

# MAS: Betriebssysteme

Koordination und Synchronisation:  
Kritische Abschnitte, Sperren, Semaphore und  
Mutexe

T. Pospíšek

# Gesamtüberblick

---

1. Einführung in Computersysteme
2. Entwicklung von Betriebssystemen
3. Architekturansätze
4. Interruptverarbeitung in Betriebssystemen
5. Prozesse und Threads
6. CPU-Scheduling
- 7. Synchronisation und Kommunikation**
8. Speicherverwaltung
9. Geräte- und Dateiverwaltung
10. Betriebssystemvirtualisierung

# Zielsetzung

---

- Der Studierende soll die Probleme der Parallelverarbeitung verstehen und einschätzen können
- Der Studierende soll Konzepte zur Vermeidung von Race Conditions sowohl auf Betriebssystemebene als auch auf Anwendungsebene erläutern können
- Der Studierende soll verstehen, wie Sperren, Semaphore und Mutexe funktionieren und wie man sie implementiert

# Überblick

---

- 1. Einführung**
2. Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss
3. Sperren, Semaphore und Mutex
4. Diverse Synchronisationsprobleme

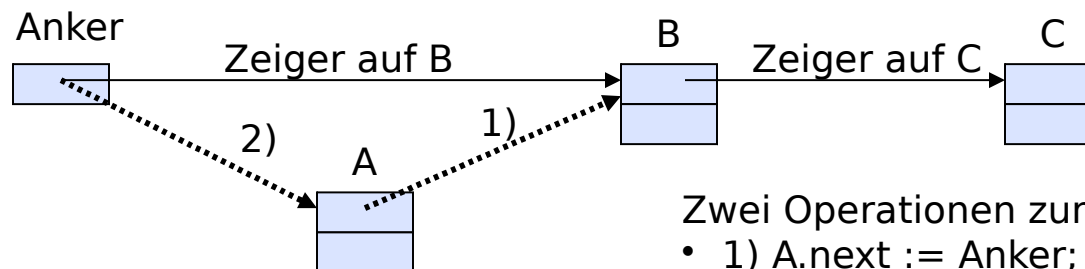
# Einführung

- Nebenläufigkeit
  - Parallele oder quasi-parallele Ausführung von Befehlsfolgen in Prozessen und Threads
  - Verdrängung jederzeit durch BS möglich ohne Einfluss des Anwendungsprogrammierers
- Atomare Aktionen
  - Codebereiche, die in einem Stück, also atomar, ausgeführt werden müssen, um Inkonsistenzen zu vermeiden
  - Aber: Eine Unterbrechung durch Verdrängung ist jederzeit möglich

# Konflikte, Fallbeispiel 1 (1)

## ■ Beispiel zur Verdeutlichung des Problems:

- Mehrere Prozesse bearbeiten eine gemeinsame Liste von Objekten (z.B. die Prozesslisten der Run-Queue)
- Ein Prozess hängt ein neues Objekt vorne in die Liste ein
  - Prozesse können zu beliebigen Zeiten unterbrochen werden
  - Versucht ein zweiter Prozess auch, ein Objekt vorne anzuhängen, gibt es möglicherweise Probleme



Zwei Operationen zum Einhängen von A:

- 1) A.next := Anker;
- 2) Anker := Adresse(A);

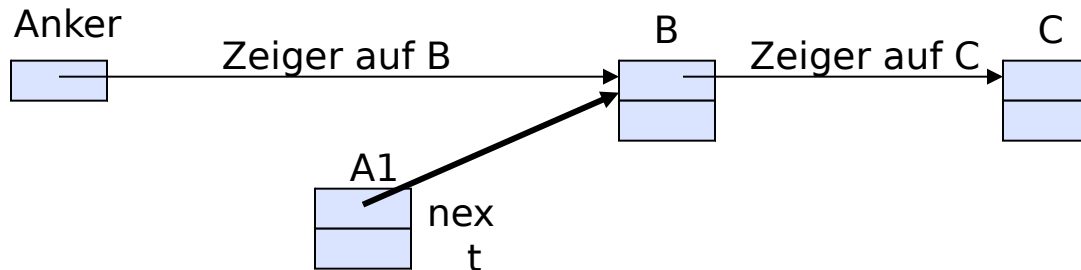
Unterbrechung hier kann  
problematisch werden

## Konflikte, Fallbeispiel 1 (2)

- Prozess 1 führt 1. Anweisung aus
  - A1.next := Anker
  - jetzt wird die CPU entzogen

Zwei Operationen zum Einhängen:

- **1) A.next := Anker;**
- 2) Anker := Adresse(A);

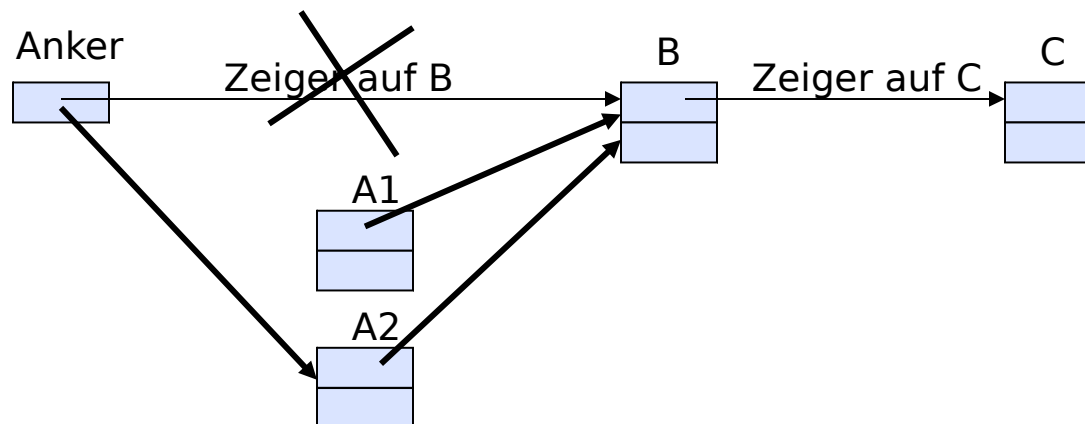


## Konflikte, Fallbeispiel 1 (3)

- Prozess 2 führt 1. und 2. Anweisung aus
  - $A2.next := \text{Anker}$
  - $\text{Anker} := \text{Adresse}(A2)$
  - Jetzt wird die CPU entzogen

Zwei Operationen zum Einhängen:

- **1)  $A.next := \text{Anker}$ ;**
- **2)  $\text{Anker} := \text{Adresse}(A)$ ;**



