

# Systemprogrammierung

## *Grundlagen von Betriebssystemen*

### Teil C – XI. Stillstand

---

5. Dezember 2026

Rüdiger Kapitza

(© Wolfgang Schröder-Preikschat, Rüdiger Kapitza)



Lehrstuhl für Informatik 4  
Systemsoftware



Friedrich-Alexander-Universität  
Technische Fakultät

Einführung

Betriebsmittel

Systematik

Verwaltung

Systemblockade

Grundlagen

Fallbeispiel

Gegenmaßnahmen

Zusammenfassung

## Einführung

### Betriebsmittel

Systematik

Verwaltung

### Systemblockade

Grundlagen

Fallbeispiel

Gegenmaßnahmen

### Zusammenfassung

- über den **Stillstand** (*stalemate*) gekoppelter Prozesse, hervorgerufen durch fehlkonstruierte oder -geleitete Betriebsmittelzuteilung
  - überkreuzte Anforderungen von Betriebsmitteln
  - „verlorene Abgabe“ produzierter oder im Voraus erworbener Ressourcen

- über den **Stillstand** (*stalemate*) gekoppelter Prozesse, hervorgerufen durch fehlkonstruierte oder -geleitete Betriebsmittelzuteilung
  
- eine **tödliche Umarmung** (*deadly embrace* [2, S. 73]) solcher direkt oder indirekt voneinander abhängigen Prozesse
  - bedingt durch **Entwurfsfehler**, zu beheben durch Entwurfsänderungen
  - der Schwerpunkt (der Vorlesung) liegt auf **konstruktive Maßnahmen**

- über den **Stillstand** (*stalemate*) gekoppelter Prozesse, hervorgerufen durch fehlkonstruierte oder -geleitete Betriebsmittelzuteilung
- eine **tödliche Umarmung** (*deadly embrace* [2, S. 73]) solcher direkt oder indirekt voneinander abhängigen Prozesse
- verschiedene Facetten von Verklemmungen, je nach Ausprägung des Wartezustands der gekoppelten Prozesse
  - **Totsperre** (*deadlock*) als kleineres Übel, da erkennbar
  - **Lebensperre** (*livelock*) als größeres Übel, da nicht erkennbar

- über den **Stillstand** (*stalemate*) gekoppelter Prozesse, hervorgerufen durch fehlkonstruierte oder -geleitete Betriebsmittelzuteilung
- eine **tödliche Umarmung** (*deadly embrace* [2, S. 73]) solcher direkt oder indirekt voneinander abhängigen Prozesse
- verschiedene Facetten von Verklemmungen, je nach Ausprägung des Wartezustands der gekoppelten Prozesse
- **Gegenmaßnahmen** sind Vorbeugung, Vermeidung oder Erkennung und Erholung von Systemblockaden
  - wobei Vorbeugung als konstruktive Maßnahme verbreitet ist, die anderen (analytische Maßnahmen) dagegen nur bedingt umzusetzen sind



source: National Geographic

Einführung

**Betriebsmittel**

Systematik

Verwaltung

Systemblockade

Grundlagen

Fallbeispiel

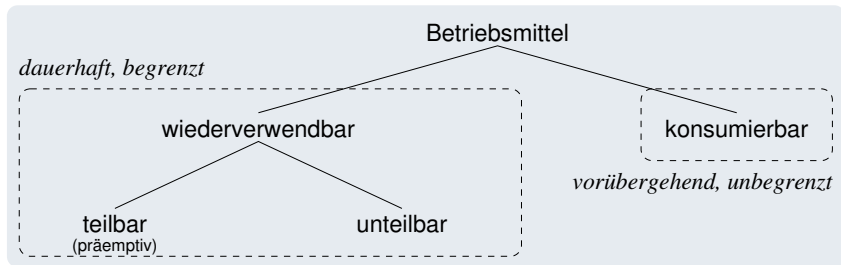
Gegenmaßnahmen

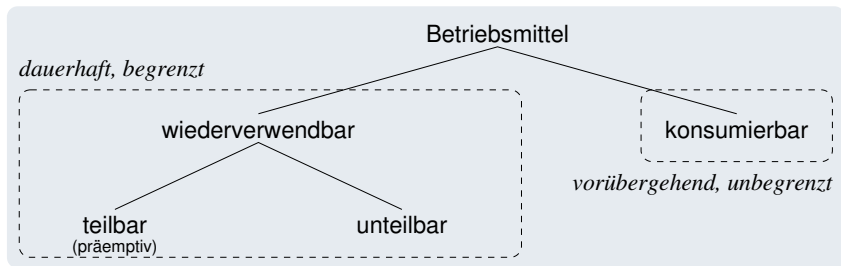
Zusammenfassung

**Betriebsmittel**

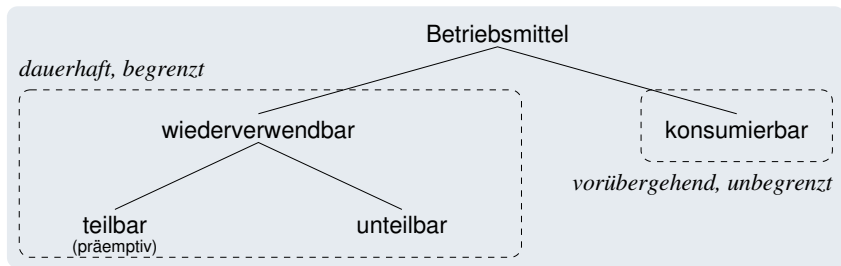
---

**Systematik**





- alle Betriebsmittel werden angefordert, zugeteilt, belegt, benutzt und freigegeben



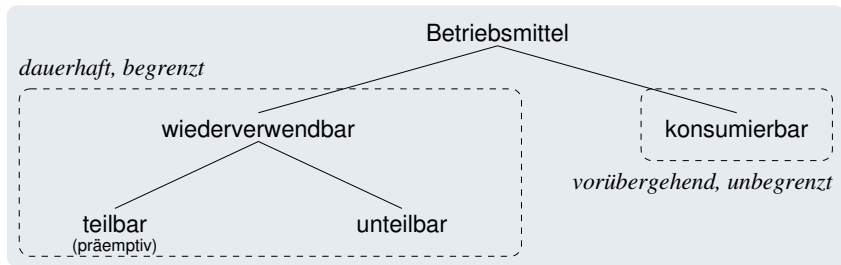
- alle Betriebsmittel werden angefordert, zugeteilt, belegt, benutzt und freigegeben, jedoch wird dabei wie folgt unterschieden:

## wiederverwendbar

- sie sind (ggf. zeitweilig) **persistent**, nicht flüchtig

## konsumierbar

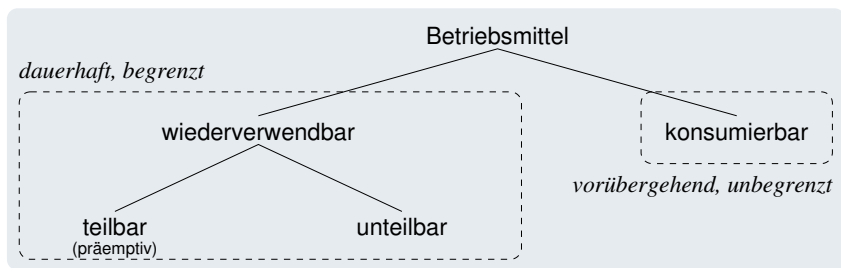
- sie sind **transient**, flüchtig



- alle Betriebsmittel werden angefordert, zugeteilt, belegt, benutzt und freigegeben, jedoch wird dabei wie folgt unterschieden:

## wiederverwendbar

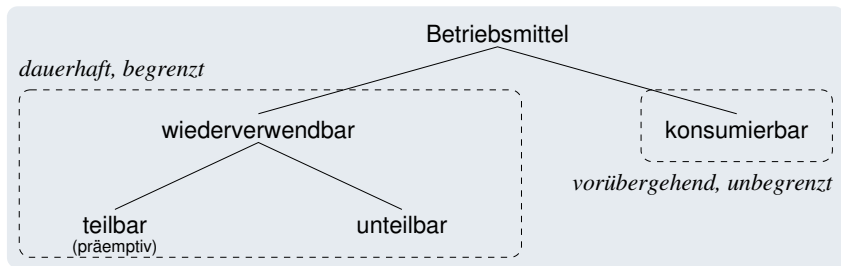
- sie sind (ggf. zeitweilig) **persistent**, nicht flüchtig
- Anforderung durch mehrseitige Synchronisation
- Freigabe ermöglicht ihre Wiederverwendung



- alle Betriebsmittel werden angefordert, zugeteilt, belegt, benutzt und freigegeben, jedoch wird dabei wie folgt unterschieden:

## **konsumierbar**

- sie sind **transient**, flüchtig
- Anforderung durch einseitige Synchronisation
- Freigabe führt zu ihrer Entsorgung (Zerstörung)



- alle Betriebsmittel werden angefordert, zugeteilt, belegt, benutzt und freigegeben, jedoch wird dabei wie folgt unterschieden:

## wiederverwendbar

- sie sind (ggf. zeitweilig) **persistent**, nicht flüchtig

## konsumierbar

- sie sind **transient**, flüchtig

- entsprechend gestaltet sich der Wettbewerb um sie (*resource contention*)

**Betriebsmittel**

---

**Verwaltung**

- konfliktfreie Abwicklung der anstehenden Aufträge
- korrekte Bearbeitung der Aufträge in endlicher Zeit
- gleichmäßige, maximierte Auslastung der Betriebsmittel
- hoher Durchsatz, kurze Durchlaufzeit, hohe Ausfallsicherheit

# Ziele

- konfliktfreie Abwicklung der anstehenden Aufträge
- korrekte Bearbeitung der Aufträge in endlicher Zeit
- gleichmäßige, maximierte Auslastung der Betriebsmittel
- hoher Durchsatz, kurze Durchlaufzeit, hohe Ausfallsicherheit
- **Betriebsmittelanforderung** frei von Verhungern/Verklemmung

