Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

Teil C – VIII. Zwischenbilanz

16. Oktober 2025

Rüdiger Kapitza

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Agenda

Systemprogrammierung 1

- Lehrziele
- C
- UNIX
- Einleitung
- Rechnerorganisation
- Betriebssystemkonzepte
- Betriebsarten

Systemprogrammierung 2

- Ausblick

Gliederung

Systemprogrammierung 1

Lehrziele

Systemnahe Software

Definition (Systemprogrammierung)

Erstellen von Softwareprogrammen, die Teile eines Betriebssystems sind beziehungsweise mit einem Betriebssystem direkt interagieren oder die Hardware (genauer: Zentraleinheit[a] und Peripherie[b]) eines Rechensystems betreiben müssen.

---

[a] *central processing unit* (CPU), ein-/mehrfach, ein-, mehr- oder vielkernig.
[b] Geräte zur Ein-/Ausgabe oder Steuerung/Regelung „externer Prozesse“.

Systemnahe Software

Definition (Systemprogrammierung)

Erstellen von Softwareprogrammen, die Teile eines Betriebssystems sind beziehungsweise mit einem Betriebssystem direkt interagieren oder die Hardware (genauer: Zentraleinheit[a] und Peripherie[b]) eines Rechensystems betreiben müssen.

[a] *central processing unit* (CPU), ein-/mehrfach, ein-, mehr- oder vielkernig.
[b] Geräte zur Ein-/Ausgabe oder Steuerung/Regelung „externer Prozesse“.

Auch schon mal zwischen zwei Stühlen sitzend:

- **Anwendungssoftware** („oben“) einerseits
  - ermöglichen, unterstützen, nicht entgegenwirken
- **Plattformsysteme** („unten“) andererseits
  - anwendungsspezifisch verfügbar machen
  - problemorientiert betreiben

Quelle: `arcadja.com`, Franz Kott

Definition (Systemprogrammierung)

Erstellen von Softwareprogrammen, die Teile eines Betriebssystems sind beziehungsweise mit einem Betriebssystem direkt interagieren oder die Hardware (genauer: Zentraleinheit[a] und Peripherie[b]) eines Rechensystems betreiben müssen.

[a] *central processing unit* (CPU), ein-/mehrfach, ein-, mehr- oder vielkernig.
[b] Geräte zur Ein-/Ausgabe oder Steuerung/Regelung „externer Prozesse“.

Auch schon mal zwischen zwei Stühlen sitzend:

- **Anwendungssoftware** („oben“) einerseits
  - ermöglichen, unterstützen, nicht entgegenwirken
- **Plattformsysteme** („unten“) andererseits
  - anwendungsspezifisch verfügbar machen
  - problemorientiert betreiben, *bedingt verbergen*
    - nachteilige Eigenschaften versuchen zu kaschieren

Quelle: `arcadja.com`, Franz Kott

Systemprogrammierung 1

C

Schlüsselwörter

`auto`	`break`	`case`	`char`	`const`	`continue`	`default`	`do`
`double`	`else`	`enum`	`extern`	`float`	`for`	`goto`	`if`
`int`	`long`	`register`	`return`	`short`	`signed`	`sizeof`	`static`
`struct`	`switch`	`typedef`	`union`	`unsigned`	`void`	`volatile`	`while`

Schlüsselwörter

```
auto     break    case     char     const    continue  default  do
double   else     enum     extern   float    for       goto     if
int      long     register return   short    signed    sizeof   static
struct   switch   typedef  union    unsigned void      volatile while
```

Operatoren, Selektoren, Klammerungen und andere „Satzzeichen“

```
!   "   %   &   '   (   )   *   +   ,   -   .   /
:   ;   <   =   >   ?   [   ]   ^   {   }   ~
```

Schlüsselwörter

auto	break	case	char	const	continue	default	do
double	else	enum	extern	float	for	goto	if
int	long	register	return	short	signed	sizeof	static
struct	switch	typedef	union	unsigned	void	volatile	while

Operatoren, Selektoren, Klammerungen und andere „Satzzeichen“

!	"	%	&	’	(	)	*	+	,	-	.	/
:	;	<	=	>	?	[	]	^	{	}	~	

- was macht dieses Programm?

```
1  #include <unistd.h>
2
3  int main() {
4      printf("%d\n", getpid());
5  }
```

Schlüsselwörter

auto	break	case	char	const	continue	default	do
double	else	enum	extern	float	for	goto	if
int	long	register	return	short	signed	sizeof	static
struct	switch	typedef	union	unsigned	void	volatile	while

Operatoren, Selektoren, Klammerungen und andere „Satzzeichen“

!	"	%	&	’	(	)	*	+	,	-	.	/
:	;	<	=	>	?	[	]	^	{	}	~	

- was macht dieses Programm?

```
1  #include <unistd.h>
2
3  int main() {
4      printf("%d\n", getpid());
5  }
```

- was geschieht nun?

```
6  #include <stdio.h>
7  #include <string.h>
8
9  int getpid() {
10     char buffer[20];
11     gets(buffer);
12     return strlen(buffer);
13 }
```

Kurzeinführung in C

Schlüsselwörter

auto	break	case	char	const	continue	default	do
double	else	enum	extern	float	for	goto	if
int	long	register	return	short	signed	sizeof	static
struct	switch	typedef	union	unsigned	void	volatile	while

Operatoren, Selektoren, Klammerungen und andere „Satzzeichen“

!	"	%	&	’	(	)	*	+	,	-	.	/
:	;	<	=	>	?	[	]	^	{	}	~	

- was macht dieses Programm?

```
1  #include <unistd.h>
2
3  int main() {
4      printf("%d\n", getpid());
5  }
```

- was kann man daraus machen?

- was geschieht nun?

```
6  #include <stdio.h>
7  #include <string.h>
8
9  int getpid() {
10     char buffer[20];
11     gets(buffer);
12     return strlen(buffer);
13 }
```

Kurzeinführung in C

Schlüsselwörter

auto	break	case	char	const	continue	default	do
double	else	enum	extern	float	for	goto	if
int	long	register	return	short	signed	sizeof	static
struct	switch	typedef	union	unsigned	void	volatile	while

Operatoren, Selektoren, Klammerungen und andere „Satzzeichen“

!	"	%	&	’	(	)	*	+	,	-	.	/
:	;	<	=	>	?	[	]	^	{	}	~	

- was macht dieses Programm?

```
1  #include <unistd.h>
2
3  int main() {
4      printf("%d\n", getpid());
5  }
```

- was kann man daraus machen?
  - ***buffer overflow exploit***

- was geschieht nun?

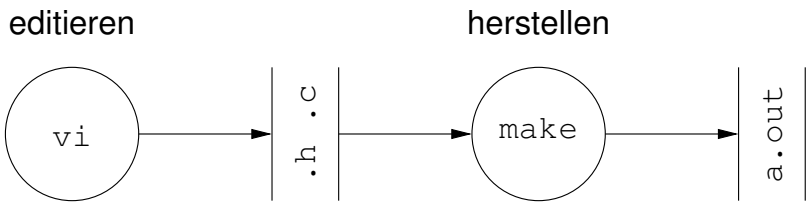
```
6  #include <stdio.h>
7  #include <string.h>
8
9  int getpid() {
10     char buffer[20];
11     gets(buffer);
12     return strlen(buffer);
13 }
```

Systemprogrammierung 1

UNIX

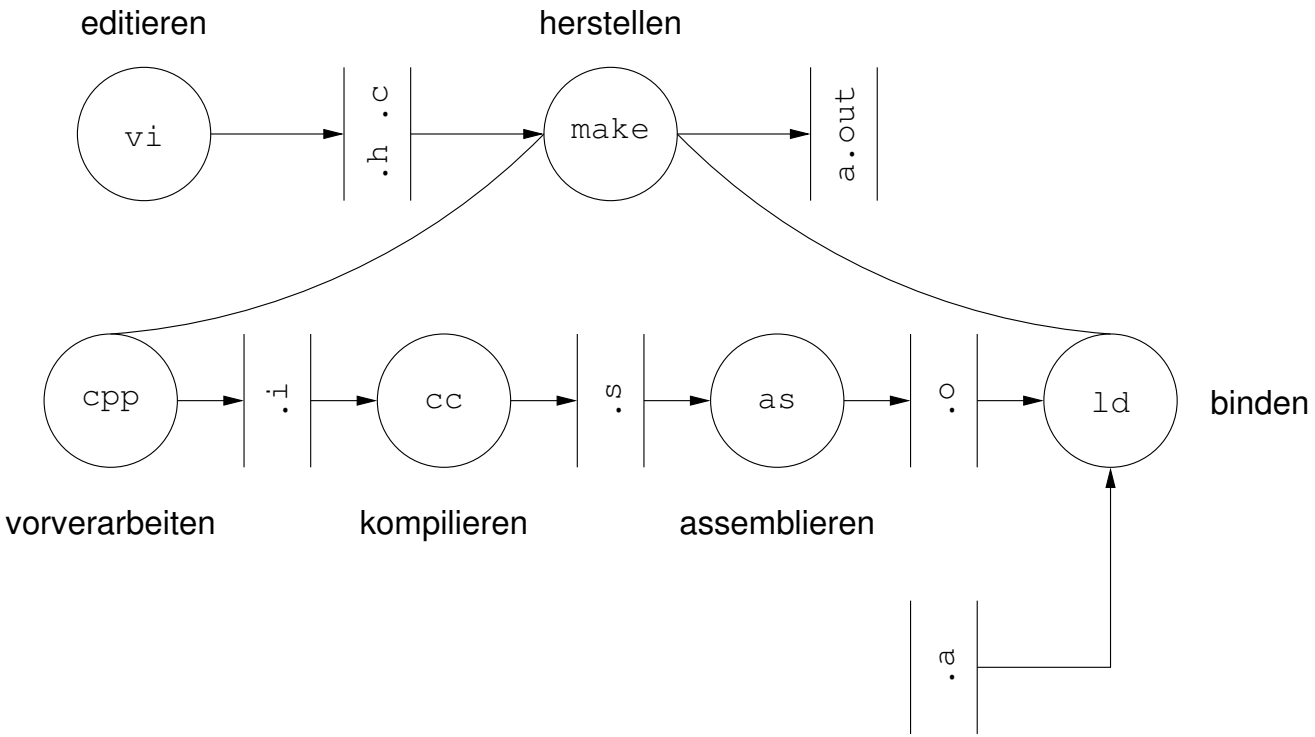
Quellprogramm $\mapsto$ Prozess

[2] und [3, S. 26*ff.*]



