34u	
			2.17s	2.09s	
Mac OS X 10.4	1.25 GHz PowerPC G4	512 MB	10.24r	106.72r	(e)
			0.69u	23.15u	
			2.12s	17.08s	
	1.5 GHz PowerPC G4	512 MB	10.11r	93.68r	(f)
			0.46u	23.71u	
			2.08s	6.85s	
1.25 GHz PowerPC G4	1.25 GB	2.17r	27.95r	(g)	
		0.43u	22.35u		
		1.50s	4.22s		

<sup>4</sup>time ./main x 11174, mit  $x \in (\mathbb{R}, \mathbb{C})$



# Wo uns der Schuh drückt. . .

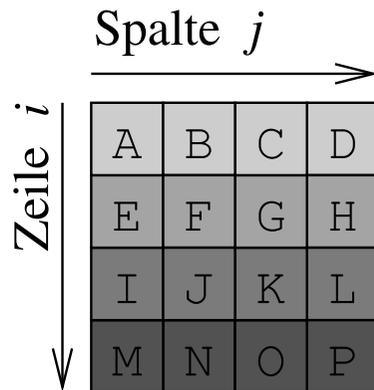
---

- (a)–(g) **Linearisierung** AuD, GRA
  - zweidimensionales Feld  $\mapsto$  eindimensionaler Arbeitsspeicher
- (a)–(g) **Zwischenspeicher** (*cache*) GRA
  - Zugriffsfehler (*cache miss*), Referenzfolgen
- (d) **Kompilierer & Magie** UEB
  - semantische Analyse, Erkennung gleicher Zugriffsmuster
- (d)–(f) **virtueller Speicher** SP
  - Seitenfehler (*pagefault*), Referenzfolgen
- (e)–(g) **Betriebssystemarchitektur** SP
  - Verortung der Funktion zur Seitenfehlerbehandlung

Sir Isaac Newton

*Was wir wissen, ist ein Tropfen, was wir nicht wissen, ist ein Ozean.*





zeilenweise Abspeicherung/Aufzählung



spaltenweise Abspeicherung/Aufzählung



- im Abstrakten könnte uns diese **Abbildung** egal sein
- im Konkreten jedoch nicht

Abspeicherung	Aufzählung	
zeilenweise	zeilenweise 😊	spaltenweise ☹️
spaltenweise	zeilenweise ☹️	spaltenweise 😊

### Fälle (a)–(g)

- Abspeicherung zeilenweise (C bzw. `main()`)
- Aufzählung zeilen- (`by_row()`) und spaltenweise (`by_column()`)



Entwicklung der Adresswerte  $A$  beim Zugriff auf die Elemente einer zeilenweise abgespeicherten Matrix mit Anfangsadresse  $\gamma$ :

$i \setminus j$	0	1	2	...	$N - 1$
0	0	1	2	...	$N - 1$
1	$N + 0$	$N + 1$	$N + 2$	...	$N + N - 1$
2	$2N + 0$	$2N + 1$	$2N + 2$	...	$2N + N - 1$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$
$N - 1$	$(N - 1)N + 0$	$(N - 1)N + 1$	$(N - 1)N + 2$	...	$(N - 1)N + N - 1$

- $A = \gamma + (i * N + j) * \text{sizeof}(\text{int})$ , für  $i, j = 0, 1, 2, \dots, N - 1$

### Fälle (a)–(g)

- linear im homogenen Fall (`by_row()`), Abspeicherung und Aufzählung sind gleichförmig  $\leadsto$  **starke Lokalität**
- sprunghaft, sonst (`by_column()`)  $\leadsto$  **schwache Lokalität**



- **Normalfall:** Datum befindet sich im Zwischenspeicher
  - Zugriffszeit  $\approx$  Zykluszeit der CPU, Wartezeit = 0
- **Ausnahmefall:** Datum befindet sich *nicht* im Zwischenspeicher
  - ↪ Zugriffsfehler  $\leadsto$  Einlagerung (Zwischenspeicherzeile, *cache line*)
    - Zugriffszeit  $\geq$  Zykluszeit des RAM, Wartezeit  $> 0$
    - **schlimmster Fall** (*worst case*): Zwischenspeicher ist voll  $\mapsto$  **GAU**
      - ↪ Zugriffsfehler  $\leadsto$  Ein- und ggf. Auslagerung (Zwischenspeicherzeile)
        - Zugriffszeit  $\geq 2 \times$  Zykluszeit des RAM, Wartezeit  $\gg 0$
- die Effektivität steht und fällt mit der **Lokalität** der Einzelzugriffe
  - starke Lokalität erhöht die **Trefferwahrscheinlichkeit** erheblich