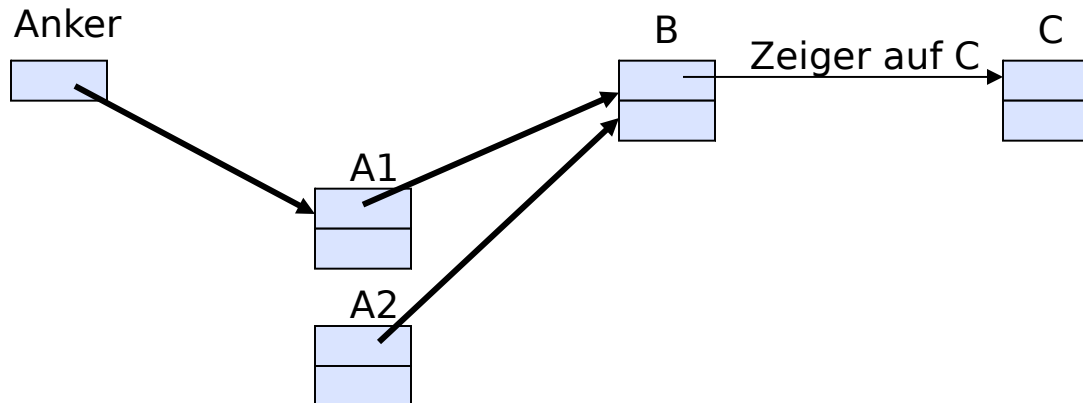


## Konflikte, Fallbeispiel 1 (4)

- Prozess 1 führt die 2. Anweisung aus
  - Anker := Adresse (A1)
  - Jetzt wird die CPU entzogen

Zwei Operationen zum Einhängen:

- 1) A.next := Anker;
- 2) Anker := Adresse(A);

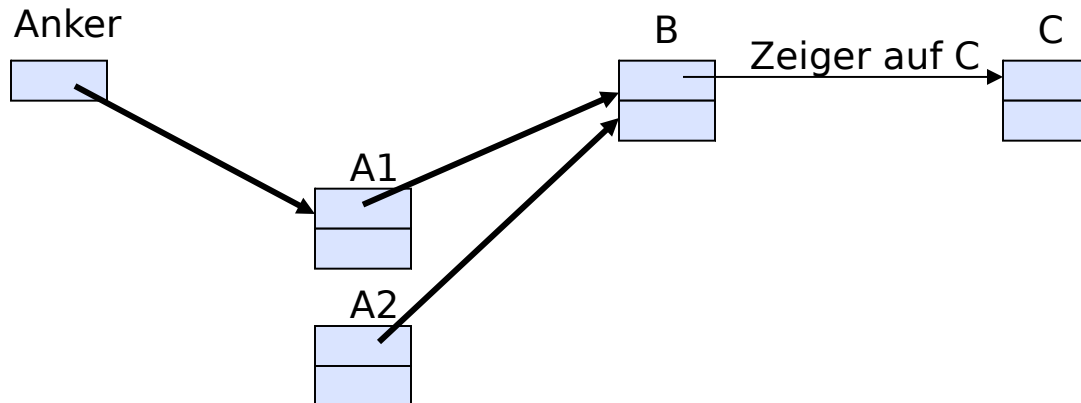


## Konflikte, Fallbeispiel 1 (5)

- Prozess 1 führt die 2. Anweisung aus
  - Anker := Adresse (A1)
  - A2 wird zur Leiche

Zwei Operationen zum Einhängen:

- 1) A.next := Anker;
- **2) Anker := Adresse(A);**



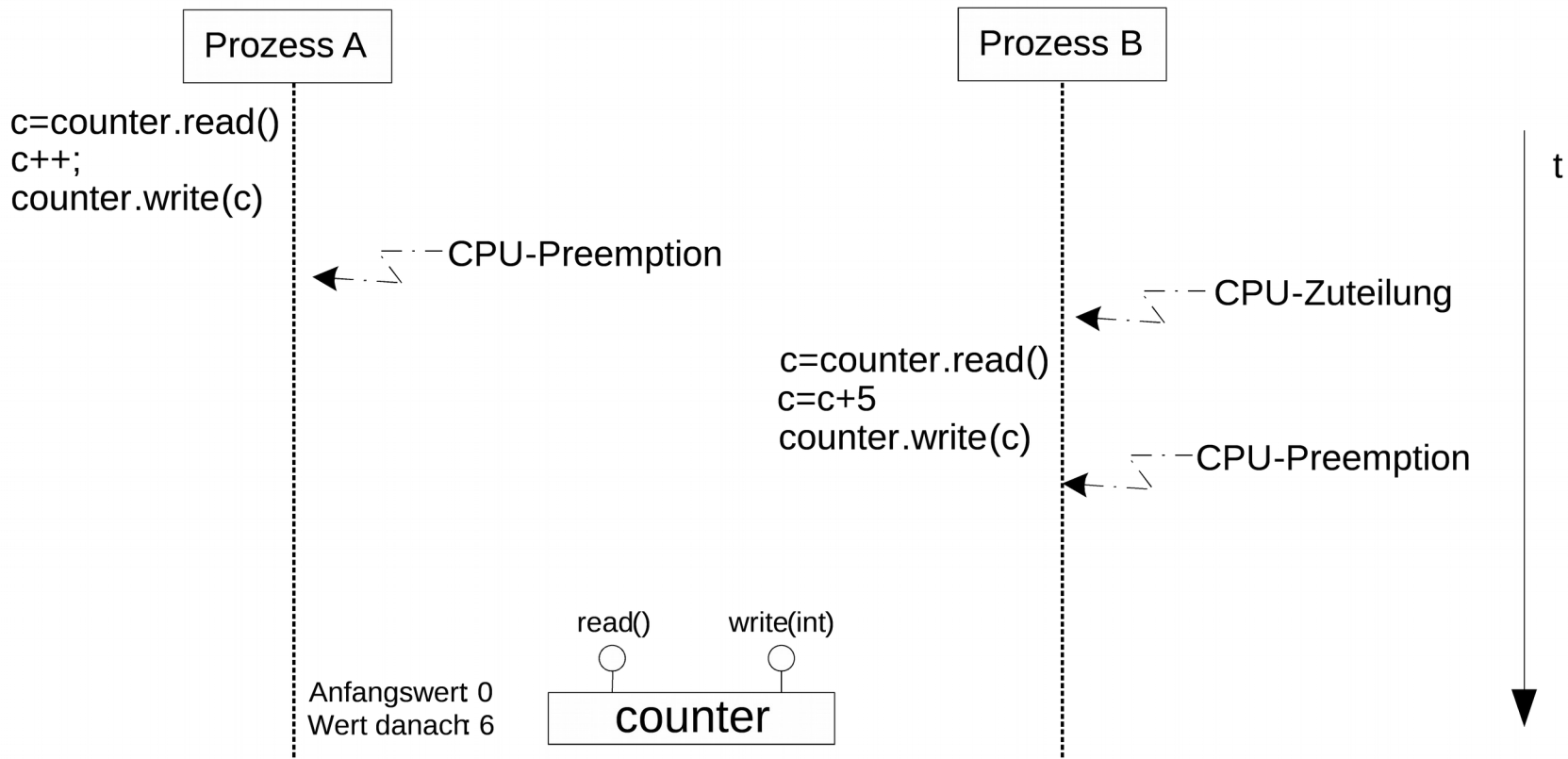
## Konflikte, Fallbeispiel 2 (1)