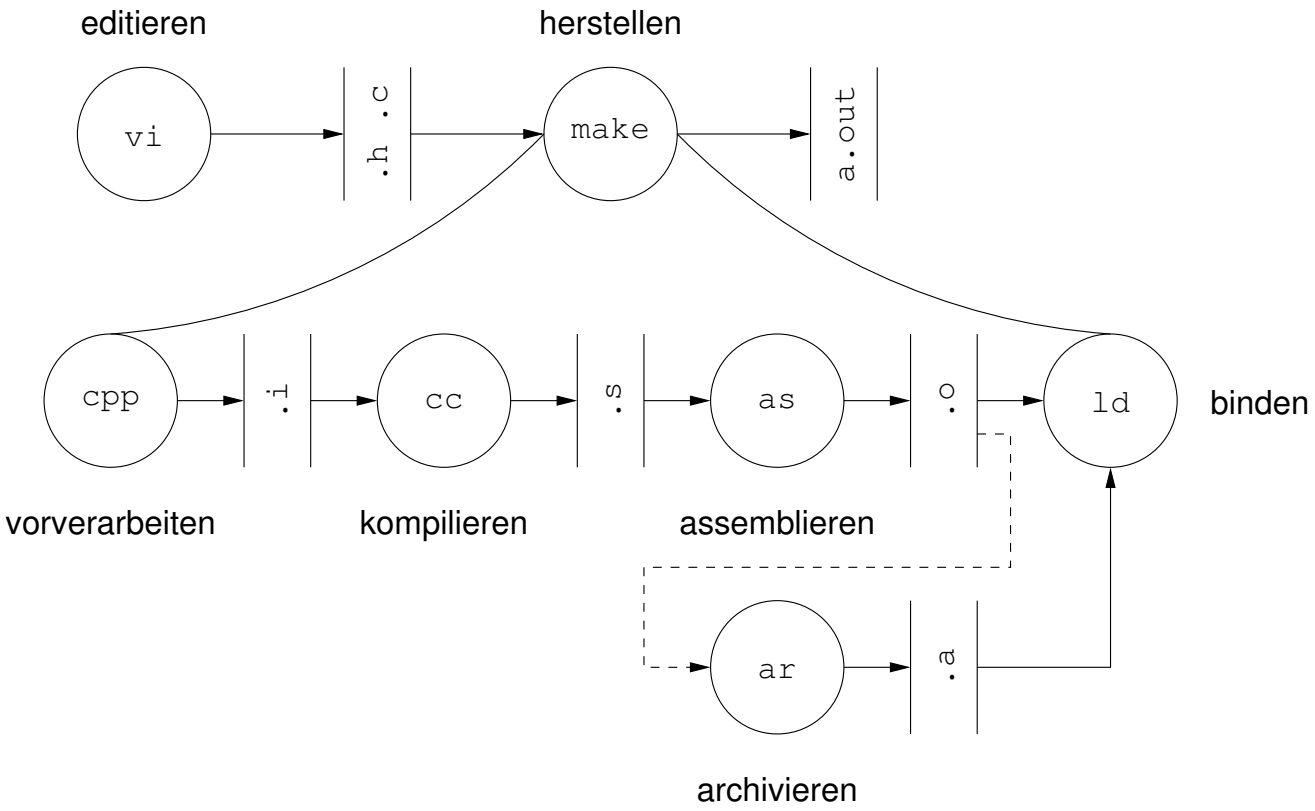
Quellprogramm $\mapsto$ Prozess

[2] und [3, S. 26*ff.*]



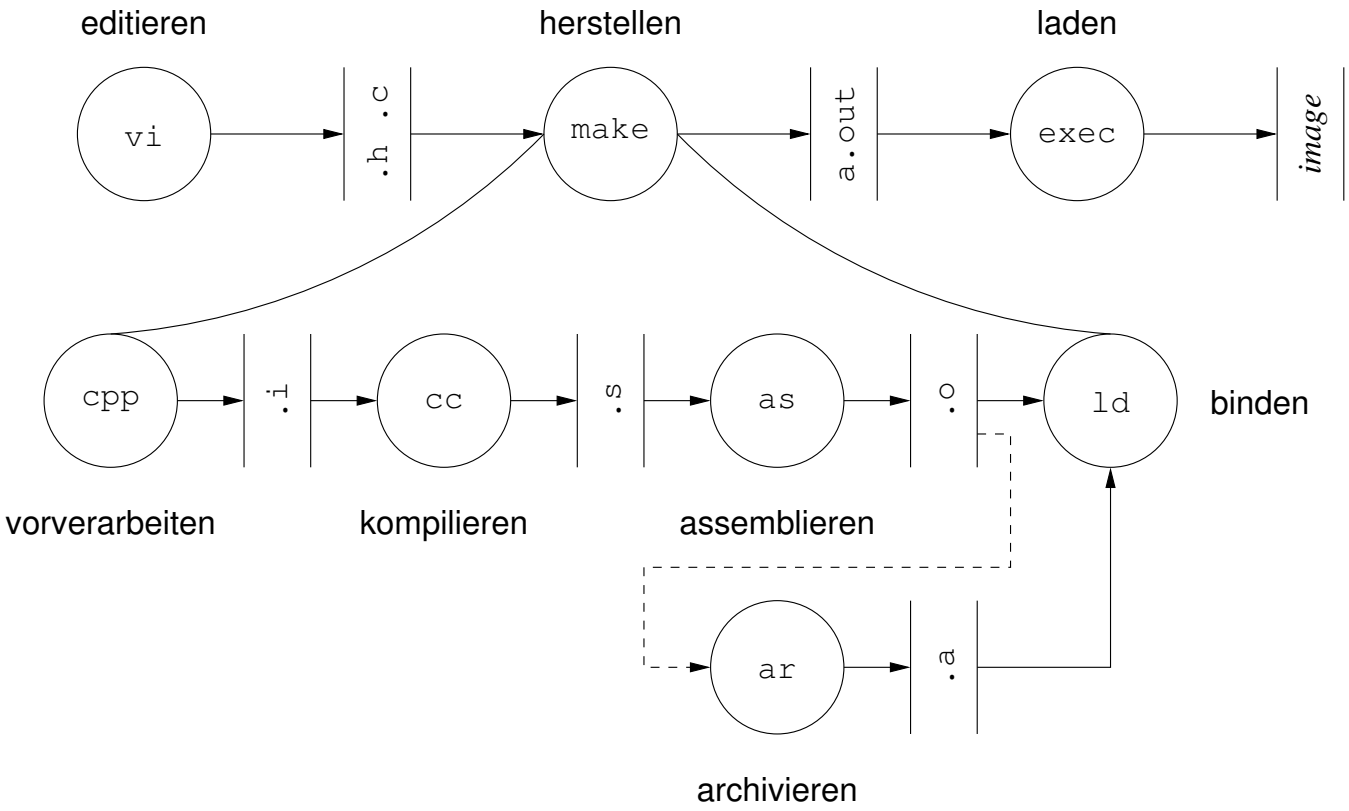
Quellprogramm $\mapsto$ Prozess

[2] und [3, S. 26*ff.*]



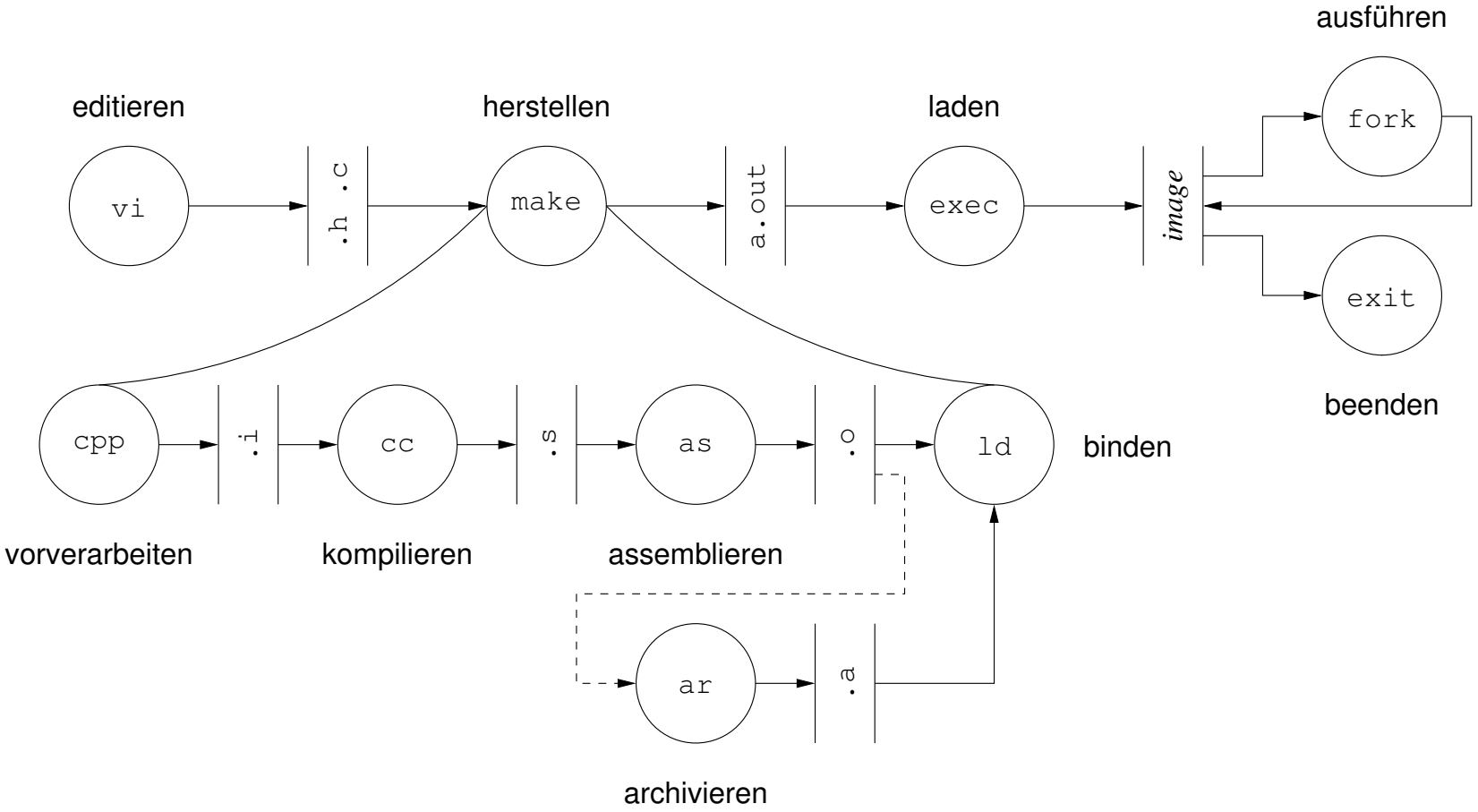
Quellprogramm $\mapsto$ Prozess

[2] und [3, S. 26*ff.*]