- konfliktfreie Abwicklung der anstehenden Aufträge
  - korrekte Bearbeitung der Aufträge in endlicher Zeit
  - gleichmäßige, maximierte Auslastung der Betriebsmittel
  - hoher Durchsatz, kurze Durchlaufzeit, hohe Ausfallsicherheit
- ⋮
- **Betriebsmittelanforderung** frei von Verhungern/Verklemmung
    - Verhungern**
      - andauernde (zeitweilige) Benachteiligung von Prozessen
      - das Prozesssystem macht Fortschritt, steht nicht still

- konfliktfreie Abwicklung der anstehenden Aufträge
- korrekte Bearbeitung der Aufträge in endlicher Zeit
- gleichmäßige, maximierte Auslastung der Betriebsmittel
- hoher Durchsatz, kurze Durchlaufzeit, hohe Ausfallsicherheit
- **Betriebsmittelanforderung** frei von Verhungern/Verklemmung

## **Verklemmung**

- irreversible gegenseitige Blockierung von Prozessen
- das Prozesssystem macht keinen Fortschritt, steht still

- konfliktfreie Abwicklung der anstehenden Aufträge
- korrekte Bearbeitung der Aufträge in endlicher Zeit
- gleichmäßige, maximierte Auslastung der Betriebsmittel
- hoher Durchsatz, kurze Durchlaufzeit, hohe Ausfallsicherheit

⋮

- **Betriebsmittelanforderung** frei von Verhungern/Verklemmung

## **Verhungern**

- andauernde (zeitweilige) Benachteiligung von Prozessen

## **Verklemmung**

- irreversible gegenseitige Blockierung von Prozessen

- gemeinsames Merkmal ist der **Wettbewerb** um Betriebsmittelzuteilung

- konfliktfreie Abwicklung der anstehenden Aufträge
- korrekte Bearbeitung der Aufträge in endlicher Zeit
- gleichmäßige, maximierte Auslastung der Betriebsmittel
- hoher Durchsatz, kurze Durchlaufzeit, hohe Ausfallsicherheit

⋮

- **Betriebsmittelanforderung** frei von Verhungern/Verklemmung

## **Verhungern**

- andauernde (zeitweilige) Benachteiligung von Prozessen

## **Verklemmung**

- irreversible gegenseitige Blockierung von Prozessen

- gemeinsames Merkmal ist der **Wettbewerb** um Betriebsmittelzuteilung
- allgemein:
  - Durchsetzung der vorgegebenen Betriebsstrategie
  - eine optimale Realisierung in Bezug auf relevante Kriterien

- **Buchführung** über die im System vorhandenen Betriebsmittel
  - Art, Klasse
  - Zugriffsrechte, Prozesszuordnung, Nutzungszustand und -dauer

- **Steuerung** der Verarbeitung von Betriebsmittelanforderungen
  - Entgegennahme, Überprüfung (z.B. der Zugriffsrechte)
  - Einplanung der Nutzung angeforderter Betriebsmittel durch Prozesse
  - Einlastung (Zuteilung) von Betriebsmittel
  - Entzug oder Freigabe von Prozessen benutzter Betriebsmittel

- **Buchführung** über die im System vorhandenen Betriebsmittel
  
- **Steuerung** der Verarbeitung von Betriebsmittelanforderungen
  
  
- **Betriebsmittelentzug**
  - Zurücknahme (*revocation*) der Betriebsmittel, die von einem „aus dem Ruder geratenen“ Prozess belegt werden
  - bei **Virtualisierung** zusätzlich:
    - Rückforderung und Neuzuteilung eines realen Betriebsmittels
    - wobei das zugehörige virtuelle Betriebsmittel dem Prozess zugeteilt bleibt



## ■ statisch

- vor Laufzeit oder vor einem Laufzeitabschnitt
- Anforderung aller (im Abschnitt) benötigten Betriebsmittel
- Zuteilung der Betriebsmittel erfolgt ggf. lange vor ihrer eigentlichen Benutzung
- Freigabe aller belegten Betriebsmittel mit Laufzeit(abschnitt)ende

## ■ dynamisch

- zur Laufzeit, in beliebigen Laufzeitabschnitten
- Anforderung des jeweils benötigten Betriebsmittels bei Bedarf
- Zuteilung des jeweiligen Betriebsmittels erfolgt „im Moment“ seiner Benutzung
- Freigabe eines belegten Betriebsmittels, sobald kein Bedarf mehr besteht

## ■ statisch

- vor Laufzeit oder vor einem Laufzeitabschnitt
- Anforderung aller (im Abschnitt) benötigten Betriebsmittel
- Zuteilung der Betriebsmittel erfolgt ggf. lange vor ihrer eigentlichen Benutzung
- Freigabe aller belegten Betriebsmittel mit Laufzeit(abschnitt)ende

↔ Risiko einer nur **suboptimalen Auslastung** der Betriebsmittel

## ■ dynamisch

- zur Laufzeit, in beliebigen Laufzeitabschnitten
- Anforderung des jeweils benötigten Betriebsmittels bei Bedarf
- Zuteilung des jeweiligen Betriebsmittels erfolgt „im Moment“ seiner Benutzung
- Freigabe eines belegten Betriebsmittels, sobald kein Bedarf mehr besteht

↔ Risiko der **Verklemmung** von abhängigen Prozessen

Einführung

Betriebsmittel

Systematik

Verwaltung

**Systemblockade**

Grundlagen

Fallbeispiel

Gegenmaßnahmen

Zusammenfassung

# **Systemblockade**

---

## **Grundlagen**

## Definition (deadly embrace)

Eine Situation, in der gekoppelte Prozesse gegenseitig die Aufhebung einer Wartebedingung entgegensehen, diese aber durch Prozesse eben dieses Systems selbst aufgehoben werden müsste.

## Definition (deadly embrace)

Eine Situation, in der gekoppelte Prozesse gegenseitig die Aufhebung einer Wartebedingung entgegensehen, diese aber durch Prozesse eben dieses Systems selbst aufgehoben werden müsste.

- Bedingung sagt etwas zur Verfügbarkeit eines Betriebsmittels aus
  - unabhängig von der Art des Betriebsmittels erwarten gekoppelte Prozesse die Versorgung durch entsprechende Aktionen gleichgestellter Prozesse
  - da jedoch alle Prozesse so handeln, wird kein Betriebsmittel verfügbar

## Definition (deadly embrace)

Eine Situation, in der gekoppelte Prozesse gegenseitig die Aufhebung einer Wartebedingung entgegensehen, diese aber durch Prozesse eben dieses Systems selbst aufgehoben werden müsste.

- Bedingung sagt etwas zur Verfügbarkeit eines Betriebsmittels aus
  
- nach [1] kann die „tödliche Umarmung“ von Prozessen entstehen:
  - i obwohl kein einziger Prozess mehr als die insgesamt verfügbare Menge von Betriebsmitteln benötigt und
  - ii unabhängig davon, ob Betriebsmittelzuteilung in der Verantwortlichkeit des Betriebssystems oder des Anwendungsprogramms selbst liegt



## Definition ([7, S. 235] $\mapsto$ zeitabhängiges Fehlverhalten)

Mit **Verklemmung** (*deadlock*) bezeichnet man einen Zustand, in dem die beteiligten Prozesse wechselseitig auf den Eintritt von Bedingungen warten, die nur durch andere Prozesse in dieser Gruppe selbst hergestellt werden können.

## Definition ([7, S. 235] $\mapsto$ zeitabhängiges Fehlverhalten)

Mit **Verklemmung** (*deadlock*) bezeichnet man einen Zustand, in dem die beteiligten Prozesse wechselseitig auf den Eintritt von Bedingungen warten, die nur durch andere Prozesse in dieser Gruppe selbst hergestellt werden können.

- die „tödliche Umarmung“ gekoppelter Prozesse im **Schlafzustand**
  - die Befehlszähler der verklemmten Prozesse bleiben (für die meiste Zeit) konstant und warten meint für den einzelnen Prozess:
    - tief**
      - er ist im Zustand „blockiert“, das erwartete Ereignis ist definiert
      - er gibt den Prozessor zu Gunsten anderer Prozesse ab
        - mit Ausnahme eines „blockiert“ fortschreitenden Leerlaufprozesses
        - der Prozessor ist in Wartestellung bis ein Prozess „bereit“ wird

## Definition ([7, S. 235] $\mapsto$ zeitabhängiges Fehlverhalten)

Mit **Verklemmung** (*deadlock*) bezeichnet man einen Zustand, in dem die beteiligten Prozesse wechselseitig auf den Eintritt von Bedingungen warten, die nur durch andere Prozesse in dieser Gruppe selbst hergestellt werden können.

- die „tödliche Umarmung“ gekoppelter Prozesse im **Schlafzustand**
  
- **gutartig**, das kleinere von zwei (inaktiv, aktiv) Übeln
  - wenn nicht vorgebeugt oder vermieden, so kann das erkannt werden
  - sofern das Ereignis, worauf ein Prozess wartet, bekannt/definiert ist
  - Abgrenzung von sich in Bewegung befindlichen Prozessen ist machbar

## Definition (Lebensperre)

Eine der Verklemmung sehr ähnliche Situation, in der gekoppelte Prozess zwar nicht im Zustand „blockiert“ sind, sie jedoch dennoch keinen Fortschritt bei der Programmausführung erzielen.

## Definition (Lebensperre)

Eine der Verklemmung sehr ähnliche Situation, in der gekoppelte Prozess zwar nicht im Zustand „blockiert“ sind, sie jedoch dennoch keinen Fortschritt bei der Programmausführung erzielen.

- die „tödliche Umarmung“ gekoppelter Prozesse im **Wachzustand**
  - die Befehlszähler der verklemmten Prozesse verändern sich fortwährend und warten meint für den einzelnen Prozess:

## Definition (Lebensperre)

Eine der Verklemmung sehr ähnliche Situation, in der gekoppelte Prozess zwar nicht im Zustand „blockiert“ sind, sie jedoch dennoch keinen Fortschritt bei der Programmausführung erzielen.