## Fälle (a)–(g)

- beide Varianten verursachen bei Ausführung den **GAU**
- `by_column()`  $\leadsto$  schwache Lokalität: **schlechte Trefferquote**



- **funktionale Eigenschaft**  $\mapsto$  „was“ etwas tut
  - beide Varianten tun das gleiche — nur in verschiedener Weise
- **nichtfunktionale Eigenschaft**  $\mapsto$  „wie“ sich etwas ausprägt
  - `by_row()` zählt Feldelemente entsprechend Feldabspeicherung auf
  - `by_row()` zeigt für gegebene Hardware günstigere Zugriffsmuster
  - ⋮
  - `by_row()` wird schneller als `by_column()` ablaufen können

### Fall (d): Beispiel eines wahren Mysteriums...

- `gcc -O -m32 -S` zeigte identischen Assemblersprachenkode
  - `by_column()` ist Kopie von `by_row()`
  - statische Analyse sagt gleiches Verhalten beider Varianten voraus
- Experiment brachte Messreihen mit extremen Ausschlägen hervor
  - „dynamische Umgebung“ verhält sich zugunsten von `by_column()`



Arbeitsspeicher hat mehr Kapazität als der Hauptspeicher<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Begrifflich sind Arbeits- und Hauptspeicher verschiedene Dinge!

- Hauptspeicher ist Zwischenspeicher  $\mapsto$  **Vordergrundspeicher**
  - von Programm- bzw. Adressraumteilen eines oder mehrerer Prozesse
- ungenutzte Bestände im Massenspeicher  $\mapsto$  **Hintergrundspeicher**
  - z.B. Plattenspeicher, SSD oder gar Hauptspeicher anderer Rechner
- gleiches Problem wie beim Zwischenspeicher (vgl. S. 15)
  - **Seitenumlagerung** (*paging*)  $\leadsto$  zeitaufwändige Ein-/Ausgabevorgänge
  - Zugriffszeit verlangsamt sich um einige Größenordnungen: ns  $\leadsto$  ms

Fälle (a)–(g): Zwickmühle wegen Hauptspeicherkapazität...

(d)–(f) beide Varianten verursachen den GAU (S. 15)

- kontraproduktiver **Seitenvorabruf** (*prepaging*) SP2

**sonst** fallen „nur“ Einlagerungsvorgänge an

- Prozess zieht sein Programm selbst in den Hauptspeicher



# Betriebssystemarchitektur

*Schönheit, Stabilität, Nützlichkeit — Venustas, Firmitas, Utilitas:  
Die drei Prinzipien von Architektur [7]*

- Systemfunktionen sind architektonisch verschieden ausgeprägt
  - sie teilen sich dieselben **Domänen** oder eben auch nicht
  - bzgl. Adressraum, Ausführungsstrang, Prozessor oder Rechnersystem
- architektonische und funktionale Merkmale widersprechen sich nicht
  - beide Arten bewirken jedoch gewisse **nichtfunktionale Eigenschaften**
    - z.B. verursachen domänenübergreifende Aktionen ggf. **Mehraufwand**

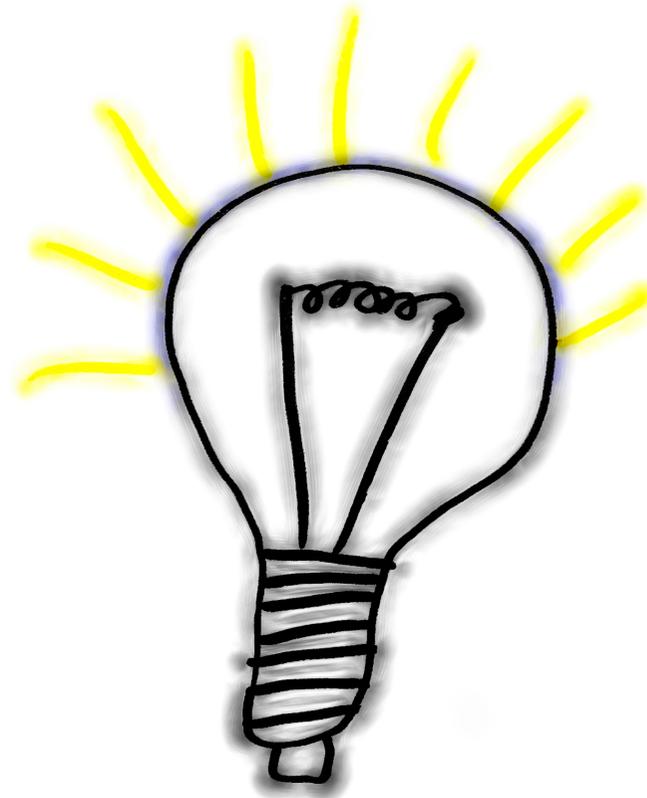
## Fälle (e)–(g)