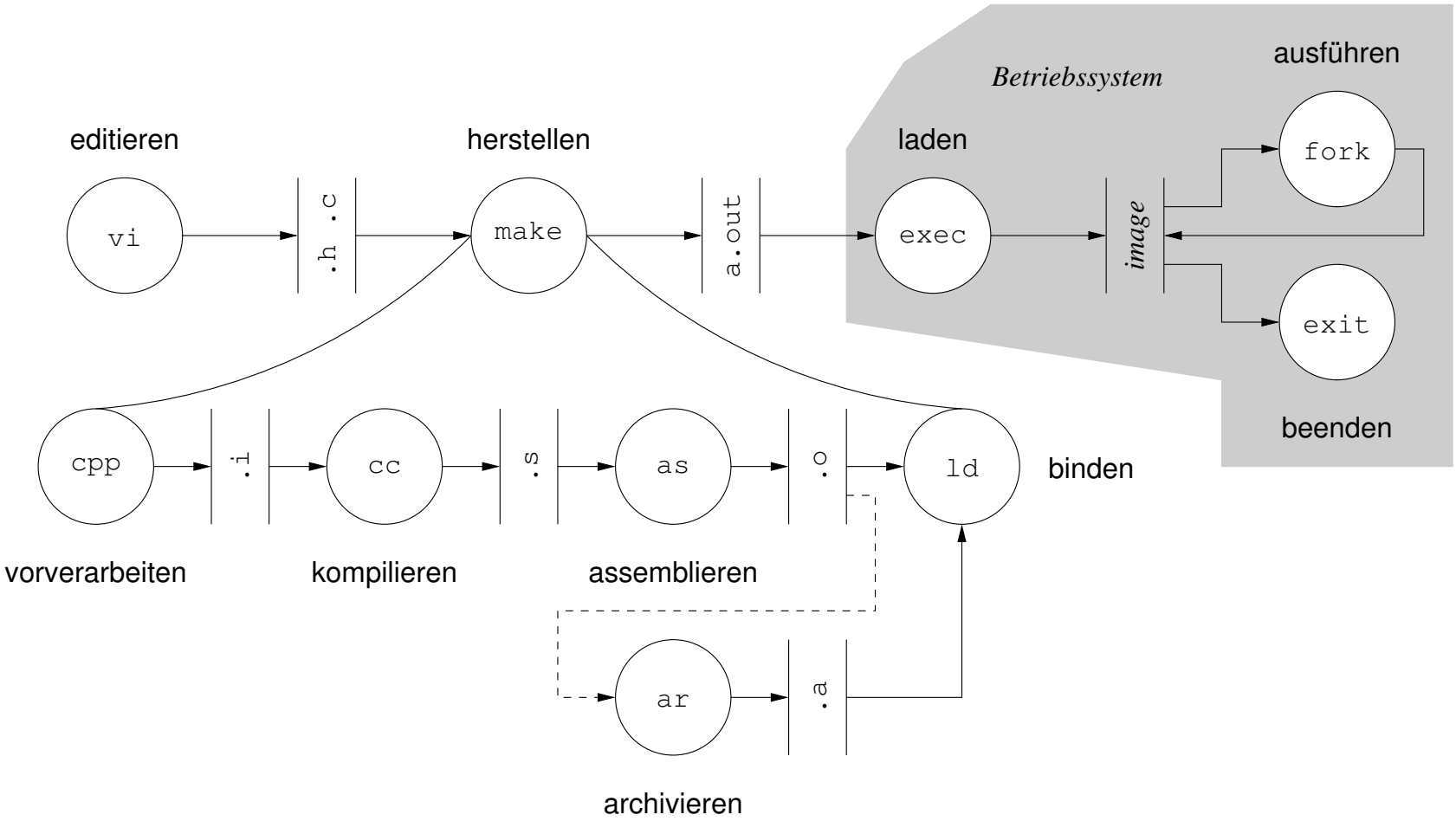
Quellprogramm $\mapsto$ Prozess

[2] und [3, S. 26*ff.*]



Quellprogramm $\mapsto$ Prozess

[2] und [3, S. 26*ff.*]



Systemprogrammierung 1

Einleitung

Ganzheitsmethode[1] [6]

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

[1] Analytische Lernmethode, die die Vermittlung eines Stoffes als Gesamtheit in den Mittelpunkt stellt, um dann konstituierende Elemente weiter zu untersuchen.

Ganzheitsmethode[1] [6]

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

[1] Analytische Lernmethode, die die Vermittlung eines Stoffes als Gesamtheit in den Mittelpunkt stellt, um dann konstituierende Elemente weiter zu untersuchen.

Ganzheitsmethode[1] [6]

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

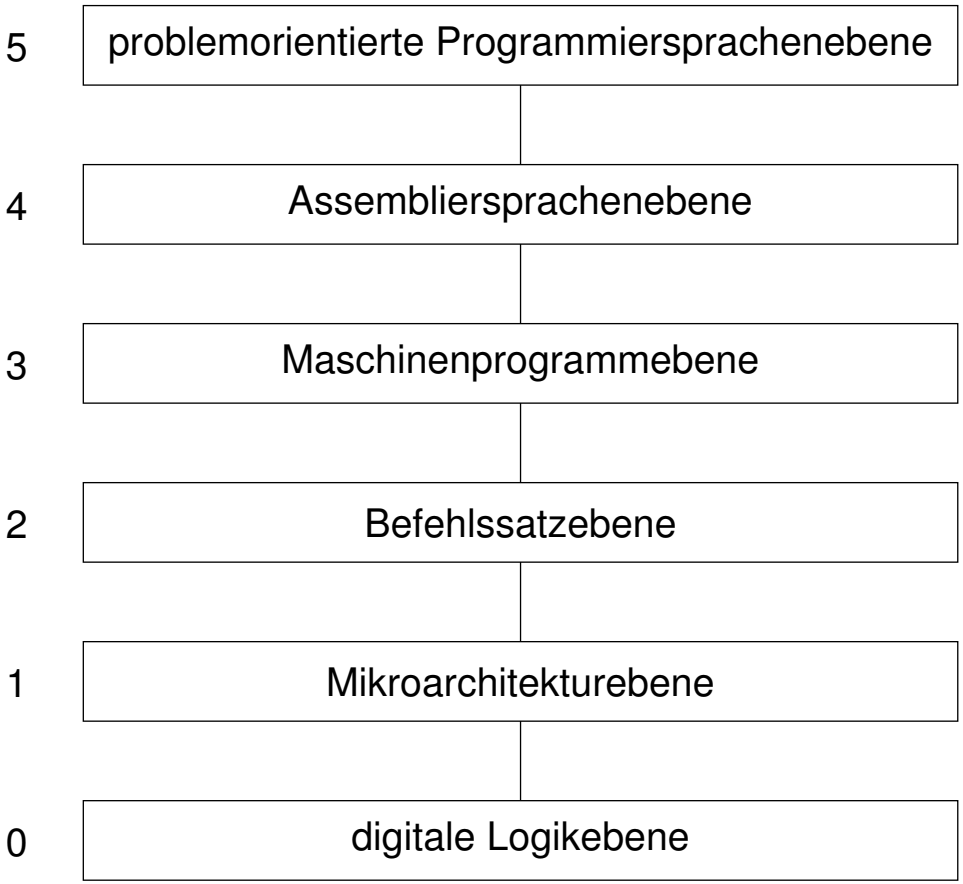
[1] Analytische Lernmethode, die die Vermittlung eines Stoffes als Gesamtheit in den Mittelpunkt stellt, um dann konstituierende Elemente weiter zu untersuchen.

Systemprogrammierung 1

Rechnerorganisation

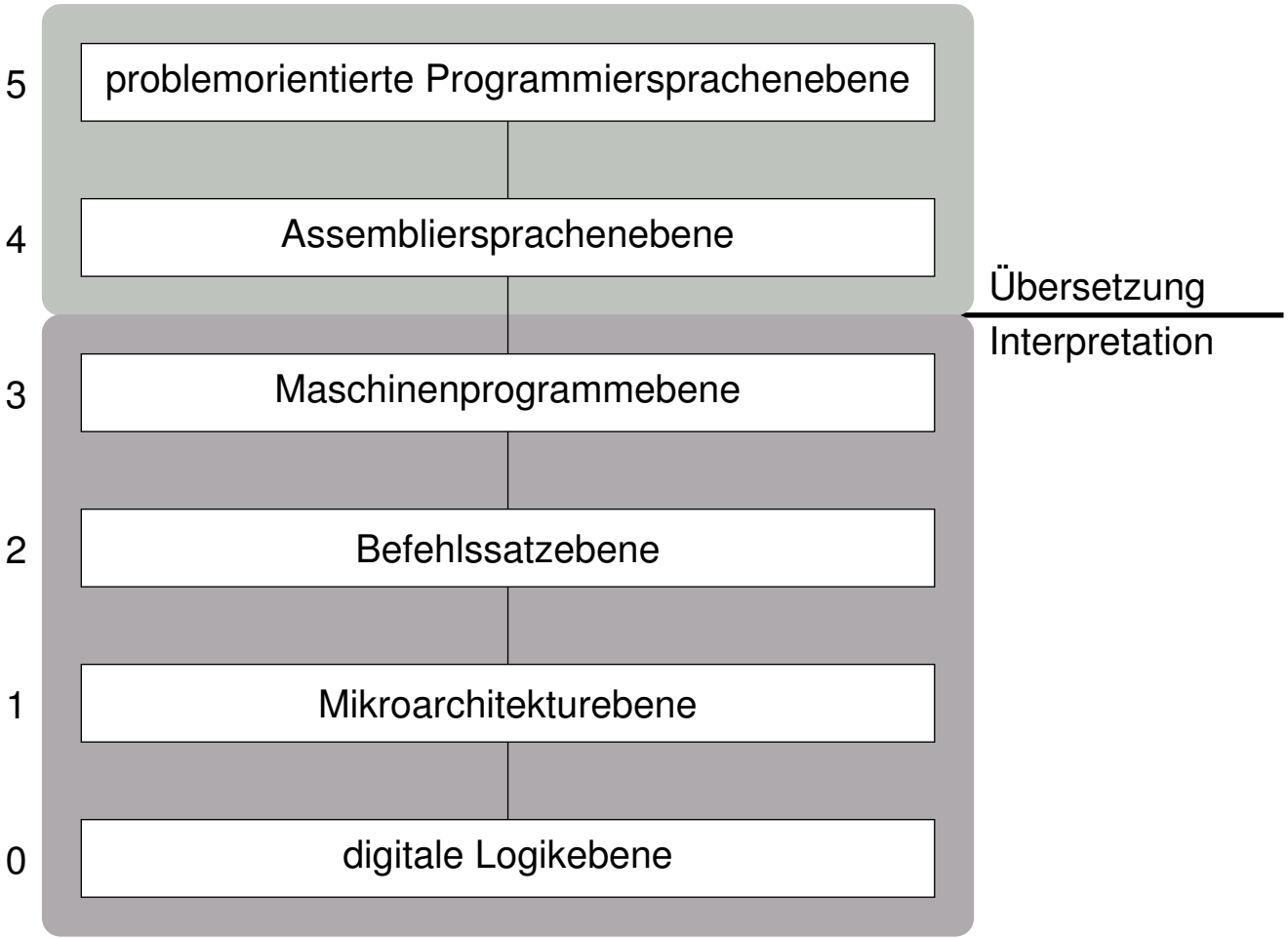
Schichtenfolge in Rechensystemen

[10]