---

- Ein gemeinsam genutzter Zähler (Counter) wird von zwei Prozessen verändert
- Auch hier kann es zu Inkonsistenzen kommen, die als Lost-Update bezeichnet werden

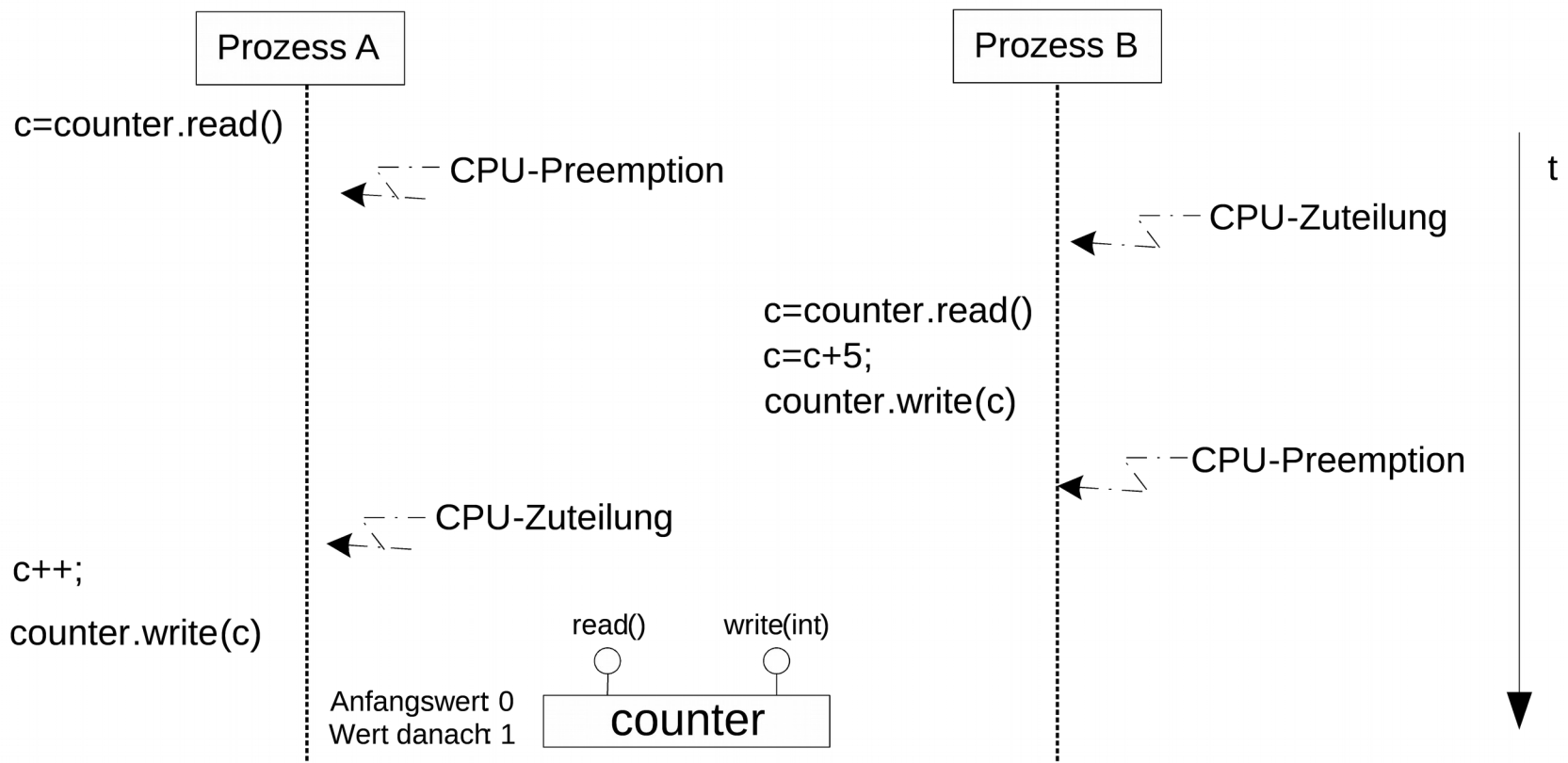
## Konflikte, Fallbeispiel 2 (2)

- Counter steht anfangs auf 0 Syntax
- **Unproblematischer** Ablauf



## Konflikte, Fallbeispiel 2 (3)

- Fehlerfall: Was passiert bei diesem Ablauf, wenn counter zunächst auf 0 steht?



# Race Conditions

---

- Diese Situationen bezeichnet man auch als Race Conditions
  - Zwei oder mehrere Prozesse oder Threads nutzen ein gemeinsames Betriebsmittel (Liste, Counter,...)
  - Endergebnisse der Bearbeitung sind von der zeitlichen Reihenfolge abhängig

# Überblick

---

1. Einführung
- 2. Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss**
3. Sperren, Semaphore und Mutex
4. Diverse Synchronisationsprobleme

# Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss

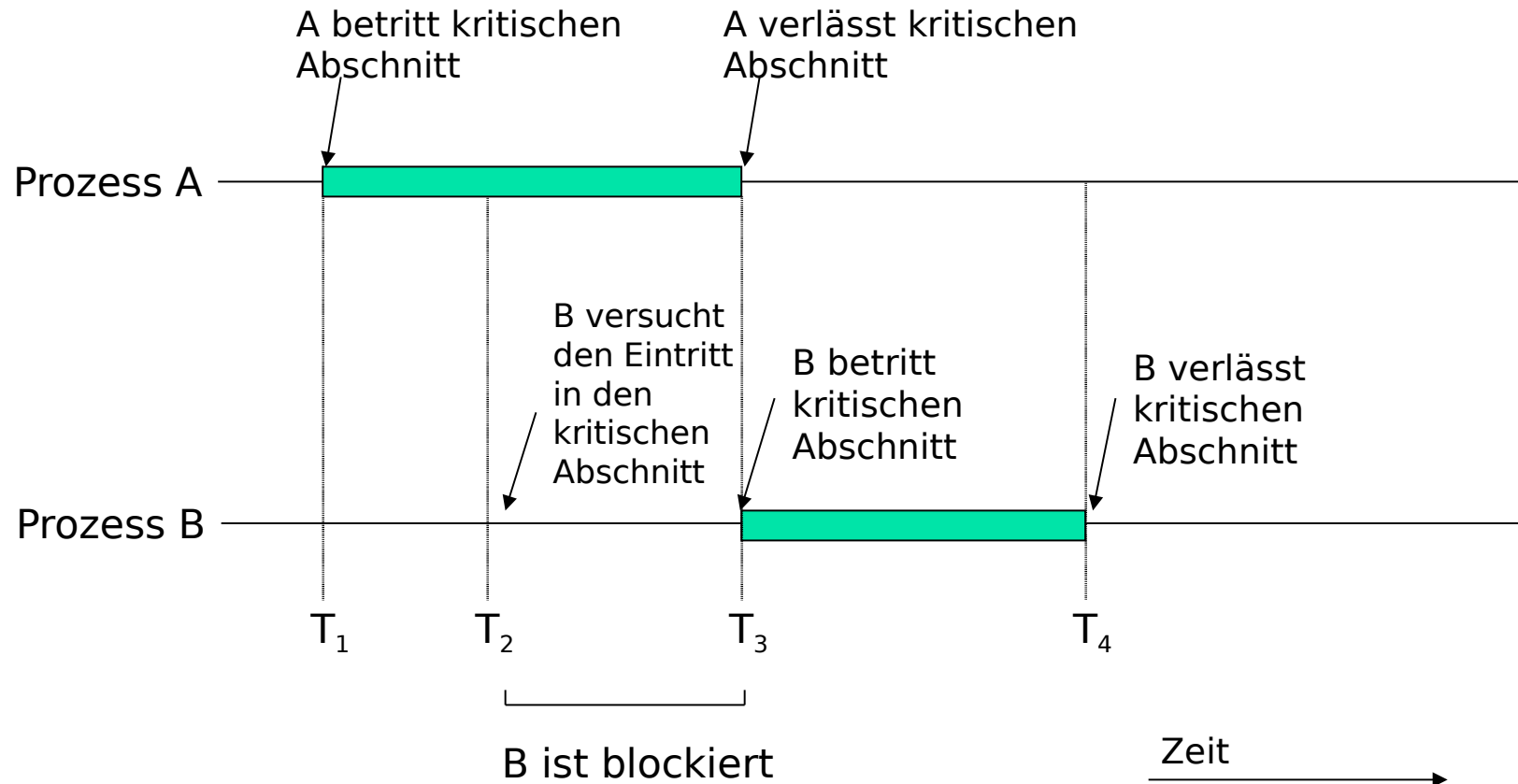
- Auf gemeinsam von mehreren Prozessen oder Threads bearbeitete Daten darf nicht beliebig zugegriffen werden
  - Prozesse bzw. Threads müssen sich zur Bearbeitung gemeinsamer (shared) Ressourcen miteinander **koordinieren**
  - **Synchronisation** erforderlich



# Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss

- Man benötigt ein Konzept, das es ermöglicht, gewisse Arbeiten **logisch nicht unterbrechbar** zu machen
  - Die Codeabschnitte, die nicht unterbrochen werden dürfen, werden auch als **kritische Abschnitte** (critical sections) bezeichnet
  - In einem kritischen Abschnitt darf sich immer nur ein Prozess zu einer Zeit befinden
  - Das Betreten und Verlassen eines kritischen Abschnitts muss abgestimmt (synchronisiert) werden
- Ziel: **Gegenseitigen Ausschluss** (mutual exclusion) garantieren

# Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss



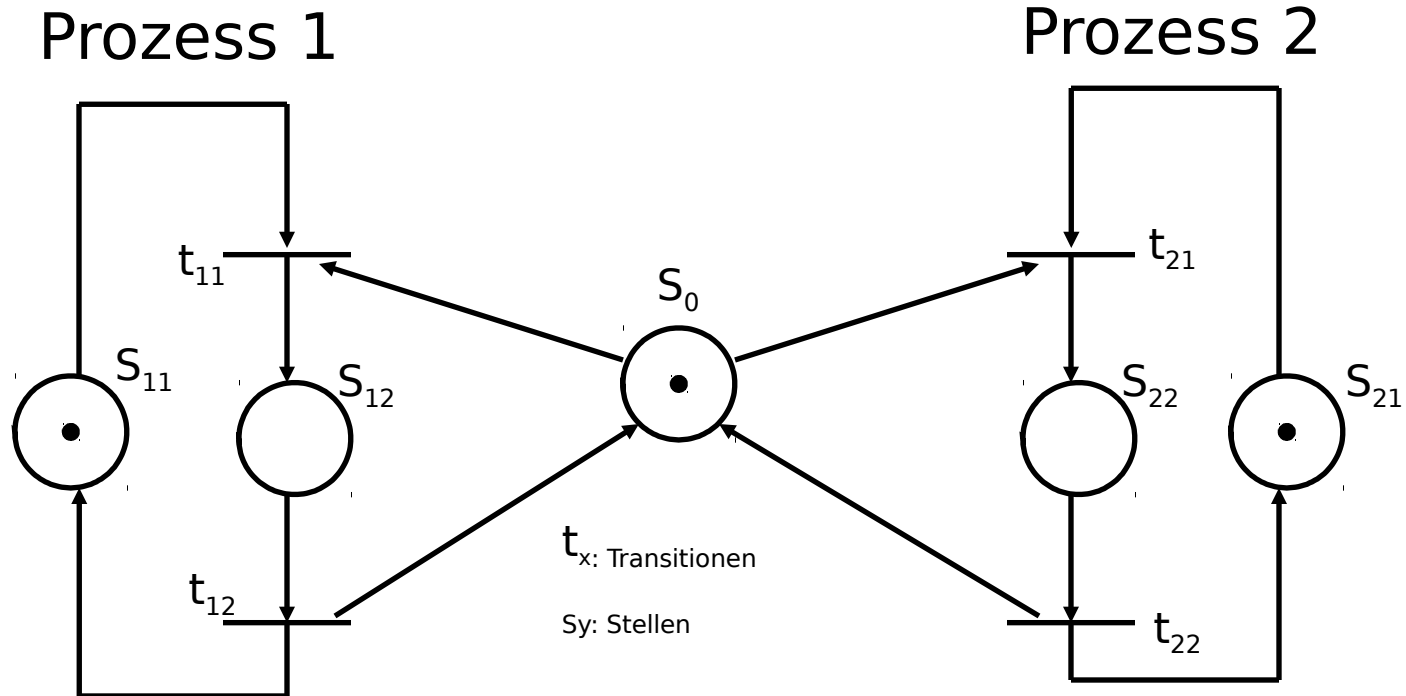
Nach Tanenbaum (2009)