- die „tödliche Umarmung“ gekoppelter Prozesse im **Wachzustand**
  - die Befehlszähler der verklemmten Prozesse verändern sich fortwährend und warten meint für den einzelnen Prozess:  
**beschäftigt**    ■ er bleibt im Zustand „laufend“, hält den Prozessor

## Definition (Lebensperre)

Eine der Verklemmung sehr ähnliche Situation, in der gekoppelte Prozesse zwar nicht im Zustand „blockiert“ sind, sie jedoch dennoch keinen Fortschritt bei der Programmausführung erzielen.

- die „tödliche Umarmung“ gekoppelter Prozesse im **Wachzustand**
  - die Befehlszähler der verklemmten Prozesse verändern sich fortwährend und warten meint für den einzelnen Prozess:

### träge

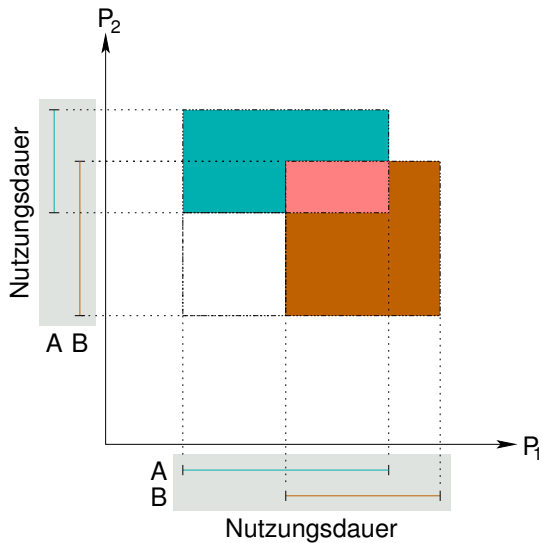
- er alterniert zwischen den Zuständen „laufend“ und „bereit“
- er gibt den Prozessor zu Gunsten anderer Prozesse ab

## Definition (Lebensperre)

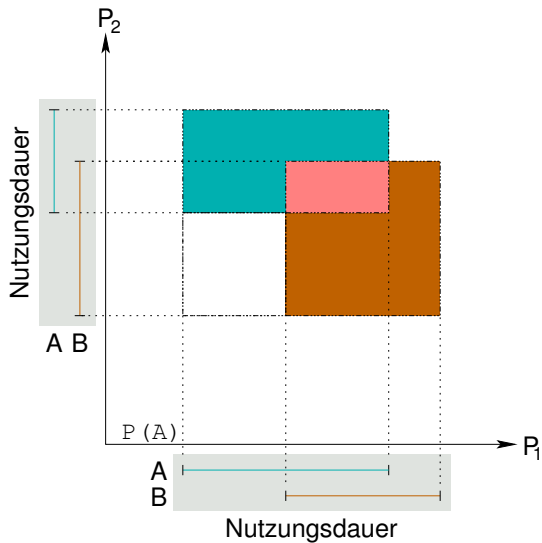
Eine der Verklemmung sehr ähnliche Situation, in der gekoppelte Prozess zwar nicht im Zustand „blockiert“ sind, sie jedoch dennoch keinen Fortschritt bei der Programmausführung erzielen.

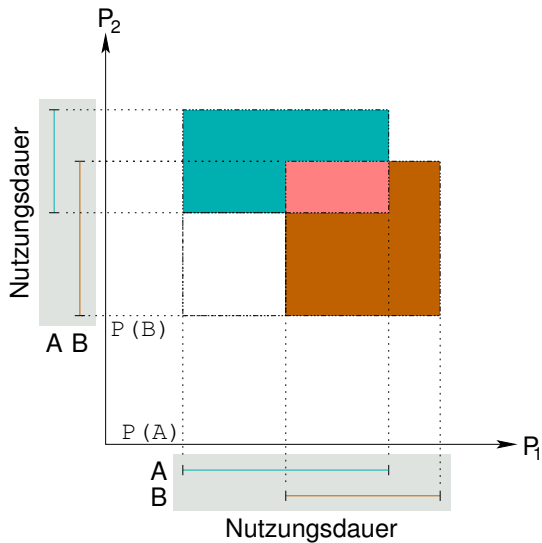
- die „tödliche Umarmung“ gekoppelter Prozesse im **Wachzustand**
  
- **bösartig**, das größere von zwei (inaktiv, aktiv) Übeln
  - wenn nicht vorgebeugt oder vermieden, so kann das nicht erkannt werden
  - keine Abgrenzung von normalen, voranschreitenden Prozessen<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Wie häufig und lange sollte etwa geprüft werden, dass sich Befehlszähler von Prozessen in welchen Wertebereichen bewegen?

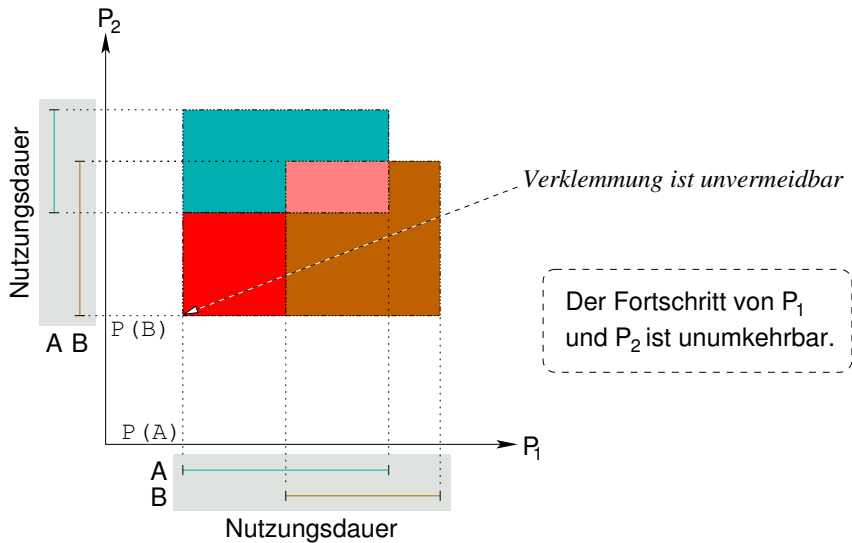


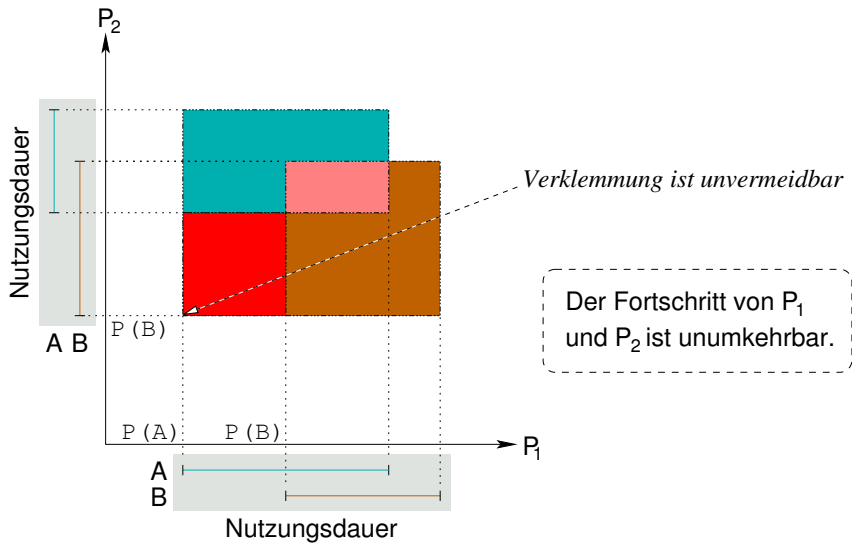
Der Fortschritt von  $P_1$  und  $P_2$  ist unumkehrbar.

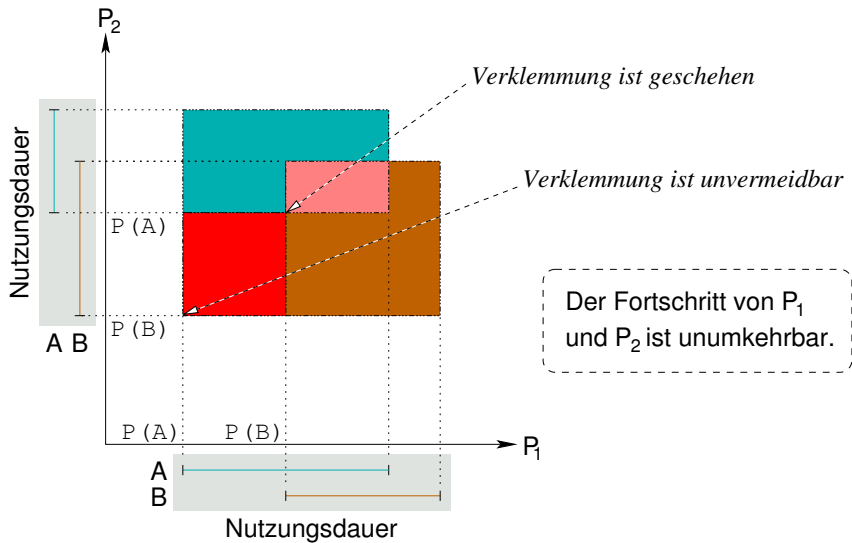




Der Fortschritt von  $P_1$  und  $P_2$  ist unumkehrbar.