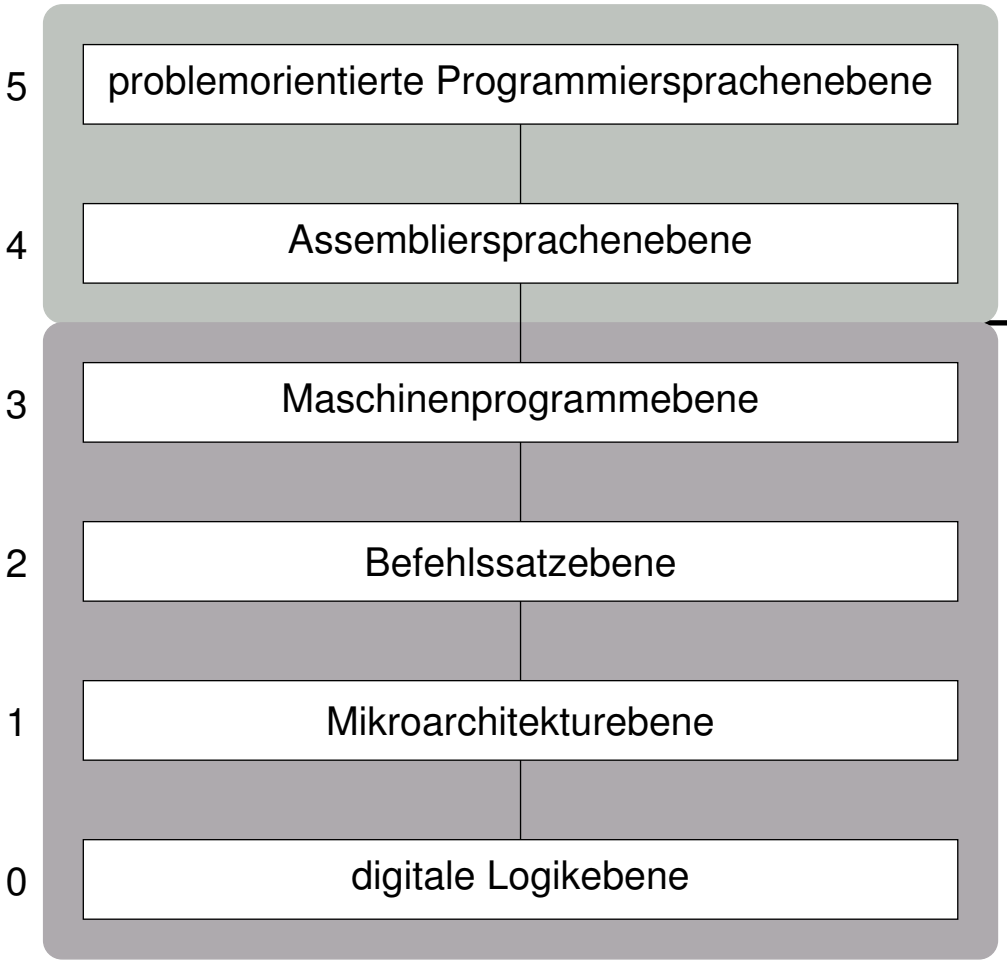


Schichtenfolge in Rechensystemen

[10]



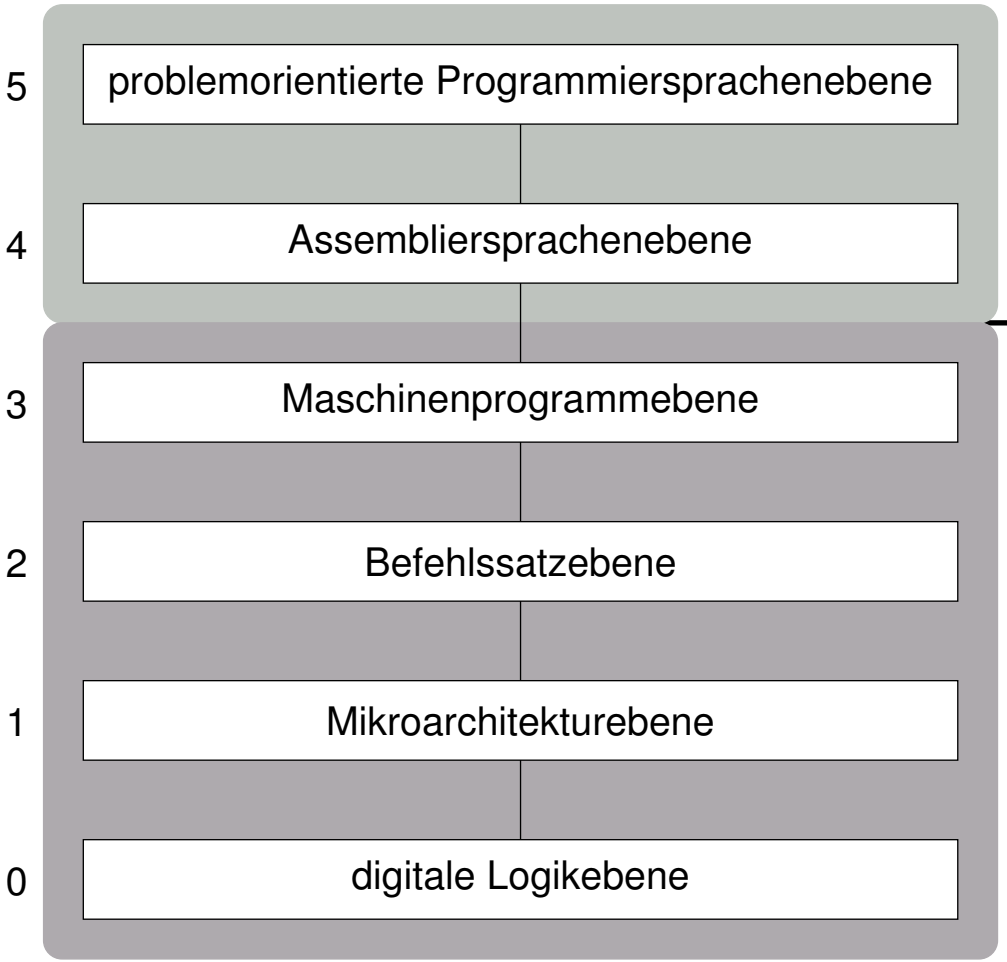
Schichtenfolge in Rechensystemen



Demarkationslinie

- Methode der Abbildung
  - ≥ 4 Übersetzung vs.
  - ≤ 3 Interpretation
- Art der Programmierung
  - ≥ 4 Anwendung vs.
  - ≤ 3 System
- Natur der Sprache
  - ≥ 4 symbolisch vs.
  - ≤ 3 numerisch