# Anforderungen an kritische Abschnitte

- Kriterien von Dijkstra (1965):
  - **Keine zwei Prozesse dürfen gleichzeitig** in einem kritischen Abschnitt sein (mutual exclusion)
  - **Keine Annahmen über die Abarbeitungsgeschwindigkeit** und die Anzahl der Prozesse bzw. Prozessoren
  - Kein Prozess außerhalb eines kritischen Abschnitts darf einen anderen Prozess **blockieren**
  - Jeder Prozess, der am Eingang eines kritischen Abschnitts wartet, muss ihn irgendwann betreten dürfen → **kein ewiges Warten** (fairness condition)

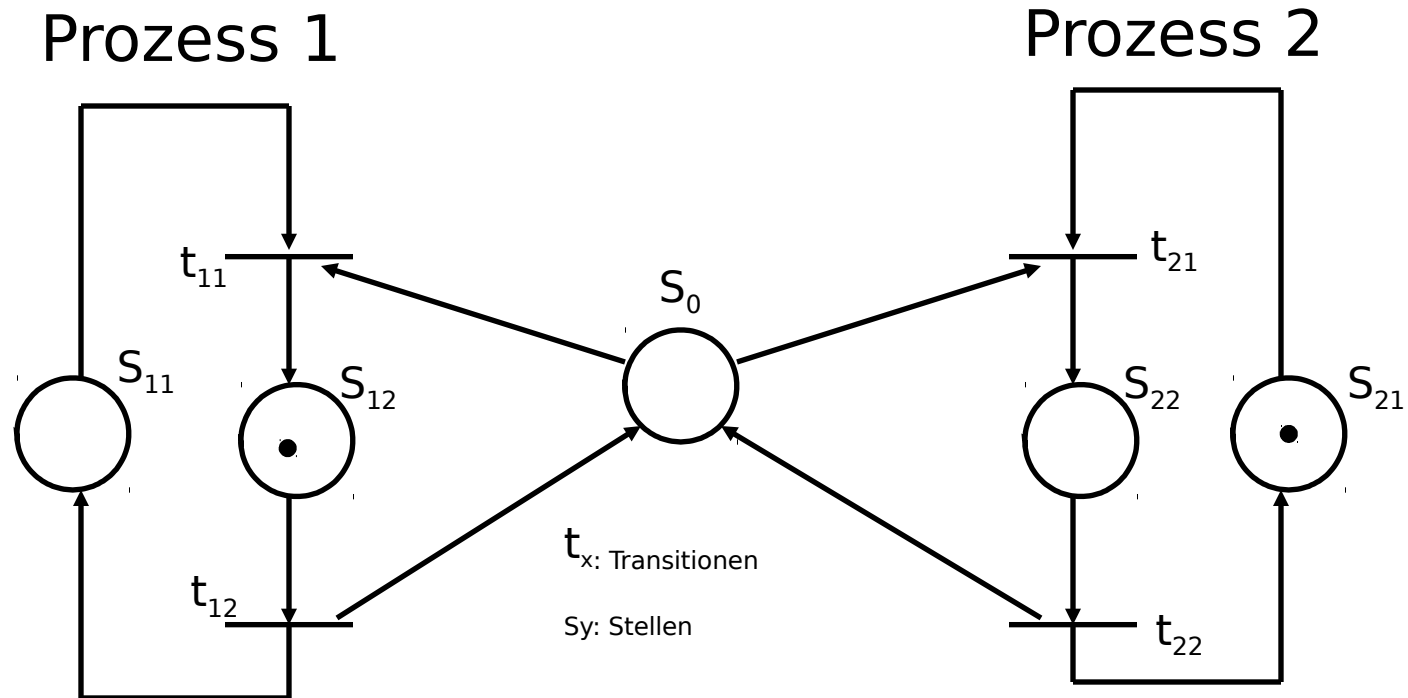


# Kritischer Abschnitt als Petrinetz (1)



- $S_{12}$  und  $S_{22}$  stellen die kritischen Abschnitte zweier Prozesse dar,  $S_{11}$  und  $S_{21}$  sind unkritisch
- Über die Stelle  $S_0$  wird der gegenseitige Ausschluss realisiert ( $S_0$  enthält maximal eine Marke)

## Kritischer Abschnitt als Petrinetz (2)



- $t_{11}$  schaltet hier und Prozess 1 ist im kritischen Abschnitt

# Überblick

---

1. Einführung
2. Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss
- 3. Sperren, Semaphore und Mutex**
4. Diverse Synchronisationsprobleme

# Sperren: Implementierungsvarianten (1)

- Eine einfache Lösung zur Realisierung von kritischen Abschnitten ist **busy waiting** (aktives Warten)
  - Ein Prozess testet eine sog. Synchronisationsvariable
  - Test solange, bis Variable einen Wert hat, der den Zutritt erlaubt → Man braucht einen speziellen Befehl dazu, oder via Token Passing
- Dieses **Polling** ist oft unwirtschaftlich, da es eine Verschwendung der CPU-Zeit bedeutet
  - Aber: **Spinlocks** in Betriebssystemen sind oft anzutreffen
    - Bei sehr kurzen Wartezeiten bei Multiprozessoren sehr gut!
    - Warum nicht bei Singleprozessoren?
- Manchmal ist es besser, einen Prozess „schlafen“ zu legen und erst wieder zu wecken, wenn er in den kritischen Bereich darf

## Sperren, Implementierungsvarianten (2)

- Hardware-Unterstützung zur Synchronisation:

- Alle **Interrupts ausschalten**; Geht nur bei Monoprozessoren. Warum?

→ Ist aber meist eine schlechte Lösung!

...