- Mac OS X = NeXTStep  $\cup$  Mach 2.5  $\rightsquigarrow$  **mikrokernbasiert**
  - Systemfunktionen laufen als *Tasks* in eigenen Adressräumen ab
  - Tasks bieten Betriebsmittel für ggf. mehrere Ausführungsstränge
  - Ausführungsstränge sind die Zuteilungseinheiten für Prozessoren
- **externer Seitenabruf** (*external pager*) zur Seitenumlagerung
  - außerhalb des klassischen Kerns  $\rightsquigarrow$  domänenübergreifende Aktionen



„... und denen [...] ist ein Licht aufgegangen“<sup>5</sup>

---



---

<sup>5</sup>Matthäus 4.16



# Gliederung

---

Einordnung

Fallstudie

Speicherbelegung

Analyse

**Begriffsdeutung**

**Literaturauszüge**

Zusammenfassung

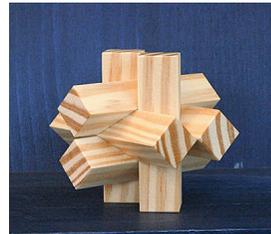


Was macht ein Betriebssystem [aus] ?



# Nachschlagewerke

*Summe derjenigen Programme, die als **residenter Teil** einer EDV-Anlage für den Betrieb der Anlage und für die Ausführung der Anwenderprogramme erforderlich ist. [8]*



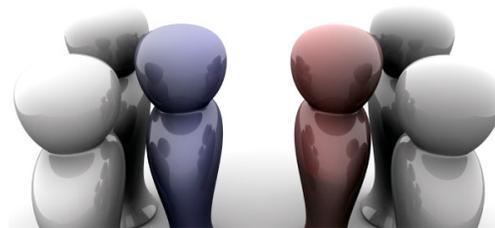
**Be'triebs·sys·tem** <n.; -s, -e; EDV> **Programmbündel**, das die Bedienung eines Computers ermöglicht. [12]



# Lehrbücher I

---

*Der Zweck eines Betriebssystems [besteht] in der **Verteilung von Betriebsmitteln** auf sich bewerbende Benutzer. [4]*

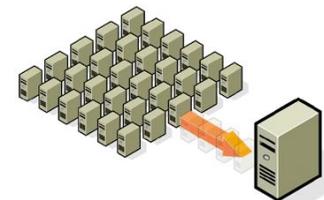


*Eine Menge von Programmen, die die Ausführung von Benutzerprogrammen und die **Benutzung von Betriebsmitteln steuern**. [3]*



## Lehrbücher II

Eine *Softwareschicht*, die alle Teile des Systems verwaltet und dem Benutzer eine Schnittstelle oder eine *virtuelle Maschine* anbietet, die einfacher zu verstehen und zu programmieren ist [als die nackte Hardware]. [10]



Ein Programm, das als *Vermittler* zwischen Rechnernutzer und Rechnerhardware fungiert. Der Sinn des Betriebssystems ist eine Umgebung bereitzustellen, in der Benutzer bequem und effizient Programme ausführen können. [9]



# Philosophische Lektüre

---

*The operating system is itself a programm which has the functions of **shielding the bare machine** from access by users (thus protecting the system), and also of **insulating the programmer** from the many extremely intricate and messy problems of reading the program, calling a translator, running the translated program, directing the output to the proper channels at the proper time, and passing control to the next user. [5]*