# **Systemblockade**

---

## **Fallbeispiel**

- **Banküberweisung** (*bank transfer*) eines gewissen Betrags von einem Konto auf ein anderes Konto

- **Banküberweisung** (*bank transfer*) eines gewissen Betrags von einem Konto auf ein anderes Konto

```
1 void transfer(account_t *from, account_t *to, double amount) {
2     claim(from, to);           /* acquire account data records */
3     from->value -= amount;     /* withdraw from one account */
4     to->value += amount;       /* credit the other account */
5     clear(from, to);          /* release account data records */
6 }
```

- dabei seien die Konten **wiederverwendbare Betriebsmittel** (Software)
- die vom Überweisungsprozess zeitweilig **unteilbar** benutzt werden müssen

- **Banküberweisung** (*bank transfer*) eines gewissen Betrags von einem Konto auf ein anderes Konto

```
1 void transfer(account_t *from, account_t *to, double amount) {
2     claim(from, to);           /* acquire account data records */
3     from->value -= amount;     /* withdraw from one account */
4     to->value += amount;       /* credit the other account */
5     clear(from, to);          /* release account data records */
6 }
```

- für die Überweisungsoperation sei folgender **Datensatz** (*data record*) eines Kontos angenommen:

```
7 typedef struct account {
8     double value;             /* actual balance */
9     semaphore_t count;       /* safeguard for account management */
10 } account_t;
```

- **wechselseitiger Ausschluss** sichert den Überweisungsprozess ab
- hierzu wird ein **zählender Semaphor** mit Initialwert 1 verwendet

- **Inanspruchnahme** der für den Transfer benötigten Datensatzobjekte:

```
1 void claim(account_t *from, account_t *to) {
2     P(&from->count);    /* acquire source account */
3     P(&to->count);      /* acquire target account */
4 }
```

- jedes dieser Objekte ist nur in einfacher Ausfertigung verfügbar
- zu einem Zeitpunkt wird nur ein Prozess ein Exemplar belegen können

- **Inanspruchnahme** der für den Transfer benötigten Datensatzobjekte:

```
1 void claim(account_t *from, account_t *to) {
2     P(&from->count);    /* acquire source account */
3     P(&to->count);      /* acquire target account */
4 }
```

- **Bereitstellung** der beiden Objekte zur Wiederverwendung:

```
5 void clear(account_t *from, account_t *to) {
6     V(&to->count);    /* release target account */
7     V(&from->count);  /* release source account */
8 }
```

- Programmierkonvention sei paarweise Verwendung von `claim` und `clear`
- d.h., es werden nie mehr Objekte bereitgestellt als angefordert wurden

- **Inanspruchnahme** der für den Transfer benötigten Datensatzobjekte:

```
1 void claim(account_t *from, account_t *to) {
2     P(&from->count);    /* acquire source account */
3     P(&to->count);      /* acquire target account */
4 }
```

- **Bereitstellung** der beiden Objekte zur Wiederverwendung:

```
5 void clear(account_t *from, account_t *to) {
6     V(&to->count);    /* release target account */
7     V(&from->count);  /* release source account */
8 }
```

- in dem Szenario verbirgt sich eine **wettlaufkritische Aktionsfolge**
  - die zur Verklemmung von „überweisungswilligen“ Prozessen führen kann

# Wettlaufkritische Aktionsfolge

- Ausgangssituation:
  - sei  $P_i$  ein Überweisungsprozess, wobei  $1 \leq i \leq 3$  verschiedene von diesen Prozessen gleichzeitig geschehen
  - sei  $K_j, j > 1$ , ein Konto, jeweils repräsentiert durch ein Datensatzobjekt

- Szenario (mit  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  beliebige Geldbeträge):  
 $P_1 : transfer(K_1, K_2, \alpha)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_1$ , wird verdrängt

- Szenario (mit  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  beliebige Geldbeträge):
  - $P_1 : \text{transfer}(K_1, K_2, \alpha)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_1$ , wird verdrängt
  - $P_2 : \text{transfer}(K_2, K_3, \beta)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_2$ , wird verdrängt

- Szenario (mit  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  beliebige Geldbeträge):
  - $P_1 : \text{transfer}(K_1, K_2, \alpha)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_1$ , wird verdrängt
  - $P_2 : \text{transfer}(K_2, K_3, \beta)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_2$ , wird verdrängt
  - $P_3 : \text{transfer}(K_3, K_1, \gamma)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_3$ , wird verdrängt

- Szenario (mit  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  beliebige Geldbeträge):
  - $P_1 : \text{transfer}(K_1, K_2, \alpha)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_1$ , wird verdrängt
  - $P_2 : \text{transfer}(K_2, K_3, \beta)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_2$ , wird verdrängt
  - $P_3 : \text{transfer}(K_3, K_1, \gamma)$     ■ durchläuft `claim`, belegt  $K_3$ , wird verdrängt
  - $P_1 : \text{transfer}(K_1, K_2, \alpha)$     ■ fährt fort, fordert  $K_2 \mapsto P_2$  an, blockiert


■ Szenario (mit  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  beliebige Geldbeträge):

- |                                    |   |
|------------------------------------|---|
| $P_1 : transfer(K_1, K_2, \alpha)$ | ▪ durchläuft <code>claim</code> , belegt $K_1$ , wird verdrängt |
| $P_2 : transfer(K_2, K_3, \beta)$  | ▪ durchläuft <code>claim</code> , belegt $K_2$ , wird verdrängt |
| $P_3 : transfer(K_3, K_1, \gamma)$ | ▪ durchläuft <code>claim</code> , belegt $K_3$ , wird verdrängt |
| $P_1 : transfer(K_1, K_2, \alpha)$ | ▪ fährt fort, fordert $K_2 \mapsto P_2$ an, blockiert           |
| $P_2 : transfer(K_2, K_3, \beta)$  | ▪ fährt fort, fordert $K_3 \mapsto P_3$ an, blockiert           |

■ Szenario (mit  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  beliebige Geldbeträge):

- |   |   |
|---|---|
| $P_1 : \text{transfer}(K_1, K_2, \alpha)$ | ▪ durchläuft <code>claim</code> , belegt $K_1$ , wird verdrängt |
| $P_2 : \text{transfer}(K_2, K_3, \beta)$  | ▪ durchläuft <code>claim</code> , belegt $K_2$ , wird verdrängt |
| $P_3 : \text{transfer}(K_3, K_1, \gamma)$ | ▪ durchläuft <code>claim</code> , belegt $K_3$ , wird verdrängt |
| $P_1 : \text{transfer}(K_1, K_2, \alpha)$ | ▪ fährt fort, fordert $K_2 \mapsto P_2$ an, blockiert           |
| $P_2 : \text{transfer}(K_2, K_3, \beta)$  | ▪ fährt fort, fordert $K_3 \mapsto P_3$ an, blockiert           |
| $P_3 : \text{transfer}(K_3, K_1, \gamma)$ | ▪ fährt fort, fordert $K_1 \mapsto P_1$ an, blockiert           |

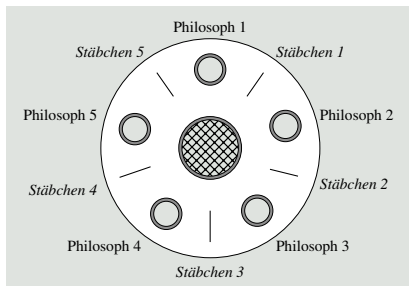
- diese Aktionsfolge bedeutet also:
  - $P_1$  wartet auf die Zuteilung von  $K_2$ , das von  $P_2$  belegt wird
  - $P_2$  wartet auf die Zuteilung von  $K_3$ , das von  $P_3$  belegt wird
  - $P_3$  wartet auf die Zuteilung von  $K_1$ , das von  $P_1$  belegt wird

- diese Aktionsfolge bedeutet also:
  - $P_1$  wartet auf die Zuteilung von  $K_2$ , das von  $P_2$  belegt wird
  - $P_2$  wartet auf die Zuteilung von  $K_3$ , das von  $P_3$  belegt wird
  - $P_3$  wartet auf die Zuteilung von  $K_1$ , das von  $P_1$  belegt wird
- d.h.,  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  sind untereinander verklemmt 
- keiner der Prozesse kann sich von selbst aus dieser Situation befreien...

# Speisende Philosophen I

## Hinweis

*Fünf Philosophen, die nichts anderes zu tun haben, als zu denken und zu essen, sitzen an einem runden Tisch. Denken macht hungrig – also wird jeder Philosoph auch essen. Dazu benötigt ein Philosoph jedoch stets beide neben seinem Teller liegenden Stäbchen.*



# Speisende Philosophen I

## Hinweis

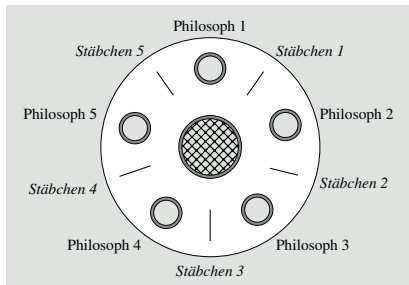
*Fünf Philosophen, die nichts anderes zu tun haben, als zu denken und zu essen, sitzen an einem runden Tisch. Denken macht hungrig – also wird jeder Philosoph auch essen. Dazu benötigt ein Philosoph jedoch stets beide neben seinem Teller liegenden Stäbchen.*

## Philosoph

- Prozess

## Stäbchen

- Betriebsmittel



# Speisende Philosophen I

## Hinweis

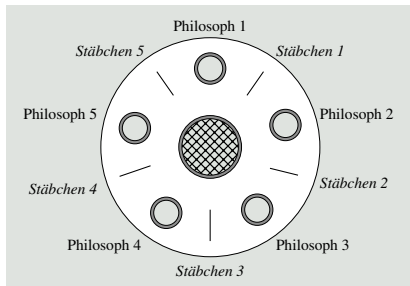
*Fünf Philosophen, die nichts anderes zu tun haben, als zu denken und zu essen, sitzen an einem runden Tisch. Denken macht hungrig – also wird jeder Philosoph auch essen. Dazu benötigt ein Philosoph jedoch stets beide neben seinem Teller liegenden Stäbchen.*

**Philosoph**    ■ Prozess

**Stäbchen**    ■ Betriebsmittel

### ■ Stillstand:

- alle Philosophen nehmen zugleich das eine (linke) Stäbchen auf
- anschließend greifen sie auf das andere (rechte) zu