Interrupts sperren (Maskieren, z.B. Windows IRQL hochsetzen)

```
/* Kritischer Abschnitt beginnt */
```

...

```
/* Kritischer Abschnitt endet */
```

Interrupts freigeben (Demaskieren)



## Sperren, Implementierungsvarianten (3)

- Hardware-Unterstützung zur Synchronisation:
  - **Atomare Instruktionsfolge** über nicht unterbrechbare Maschinenbefehle in einem einzigen ununterbrechbaren Speicherzyklus → wichtig bei Multiprozessoren!
  - Praktische Beispiele hierfür:
    - **Test and Set Lock** (TSL = test and set lock) bzw. **TAL**
      - Lesen und Ersetzen einer Speicherzelle in einem Speicherzyklus
    - **Swap**
      - Austausch zweier Variablenwerte in einem Speicherzyklus
    - **Fetch And Add**
      - Lesen und Inkrementieren einer Speicherzelle in einem Speicherzyklus
    - **Exchange-Befehl XCHG dest, src (im Intel-Befehlssatz)**
      - Inhalte von src und dest werden ausgetauscht (Register und Speicherbereiche als Quelle und Ziel möglich)

# Sperren, Beispiel: TSL-Befehl

- Einfache Lock-Implementierung mit TSL-Befehl (auch: TAS-Befehl)
- LOCK ist eine Speichervariable, die vom TSL-Befehl in einem Speicherzyklus gesetzt und ausgelesen wird

...

## **MyLock\_lock:**

<b>TSL</b> R1, LOCK	// Lies LOCK in R1 ein und
	// setze Wert von LOCK auf 1
<b>CMP</b> R1, #0	// Vergleiche Registerinhalt mit 0
	// Wenn Vergleich zutrifft, dann ist Lock gesetzt
<b>JNE</b> MyLock_lock	// Ansonsten erneut versuchen
<b>RET</b>	// Kritischer Abschnitt kann betreten werden

## **MyLock\_unlock:**

<b>MOV<math>\bar{E}</math></b> LOCK, #0	// LOCK auf 0 setzen (freigeben)
<b>RET</b>	// Kritischer Abschnitt kann von anderem Prozess
	// betreten werden

Nach Tanenbaum (2009)

# Sperren, Beispiel: Lock über XCHG-Befehl

- Pseudocode mit Intel-80386-Maschinenbefehlen

**void akquireLock (var boolean lock)**

```
{  
    CODE {SYSTEM.i386}  
        MOV EBX, lock[EBP]    ; EBX := ADR(lock)  
        MOV AL, 1             ; AL := 1  
test:  
        XCHG [EBX], AL        ; Setze und lese Lockvariable atomar  
        CMP AL, 1             ; gesperrt?  
        JNE exit              ; ja  
        NOP                   ; nein, erneut versuchen  
        JMP test  
exit:  
}
```

**void releaseLock (var boolean lock)**

```
{  
    lock := FALSE;  
}
```

# Semaphore

- Dijkstra (1965) führte das Konzept der Semaphore zur Lösung des Mutual-Exclusion-Problems ein
- Zwei elementare Operationen
  - **P()**
    - Aufruf bei Eintritt in den kritischen Abschnitt, Operation auf Semaphor
    - Aufrufender Prozess wird in den Wartezustand versetzt, wenn sich ein anderer Prozess im kritischen Abschnitt befindet → Warteschlange
  - **V()**
    - Aufruf bei Verlassen des kritischen Abschnitts
    - Evtl. wird einer der wartenden Prozesse aktiviert und darf den kritischen Abschnitt betreten



Edsger Wybe Dijkstra (11.5.1930 – 06.08.2002)

Eisenbahnsignale  
Quelle: wikipedia.de

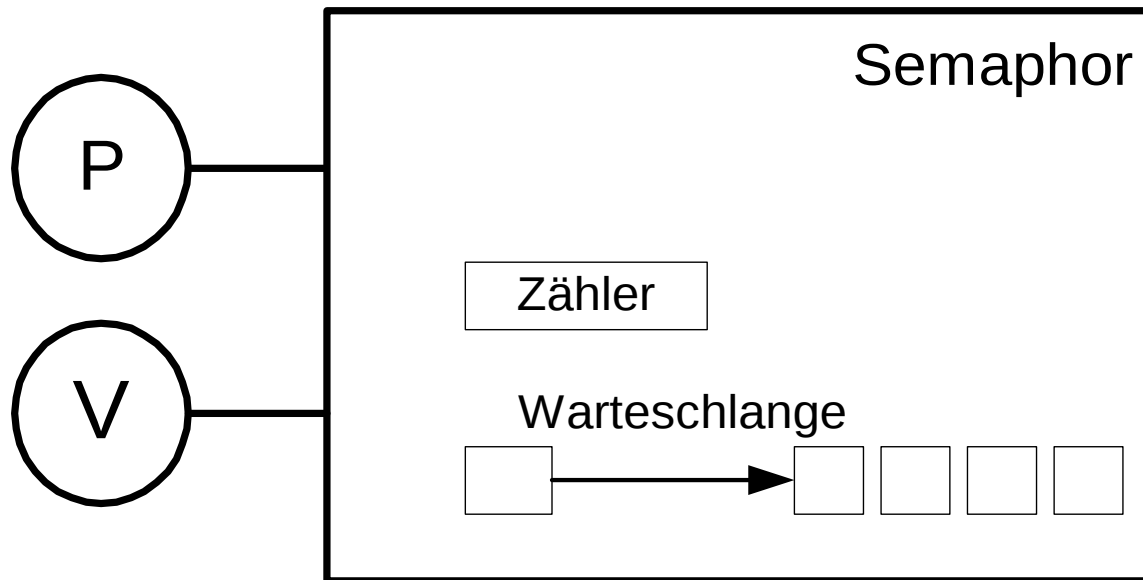


# Semaphore

- Semaphor-Zähler
- Warteschlange

Niederländisch:

- P kommt evtl. von probeeren = versuchen oder passeeren = passieren
- V kommt evtl. von verhogen = erhöhen oder vrijgeven = freisetzen



P: P-Operation auch Down-Operation genannt

V: V-Operation, auch Up-Operation genannt

# Semaphore, Beispielnutzung

```
...  
P();                // kritischer Abschnitt besetzt?  
  
c=counter.read();    // kritischer Abschnitt  
c++;  
counter.write(c);  
  
V();                // Verlassen des kritischen Abschnitts,  
                    // Aufwecken eines wartenden Prozesses
```