*Ein Betriebssystem kennt auf jeden Fall keinen Prozessor mehr, sondern ist neutral gegen ihn, und das war es vorher noch nie. Und auf diese Weise kann man eben **jeden beliebigen Prozessor auf jedem beliebigen anderen emulieren**, wie das schöne Wort lautet. [6]*



# Sachbücher und Normen

*Es ist das Betriebssystem, das die Kontrolle über das Plastik und Metall (Hardware) übernimmt und anderen Softwareprogrammen (Excel, Word, ...) eine **standardisierte Arbeitsplattform** (Windows, Unix, OS/2) schafft. [2]*



*Die Programme eines digitalen Rechensystems, die zusammen mit den Eigenschaften der Rechenanlage die Grundlage der möglichen Betriebsarten des digitalen Rechensystems bilden und insbesondere die **Abwicklung von Programmen steuern** und überwachen. [1]* 😊



# Gliederung

---

Einordnung

Fallstudie

Speicherbelegung

Analyse

Begriffsdeutung

Literaturauszüge

Zusammenfassung



## **Be'triebs·sys·tem** <n.; -s, -e; EDV> (*operating system*)

- eine Menge von Programmen, die
  - Programme, Anwendungen oder BenutzerInnen assistieren sollen
  - die Ausführung von Programmen überwachen und steuern
  - den Rechner für eine Anwendungsklasse betreiben
  - eine **abstrakte Maschine** implementieren
  
- verwaltet die **Betriebsmittel** eines Rechensystems
  - kontrolliert die Vergabe der (Software/Hardware) Ressourcen
  - verteilt diese ggf. gerecht an die mitbenutzenden Rechenprozesse
  
- definiert sich nicht über die Architektur, sondern über Funktionen



- wir werden...

- SP1
  1. einen „Hauch“ von Rechnerorganisation „einatmen“
  2. Betriebssysteme in ihrer Grobfunktion „von aussen“ betrachten
  3. Rechnerbetriebsarten kennen- und unterscheiden lernen

- SP2
  4. eine kurze Zwischenbilanz von SP1 ziehen
  5. Funktionen von Betriebssystemen im Detail untersuchen
  6. den Stoff rekapitulieren

- Zusammenhänge stehen im Vordergrund!

- Leitfaden ist die ganzheitliche Betrachtung von Systemfunktionen
- skizziert wird eine logische Struktur ggf. vieler Ausprägungsformen
- klassischer Lehrbuchstoff wird ergänzt, weniger repetiert oder vertieft



# Nachwort

- Typen von Betriebssystemen dürfen nicht dogmatisiert werden
  - etwa: ☆❄️■◆| „ist besser als“ ❄️❄️■❄️□▷▲ — umgekehrt dito
  - oder: ☆❄️❄️❄️❄️ „schlägt beide um Längen“...
- Betriebssysteme sind immer im **Anwendungskontext** zu beurteilen
  - „Universalbetriebssysteme“ gibt es nicht wirklich, wird es nie geben
  - allen Anwendungsfällen wird **nie gleich gut** Genüge getragen



„Universalbetriebssystem“



„Spezialbetriebssystem“



# Literaturverzeichnis I

---

- [1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG:  
*Informationsverarbeitung — Begriffe.*  
Berlin, Köln, 1985 (DIN 44300)
  
- [2] EWERT, B. ; CHRISTOFFER, K. ; CHRISTOFFER, U. ; ÜNLÜ, S. :  
*FreeHand 10.*  
Galileo Design, 2001. –  
ISBN 3–898–42177–5
  
- [3] HABERMANN, A. N.:  
*Introduction to Operating System Design.*  
Science Research Associates, 1976. –  
ISBN 0–574–21075–X
  
- [4] HANSEN, P. B.:  
*Betriebssysteme.*  
Carl Hanser Verlag, 1977. –  
ISBN 3–446–12105–6



# Literaturverzeichnis II

---

- [5] HOFSTADTER, D. R.:  
*Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid — A Metaphorical Fugue on Minds and Machines in the Spirit of Lewis Carrol.*  
Penguin Books, 1979. –  
ISBN 0–140–05579–7
- [6] KITTLER, F. :  
*Interview.*  
<http://www.hydra.umn.edu/kittler/interview.html>, 1993
- [7] POLLIO, V. M. V.:  
*De Architectura Libris Decem.*  
Primus Verlag, 1996 (Original 27 v. Chr.)
- [8] SCHNEIDER, H.-J. :  
*Lexikon der Informatik und Datenverarbeitung.*  
München, Wien : Oldenbourg-Verlag, 1997. –  
ISBN 3–486–22875–7
- [9] SILBERSCHATZ, A. ; GALVIN, P. B. ; GAGNE, G. :  
*Operating System Concepts.*  
John Wiley & Sons, Inc., 2001. –  
ISBN 0–471–41743–2