## Hinweis

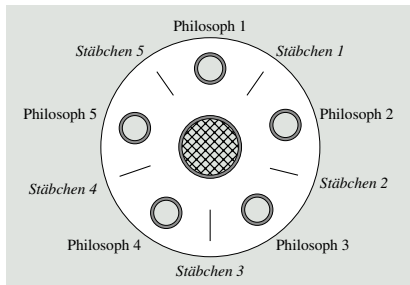
*Fünf Philosophen, die nichts anderes zu tun haben, als zu denken und zu essen, sitzen an einem runden Tisch. Denken macht hungrig – also wird jeder Philosoph auch essen. Dazu benötigt ein Philosoph jedoch stets beide neben seinem Teller liegenden Stäbchen.*

## Philosoph

- Prozess
- ↪ Überweisung

## Stäbchen

- Betriebsmittel
- ↪ Konto



↪ die Überweisungsprozesse fordern zugleich das jeweilige Quellkonto an, belegen es und fordern anschließend das Zielkonto an

## ■ Philosophendasein:

```
1 void phil(int who) {
2     int any = check(who);
3     while (any > 0) {
4         think();
5         claim(any);
6         munch();
7         clear(any);
8     }
9 }

10 void think() { ... }
11 void munch() { ... }
```

## ■ Philosophendasein:

```
1 void phil(int who) {
2     int any = check(who);
3     while (any > 0) {
4         think();
5         claim(any);
6         munch();
7         clear(any);
8     }
9 }
```

```
10 void think() { ... }
11 void munch() { ... }
```

## ■ Stäbchenverwaltung:

```
12 semaphore_t rod[NPHIL] = {
13     { 1 }, { 1 }, { 1 }, { 1 }, { 1 }
14 };
15
16 int check(int who) {
17     ... /* validate who */
18     return who - 1;
19 }
```

- altbekanntes Muster der Betriebsmittelzuteilung
  - vgl. S. 55

```
20 void claim(unsigned slot) {
21     P(&rod[slot]);
22     P(&rod[(slot + 1) % NPHIL]);
23 }
24
25 void clear(unsigned slot) {
26     V(&rod[(slot + 1) % NPHIL]);
27     V(&rod[slot]);
28 }
```

- altbekanntes Muster der Betriebsmittelzuteilung

- vgl. S. 55

- *P* vergibt zu einem Zeitpunkt nur ein Stäbchen (*rod*), umgekehrt gibt *V* entsprechend nur eins frei

```
20 void claim(unsigned slot) {
21     P(&rod[slot]);
22     P(&rod[(slot + 1) % NPHIL]);
23 }
24
25 void clear(unsigned slot) {
26     V(&rod[(slot + 1) % NPHIL]);
27     V(&rod[slot]);
28 }
```

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld *rod*

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld  $rod$

```
void claim(0) {  
    P(&rod[0]);  
}
```

1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld  $rod$

```
void claim(0) {  
    P(&rod[0]);  
    P(&rod[1]);  
}  
  
void claim(1) {  
    P(&rod[1]);  
}
```



1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_2 \mapsto r_1$  gestört
2.  $P_2$  nimmt  $S_2 \mapsto r_1$  auf

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld  $rod$

```
void claim(0) {  
    P(&rod[0]);  
    P(&rod[1]);  
}
```

```
void claim(1) {  
    P(&rod[1]);  
    P(&rod[2]);  
}
```

```
void claim(2) {  
    P(&rod[2]);  
}
```

1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_2 \mapsto r_1$  gestört
2.  $P_2$  nimmt  $S_2 \mapsto r_1$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_3 \mapsto r_2$  gestört
3.  $P_3$  nimmt  $S_3 \mapsto r_2$  auf

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld  $rod$

```

void claim(0) {
    P(&rod[0]);
    P(&rod[1]);
}

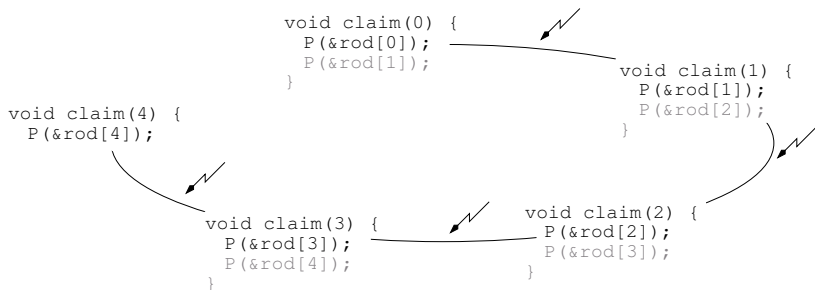
void claim(1) {
    P(&rod[1]);
    P(&rod[2]);
}

void claim(2) {
    P(&rod[2]);
    P(&rod[3]);
}

void claim(3) {
    P(&rod[3]);
}
    
```

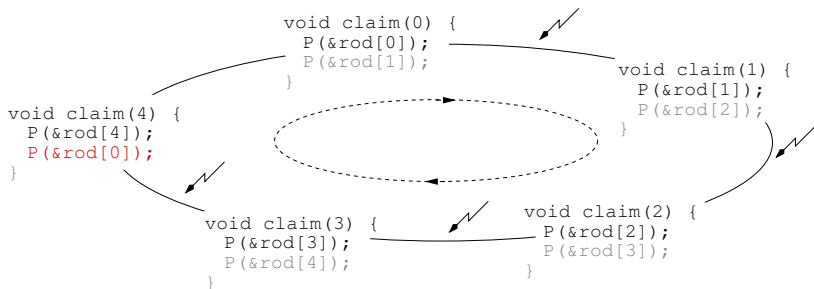
1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_2 \mapsto r_1$  gestört
2.  $P_2$  nimmt  $S_2 \mapsto r_1$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_3 \mapsto r_2$  gestört
3.  $P_3$  nimmt  $S_3 \mapsto r_2$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_4 \mapsto r_3$  gestört
4.  $P_4$  nimmt  $S_4 \mapsto r_3$  auf

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld `rod`



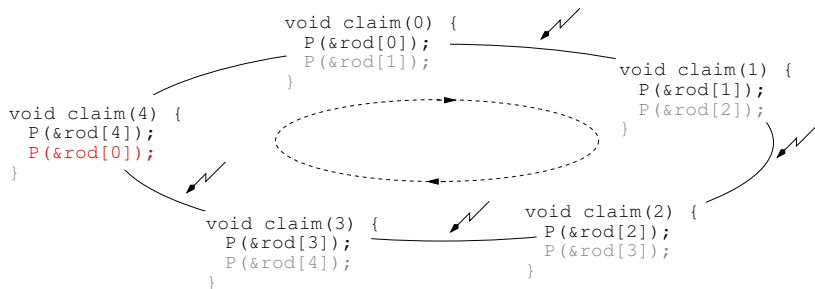
1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_2 \mapsto r_1$  gestört
2.  $P_2$  nimmt  $S_2 \mapsto r_1$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_3 \mapsto r_2$  gestört
3.  $P_3$  nimmt  $S_3 \mapsto r_2$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_4 \mapsto r_3$  gestört
4.  $P_4$  nimmt  $S_4 \mapsto r_3$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_5 \mapsto r_4$  gestört
5.  $P_5$  nimmt  $S_5 \mapsto r_4$  auf

- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld `rod`



1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_2 \mapsto r_1$  gestört
2.  $P_2$  nimmt  $S_2 \mapsto r_1$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_3 \mapsto r_2$  gestört
3.  $P_3$  nimmt  $S_3 \mapsto r_2$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_4 \mapsto r_3$  gestört
4.  $P_4$  nimmt  $S_4 \mapsto r_3$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_5 \mapsto r_4$  gestört
5.  $P_5$  nimmt  $S_5 \mapsto r_4$  auf, **fordert  $S_1 \mapsto r_0$  an** und muss warten

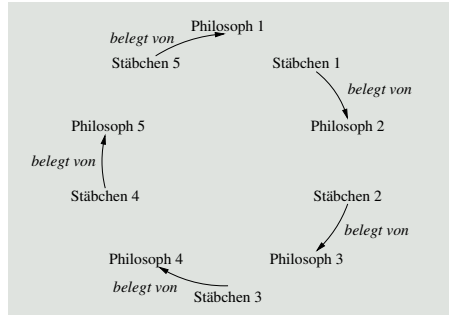
- sei  $P_i$ ,  $1 \leq i \leq 5$ , Philosoph  $i$ , der Stäbchen  $S_i$  und  $S_{i+1}$  benötigt
  - mit  $r = i - 1$  als Index im Wertebereich  $[0, 4]$  für das Stäbchenfeld  $rod$



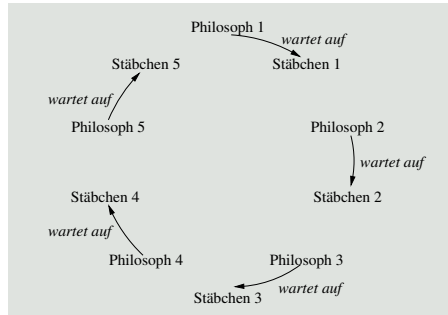
1.  $P_1$  nimmt  $S_1 \mapsto r_0$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_2 \mapsto r_1$  gestört
2.  $P_2$  nimmt  $S_2 \mapsto r_1$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_3 \mapsto r_2$  gestört
3.  $P_3$  nimmt  $S_3 \mapsto r_2$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_4 \mapsto r_3$  gestört
4.  $P_4$  nimmt  $S_4 \mapsto r_3$  auf, wird vor Aufnahme von  $S_5 \mapsto r_4$  gestört
5.  $P_5$  nimmt  $S_5 \mapsto r_4$  auf, **fordert  $S_1 \mapsto r_0$  an** und muss warten
  - in Folge fordern alle anderen  $P_i$ ,  $1 \leq i < 4$ , ihr zweites Stäbchen an...