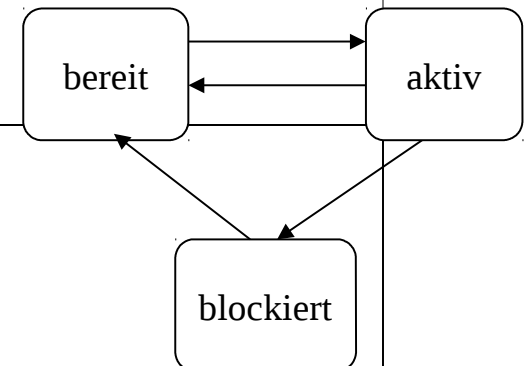
- P() und V() sind selbst wieder ununterbrechbar, also **atomare Aktionen**
- Atomare Aktionen werden **ganz** oder **gar nicht** ausgeführt

# Semaphore, Algorithmus

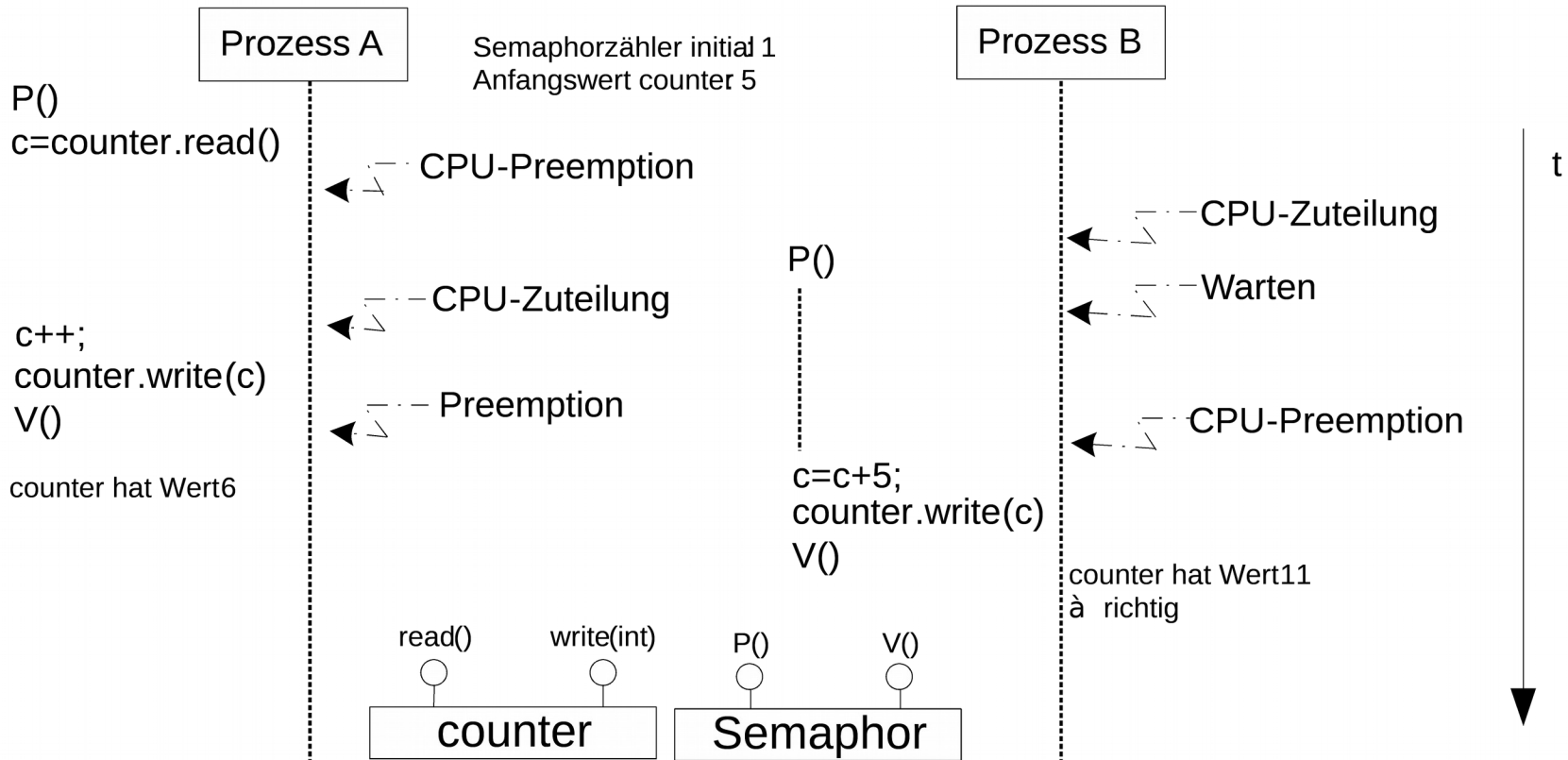
- $s$  ist der Semaphor-Zähler, Init:  $s \geq 1$

```
void P() {  
  if ( $s \geq 1$ ) {  
     $s = s - 1$ ;    // der die P-Operation ausführende Prozess setzt  
                  // seinen Ablauf fort  
  } else {  
    // der die P-Operation ausführende Prozess wird in seinem Ablauf  
    // zunächst gestoppt, in den Wartezustand versetzt und in einer dem  
    // Semaphor S zugeordneten Warteliste eingetragen  
  }  
}
```

```
void V() {  
   $s = s + 1$ ;  
  if (Warteliste ist nicht leer) {  
    // aus der Warteliste wird ein Prozess ausgewählt  
    // und aufgeweckt  
  }  
}  
// der die V-Operation ausführende Prozess setzt seinen Ablauf fort
```



# Semaphore: Vermeidung des Lost-Update-Problems





## Semaphore, einfache Form: Mutex

- Wenn man auf den Zähler im Semaphore verzichten kann, kann eine einfachere Form angewendet werden
- Diese wird als **Mutex** bezeichnet
- Ein Mutex ist leicht und effizient zu implementieren
- Ein Mutex ist eine Variable, die nur zwei Zustände haben kann:
  - locked und unlocked
- Man braucht also nur 1 Bit zur Implementierung
- Zwei Operationen:
  - mutex\_lock
  - mutex\_unlock

# Überblick

---

1. Einführung
2. Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss
3. Semaphore und Mutex
- 4. Diverse Synchronisationsprobleme**

# Philosophenproblem

- Dijkstra und Hoare (1965), Dining Philosophers Problem:
  - Fünf Philosophen sitzen um einen Tisch herum
  - Jeder hat einen Teller mit Spaghetti vor sich
  - Zwischen den Tellern liegt je eine Gabel (5 Gabeln)
  - Zum Essen braucht ein Philosoph 2 Gabeln
  - Ein Philosoph isst und denkt abwechselnd
  - Wenn er hungrig wird, versucht er in beliebiger Reihenfolge die beiden Gabeln links und rechts von seinem Teller zu nehmen
  - Hat er sie bekommen, isst er und legt sie dann wieder auf ihren Platz zurück