# Literaturverzeichnis III

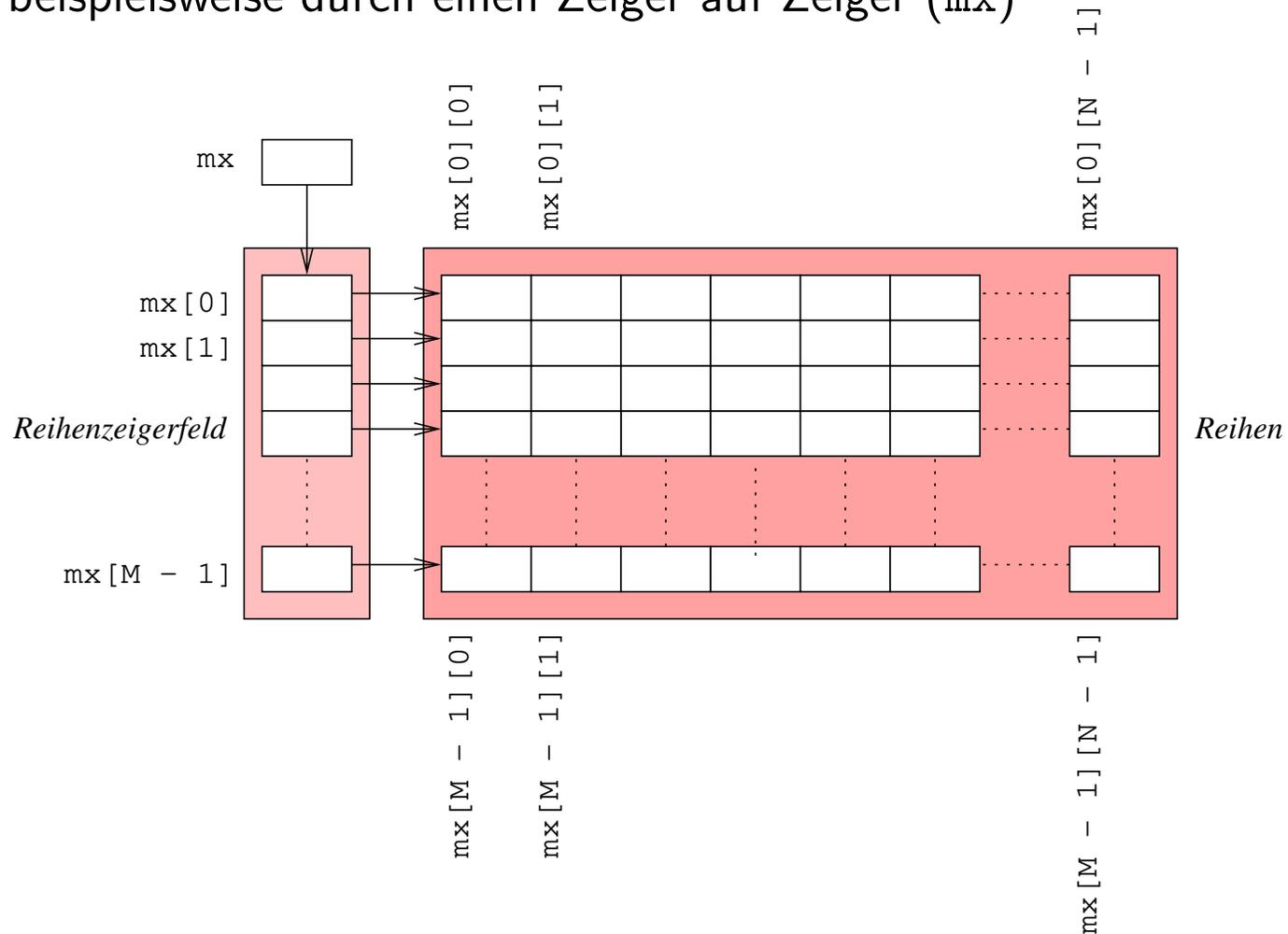
---

- [10] TANENBAUM, A. S.:  
*Operating Systems: Design and Implementation.*  
Prentice-Hall, Inc., 1997. –  
ISBN 0–136–38677–6
- [11] TENNENHOUSE, D. :  
Proactive Computing.  
In: *Communications of the ACM* 43 (2000), Mai, Nr. 5, S. 43–50
- [12] WAHRIG-BURFEIND, R. :  
*Universalwörterbuch Rechtschreibung.*  
Deutscher Taschenbuch Verlag, 2002. –  
ISBN 3–423–32524–0



# Matrix als zweidimensionales offenes Feld

- **offene** (dynamische) **Felder** als Datentypen kennt C nicht, sie sind bei Bedarf durch das **Zeigerkonzept** zu implementieren
  - hier beispielsweise durch einen Zeiger auf Zeiger (`mx`)



# Instanzenbildung einer $N \times N$ Matrix

```
1  #include <stdlib.h>
2  #include <stdbool.h>
3
4  int main (int argc, char *argv[]) {
5      if (argc == 3) {
6          unsigned int n = atoi(argv[2]);
7          if (n != 0) {
8              int **mx = (int**)calloc(n, sizeof(int*));
9              if (mx != 0) {
10                 bool goon = true;
11                 for (int i = 0; i < n; i++) {
12                     mx[i] = (int*)calloc(n, sizeof(int));
13                     if (mx[i] == 0) {
14                         goon = false;
15                         break;
16                     }
17                 }
18
19                 if (goon) {
20                     if (*argv[1] == 'R') by_row(mx, n, 42);
21                     else by_column(mx, n, 42);
22                 }
23
24                 for (int i = 0; i < n; i++) {
25                     if (mx[i] == 0) break;
26                     free(mx[i]);
27                 }
28                 free(mx);
29             }
30         }