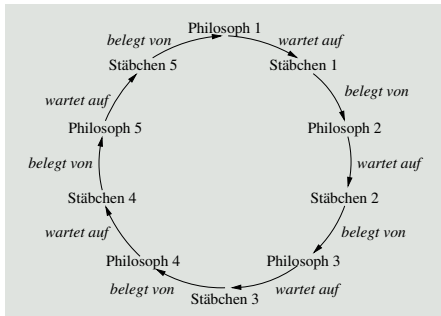
- für jedes belegte Betriebsmittel ist der **Eigentümer** bekannt



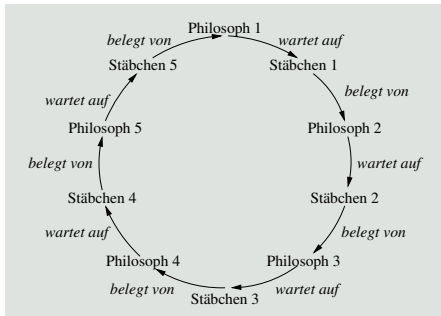
- für jeden wartenden Prozess ist der **Blockadegrund** bekannt



- der **Wartegraph** (S. 129) zeigt die Verklemmungssituation
  - ist das Ergebnis der Analyse der Betriebsmittelbelegung
  - wird im Bedarfsfall aufgebaut

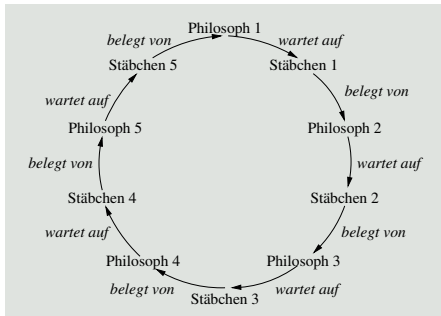


- der **Wartegraph** (S. 129) zeigt die Verklemmungssituation
  - ist das Ergebnis der Analyse der Betriebsmittelbelegung
  - wird im Bedarfsfall aufgebaut



↪ ein geschlossener Kreis (im Wartegraphen) erfasst all jene Prozesse, die sich zusammen im **Deadlock** befinden.

- der **Wartegraph** (S. 129) zeigt die Verklemmungssituation
  - ist das Ergebnis der Analyse der Betriebsmittelbelegung
  - wird im Bedarfsfall aufgebaut



- ↪ ein geschlossener Kreis (im Wartegraphen) erfasst all jene Prozesse, die sich zusammen im **Deadlock** befinden.
- ↪ es muss sichergestellt sein, dass ein solcher Kreis entweder nicht entstehen oder dass er erkannt und „durchbrochen“ werden kann

# **Systemblockade**

---

## **Gegenmaßnahmen**

## **Hinweis (Lebensperre)**

*Nachfolgendes gilt auch für Stillstand im aktiven Wartezustand.*

- **notwendige Bedingungen** für die gekoppelten Prozesse:
  1. **Ausschließlichkeit** in der Betriebsmittelnutzung (*mutual exclusion*)
  2. **Nachforderung** eines oder mehrerer Betriebsmittel (*hold and wait*)
  3. **Unentziehbarkeit** (*no preemption*) der zugeteilten Betriebsmittel

- **notwendige Bedingungen** für die gekoppelten Prozesse:
  1. **Ausschließlichkeit** in der Betriebsmittelnutzung (*mutual exclusion*)
  2. **Nachforderung** eines oder mehrerer Betriebsmittel (*hold and wait*)
  3. **Unentziehbarkeit** (*no preemption*) der zugeteilten Betriebsmittel
- **notwendige und hinreichende Bedingung:**
  4. **zirkulares Warten** muss eingetreten sein
    - jeder der Prozesse hält eins oder mehrere Betriebsmittel, die einer oder mehrere andere Prozesse in der Kette angefordert haben

- **notwendige Bedingungen** für die gekoppelten Prozesse:
  1. **Ausschließlichkeit** in der Betriebsmittelnutzung (*mutual exclusion*)
  2. **Nachforderung** eines oder mehrerer Betriebsmittel (*hold and wait*)
  3. **Unentziehbarkeit** (*no preemption*) der zugeteilten Betriebsmittel
- **notwendige und hinreichende Bedingung:**
  4. **zirkulares Warten** muss eingetreten sein
    - jeder der Prozesse hält eins oder mehrere Betriebsmittel, die einer oder mehrere andere Prozesse in der Kette angefordert haben

## Hinweis (Vorbeugung/Vemeidung)

Jede dieser Bedingungen muss zu einem Zeitpunkt erfüllt sein, damit Prozesse verklemmen. Die Aufhebung nur einer dieser Bedingungen resultiert in ein **verklemmungsfreies System** von Prozessen.

## **Hinweis (Prävention)**

*Vorsorgemaßnahmen, damit gekoppelte Prozesse gar nicht erst eine Verklemmung entwickeln können.*

- **indirekte Methoden**, eine der notwendigen Bedingungen aufheben

- **indirekte Methoden**, eine der notwendigen Bedingungen aufheben
  1. nichtblockierende Synchronisation, Atomarität auf tieferer Ebene nutzen

- **indirekte Methoden**, eine der notwendigen Bedingungen aufheben
  1. nichtblockierende Synchronisation, Atomarität auf tieferer Ebene nutzen
  2. alle benötigten Betriebsmittel unteilbar anfordern

- **indirekte Methoden**, eine der notwendigen Bedingungen aufheben
  1. nichtblockierende Synchronisation, Atomarität auf tieferer Ebene nutzen
  2. alle benötigten Betriebsmittel unteilbar anfordern
  3. Betriebsmittel virtualisieren, damit den Entzug der realen Betriebsmittel ermöglichen, nicht jedoch ihrer virtuellen Gegenstücke

- **indirekte Methoden**, eine der notwendigen Bedingungen aufheben
  1. nichtblockierende Synchronisation, Atomarität auf tieferer Ebene nutzen
  2. alle benötigten Betriebsmittel unteilbar anfordern
  3. Betriebsmittel virtualisieren, damit den Entzug der realen Betriebsmittel ermöglichen, nicht jedoch ihrer virtuellen Gegenstücke
- **direkte Methoden**, notwendige & hinreichende Bedingung aufheben
  4. eine lineare Ordnung von Betriebsmittelklassen definieren, die zusichert, dass Betriebsmittel  $R_i$  vor  $R_j$  zuteilbar ist, nur wenn  $i < j$

- **indirekte Methoden**, eine der notwendigen Bedingungen aufheben
  1. nichtblockierende Synchronisation, Atomarität auf tieferer Ebene nutzen
  2. alle benötigten Betriebsmittel unteilbar anfordern
  3. Betriebsmittel virtualisieren, damit den Entzug der realen Betriebsmittel ermöglichen, nicht jedoch ihrer virtuellen Gegenstücke
- **direkte Methoden**, notwendige & hinreichende Bedingung aufheben
  4. eine lineare Ordnung von Betriebsmittelklassen definieren, die zusichert, dass Betriebsmittel  $R_i$  vor  $R_j$  zuteilbar ist, nur wenn  $i < j$

## Hinweis (Prophylaxe)

*Jede dieser Methoden steht für eine **konstruktive Maßnahme**, die Aufbau und Struktur nichtsequentieller Programme beeinflusst.*

## ■ Beispiel zum Bankwesen (vgl. S. 55):

```
1 void claim(account_t *from, account_t *to) {
2     static semaphore_t mutex = {1};
3     P(&mutex);                               /* enter critical section */
4     P(&from->count);                          /* demand */
5     P(&to->count);                            /* additional demand */
6     V(&mutex);                               /* leave critical section */
7 }
```

## ■ Beispiel zum Philosophenproblem (vgl. S. 71):

```
1 void claim(unsigned slot) {
2     static semaphore_t mutex = {1};
3     P(&mutex);                /* enter critical section */
4     P(&rod[slot]);            /* demand */
5     P(&rod[(slot + 1) % NPHIL]); /* additional demand */
6     V(&mutex);                /* leave critical section */
7 }
```

## ■ Beispiel zum Bankwesen (vgl. S. 55):

```
1 void claim(account_t *from, account_t *to) {
2     static semaphore_t mutex = {1};
3     P(&mutex);                               /* enter critical section */
4     P(&from->count);                          /* demand */
5     P(&to->count);                             /* additional demand */
6     V(&mutex);                               /* leave critical section */
7 }
```

## ■ Beispiel zum Philosophenproblem (vgl. S. 71):

```
1 void claim(unsigned slot) {
2     static semaphore_t mutex = {1};
3     P(&mutex);                               /* enter critical section */
4     P(&rod[slot]);                           /* demand */
5     P(&rod[(slot + 1) % NPHIL]); /* additional demand */
6     V(&mutex);                               /* leave critical section */
7 }
```

- die **Nachforderungsbedingung** wurde insofern aufgehoben, als dass An- und Nachforderung (Z. 4–5) nunmehr unteilbar geschehen

# Atomarität auf tieferer Ebene nutzen

- Beispiel zum Bankwesen (vgl. S. 52):
  - Umstrukturierung, **prozedurale Abstraktion** der kritischen Aktionsfolge:

```
1 void transfer(account_t *from, account_t *to, double amount) {
2     issue(from, -amount);    /* withdraw from one account */
3     issue(to, amount);      /* credit the other account */
4 }
```

# Atomarität auf tieferer Ebene nutzen

- Beispiel zum Bankwesen (vgl. S. 52):

```
1 void transfer(account_t *from, account_t *to, double amount) {
2     issue(from, -amount);    /* withdraw from one account */
3     issue(to, amount);      /* credit the other account */
4 }
```

- Abbildung auf eine problemspezifische **Elementaroperation**:

```
5 inline void issue(account_t *this, double amount) {
6     FAA(&this->balance, amount);
7 }
```

# Atomarität auf tieferer Ebene nutzen

- Beispiel zum Bankwesen (vgl. S. 52):

```
1 void transfer(account_t *from, account_t *to, double amount) {
2     issue(from, -amount);    /* withdraw from one account */
3     issue(to, amount);      /* credit the other account */
4 }
```

```
5 inline void issue(account_t *this, double amount) {
6     FAA(&this->balance, amount);
7 }
```

- Reduktion auf eine atomare, in GCC eingebaute intrinsische Funktion.