Schichtenfolge in Rechensystemen

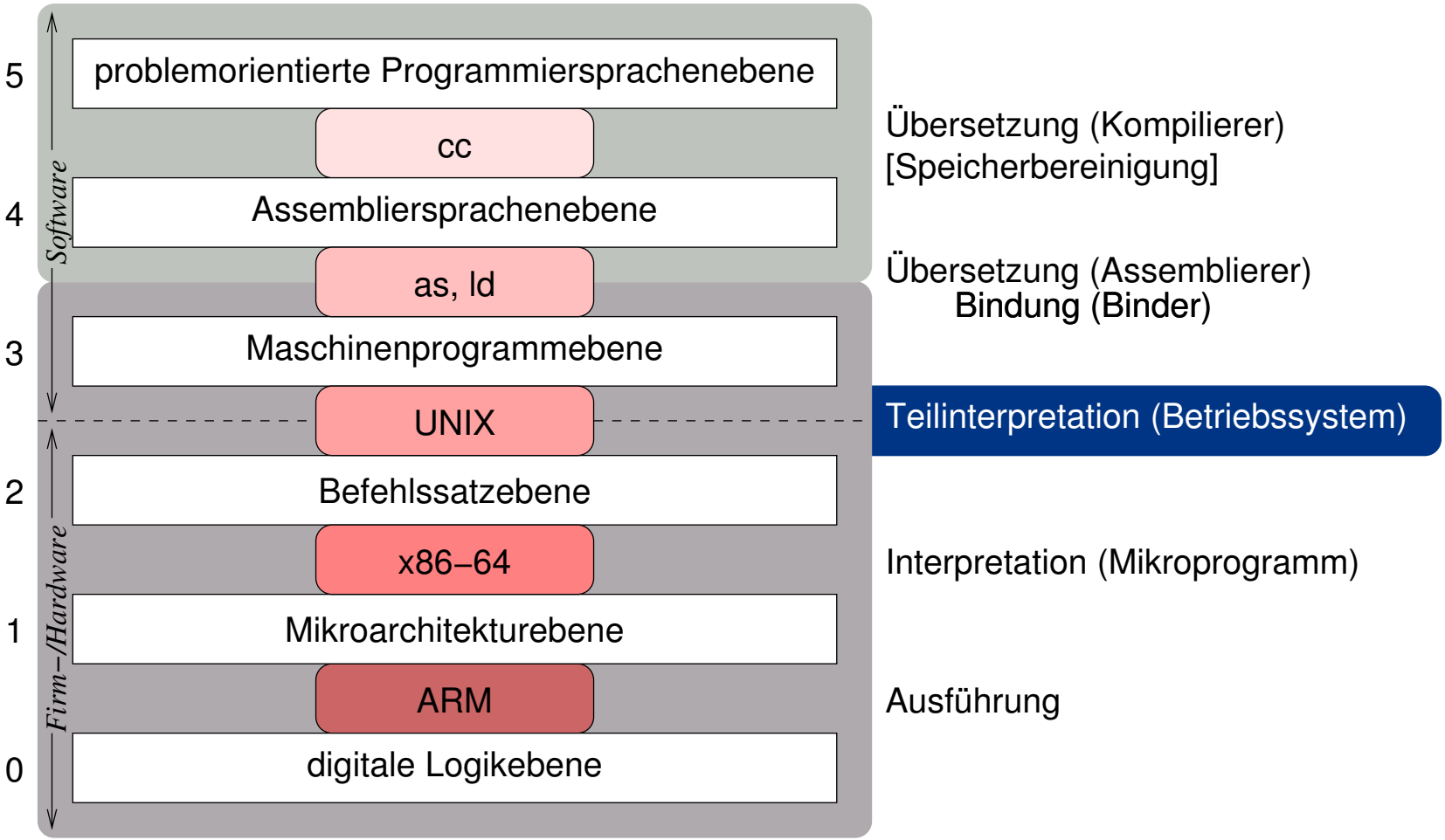


Demarkationslinie

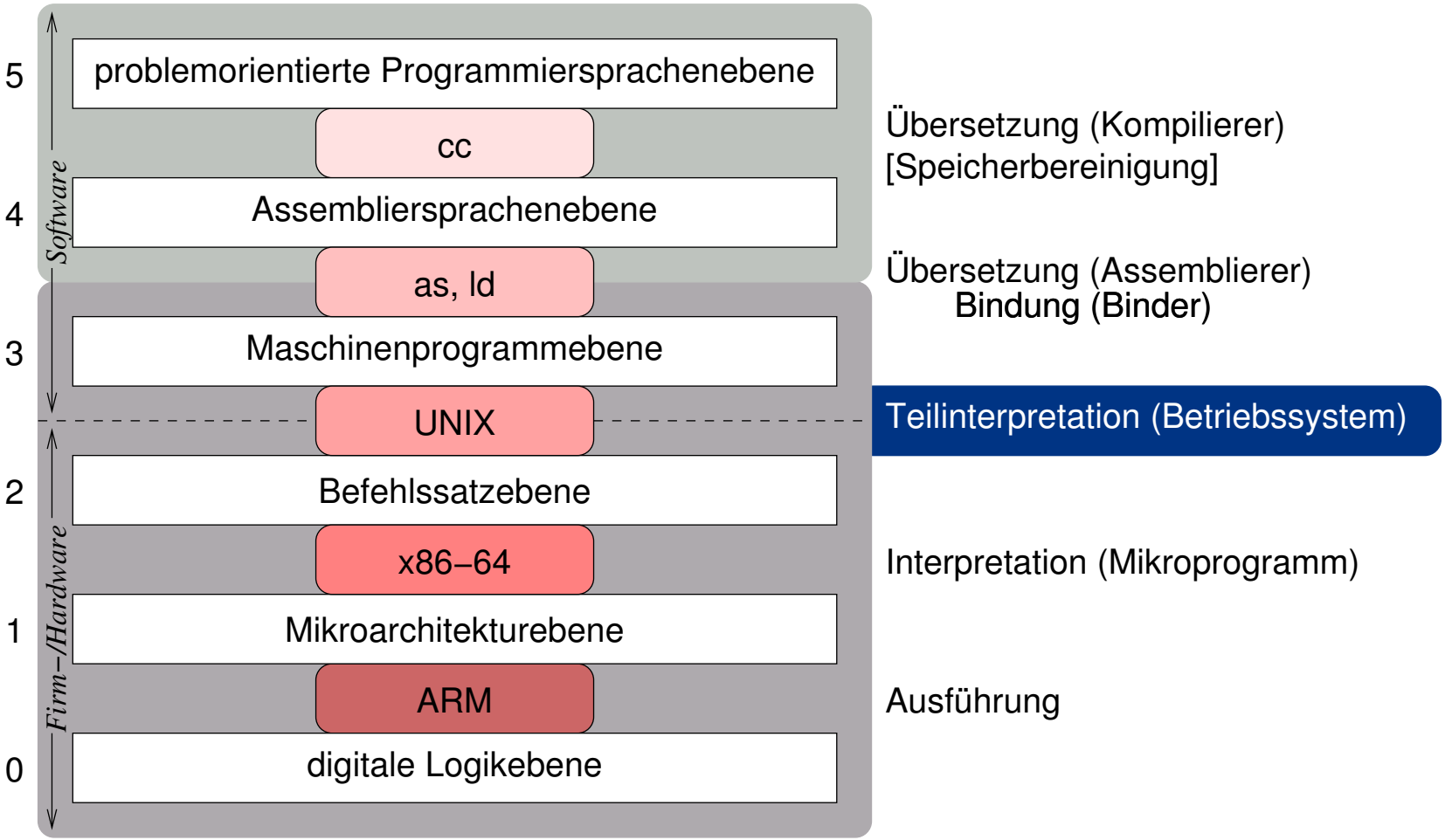
- Methode der Abbildung
  - ≥ 4 Übersetzung vs.
  - ≤ 3 Interpretation
- Art der Programmierung
  - ≥ 4 Anwendung vs.
  - ≤ 3 System
- Natur der Sprache
  - ≥ 4 symbolisch vs.
  - ≤ 3 numerisch

- Schichten der Ebene$_{[4,5]}$ sind nicht wirklich existent
  - sie werden via Übersetzung aufgelöst und auf tiefere Ebenen abgebildet
  - so dass am Ende nur ein Maschinenprogramm (Ebene$_3$) übrigbleibt

Schichten und abstrakte/reale Prozessoren [10]



Schichten und abstrakte/reale Prozessoren [10]



- RISC auf Ebene$_1$ und gegebenenfalls (hier) CISC auf Ebene$_2$
  - nach außen „*complex*“, innen aber „*reduced instruction set computer*“
  - Intel *Core* oder *Haswell* $\leftrightarrow$ AMD *Bulldozer* oder *Zen* (ARM)

Systemaufrufschnittstelle (*system call interface*)[2] [7]

```
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

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

Systemaufrufschnittstelle (*system call interface*)[2] [7]