31     }
32 }
```



- **zeilenweises Vorgehen:** Spaltenelemente j von Zeile i aufzählen

```
1 void by_row (int *mx[], unsigned int n, int v) {
2     unsigned int i, j;
3     for (i = 0; i < n; i++)
4         for (j = 0; j < n; j++)
5             mx[i][j] = v;
6 }
```

- **spaltenweises Vorgehen:** Zeilenelemente i von Spalte j aufzählen

```
7 void by_column (int *mx[], unsigned int n, int v) {
8     unsigned int i, j;
9     for (j = 0; j < n; j++)
10        for (i = 0; i < n; i++)
11            mx[i][j] = v;
12 }
```

## Gemeinsamkeit und Unterschied (vgl. S. 9)

**funktional** nutzen beide ein zweidimensionales dynamisches Feld  
**nichtfunktional** unterscheiden sie sich im Laufzeitverhalten



- kritischer Lastpunkt (*hotspot*) ist die Zuweisung der inneren Schleife<sup>6</sup>
  - dynamisch angelegtes Feld festen Ausmaßes (S. 9)
  - dynamisch angelegtes Feld offenen Ausmaßes (S. 36)

## – by\_row

```
1 LBB0_3:
2     movl %ecx, (%edx,%ebx,4)
3     incl %ebx
4     cmpl %ebx, %eax
5     jne  LBB0_3
```

## – by\_column

```
6 LBB1_3:
7     movl %ecx, (%ebx)
8     addl %esi, %ebx
9     decl %eax
10    jne  LBB1_3
```

## – by\_row

```
11 LBB0_3:
12    movl %ecx, (%edi,%ebx,4)
13    incl %ebx
14    cmpl %ebx, %eax
15    jne  LBB0_3
```

## – by\_column

```
16 LBB1_3:
17    movl (%edx,%edi,4), %ebx
18    movl %ecx, (%ebx,%esi,4)
19    incl %edi
20    cmpl %edi, %eax
21    jne  LBB1_3
```

- zeilenweises Vorgehen ist in beiden Varianten im Zeitverhalten gleich, aber der offene Fall benötigt mehr Speicher (Reihenzeigerfeld)
- spaltenweises Vorgehen benötigt bei der offenen Variante mehr Zeit, da komplexere und mehr Befehle benötigt werden

<sup>6</sup>gcc -O -m32 -static -S