# Atomarität auf tieferer Ebene nutzen

- Beispiel zum Bankwesen (vgl. S. 52):
  - die **Nachforderungsbedingung** wurde abgebildet auf nur noch eine Anforderung des Betriebsmittels „kritischer Abschnitt“: **FAA**
    - die Verwendung eines binären Semaphors anstelle von FAA ginge ebenso, jedoch wäre dies bei weitem nicht so effizient, wie mit FAA



## Hinweis

**Vorabwissen** zu Prozessen und ihren Betriebsmittelanforderungen.

- Vereitelung „tödlicher Umarmung“ durch **strategische Methoden**
  - kein Versuch wird unternommen, eine notwendige Bedingung aufzuheben
  - vielmehr verhindert **laufende Anforderungsanalyse** zirkulares Warten

- Vereitelung „tödlicher Umarmung“ durch **strategische Methoden**
  
- Prozesse und ihre Betriebsmittelanforderungen werden überwacht
  - jede Anforderung prüft auf einen möglichen **unsicheren Zustand**
  - sollte ein solcher möglich sein, wird die **Zuteilung abgelehnt**
  - anfordernden Prozess suspendieren  $\leadsto$  langfristige Planung [6, S. 19]

- Vereitelung „tödlicher Umarmung“ durch **strategische Methoden**
- Prozesse und ihre Betriebsmittelanforderungen werden überwacht
- Betriebsmittelzuteilung erfolgt nur im **sicheren Zustand**
  - im Falle einer **Prozessfolge**, die alle zukünftigen Anforderungen erfüllt
  - in Anbetracht aller aktuellen Belegungen und anstehenden Freigaben

- Vereitelung „tödlicher Umarmung“ durch **strategische Methoden**
- Prozesse und ihre Betriebsmittelanforderungen werden überwacht
- Betriebsmittelzuteilung erfolgt nur im **sicheren Zustand**

## Hinweis (Vermeidung)

*Jede Methode, die Verklemmungen „vermeidet“, ist eine **analytische Maßnahme** zur Laufzeit nichtsequentieller Programme.*

# Bestimmung des unsicheren Zustands

# Bestimmung des unsicheren Zustands

- Ansatz **Betriebsmittelgraph** (S. 119)
  - definiert einen **Mengenkontrakt** für Prozessexemplare bezüglich Bedarf und aktueller Vergabe von Betriebsmitteln bestimmter Klassen
  - mit Vorabwissen angelegt und initialisiert bei der Prozesserstellung und fortgeschrieben mit jeder Betriebsmittelanforderung
  - anhaltende Analyse hinsichtlich möglicher **Zyklenbildung** im Graphen

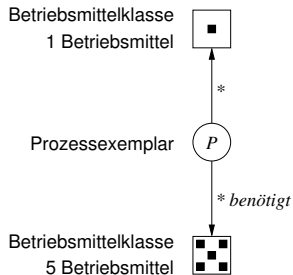
- Ansatz **Bankiersalgorithmus** (*banker's algorithm* [2])
  - Annahme ist, dass das System die Menge von Betriebsmitteln kennt, die:
    - i jeder Prozess möglicherweise anfordert (*maximum claim*: Bedarf),
    - ii jeder Prozess gegenwärtig hält (*allocated*: Belegung) und
    - iii noch nicht allen Prozessen zugewiesen wurde (*available*: Verfügungsrahmen)

- Ansatz **Bankiersalgorithmus** (*banker's algorithm* [2])
  - Annahme ist, dass das System die Menge von Betriebsmitteln kennt, die:
    - i jeder Prozess möglicherweise anfordert (*maximum claim*: Bedarf),
    - ii jeder Prozess gegenwärtig hält (*allocated*: Belegung) und
    - iii noch nicht allen Prozessen zugewiesen wurde (*available*: Verfügungsrahmen)
  - **sicherer Zustand** ist, wenn eine Anforderung folgendes nicht übersteigt:
    - (a) den Bedarf des anfragenden Prozesses und
    - (b) den Verfügungsrahmen von Betriebsmitteln der angefragten Klasse

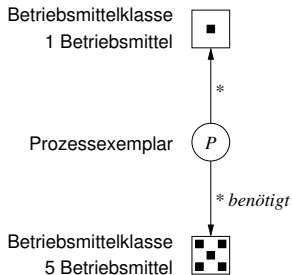
- Ansatz **Bankiersalgorithmus** (*banker's algorithm* [2])
  - Annahme ist, dass das System die Menge von Betriebsmitteln kennt, die:
    - i jeder Prozess möglicherweise anfordert (*maximum claim*: Bedarf),
    - ii jeder Prozess gegenwärtig hält (*allocated*: Belegung) und
    - iii noch nicht allen Prozessen zugewiesen wurde (*available*: Verfügungsrahmen)
  - **sicherer Zustand** ist, wenn eine Anforderung folgendes nicht übersteigt:
    - (a) den Bedarf des anfragenden Prozesses und
    - (b) den Verfügungsrahmen von Betriebsmitteln der angefragten Klasse
  - scheitert (a), wird die Anforderung zurückgewiesen, scheitert (b), wird der anfordernde Prozess suspendiert  $\leadsto$  langfristige Planung [6, S. 19]

- nicht nur die Erfordernis von **Vorabwissen** erweist sich als ein großes Problem, auch die Skalierbarkeit von Methode und Impl.

- ein **gerichteter Graph**, der Prozessexemplare und Betriebsmittel oder Betriebsmittelklassen zusammenhängend darstellt
  - eine vom Betriebssystem zu verwaltende **dynamische Datenstruktur**

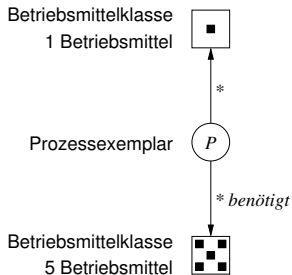


- ein **gerichteter Graph**, der Prozessexemplare und Betriebsmittel oder Betriebsmittelklassen zusammenhängend darstellt



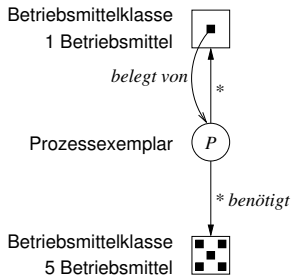
- optionales (Vorab-) Wissen, um die *benötigt*-Beziehung zu bilden:
  - Betriebsmittelklassen und den jeweiligen Betriebsmittelbedarf

- ein **gerichteter Graph**, der Prozessexemplare und Betriebsmittel oder Betriebsmittelklassen zusammenhängend darstellt



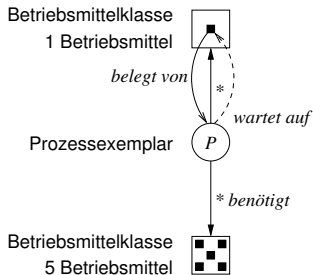
- optionales (Vorab-) Wissen, um die *benötigt*-Beziehung zu bilden:
  - Betriebsmittelklassen und den jeweiligen Betriebsmittelbedarf
- obligatorisches Wissen bezüglich aller Prozesse/Betriebsmittel:
  - für jeden Prozess gibt es eine Liste zugeteilter Betriebsmittel (*benötigt*)

- ein **gerichteter Graph**, der Prozessexemplare und Betriebsmittel oder Betriebsmittelklassen zusammenhängend darstellt



- optionales (Vorab-) Wissen, um die *benötigt*-Beziehung zu bilden:
  - Betriebsmittelklassen und den jeweiligen Betriebsmittelbedarf
- obligatorisches Wissen bezüglich aller Prozesse/Betriebsmittel:
  - für jeden Prozess gibt es eine Liste zugeteilter Betriebsmittel (*benötigt*)
  - jedes Betriebsmittel verbucht den Besitzerprozess (*belegt von*)

- ein **gerichteter Graph**, der Prozessexemplare und Betriebsmittel oder Betriebsmittelklassen zusammenhängend darstellt



- optionales (Vorab-) Wissen, um die *benötigt*-Beziehung zu bilden:
  - Betriebsmittelklassen und den jeweiligen Betriebsmittelbedarf
- obligatorisches Wissen bezüglich aller Prozesse/Betriebsmittel:
  - für jeden Prozess gibt es eine Liste zugeteilter Betriebsmittel (*belegt von*)
  - jedes Betriebsmittel verbucht den Besitzerprozess (*belegt von*)
- schließlich noch (obligatorisches) Wissen, um aus dem RAG einen **Wartegraphen** abzuleiten zu können:
  - für jeden Prozess ist vermerkt, worauf er wartet (*wartet auf*)



- Prozessverklemmungen werden stillschweigend in Kauf genommen
  - kein Versuch wird unternommen, eine der vier Bedingungen aufzuheben
  - stattdessen läuft die **sporadische Suche** nach blockierten Prozessen
    - ein **Wartegraph** (S. 129) wird aufgebaut und nach Zyklen abgesucht
    - Grundlage dafür bildet der **Betriebsmittelgraph** (S. 119)

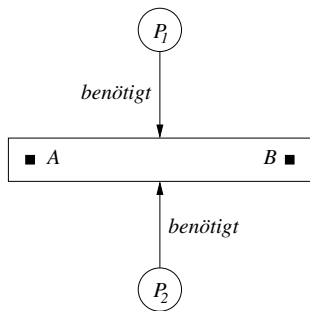
- Prozessverklemmungen werden stillschweigend in Kauf genommen
  
- erkannte Zyklen werden im nachgeschalteten Schritt durchbrochen
  - eine Option ist die **Prozesszerstörung** eines einzelnen, ausgewählten Exemplars oder aller Exemplare im Zyklus
  - die andere Option ist **Betriebsmittelentzug**, durch Auswahl eines Opfers und anschließendem **Zurückrollen** des besitzenden Prozesses

- Prozessverklemmungen werden stillschweigend in Kauf genommen
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- erkannte Zyklen werden im nachgeschalteten Schritt durchbrochen
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- gegebenenfalls wiederholt sich der ganze Vorgang, solange nicht alle Zyklen aufgelöst werden konnten