```
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

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

Systemaufrufschnittstelle (*system call interface*)[2] [7]

```
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 (Ebene$_3$ $\mapsto$ Ebene$_2$) auslösen
  - **7** Aufruf abfangen (*trap*) und dem Betriebssystem zustellen
  - **9–10** Status überprüfen und ggf. Fehlerbehandlung durchführen

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

Teilinterpretation

[4]

Teilinterpretation [4]

- Befehle der Maschinenprogrammbene, also Ebene_3-Befehle sind…
  - „normale“ Befehle der Ebene_2, die die CPU direkt ausführen kann
    - **unprivilegierte Befehle**, die in jedem Arbeitsmodus ausführbar sind
  - „unnormale“ Befehle der Ebene_2, die das Betriebssystem ausführt
    - **privilegierte Befehle**, die nur im privilegierten Arbeitsmodus ausführbar sind

Teilinterpretation [4]

- Befehle der Maschinenprogrammbene, also Ebene_3-Befehle sind…
  - „normale“ Befehle der Ebene_2, die die CPU direkt ausführen kann
    - **unprivilegierte Befehle**, die in jedem Arbeitsmodus ausführbar sind
  - „unnormale“ Befehle der Ebene_2, die das Betriebssystem ausführt
    - **privilegierte Befehle**, die nur im privilegierten Arbeitsmodus ausführbar sind
- die „aus der Reihe fallenden“ Befehle stellen Adressräume, Prozesse, Speicher, Dateien und Wege zur Ein-/Ausgabe bereit
  - Interpreter dieser Befehle ist das Betriebssystem
  - der dadurch definierte Prozessor ist die **Betriebssystemmaschine**

Teilinterpretation [4]

- Befehle der Maschinenprogrammbene, also Ebene$_3$-Befehle sind…
  - „normale“ Befehle der Ebene$_2$, die die CPU direkt ausführen kann
    - **unprivilegierte Befehle**, die in jedem Arbeitsmodus ausführbar sind
  - „unnormale“ Befehle der Ebene$_2$, die das Betriebssystem ausführt
    - **privilegierte Befehle**, die nur im privilegierten Arbeitsmodus ausführbar sind
- die „aus der Reihe fallenden“ Befehle stellen Adressräume, Prozesse, Speicher, Dateien und Wege zur Ein-/Ausgabe bereit
  - Interpreter dieser Befehle ist das Betriebssystem
  - der dadurch definierte Prozessor ist die **Betriebssystemmaschine**
- demzufolge ist ein Betriebssystem immer nur **ausnahmsweise** aktiv
  - es muss von außerhalb aktiviert werden
    - programmiert im Falle eines Systemaufrufs (`CD80`: Linux/x86) oder einer sonstigen synchronen Programmunterbrechung (*trap*)
    - nicht programmiert, also nicht vorhergesehen, im Falle einer asynchronen Programmunterbrechung (*interrupt*)
  - es deaktiviert sich immer selbst, in beiden Fällen programmiert (`CF`: x86)

Systemprogrammierung 1

Betriebssystemkonzepte

Prozess

Betriebssysteme bringen Programme zur Ausführung, in dem dazu Prozesse erzeugt, bereitgestellt und begleitet werden

Prozess

Betriebssysteme bringen Programme zur Ausführung, in dem dazu Prozesse erzeugt, bereitgestellt und begleitet werden

- im Informatikkontext ist ein Prozess ohne Programm nicht möglich
  - die als Programm kodierte Berechnungsvorschrift definiert den Prozess
  - das Programm legt damit den Prozess fest, gibt ihn vor
  - gegebenenfalls bewirkt, steuert, terminiert es gar andere Prozesse
    - wenn das Betriebssystem die dazu nötigen Befehle anbietet!

Prozess

Betriebssysteme bringen Programme zur Ausführung, in dem dazu Prozesse erzeugt, bereitgestellt und begleitet werden

- im Informatikkontext ist ein Prozess ohne Programm nicht möglich
  - die als Programm kodierte Berechnungsvorschrift definiert den Prozess
  - das Programm legt damit den Prozess fest, gibt ihn vor
  - gegebenenfalls bewirkt, steuert, terminiert es gar andere Prozesse
    - wenn das Betriebssystem die dazu nötigen Befehle anbietet!
- ein Programm beschreibt die Art des Ablaufs eines Prozesses

sequentiell
- eine Folge von zeitlich nicht überlappenden Aktionen
- verläuft deterministisch, das Ergebnis ist determiniert

parallel
- nicht sequentiell

Prozess

Betriebssysteme bringen Programme zur Ausführung, in dem dazu Prozesse erzeugt, bereitgestellt und begleitet werden

- im Informatikkontext ist ein Prozess ohne Programm nicht möglich
  - die als Programm kodierte Berechnungsvorschrift definiert den Prozess
  - das Programm legt damit den Prozess fest, gibt ihn vor
  - gegebenenfalls bewirkt, steuert, terminiert es gar andere Prozesse
    - wenn das Betriebssystem die dazu nötigen Befehle anbietet!
- ein Programm beschreibt die Art des Ablaufs eines Prozesses

  sequentiell
  - eine Folge von zeitlich nicht überlappenden Aktionen
  - verläuft deterministisch, das Ergebnis ist determiniert

  parallel
  - nicht sequentiell
  - in beiden Arten besteht ein Programmablauf aus **Aktionen**

Prozess

Betriebssysteme bringen Programme zur Ausführung, in dem dazu Prozesse erzeugt, bereitgestellt und begleitet werden

- im Informatikkontext ist ein Prozess ohne Programm nicht möglich
  - die als Programm kodierte Berechnungsvorschrift definiert den Prozess
  - das Programm legt damit den Prozess fest, gibt ihn vor
  - gegebenenfalls bewirkt, steuert, terminiert es gar andere Prozesse
    - wenn das Betriebssystem die dazu nötigen Befehle anbietet!
- ein Programm beschreibt die Art des Ablaufs eines Prozesses

  sequentiell
  - eine Folge von zeitlich nicht überlappenden Aktionen
  - verläuft deterministisch, das Ergebnis ist determiniert

  parallel
  - nicht sequentiell
- in beiden Arten besteht ein Programmablauf aus **Aktionen**

Beachte: Programmablauf und Abstraktionsebene

Ein und derselbe Programmablauf kann auf einer Abstraktionsebene sequentiell, auf einer anderen parallel sein.

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

  Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)
  - welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

  Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)
  - welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?
- die zur Durchführung dieser Aufgaben zu verfolgenden Strategien profitieren voneinander — oder bedingen einander

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

  Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)
  - welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?
- die zur Durchführung dieser Aufgaben zu verfolgenden Strategien profitieren voneinander — oder bedingen einander
  - ein Datum kann ggf. erst platziert werden, wenn Platz freigemacht wurde

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

  Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)
  - welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?
- die zur Durchführung dieser Aufgaben zu verfolgenden Strategien profitieren voneinander — oder bedingen einander
  - ein Datum kann ggf. erst platziert werden, wenn Platz freigemacht wurde
  - etwa indem das Datum den Inhalt eines belegten Speicherplatzes ersetzt

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

  Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)
  - welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?
- die zur Durchführung dieser Aufgaben zu verfolgenden Strategien profitieren voneinander — oder bedingen einander
  - ein Datum kann ggf. erst platziert werden, wenn Platz freigemacht wurde
  - etwa indem das Datum den Inhalt eines belegten Speicherplatzes ersetzt
  - ggf. aber ist das so ersetzte Datum später erneut zu laden

Speicherverwaltung: Politiken

- Aufgabe ist es, über die **Speicherzuteilung** an einen Prozess Buch zu führen und seine Adressraumgröße dazu passend auszulegen

  Platzierungsstrategie (*placement policy*)
  - wo im Hauptspeicher ist noch Platz?
- zusätzliche Aufgabe kann die **Speichervirtualisierung** sein, um den Mehrprogrammbetrieb zu maximieren

  Ladestrategie (*fetch policy*)
  - wann muss ein Datum im Hauptspeicher liegen?

  Ersetzungsstrategie (*replacement policy*)
  - welches Datum im Hauptspeicher ist ersetzbar?
- die zur Durchführung dieser Aufgaben zu verfolgenden Strategien profitieren voneinander — oder bedingen einander
  - ein Datum kann ggf. erst platziert werden, wenn Platz freigemacht wurde
  - etwa indem das Datum den Inhalt eines belegten Speicherplatzes ersetzt
  - ggf. aber ist das so ersetzte Datum später erneut zu laden
  - bevor ein Datum geladen werden kann, ist Platz dafür bereitzustellen

Speicherverwaltung: „Reviere“ [11]