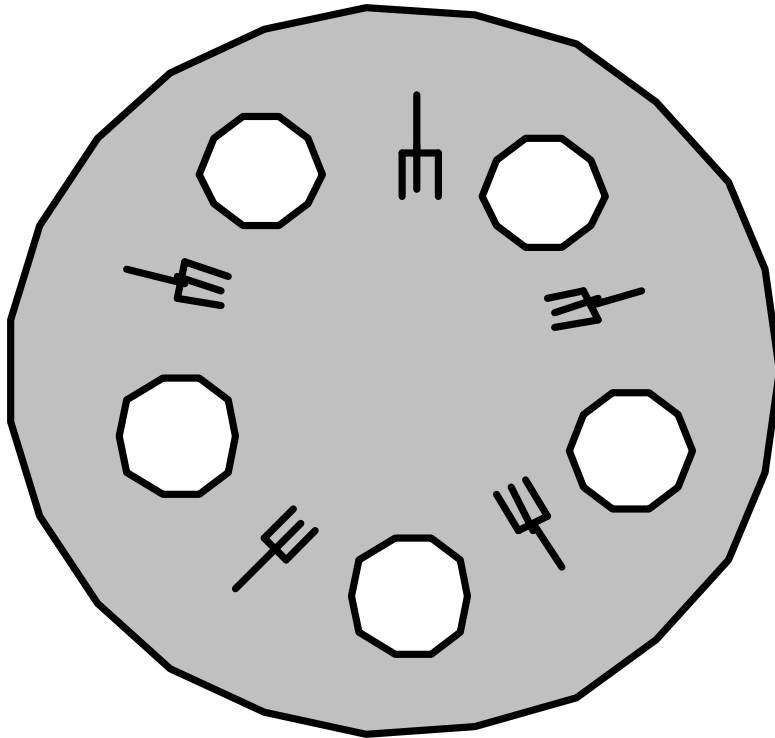


Sir Charles Antony Richard  
Hoare (11.01.1934)  
Britischer  
Computerwissenschaftler



Edsger Wybe Dijkstra  
(11.5.1930 - 06.08.2002)  
Niederländischer  
Computer-Wissenschaftler

# Prozessverwaltung: Philosophenproblem



## Lösungsalgorithmus:

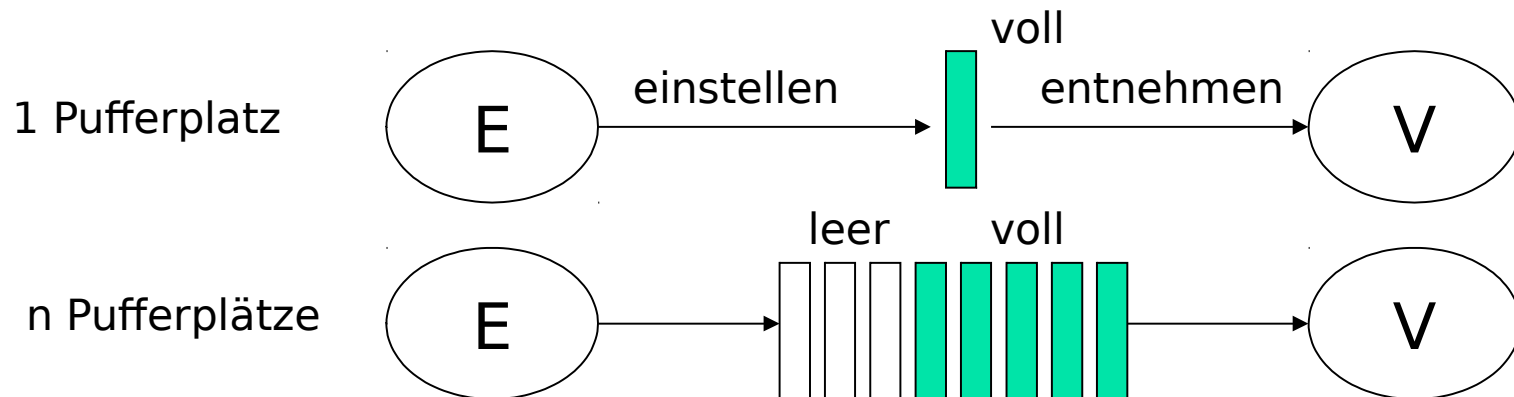
```
...  
static int n = 5;  
  
void philosopher(int i) {  
    while (true) {  
        think();  
        take_fork(i);  
        take_fork((i+1) % n);  
        eat();  
        put_fork(i);  
        put_fork((i+1) % n);  
    }  
}
```

Warum funktioniert der angegebene Algorithmus nicht?

Finden Sie eine Lösung, bei der zwei Philosophen gleichzeitig essen können und keiner verhungern muss!

# Erzeuger-Verbraucher-Problem

- Ein oder mehrere Erzeugerprozesse (producer) produzieren
- Ein oder mehrere Verbraucherprozesse (consumer) konsumieren
- Endlich große Pufferbereiche zwischen den Prozessen
  - Erzeuger füllt auf
  - Verbraucher nimmt heraus
- **Flusskontrolle** erforderlich
  - Erzeuger legt sich schlafen, wenn Puffer voll ist und wird vom Verbraucher aufgeweckt, wenn wieder Platz ist
  - Verbraucher legt sich schlafen, wenn Puffer leer ist und wird vom Erzeuger wieder aufgeweckt, wenn wieder was drinnen ist



# Erzeuger-Verbraucher-Problem

- Lösung mit drei Semaphoren:
  - **mutex** für den gegenseitigen Ausschluss beim Pufferzugriff
  - **frei** und **belegt** zur Synchronisation

## Erzeuger

```
while (true) {  
    produce(item);  
    P(frei);  
    P(mutex);  
    putInBuffer(item);  
    V(mutex);  
    V(belegt);  
}
```

## Verbraucher

```
while (true) {  
    P(belegt);  
    P(mutex);  
    getFromBuffer(item);  
    V(mutex);  
    V(frei);  
    consume(item);  
}
```

### Initialisierung:

belegt = 0;	// Verbraucher muss erst mal warten, zählt die belegten Puffer
frei = N (Puffergröße);	// Am Anfang ist Puffer leer, zählt die leeren Puffer
Mutex = 1;	// Mutual Exclusion Zugang nur für Pufferbearbeitung

→ am Anfang darf nur Erzeuger was tun

Nach Tanenbaum (2009)

# Überblick und Zusammenfassung

---

- ✓ Einführung
- ✓ Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss
- ✓ Sperren, Semaphore und Mutex
- ✓ Diverse Synchronisationsprobleme