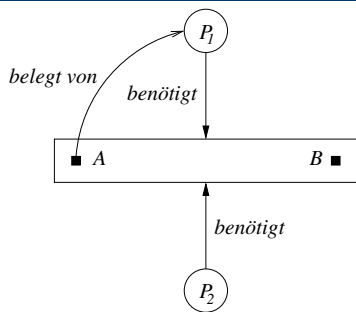
- Prozessverklemmungen werden stillschweigend in Kauf genommen
  
- erkannte Zyklen werden im nachgeschalteten Schritt durchbrochen
  
- gegebenenfalls wiederholt sich der ganze Vorgang, solange nicht alle Zyklen aufgelöst werden konnten

**Gratwanderung zwischen Schaden und Aufwand**

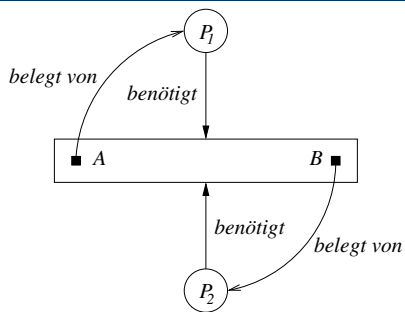
*Schaden macht klug, aber zu spät. (Sprichwort)*



- seien  $A$  und  $B$  Betriebsmittel derselben Klasse:

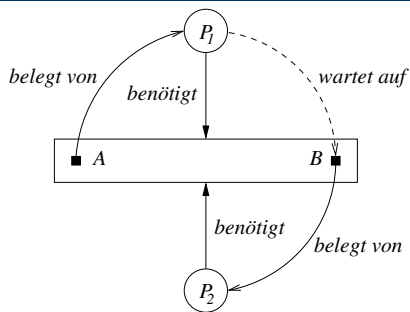


- seien *A* und *B* Betriebsmittel derselben Klasse:
  1.  $P_1$  vollzieht  $P(A)$ , *A* ist frei und wird  $P_1$  zugeteilt



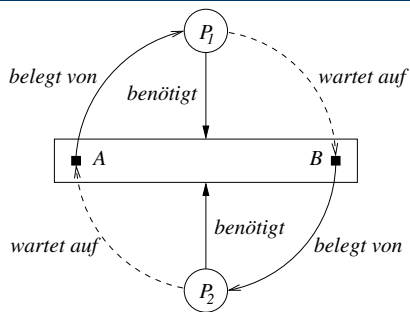
■ seien  $A$  und  $B$  Betriebsmittel derselben Klasse:

1.  $P_1$  vollzieht  $P(A)$ ,  $A$  ist frei und wird  $P_1$  zugeteilt
2.  $P_2$  vollzieht  $P(B)$ ,  $B$  ist frei und wird  $P_2$  zugeteilt



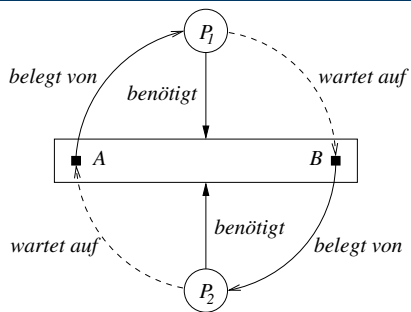
■ seien  $A$  und  $B$  Betriebsmittel derselben Klasse:

1.  $P_1$  vollzieht  $P(A)$ ,  $A$  ist frei und wird  $P_1$  zugeteilt
2.  $P_2$  vollzieht  $P(B)$ ,  $B$  ist frei und wird  $P_2$  zugeteilt
3.  $P_1$  vollzieht  $P(B)$ ,  $B$  ist belegt  $\leadsto P_1$  muss auf  $V(B)$  durch  $P_2$  warten

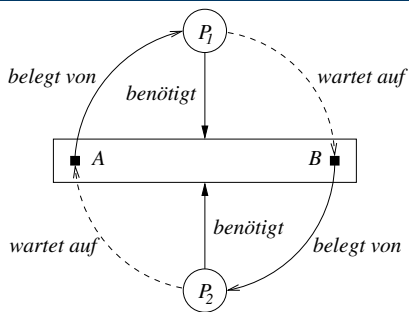


■ seien  $A$  und  $B$  Betriebsmittel derselben Klasse:

1.  $P_1$  vollzieht  $P(A)$ ,  $A$  ist frei und wird  $P_1$  zugeteilt
2.  $P_2$  vollzieht  $P(B)$ ,  $B$  ist frei und wird  $P_2$  zugeteilt
3.  $P_1$  vollzieht  $P(B)$ ,  $B$  ist belegt  $\leadsto P_1$  muss auf  $V(B)$  durch  $P_2$  warten
4.  $P_2$  performs  $P(A)$ ,  $A$  ist belegt  $\leadsto P_2$  muss auf  $V(A)$  durch  $P_1$  warten



- ein **Zyklus** von  $P_1$  nach  $P_2$  über  $A$  und  $B$ , hin und zurück
  - $P_1$  und  $P_2$  befinden sich im **Deadlock**...



## Hinweis (Erzeugung)

Wenn das Betriebssystem den Verklemmungsfall für wahrscheinlich hält:

- Antwortzeitzunahme
- Durchsatzabnahme
- Leerlaufzeitanstieg

Einführung

Betriebsmittel

Systematik

Verwaltung

Systemblockade

Grundlagen

Fallbeispiel

Gegenmaßnahmen

**Zusammenfassung**



- **Betriebsmittel** zeigen sich als Entitäten von Hard- und Software
  - wiederverwendbar**    ■ begrenzt verfügbar: teilbar, unteilbar
  - konsumierbar**     ■ unbegrenzt verfügbar

- Ziele, Aufgaben und Verfahrensweise der **Betriebsmittelverwaltung**
  - Betriebsmittelanforderung frei von Verhungern/Verklemmung
  - Buchführung der Betriebsmittel, Steuerung der Anforderungen
  - statische/dynamische Zuteilung von Betriebsmitteln

- für eine Verklemmung müssen **vier Bedingungen** gelten
  - exklusive Belegung, Nachforderung, kein Entzug von Betriebsmitteln
  - zirkulares Warten der die Betriebsmittel beanspruchenden Prozesse
  - nicht zu vergessen: Verklemmung bedeutet „*deadlock*“ oder „*livelock*“

- die **Gegenmaßnahmen** sind:
  - Vorbeugen, Vermeiden, Erkennen & Erholen
  - die Verfahren können im Mix zum Einsatz kommen

- Verfahren zum **Vermeiden/Erkennen** sind eher praxisirrelevant
  - sie sind kaum umzusetzen, zu aufwendig und damit schlecht einsetzbar
  - Vorherrschaft sequentieller Programmierung macht sie verzichtbar...

- **Betriebsmittel** zeigen sich als Entitäten von Hard- und Software
- Ziele, Aufgaben und Verfahrensweise der **Betriebsmittelverwaltung**
- für eine Verklemmung müssen **vier Bedingungen** gelten
- die **Gegenmaßnahmen** sind:
  - Vorbeugen, Vermeiden, Erkennen & Erholen
- Verfahren zum **Vermeiden/Erkennen** sind eher praxisirrelevant

**Zusammenfassung**

---

**Bibliographie**

- [1] COFFMAN, JR., E. G. ; ELPHICK, M. J. ; SHOSHANI, A. :  
**System Deadlocks.**  
In: *Computing Surveys* 3 (1971), Jun., Nr. 2, S. 67–78
- [2] DIJKSTRA, E. W.:  
**Cooperating Sequential Processes / Technische Universiteit Eindhoven.**  
Eindhoven, The Netherlands, 1965 (EWD-123). –  
Forschungsbericht. –  
(Reprinted in *Great Papers in Computer Science*, P. Laplante, ed., IEEE Press, New York, NY, 1996)
- [3] HABERMANN, A. N.:  
**Prevention of System Deadlocks.**  
In: *Communications of the ACM* 12 (1969), Jul., Nr. 7, S. 373–377/385

- [4] HOLT, R. C.:  
***On Deadlock in Computer Systems.***  
Ithaca, NY, USA, Cornell University, Diss., 1971
- [5] HOLT, R. C.:  
***Some Deadlock Properties of Computer Systems.***  
In: *ACM Computing Surveys* 4 (1972), Sept., Nr. 3, S. 179–196
- [6] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :  
***Einplanungsgrundlagen.***  
In: LEHRSTUHL INFORMATIK 4 (Hrsg.): *Systemprogrammierung.*  
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien), Kapitel 9.1
- [7] NEHMER, J. ; STURM, P. :  
***Systemsoftware: Grundlagen moderner Betriebssysteme.***  
dpunkt.Verlag GmbH, 2001. –  
ISBN 3-898-64115-5

# **Anhang**

---

## **Verklemmungsvermeidung**



- sei  $P_k$  ein sequentieller Prozess
- sei  $S$  eine geordnete Menge solcher Prozesse
- sei  $b_k$  der Betriebsmittelanspruch eines Prozesses,  $P_k$
- sei  $s(k)$  die Ordnungszahl von  $P_k \in S$
- sei  $r(t)$  die Anzahl verfügbarer Betriebsmittel zum Zeitpunkt  $t$
- sei  $c_k(t)$  die Anzahl der  $P_k$  zur Zeit  $t$  zugeteilten Betriebsmittel

- sei  $P_k$  ein sequentieller Prozess
- sei  $S$  eine geordnete Menge solcher Prozesse
- sei  $b_k$  der Betriebsmittelanspruch eines Prozesses,  $P_k$
- sei  $s(k)$  die Ordnungszahl von  $P_k \in S$
- sei  $r(t)$  die Anzahl verfügbarer Betriebsmittel zum Zeitpunkt  $t$
- sei  $c_k(t)$  die Anzahl der  $P_k$  zur Zeit  $t$  zugeteilten Betriebsmittel
- dann gilt ein Zustand als sicher, wenn es eine vollständige Folge in  $S$  gibt, so dass:

$$\forall P_k \in S b_k \leq r(t) + \sum_{s(l) \leq s(k)} c_l(t) \quad (1)$$

*Condition (1) says that the claim by process  $P_k$  must not exceed the sum of the free resources and those resources which will become free “in due time,” when the processes preceding in  $S$  have released theirs. [3, p. 375]*