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

Speicherverwaltung: „Reviere“ [11]

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

  Speicherzuteilung
  - Maschinenprogramm und Betriebssystem
  - Haldenspeicher, Hauptspeicher

Speicherverwaltung: „Reviere“ [11]

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

Speicherzuteilung
- Maschinenprogramm und Betriebssystem
- Haldenspeicher, Hauptspeicher

Speichervirtualisierung
- ist allein Aufgabe des Betriebssystems
- Haupt-/Arbeitsspeicher, Ablage

Speicherverwaltung: „Reviere“ [11]

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

  Speicherzuteilung
  - Maschinenprogramm und Betriebssystem
  - Haldenspeicher, Hauptspeicher

  Speichervirtualisierung
  - ist allein Aufgabe des Betriebssystems
  - Haupt-/Arbeitsspeicher, Ablage

- das Maschinenprogramm verwaltet den seinem Prozess (-adressraum) jeweils zugeteilten Speicher **lokal** eigenständig
  - stellt dabei **sprachenorientierte Kriterien** in den Vordergrund
    - typisch für den Haldenspeicher $\rightsquigarrow$ `malloc`/`free`

Speicherverwaltung: „Reviere“ [11]

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

  Speicherzuteilung
  - Maschinenprogramm und Betriebssystem
  - Haldenspeicher, Hauptspeicher

  Speichervirtualisierung
  - ist allein Aufgabe des Betriebssystems
  - Haupt-/Arbeitsspeicher, Ablage

- das Maschinenprogramm verwaltet den seinem Prozess (-adressraum) jeweils zugeteilten Speicher **lokal** eigenständig
  - stellt dabei **sprachenorientierte Kriterien** in den Vordergrund
    - typisch für den Haldenspeicher $\rightsquigarrow$ `malloc`/`free`
- das Betriebssystem verwaltet den gesamten Haupt-/Arbeitsspeicher **global** für alle Prozessexemplare bzw. -adressräume
  - stellt dabei **systemorientierte Kriterien** in den Vordergrund
    - hilft, einen Haldenspeicher zu verwalten $\rightsquigarrow$ z.B. `sbrk`/`mmap`

Speicherverwaltung: „Reviere“ [11]

- normalerweise sind die **Verantwortlichkeiten** auf mehrere Ebenen innerhalb eines Rechensystems verteilt

  Speicherzuteilung
  - Maschinenprogramm und Betriebssystem
  - Haldenspeicher, Hauptspeicher

  Speichervirtualisierung
  - ist allein Aufgabe des Betriebssystems
  - Haupt-/Arbeitsspeicher, Ablage

- das Maschinenprogramm verwaltet den seinem Prozess (-adressraum) jeweils zugeteilten Speicher **lokal** eigenständig
  - stellt dabei **sprachenorientierte Kriterien** in den Vordergrund
    - typisch für den Haldenspeicher $\rightsquigarrow$ `malloc`/`free`
- das Betriebssystem verwaltet den gesamten Haupt-/Arbeitsspeicher **global** für alle Prozessexemplare bzw. -adressräume
  - stellt dabei **systemorientierte Kriterien** in den Vordergrund
    - hilft, einen Haldenspeicher zu verwalten $\rightsquigarrow$ z.B. `sbrk`/`mmap`
- Maschinenprogramm und Betriebssystem gehen somit eine **Symbiose** ein, sie nehmen eine **Arbeitsteilung** vor
  - genauer gesagt: das Laufzeitsystem (`libc`) im Maschinenprogramm

Prozessadressraum

- **Seitenadressierung** (*paging*) mittels **Seitentabelle** [11, S. 29–30]
  - jede von der CPU generierte Adresse wird gedeutet als $A_p = (p, o)$, wobei

    Versatz $o = [0, 2^w - 1]$, mit $9 \leq w \leq 30$ (*offset*)

    Seitennummer $p = [0, 2^{n-w} - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$, Tabellenindex
  - eine gewöhnliche **lineare Adresse** $\rightsquigarrow$ **eindimensionaler Adressraum**
    - d.h., Oktetts oder Worte in einer Dimension aufgereiht

Prozessadressraum

- **Seitenadressierung** (*paging*) mittels **Seitentabelle** [11, S. 29–30]
  - jede von der CPU generierte Adresse wird gedeutet als $A_p = (p, o)$

    Versatz $o = [0, 2^w - 1]$, mit $9 \leq w \leq 30$ (*offset*)

    Seitennummer $p = [0, 2^{n-w} - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$, Tabellenindex
  - eine gewöhnliche **lineare Adresse** $\rightsquigarrow$ **eindimensionaler Adressraum**
    - d.h., Oktetts oder Worte in einer Dimension aufgereiht
- **Segmentierung** (*segmentation*) mittels **Segmenttabelle** [3, S. 37]
  - jede Adresse ist repräsentiert als Zweitupel $A_s = \langle s, d \rangle$, wobei

    Segmentname $s = [0, 2^m - 1]$, mit $12 \leq m \leq 18$, Tabellenindex

    Verschiebung $d = [0, 2^n - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$ (*displacement*)
  - Zweikomponentenadresse $\rightsquigarrow$ **zweidimensionaler Adressraum**
    - d.h., Segmente in der ersten und Segmentinhalte in der zweiten Dimension

Prozessadressraum

- **Seitenadressierung** (*paging*) mittels **Seitentabelle** [11, S. 29–30]
  - jede von der CPU generierte Adresse wird gedeutet als $A_p = (p, o)$

    Versatz $o = [0, 2^w - 1]$, mit $9 \leq w \leq 30$ (*offset*)

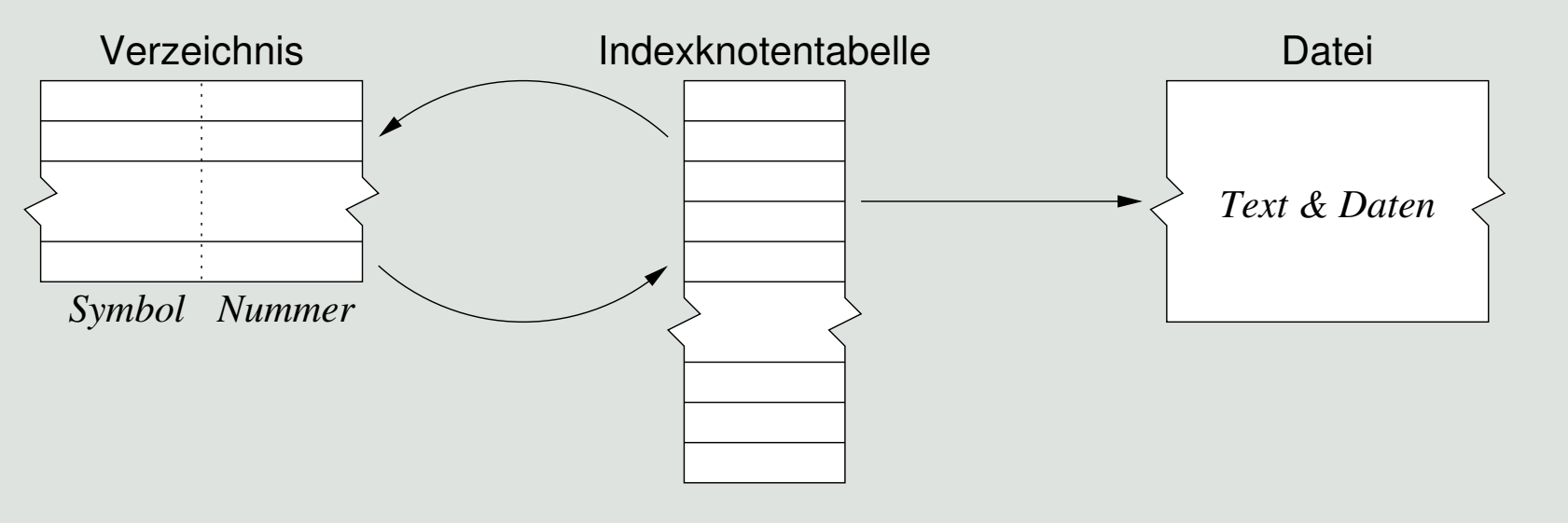
    Seitennummer $p = [0, 2^{n-w} - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$, Tabellenindex
  - eine gewöhnliche **lineare Adresse** $\rightsquigarrow$ **eindimensionaler Adressraum**
    - d.h., Oktetts oder Worte in einer Dimension aufgereiht
- **Segmentierung** (*segmentation*) mittels **Segmenttabelle** [3, S. 37]
  - jede Adresse ist repräsentiert als Zweitupel $A_s = \langle s, d \rangle$

    Segmentname $s = [0, 2^m - 1]$, mit $12 \leq m \leq 18$, Tabellenindex

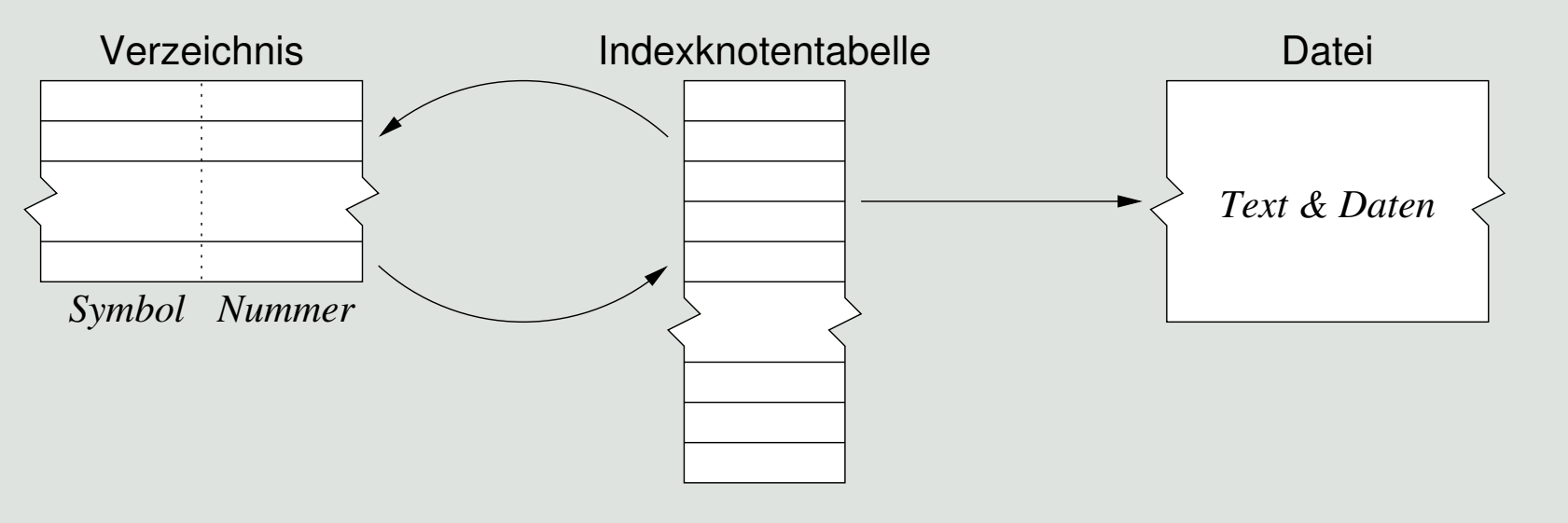
    Verschiebung $d = [0, 2^n - 1]$, mit $32 \leq n \leq 64$ (*displacement*)
  - Zweikomponentenadresse $\rightsquigarrow$ **zweidimensionaler Adressraum**
    - d.h., Segmente in der ersten und Segmentinhalte in der zweiten Dimension

- Kombination (vgl. [3, S. 38–40]):
  - **segmentierte Seitenadressierung** (*segmented paging*)
    - die Seitentabellen sind segmentiert, d.h., $A_p = (p, o)$ mit $p = (s, d)$
  - **seitennummerierte Segmentierung** (*paged segmentation*)
    - die Segmente sind seitennummeriert, d.h., $A_s = \langle s, d \rangle$ mit $d = (p, o)$ oder die Segmenteinheit generiert eine lineare Adresse A_p für die Seiteneinheit

Organisation des Ablagespeichers

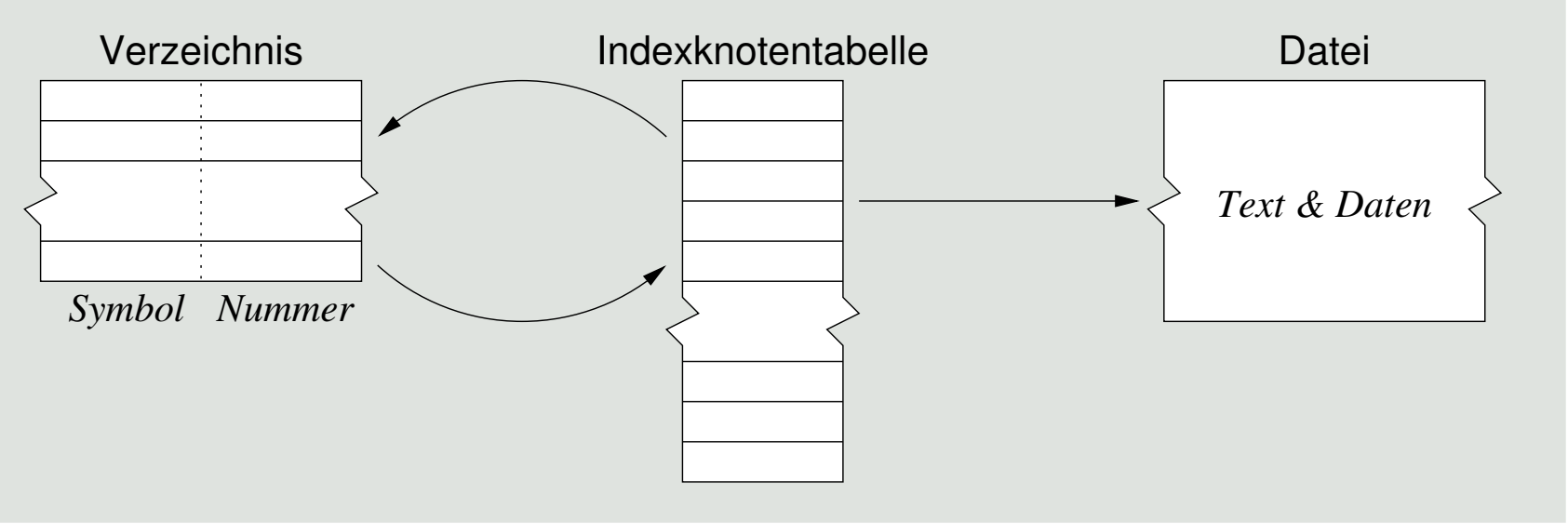


Organisation des Ablagespeichers



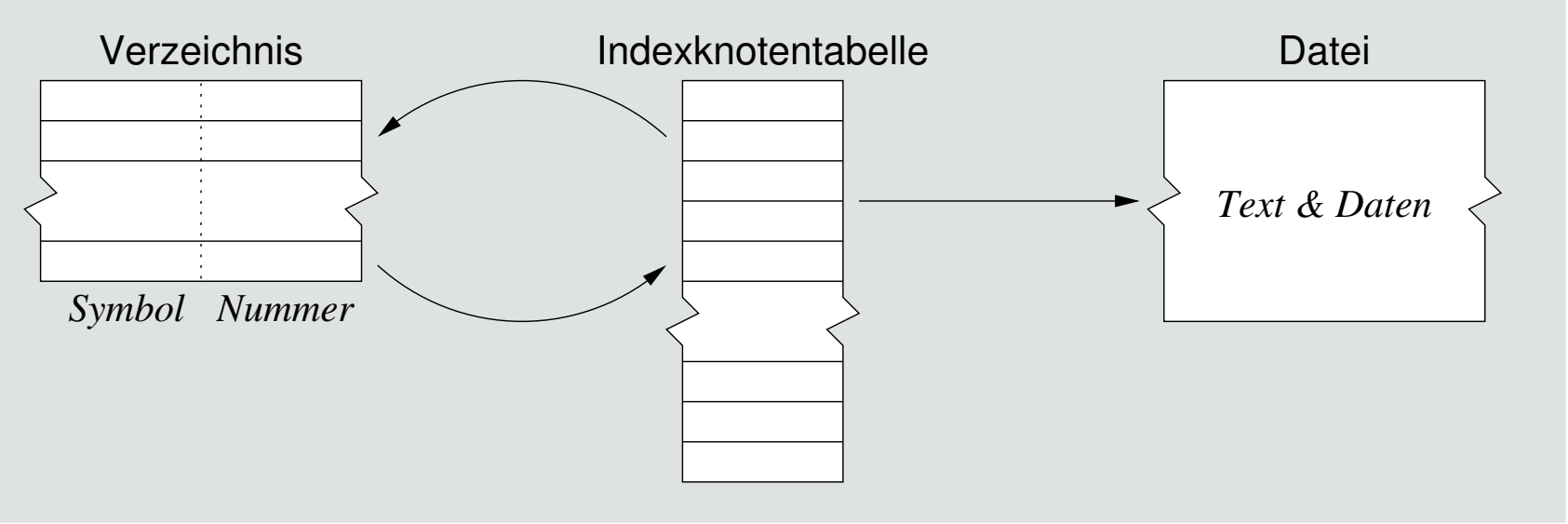
- die **Indexknotentabelle** (*inode table*) ist ein statisches Feld (*array*) von Indexknoten und die zentrale Datenstruktur
  - ein Indexknoten ist **Deskriptor** insb. eines Verzeichnisses oder einer Datei

Organisation des Ablagespeichers



- die **Indexknotentabelle** (*inode table*) ist ein statisches Feld (*array*) von Indexknoten und die zentrale Datenstruktur
- das **Verzeichnis** (*directory*) ist eine **Abbildungstabelle**, es übersetzt symbolisch repräsentierte Namen in Indexknotennummern
  - eine von der Namensverwaltung des Betriebssystems definierte Datei

Organisation des Ablagespeichers



- die **Indexknotentabelle** (*inode table*) ist ein statisches Feld (*array*) von Indexknoten und die zentrale Datenstruktur
- das **Verzeichnis** (*directory*) ist eine **Abbildungstabelle**, es übersetzt symbolisch repräsentierte Namen in Indexknotennummern
  - eine von der Namensverwaltung des Betriebssystems definierte Datei
- die **Datei** (*file*) ist eine abgeschlossene Einheit zusammenhängender Daten beliebiger Repräsentation, Struktur und Bedeutung

Systemprogrammierung 1

Betriebsarten

Stapelbetrieb

Stapelbetrieb

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
  - Entlastung durch Spezialrechner

Stapelbetrieb

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
  - Entlastung durch Spezialrechner
- überlappte Ein-/Ausgabe: DMA, *Interrupts*
  - nebenläufige Programmausführung

Stapelbetrieb

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
  - Entlastung durch Spezialrechner
- überlappte Ein-/Ausgabe: DMA, *Interrupts*
  - nebenläufige Programmausführung
- überlappte Auftragsverarbeitung: Einplanung, Vorgriff
  - Verarbeitungsstrom von Aufträgen

Stapelbetrieb

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
  - Entlastung durch Spezialrechner
- überlappte Ein-/Ausgabe: DMA, *Interrupts*
  - nebenläufige Programmausführung
- überlappte Auftragsverarbeitung: Einplanung, Vorgriff
  - Verarbeitungsstrom von Aufträgen
- abgesetzte Ein-/Ausgabe: *Spooling*
  - Entkopplung durch Pufferbereiche

Stapelbetrieb

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
  - Entlastung durch Spezialrechner
- überlappte Ein-/Ausgabe: DMA, *Interrupts*
  - nebenläufige Programmausführung
- überlappte Auftragsverarbeitung: Einplanung, Vorgriff
  - Verarbeitungsstrom von Aufträgen
- abgesetzte Ein-/Ausgabe: *Spooling*
  - Entkopplung durch Pufferbereiche
- Mehrprogrammbetrieb: *Multiprogramming*
  - Multiplexen der CPU

Stapelbetrieb

- abgesetzter Betrieb: Satellitenrechner, Hauptrechner
  - Entlastung durch Spezialrechner
- überlappte Ein-/Ausgabe: DMA, *Interrupts*
  - nebenläufige Programmausführung
- überlappte Auftragsverarbeitung: Einplanung, Vorgriff
  - Verarbeitungsstrom von Aufträgen
- abgesetzte Ein-/Ausgabe: *Spooling*
  - Entkopplung durch Pufferbereiche
- Mehrprogrammbetrieb: *Multiprogramming*
  - Multiplexen der CPU
- dynamisches Laden: Überlagerung (*overlay*)
  - programmiertes Nachladen von Programmbestandteilen

Mehrzugangsbetrieb

Mehrzugangsbetrieb

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
  - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können

Mehrzugangsbetrieb

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
  - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können
- Hintergrundbetrieb: Mischbetrieb
  - Programme im Vordergrund starten

Mehrzugangsbetrieb

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
  - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können
- Hintergrundbetrieb: Mischbetrieb
  - Programme im Vordergrund starten
- Teilnehmerbetrieb: Zeitscheibe, *Timesharing*
  - eigene Dialogprozesse absetzen können

Mehrzugangsbetrieb

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
  - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können
- Hintergrundbetrieb: Mischbetrieb
  - Programme im Vordergrund starten
- Teilnehmerbetrieb: Zeitscheibe, *Timesharing*
  - eigene Dialogprozesse absetzen können
- Teilhaberbetrieb: residente Dialogprozesse
  - sich gemeinsame Dialogprozesse teilen können

Mehrzugangsbetrieb

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
  - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können
- Hintergrundbetrieb: Mischbetrieb
  - Programme im Vordergrund starten
- Teilnehmerbetrieb: Zeitscheibe, *Timesharing*
  - eigene Dialogprozesse absetzen können
- Teilhaberbetrieb: residente Dialogprozesse
  - sich gemeinsame Dialogprozesse teilen können
- Multiprozessorbetrieb: Parallelrechner, SMP
  - Parallelverarbeitung von Programmen

Mehrzugangsbetrieb [5]

- Dialogbetrieb: Dialogstationen
  - mehrere Benutzer gleichzeitig bedienen können
- Hintergrundbetrieb: Mischbetrieb
  - Programme im Vordergrund starten
- Teilnehmerbetrieb: Zeitscheibe, *Timesharing*
  - eigene Dialogprozesse absetzen können
- Teilhaberbetrieb: residente Dialogprozesse
  - sich gemeinsame Dialogprozesse teilen können
- Multiprozessorbetrieb: Parallelrechner, SMP
  - Parallelverarbeitung von Programmen
- Speicheraustausch: *Swapping*, *Paging*
  - von ganzen Prozessadressräumen oder einzelnen Bestandteilen

Echtzeitbetrieb: Terminvorgaben

[5, S. 12*ff.*]

- externe (physikalische) Prozesse definieren, was genau bei einer nicht termingerecht geleisteten Berechnung zu geschehen hat

Echtzeitbetrieb: Terminvorgaben

[5, S. 12*ff.*]

- externe (physikalische) Prozesse definieren, was genau bei einer nicht termingerecht geleisteten Berechnung zu geschehen hat:
  weich (*soft*) auch „schwach“
    - das Ergebnis ist weiterhin von Nutzen, verliert jedoch mit jedem weiteren Zeitverzug des internen Prozesses zunehmend an Wert
    - die Terminverletzung ist tolerierbar

Echtzeitbetrieb: Terminvorgaben [5, S. 12*ff.*]

- externe (physikalische) Prozesse definieren, was genau bei einer nicht termingerecht geleisteten Berechnung zu geschehen hat:
  weich (*soft*) auch „schwach“
    - das Ergebnis ist weiterhin von Nutzen, verliert jedoch mit jedem weiteren Zeitverzug des internen Prozesses zunehmend an Wert
    - die Terminverletzung ist tolerierbar

  fest (*firm*) auch „stark“
    - das Ergebnis ist wertlos, wird verworfen, der interne Prozess wird abgebrochen und erneut bereitgestellt
    - die Terminverletzung ist tolerierbar

Echtzeitbetrieb: Terminvorgaben [5, S. 12*ff.*]

- externe (physikalische) Prozesse definieren, was genau bei einer nicht termingerecht geleisteten Berechnung zu geschehen hat:

  weich (*soft*) auch „schwach“
  - das Ergebnis ist weiterhin von Nutzen, verliert jedoch mit jedem weiteren Zeitverzug des internen Prozesses zunehmend an Wert
  - die Terminverletzung ist tolerierbar

  fest (*firm*) auch „stark“
  - das Ergebnis ist wertlos, wird verworfen, der interne Prozess wird abgebrochen und erneut bereitgestellt
  - die Terminverletzung ist tolerierbar

  hart (*hard*) auch „strikt“
  - Verspätung des Ergebnisses kann zur „Katastrophe“ führen, dem int. Prozess wird eine **Ausnahmesituation** zugestellt
  - Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar — aber möglich…

Echtzeitbetrieb: Terminvorgaben [5, S. 12*ff.*]

- externe (physikalische) Prozesse definieren, was genau bei einer nicht termingerecht geleisteten Berechnung zu geschehen hat:
  weich (*soft*) auch „schwach“
    - das Ergebnis ist weiterhin von Nutzen, verliert jedoch mit jedem weiteren Zeitverzug des internen Prozesses zunehmend an Wert
    - die Terminverletzung ist tolerierbar

  fest (*firm*) auch „stark“
    - das Ergebnis ist wertlos, wird verworfen, der interne Prozess wird abgebrochen und erneut bereitgestellt
    - die Terminverletzung ist tolerierbar

  hart (*hard*) auch „strikt“
    - Verspätung des Ergebnisses kann zur „Katastrophe“ führen, dem int. Prozess wird eine **Ausnahmesituation** zugestellt
    - Terminverletzung ist keinesfalls tolerierbar — aber möglich…
- ggf. zusätzlich geforderte Randbedingung ist die Termineinhaltung unter allen Last- und Fehlerbedingungen

Gliederung

Systemprogrammierung 2

Ausblick

Vertiefung

Vertiefung

- Prozessverwaltung
  - Einplanung (klassisch, Fallstudien)
  - Koroutinen, Programmfäden, Einlastung

Vertiefung

- Prozessverwaltung
  - Einplanung (klassisch, Fallstudien)
  - Koroutinen, Programmfäden, Einlastung
- Synchronisation
  - ein-/mehrseitig, blockierend/nicht-blockierend
  - Verklemmungen (Gegenmaßnahmen, Auflösung)

Vertiefung

- Prozessverwaltung
  - Einplanung (klassisch, Fallstudien)
  - Koroutinen, Programmfäden, Einlastung
- Synchronisation
  - ein-/mehrseitig, blockierend/nicht-blockierend
  - Verklemmungen (Gegenmaßnahmen, Auflösung)
- Speicherverwaltung
  - Adressräume, MMU (Pentium)
  - Disziplinen, virtueller Speicher, Arbeitsmenge

- Prozessverwaltung
  - Einplanung (klassisch, Fallstudien)
  - Koroutinen, Programmfäden, Einlastung
- Synchronisation
  - ein-/mehrseitig, blockierend/nicht-blockierend
  - Verklemmungen (Gegenmaßnahmen, Auflösung)
- Speicherverwaltung
  - Adressräume, MMU (Pentium)
  - Disziplinen, virtueller Speicher, Arbeitsmenge
- Dateiverwaltung
  - Organisation des Hintergrundspeichers
  - Datenverfügbarkeit (RAID)

Literaturverzeichnis (1)

[1] Kleinöder, J. :
Kurzeinführung in C.
In: [13], Kapitel 2

[2] Kleinöder, J. :
Vom C-Programm zum UNIX-Prozess.
In: [13], Kapitel 3

[3] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Adressbindung.
In: [13], Kapitel 6.3

[4] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Betriebssystemmaschine.
In: [13], Kapitel 5.3

Literaturverzeichnis (2)

[5] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Dialog- und Echtzeitverarbeitung.
In: [13], Kapitel 7.2

[6] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Einführung.
In: [13], Kapitel 4

[7] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Maschinenprogramme.
In: [13], Kapitel 5.2

[8] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Organisation.
In: [13], Kapitel 1

Literaturverzeichnis (3)

[9] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Prozesse.
In: [13], Kapitel 6.1

[10] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Rechnerorganisation.
In: [13], Kapitel 5.1

[11] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Speicher.
In: [13], Kapitel 6.2

[12] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. :
Stapelverarbeitung.
In: [13], Kapitel 7.1

Literaturverzeichnis (4)

[13] Kleinöder, J. ; Schröder-Preikschat, W. ; Lehrstuhl Informatik 4 (Hrsg.):
Systemprogrammierung.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien)