

Betriebssysteme

WS 2014/15

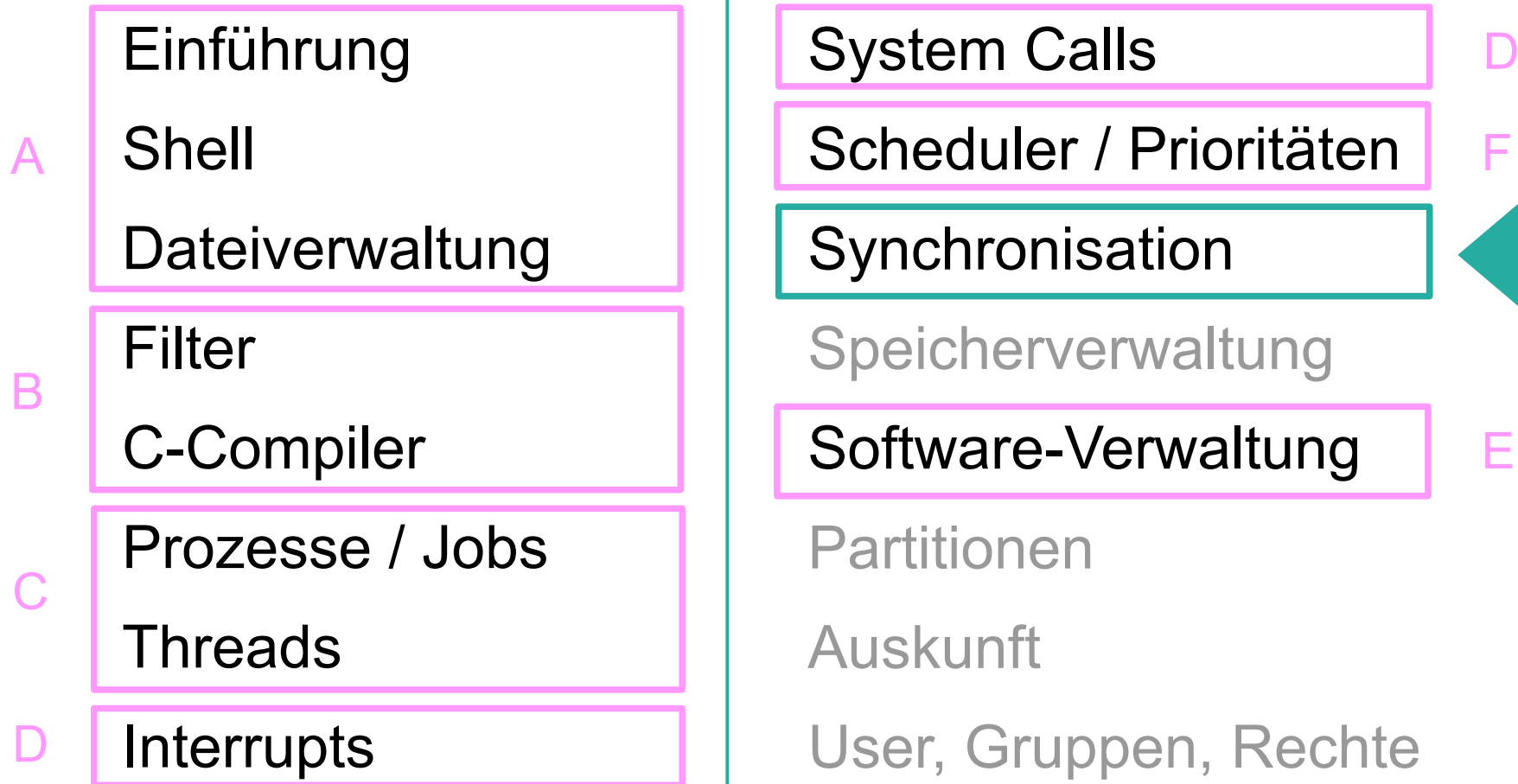
Hans-Georg Eßer
Dipl.-Math., Dipl.-Inform.

Foliensatz G:

v1.0, 2015/01/01

- Synchronisation
- Deadlocks

Übersicht: BS Praxis und BS Theorie



Synchronisation

- Es gibt Prozesse (oder Threads oder Kernel-Funktionen) mit gemeinsamem Zugriff auf bestimmte Daten, z. B.
 - Threads des gleichen Prozesses: gemeinsamer Speicher
 - Prozesse / Threads öffnen die gleiche Datei zum Lesen / Schreiben
 - Mehr-Prozessor-System: Scheduler (je einer pro CPU) greifen auf gleiche Prozesslisten / Warteschlangen zu

- Synchronisation: Probleme mit „gleichzeitigem“ Zugriff auf Datenstrukturen
- Beispiel: Zwei Threads erhöhen einen Zähler

```
erhoehe_zaeher( ) {
  w=read(Adresse);
  w=w+1;
  write(Adresse,w);
}
```

Ausgangssituation: w=10

T1:

```
w=read(Adresse); // 10
w=w+1;           // 11
```

T2:

```
w=read(Adresse); // 10
w=w+1;           // 11
write(Adresse,w); // 11
```

```
write(Adresse,w); // 11 !!
```

Ergebnis nach T1, T2: w=11 – nicht 12!

- Gewünscht wäre eine der folgenden Reihenfolgen:

Ausgangssituation: w=10

P1:

```
w=read(Adr); // 10
w=w+1;       // 11
write(Adr,w); // 11
```

P2:

```
w=read(Adr); // 11
w=w+1;       // 12
write(Adr,w); // 12
```

Ergebnis nach P1, P2: w=12

Ausgangssituation: w=10

P1:

```
w=read(Adr); // 11
w=w+1;       // 12
write(Adr,w); // 12
```

P2:

```
w=read(Adr); // 10
w=w+1;       // 11
write(Adr,w); // 11
```

Ergebnis nach P1, P2: w=12

- Ursache: `erhoehe_zaeehler()` arbeitet nicht **atomar**:
 - Scheduler kann die Funktion unterbrechen
 - Funktion kann auf mehreren CPUs gleichzeitig laufen
- Lösung: Finde alle Code-Teile, die auf gemeinsame Daten zugreifen, und stelle sicher, dass immer nur ein Prozess auf diese Daten zugreift (gegenseitiger Ausschluss, mutual exclusion)

- Analoges Problem bei Datenbanken:

```
exec sql CONNECT ...
exec sql SELECT kontostand INTO $var FROM Konto
        WHERE kontonummer = $knr
$var = $var - abhebung
exec sql UPDATE Konto SET kontostand = $var
        WHERE kontonummer = $knr
exec sql DISCONNECT
```

Bei parallelem Zugriff auf gleichen Datensatz kann es zu Fehlern kommen

→ Lösung über (Datenbank-) **Transaktionen**, die u. a. **atomar und isoliert (ACID-Prinzip)** erfolgen müssen

Race Condition:

- Mehrere parallele Threads / Prozesse nutzen eine gemeinsame Ressource
- Zustand hängt von Reihenfolge der Ausführung ab
- Race: die Threads liefern sich „ein Rennen“ um den ersten / schnellsten Zugriff

Warum Race Conditions vermeiden?

- Ergebnisse von parallelen Berechnungen sind nicht eindeutig (d. h. potenziell falsch)
- Bei Programmtests könnte (durch Zufall) immer eine „korrekte“ Ausführreihenfolge auftreten; später beim Praxiseinsatz dann aber gelegentlich eine „falsche“.
- Race Conditions sind auch Sicherheitslücken

- Idee: Zugriff via Lock auf einen Prozess (Thread, ...) beschränken:

```
int Lock = UNLOCKED;           // global
erhoehe_zaehler( ) {
    while (Lock == LOCKED) { } ; // warten
    Lock = LOCKED;
    // Anfang Datennutzung
    w=read(Adresse);
    w=w+1;
    write(Adresse,w);
    // Ende Datennutzung
    Lock = UNLOCKED;
}
```

- Problem: Lock-Variable nicht geschützt

- Nicht alle Zugriffe sind problematisch:
 - Gleichzeitiges Lesen von Daten stört nicht
 - Prozesse, die „disjunkt“ sind (d. h.: die keine gemeinsamen Daten haben) können ohne Schutz zugreifen
- Sobald mehrere Prozesse/Threads/... gemeinsam auf ein Objekt zugreifen – und mindestens einer davon schreibend –, ist das Verhalten des Gesamtsystems **unvorhersehbar** und **nicht reproduzierbar**.

- Einführung, Race Conditions
- Kritische Abschnitte und gegenseitiger Ausschluss
- Synchronisationsmethoden, Standard-Primitive:
 - Mutexe
 - Semaphore

- Programmteil, der auf gemeinsame Daten zugreift
 - Müssen nicht verschiedene Funktionen sein: auch mehrere Instanzen (z. B. Threads), welche dieselbe Funktion ausführen
- Block zwischen erstem und letztem Zugriff
- Nicht „den Code schützen“, sondern die Daten
- Formulierung: kritischen Abschnitt „betreten“ und „verlassen“ (enter / leave critical section)

- Bestimmen des kritischen Abschnitts nicht ganz eindeutig:

```

void test () {
    z = global[i];
    z = z + 1;
    global[i] = z;
    // was anderes tun
    z = global[j];
    z = z - 1;
    global[j] = z;
}

```

The diagram illustrates the identification of critical sections in the provided code. Two red curly braces on the right side of the code block group the first three lines (z = global[i]; z = z + 1; global[i] = z;) and the last three lines (z = global[j]; z = z - 1; global[j] = z;). A larger green curly brace on the right side groups all six lines of the function body, indicating that the entire function is a critical section.

- zwei kritische Abschnitte oder nur einer?

- Anforderung an parallele Threads:
 - Es darf maximal ein Thread gleichzeitig im kritischen Abschnitt sein
 - Kein Thread, der außerhalb kritischer Abschnitte ist, darf einen anderen blockieren
 - Kein Thread soll ewig auf das Betreten eines kritischen Abschnitts warten
 - Deadlocks sollen vermieden werden (z. B.: zwei Prozesse sind in verschiedenen kritischen Abschnitten und blockieren sich gegenseitig)

- Tritt nie mehr als ein Thread gleichzeitig in den kritischen Abschnitt ein, heißt das „**gegenseitiger Ausschluss**“ (englisch: **mutual exclusion**, kurz: **mutex**)
- Es ist Aufgabe der Programmierer, diese Bedingung zu garantieren
- Das Betriebssystem bietet Hilfsmittel, mit denen gegenseitiger Ausschluss durchgesetzt werden kann, schützt aber nicht vor Programmierfehlern

- **Maschineninstruktion** (z. B. mit dem Namen **TSL = Test and Set Lock**), die **atomar** eine Lock-Variable liest und setzt, also ohne dazwischen unterbrochen werden zu können.

enter:

```
    tsl register, flag    ; Variablenwert in Register kopieren und  
                          ; dann Variable auf 1 setzen  
    cmp register, 0      ; War die Variable 0?  
    jnz enter           ; Nicht 0: Lock war gesetzt, also Schleife  
    ret
```

leave:

```
    mov  flag, 0         ; 0 in flag speichern: Lock freigeben  
    ret
```

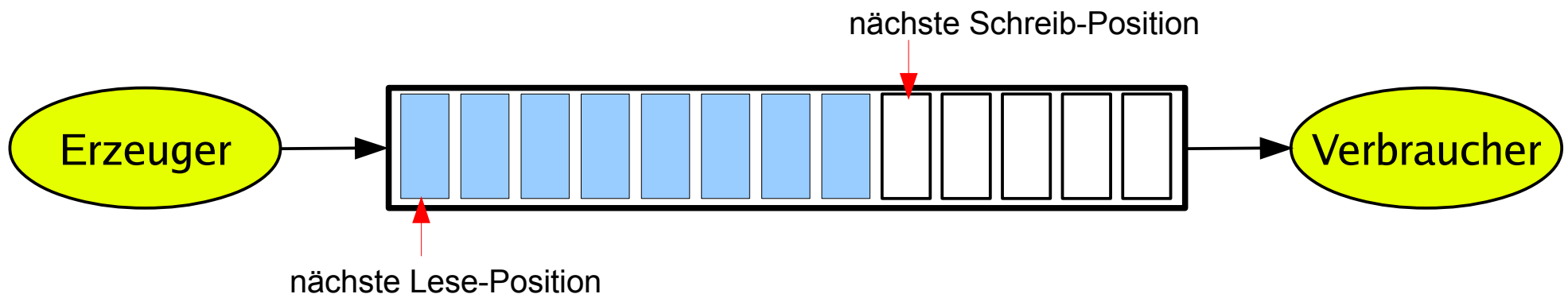
- **TSL** muss zwei Dinge leisten:
 - Interrupts ausschalten, damit der Test-und-Setzen-Vorgang nicht durch einen anderen Prozess unterbrochen wird
 - Im Falle mehrerer CPUs den Speicherbus sperren, damit kein Prozess auf einer anderen CPU (deren Interrupts nicht gesperrt sind!) auf die gleiche Variable zugreifen kann

- **Aktives Warten (busy waiting):**
 - Ausführen einer Schleife, bis eine Variable einen bestimmten Wert annimmt.
 - Der **Thread ist bereit** und **belegt die CPU**.
 - Die Variable muss von einem anderen Thread gesetzt werden.
 - (Großes) Problem, wenn der andere Thread endet.
 - (Großes) Problem, wenn der andere Thread – z. B. wegen niedriger Priorität – nicht dazu kommt, die Variable zu setzen.

- **Passives Warten (sleep and wake):**
 - Ein **Thread blockiert** und wartet auf ein Ereignis, das ihn wieder in den Zustand „bereit“ versetzt.
 - Blockierter Thread **verschwendet keine CPU-Zeit.**
 - Ein anderer Thread muss das Eintreten des Ereignisses bewirken.
 - (Kleines) Problem, wenn der andere Thread endet.
 - Bei Eintreten des Ereignisses muss der blockierte Thread geweckt werden, z. B.
 - explizit durch einen anderen Thread,
 - durch Mechanismen des Betriebssystems.

Erzeuger-Verbraucher-Problem (1)

- Beim **Erzeuger-Verbraucher-Problem** (producer consumer problem, bounded buffer problem) gibt es zwei kooperierende Threads:
 - Der Erzeuger speichert Informationen in einem **beschränkten Puffer**.
 - Der Verbraucher liest Informationen aus diesem Puffer.



- **Synchronisation**
 - **Puffer nicht überfüllen:**
Wenn der Puffer voll ist, muss der Erzeuger warten, bis der Verbraucher eine Information aus dem Puffer abgeholt hat, und erst dann weiter arbeiten.
 - **Nicht aus leerem Puffer lesen:**
Wenn der Puffer leer ist, muss der Verbraucher warten, bis der Erzeuger eine Information im Puffer abgelegt hat, und erst dann weiter arbeiten.

- Realisierung mit passivem Warten:
 - Eine gemeinsam benutzte Variable „count“ zählt die belegten Positionen im Puffer.
 - Wenn der Erzeuger eine Information einstellt und der Puffer leer war ($\text{count} == 0$), weckt er den Verbraucher;
bei vollem Puffer blockiert er.
 - Wenn der Verbraucher eine Information abholt und der Puffer voll war ($\text{count} == \text{max}$), weckt er den Erzeuger;
bei leerem Puffer blockiert er.

Erzeuger-Verbraucher-Problem mit sleep / wake

```

#define N 100 // Anzahl der Plätze im Puffer
int count = 0; // Anzahl der belegten Plätze im Puffer

producer () {
    while (TRUE) { // Endlosschleife
        produce_item (item); // Erzeuge etwas für den Puffer
        if (count == N) sleep(); // Wenn Puffer voll: schlafen legen
        enter_item (item); // In den Puffer einstellen
        count = count + 1; // Zahl der belegten Plätze inkrementieren
        if (count == 1) wake(consumer); // war der Puffer vorher leer?
    }
}

consumer () {
    while (TRUE) { // Endlosschleife
        if (count == 0) sleep(); // Wenn Puffer leer: schlafen legen
        remove_item (item); // Etwas aus dem Puffer entnehmen
        count = count - 1; // Zahl der belegten Plätze dekrementieren
        if (count == N-1) wake(producer); // war der Puffer vorher voll?
        consume_item (item); // Verarbeiten
    }
}

```

- Das Programm enthält eine *race condition*, die zu einem *Deadlock* führen kann, z. B. wie folgt:
 - Verbraucher liest Variable count, die den Wert 0 hat.
 - Kontextwechsel zum Erzeuger.
 - Erzeuger stellt etwas in den Puffer ein, erhöht count und weckt den Verbraucher, da count vorher 0 war.
 - Verbraucher legt sich schlafen, da er für count noch den Wert 0 gespeichert hat (der zwischenzeitlich erhöht wurde).
 - Erzeuger schreibt den Puffer voll und legt sich dann auch schlafen.

- **Problemursache:**
Wakeup-Signal für einen – noch nicht – schlafenden Prozess wird ignoriert
- Falsche Reihenfolge
- Weckruf „irgendwie“ für spätere Verwendung aufbewahren...

VERBRAUCHER	ERZEUGER
n=read(count);	..
<hr/>	
..	produce_item();
..	n=read(count);
..	/* n=0 */
..	n=n+1;
..	write(n,count);
..	wake (VERBRAUCHER);
<hr/>	
/* n=0 */	..
sleep ();	..



- Lösungsmöglichkeit: Systemaufrufe *sleep* und *wake* verwenden ein „**wakeup pending bit**“:
 - Bei *wake()* für einen nicht schlafenden Thread dessen wakeup pending bit setzen.
 - Bei *sleep()* das wakeup pending bit des Threads überprüfen – wenn es gesetzt ist, den Thread nicht schlafen legen.

Aber: Lösung lässt sich nicht verallgemeinern (mehrere zu synchronisierende Prozesse benötigen evtl. zusätzliche solche Bits)

Ein **Semaphor** ist eine Integer- (Zähler-) Variable, die man wie folgt verwendet:

- Semaphor hat festgelegten Anfangswert N („Anzahl der verfügbaren Ressourcen“).
- Beim **Anfordern** eines Semaphors (P- oder **Wait-Operation**): P = (niederl.) probeer
 - Semaphor-Wert um 1 erniedrigen, falls er >0 ist,
 - Thread blockieren und in eine Warteschlange einreihen, wenn der Semaphor-Wert 0 ist.

- Bei **Freigabe** eines Semaphors (V- oder **Signal-Operation**): V = (niederl.) vrijgeven
 - einen Thread aus der Warteschlange wecken, falls diese nicht leer ist,
 - Semaphor-Wert um 1 erhöhen (wenn es keinen auf den Semaphor wartenden Thread gibt)
- Code sieht dann immer so aus:

```
wait (&sem);
/* Code, der die Ressource nutzt */
signal (&sem);
```

- in vielen Büchern: **P** (&sem), **V** (&sem)

- Pseudo-Code für Semaphor-Operationen

```

wait (sem) {
  if (sem>0)
    sem--;
  else {
    ADD_CALLER_TO (QUEUE(sem));
    SLEEP;
  }
}

```

```

signal (sem) {
  if (P in QUEUE(sem)) {
    WAKEUP (P);
    REMOVE (P, QUEUE);
  }
  else
    sem++;
}

```

- **Mutex:** boolesche Variable (true/false), die den Zugriff auf gemeinsam genutzte Daten synchronisiert
 - true: Zugang erlaubt
 - false: Zugang verboten
- **blockierend:** Ein Thread, der sich Zugang verschaffen will, während ein anderer Thread Zugang hat, blockiert → Warteschlange
- Bei Freigabe:
 - Warteschlange enthält Threads → einen wecken
 - Warteschlange leer: Mutex auf true setzen

- **Mutex (mutual exclusion) = binärer Semaphor**, also ein Semaphor, der nur die Werte 0 / 1 annehmen kann. Pseudo-Code:

```
wait (mutex) {
    if (mutex==1)
        mutex=0;
    else {
        ADD_CALLER_TO (QUEUE(mutex));
        SLEEP
    }
}
```

```
signal (mutex) {
    if (P in QUEUE(mutex)) {
        WAKEUP (P);
        REMOVE (P, QUEUE);
    }
    else
        mutex=1;
}
```

- Neue Interpretation: wait → lock
signal → unlock
- Mutexe für exklusiven Zugriff (kritische Abschnitte)

- Betriebssysteme können Mutexe und Semaphoren **blockierend** oder **nicht-blockierend** implementieren
- blockierend:
 - wenn der Versuch, den Zähler zu erniedrigen, scheitert
 - warten
- nicht blockierend:
 - wenn der Versuch scheitert
 - vielleicht etwas anderes tun

- Bei Mutexen / Semaphoren müssen die beiden Operationen `wait()` und `signal()` **atomar** implementiert sein:

Während der Ausführung von `wait()` / `signal()` darf kein anderer Prozess an die Reihe kommen

- Mutexe / Semaphore verwalten Warteschlangen (der Prozesse, die schlafen gelegt wurden)
- Beim Aufruf von `signal()` muss evtl. ein Prozess geweckt werden
- Auswahl des zu weckenden Prozesses ist ein ähnliches Problem wie die Prozess-Auswahl im Scheduler
 - FIFO: **starker** Semaphor / Mutex
 - zufällig: **schwacher** Semaphor / Mutex

Erzeuger-Verbraucher-Problem mit Semaphoren und Mutexen

```

typedef int semaphore;
semaphore mutex = 1;           // kontrolliert Zugriff auf Puffer
semaphore empty = N;          // zählt freie Plätze im Puffer
semaphore full = 0;           // zählt belegte Plätze im Puffer

producer() {
    while (TRUE) {            // Endlosschleife
        produce_item(item);   // erzeuge etwas für den Puffer
        wait (empty);         // leere Plätze dekrementieren bzw. blockieren
        wait (mutex);         // Eintritt in den kritischen Abschnitt
        enter_item (item);    // in den Puffer einstellen
        signal (mutex);       // kritischen Abschnitt verlassen
        signal (full);        // belegte Plätze erhöhen, evtl. consumer wecken
    }
}

consumer() {
    while (TRUE) {           // Endlosschleife
        wait (full);          // belegte Plätze dekrementieren bzw. blockieren
        wait (mutex);         // Eintritt in den kritischen Abschnitt
        remove_item(item);    // aus dem Puffer entnehmen
        signal (mutex);       // kritischen Abschnitt verlassen
        signal (empty);       // freie Plätze erhöhen, evtl. producer wecken
        consume_entry (item); // verbrauchen
    }
}

```

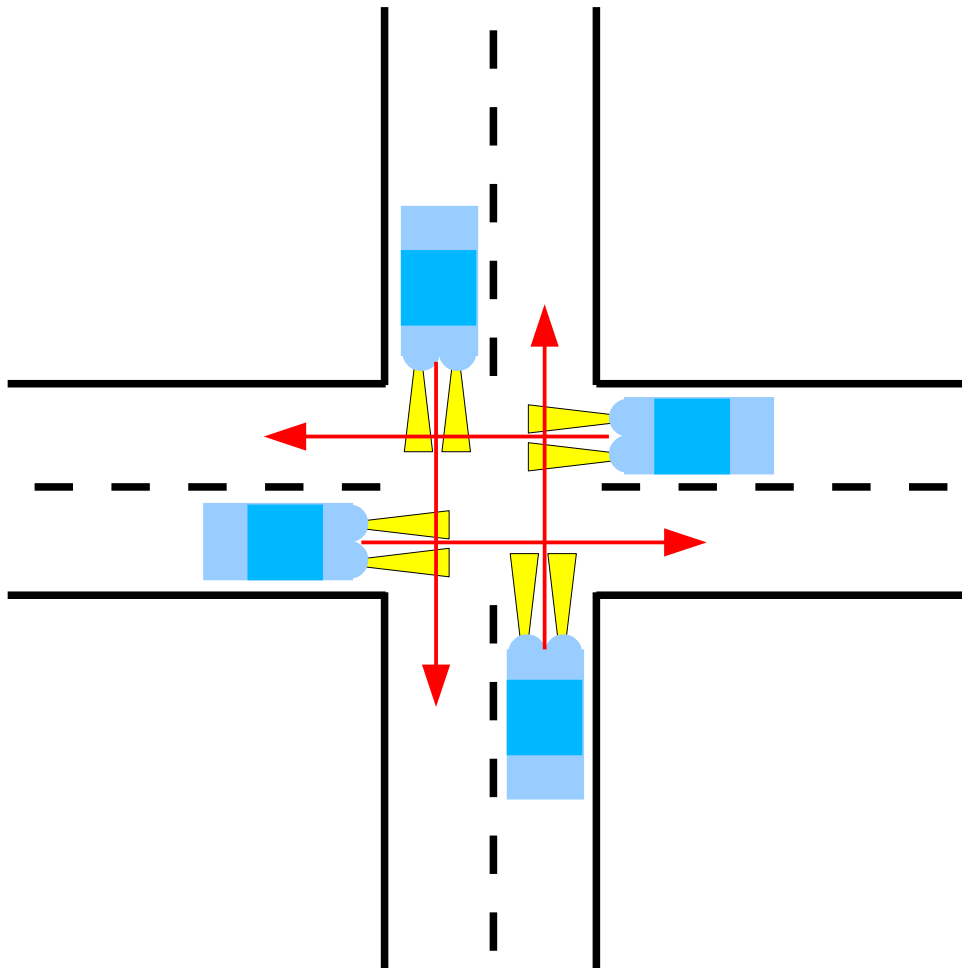
Deadlocks

- Einführung
- Ressourcen-Typen
- Hinreichende und notwendige Deadlock-Bedingungen
- Deadlock-Erkennung und -Behebung
- Deadlock-Vermeidung (avoidance):
Banker-Algorithmus
- Deadlock-Verhinderung (prevention)

Was ist ein Deadlock?

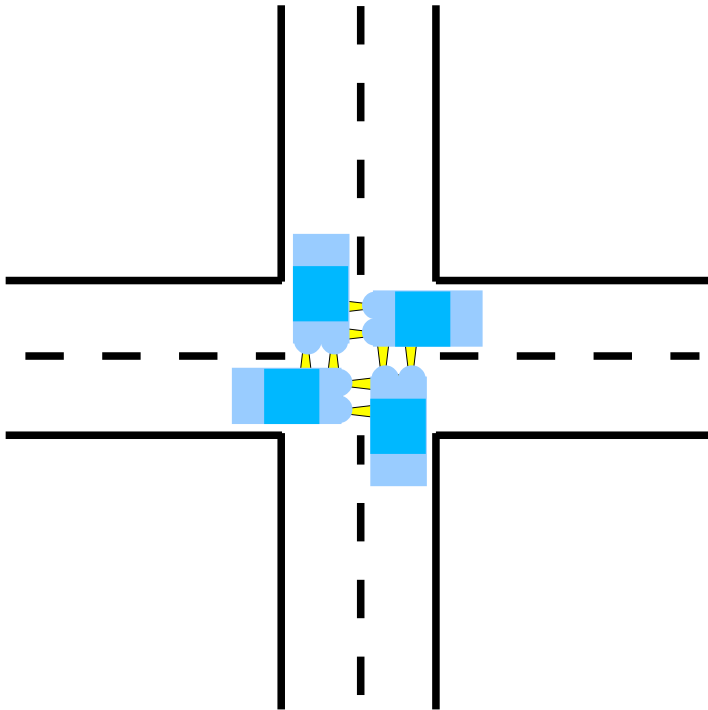
- Eine Menge von Prozessen befindet sich in einer **Deadlock-Situation**, wenn:
 - jeder Prozess auf eine Ressource wartet, die von einem anderen Prozess blockiert wird
 - keine der Ressourcen freigegeben werden kann, weil der haltende Prozess (indem er selbst wartet) blockiert ist
- In einer Deadlock-Situation werden also die Prozesse dauerhaft verharren
- Deadlocks sind unbedingt zu vermeiden

- Der Klassiker: Rechts-vor-Links-Kreuzung

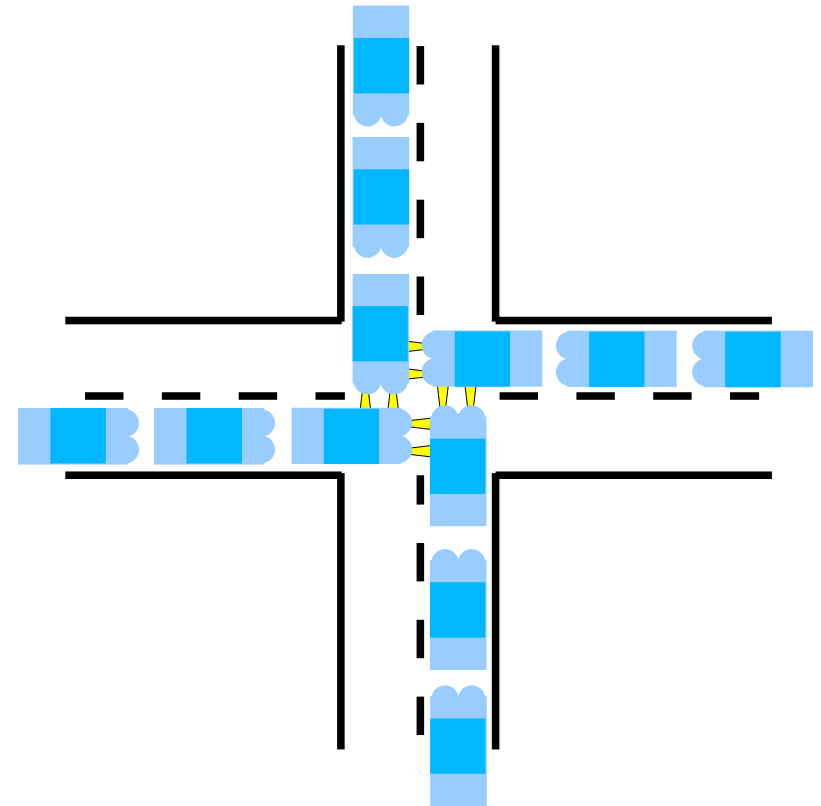


Wer darf fahren?
Potenzieller Deadlock

Deadlock: Rechts vor Links (2)

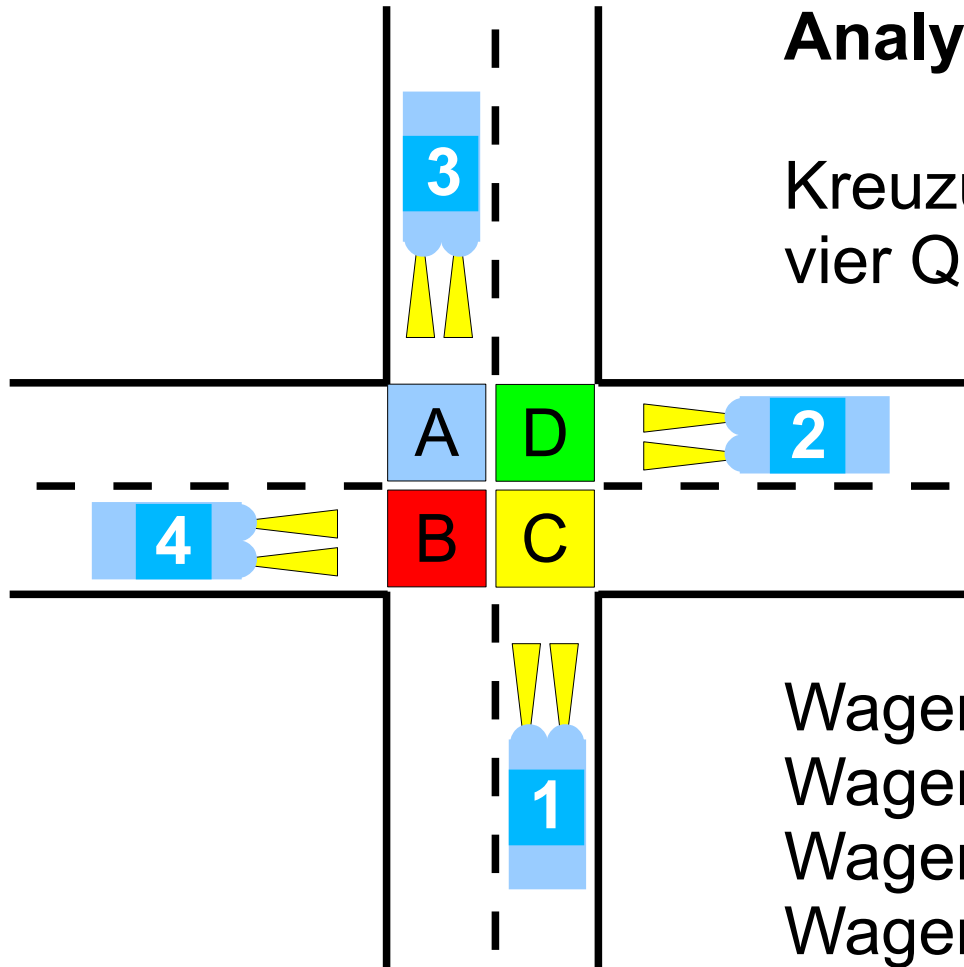


Deadlock, aber behebbar:
eines oder mehrere Autos
können zurücksetzen



Deadlock, nicht behebbar:
beteiligte Autos können nicht
zurücksetzen

Deadlock: Rechts vor Links (3)



Analyse:

Kreuzungsbereich besteht aus vier Quadranten A, B, C, D

Wagen 1 benötigt C, D
 Wagen 2 benötigt D, A
 Wagen 3 benötigt A, B
 Wagen 4 benötigt B, C

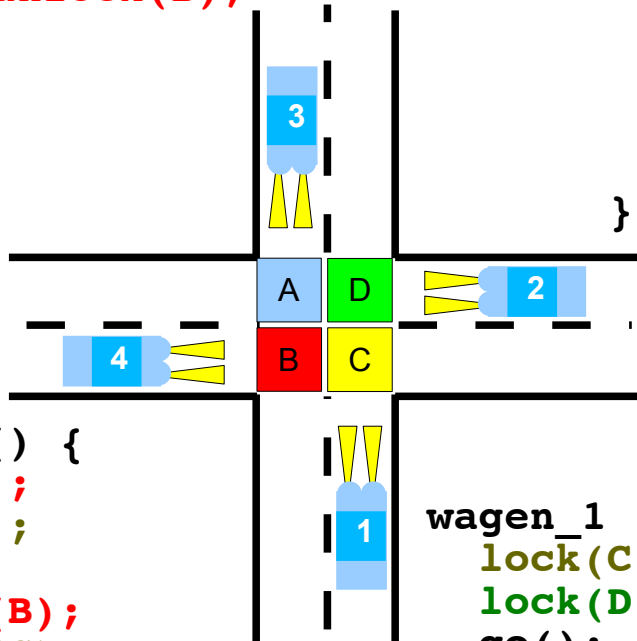
Deadlock: Rechts vor Links (4)

```
wagen_3 () {
  lock(A);
  lock(B);
  go();
  unlock(A);
  unlock(B);
}
```

```
wagen_2 () {
  lock(D);
  lock(A);
  go();
  unlock(D);
  unlock(A);
}
```

```
wagen_4 () {
  lock(B);
  lock(C);
  go();
  unlock(B);
  unlock(C);
}
```

```
wagen_1 () {
  lock(C);
  lock(D);
  go();
  unlock(C);
  unlock(D);
}
```



Problematische Reihenfolge:

- w1: lock(C)
- w2: lock(D)
- w3: lock(A)
- w4: lock(B)
- w1: lock(D) ← blockiert
- w2: lock(A) ← blockiert
- w3: lock(B) ← blockiert
- w4: lock(C) ← blockiert

Deadlock: kleinstes Beispiel (1)

- Zwei Locks A und B
 - z. B. A = Scanner, B = Drucker,
Prozesse P, Q wollen beide eine Kopie erstellen
- Locking in verschiedenen Reihenfolgen

Prozess P

```
lock (A);
lock (B);
```

```
/* krit. Bereich */
```

```
unlock (A);
unlock (B);
```

Prozess Q

```
lock (B);
lock (A);
```

```
/* krit. Bereich */
```

```
unlock (B);
unlock (A);
```

**Problematische
Reihenfolge:**

P: lock(A)

Q: lock(B)

P: lock(B) ← blockiert

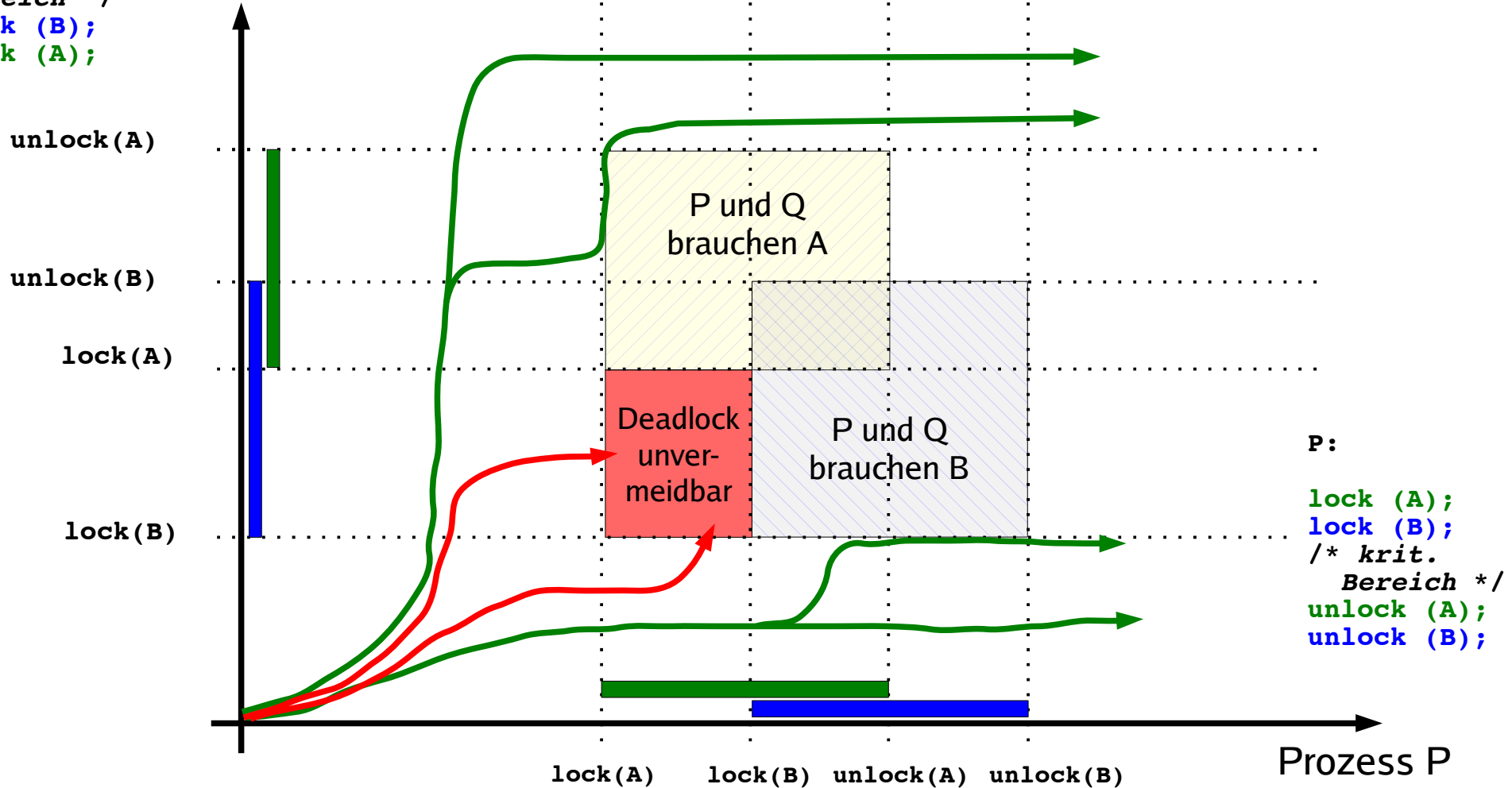
Q: lock(A) ← blockiert

Deadlock: kleinstes Beispiel (2)

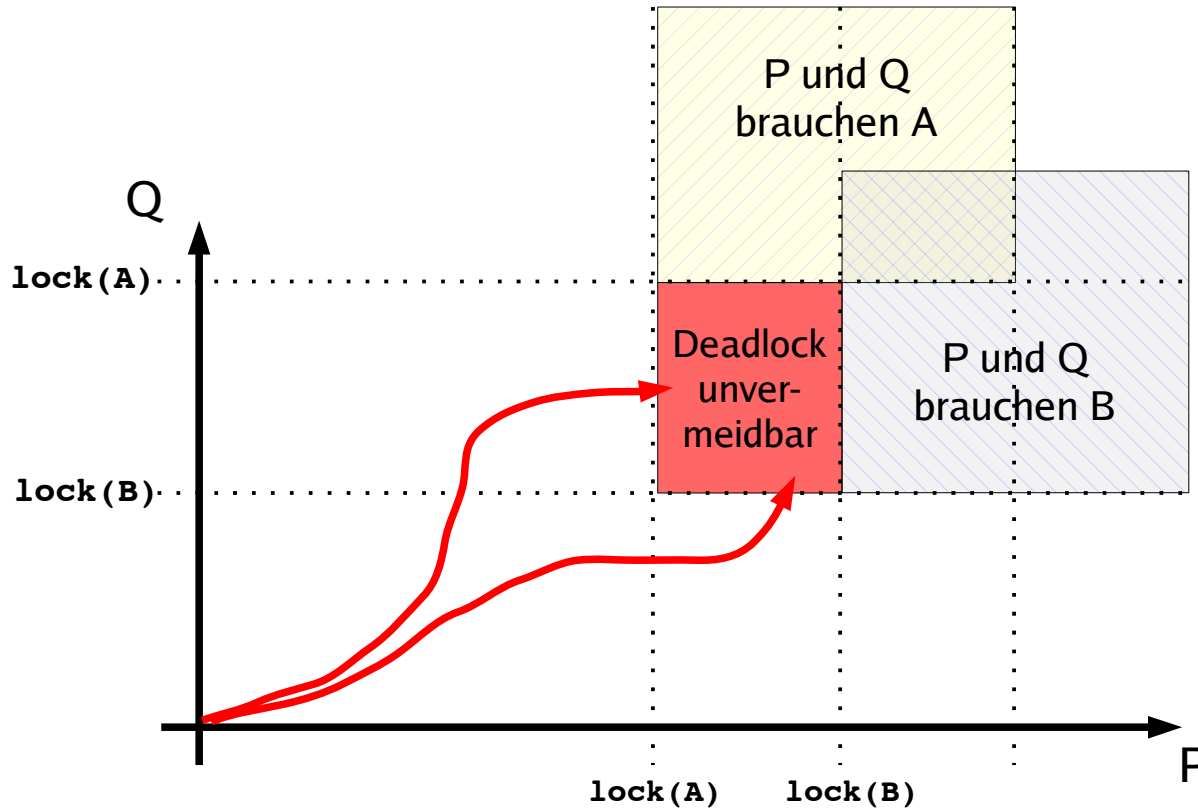
Q:

```
lock (B);
lock (A);
/* krit.
Bereich */
unlock (B);
unlock (A);
```

Prozess Q



Deadlock: kleinstes Beispiel (3)



Programmverzahnungen,
die zwangsläufig in den
Deadlock führen:

oberer roter Weg:

Q: `lock(B)`

P: `lock(A)`

unterer roter Weg:

P: `lock(A)`

Q: `lock(B)`

- Problem beheben:
P benötigt die Locks nicht gleichzeitig

Prozess P

```
lock (A);
/* krit. Bereich */
unlock (A);
```

```
lock (B);
/* krit. Bereich */
unlock (B);
```

Prozess Q

```
lock (B);
lock (A);

/* krit. Bereich */
```

```
unlock (B);
unlock (A);
```

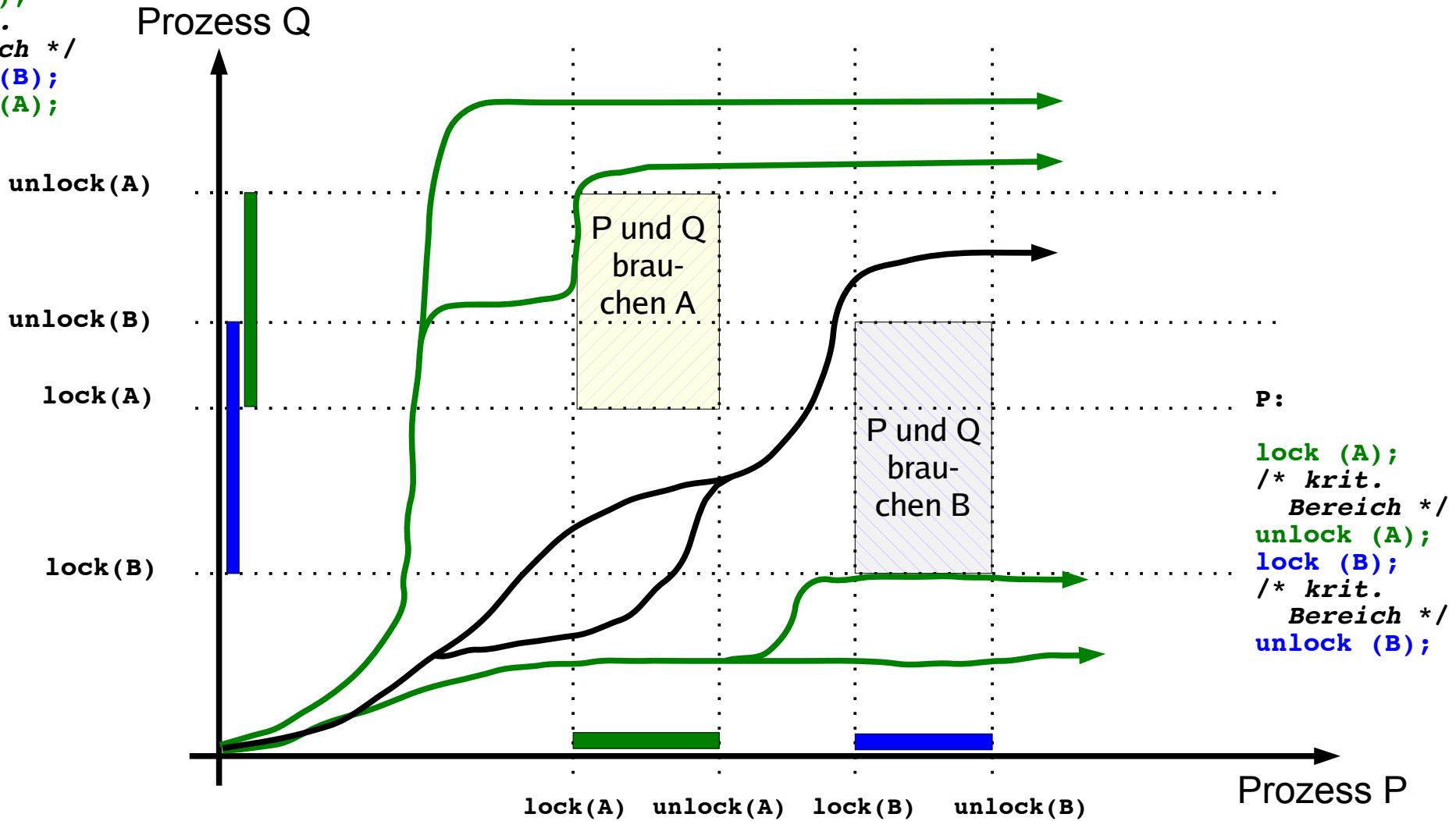
Jetzt kann kein Deadlock mehr auftreten

- Andere Lösung: P und Q fordern A, B in gleicher Reihenfolge an

Deadlock: kleinstes Beispiel (5)

Q:

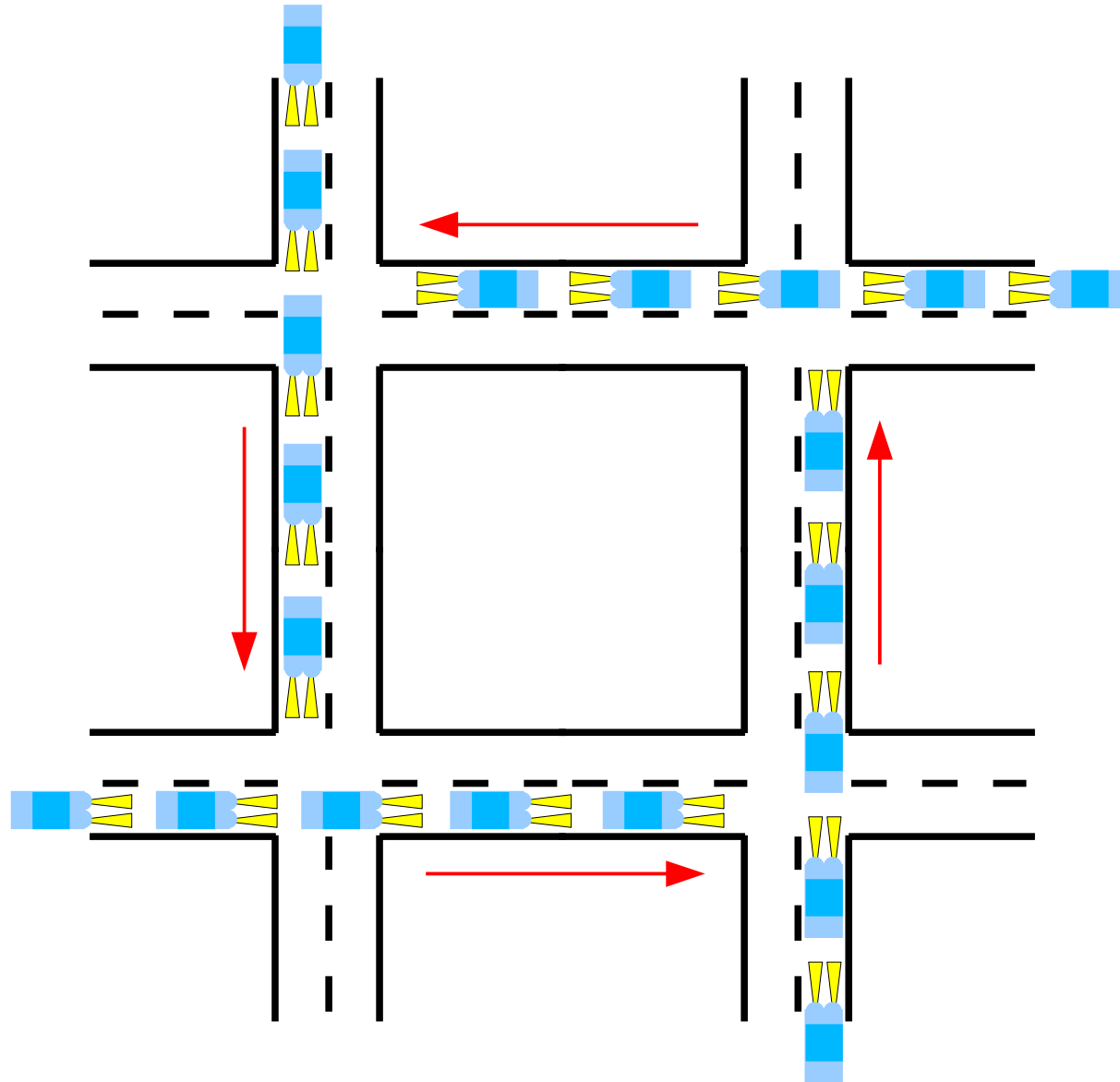
```
lock (B);
lock (A);
/* krit.
Bereich */
unlock (B);
unlock (A);
```



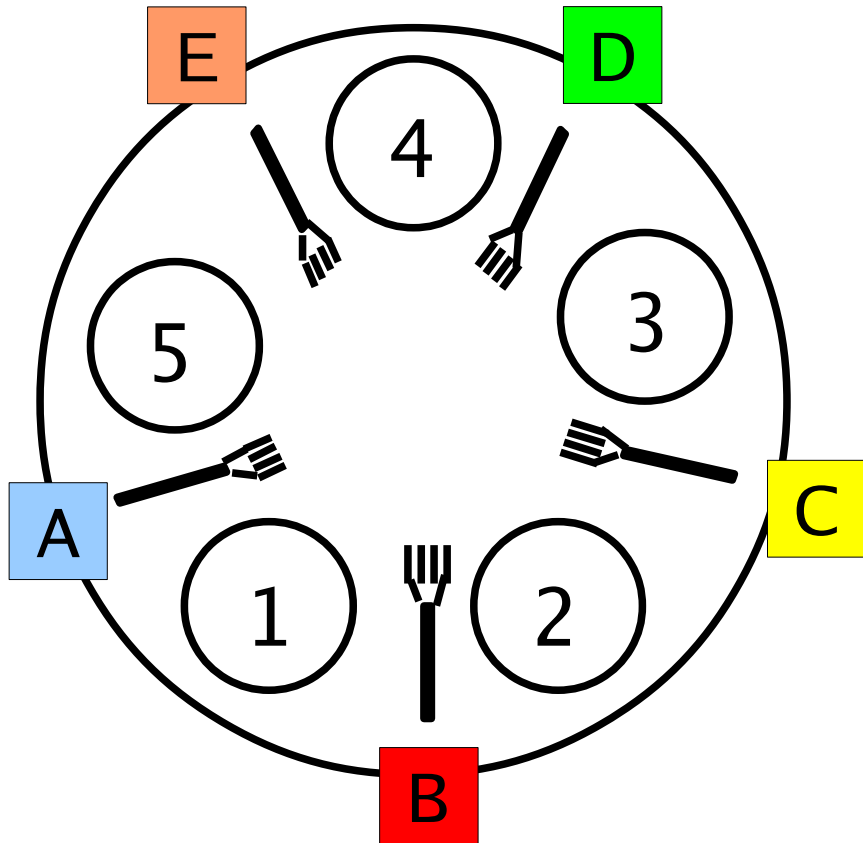
P:

```
lock (A);
/* krit.
Bereich */
unlock (A);
lock (B);
/* krit.
Bereich */
unlock (B);
```

Grid Lock



Fünf-Philosophen-Problem



Philosoph 1 braucht Gabeln A, B
 Philosoph 2 braucht Gabeln B, C
 Philosoph 3 braucht Gabeln C, D
 Philosoph 4 braucht Gabeln D, E
 Philosoph 5 braucht Gabeln E, A

Problematische Reihenfolge:

p1: lock (B)
 p2: lock (C)
 p3: lock (D)
 p4: lock (E)
 p5: lock (A)
 p1: lock (A) ← blockiert
 p2: lock (B) ← blockiert
 p3: lock (C) ← blockiert
 p4: lock (D) ← blockiert
 p5: lock (E) ← blockiert

Zwei Kategorien von Ressourcen: unterbrechbar / nicht unterbrechbar

- unterbrechbare Ressourcen
 - Betriebssystem kann einem Prozess solche Ressourcen wieder entziehen
 - Beispiele:
 - CPU (Scheduler)
 - Hauptspeicher (Speicherverwaltung)
 - das kann Deadlocks vermeiden

- nicht unterbrechbare Ressourcen
 - Betriebssystem kann Ressource nicht (ohne fehlerhaften Abbruch) entziehen – Prozess muss diese freiwillig zurückgeben
 - Beispiele:
 - DVD-Brenner (Entzug → zerstörter Rohling)
 - Tape-Streamer (Entzug → sinnlose Daten auf Band oder Abbruch der Bandsicherung wegen Timeout)
- Nur die *nicht* unterbrechbaren sind interessant, weil sie Deadlocks verursachen können

- wiederverwendbare vs. konsumierbare Ressourcen
 - **wiederverwendbar:** Zugriff auf Ressource zwar exklusiv, aber nach Freigabe wieder durch anderen Prozess nutzbar (Platte, RAM, CPU, ...)
 - **konsumierbar:** von einem Prozess erzeugt und von einem anderen Prozess konsumiert (Nachrichten, Interrupts, Signale, ...)

1. Gegenseitiger Ausschluss (mutual exclusion)

- Ressource ist exklusiv: Es kann stets nur ein Prozess darauf zugreifen

2. Hold and Wait (besitzen und warten)

- Ein Prozess ist bereits im Besitz einer oder mehrerer Ressourcen, und
- er kann noch weitere anfordern

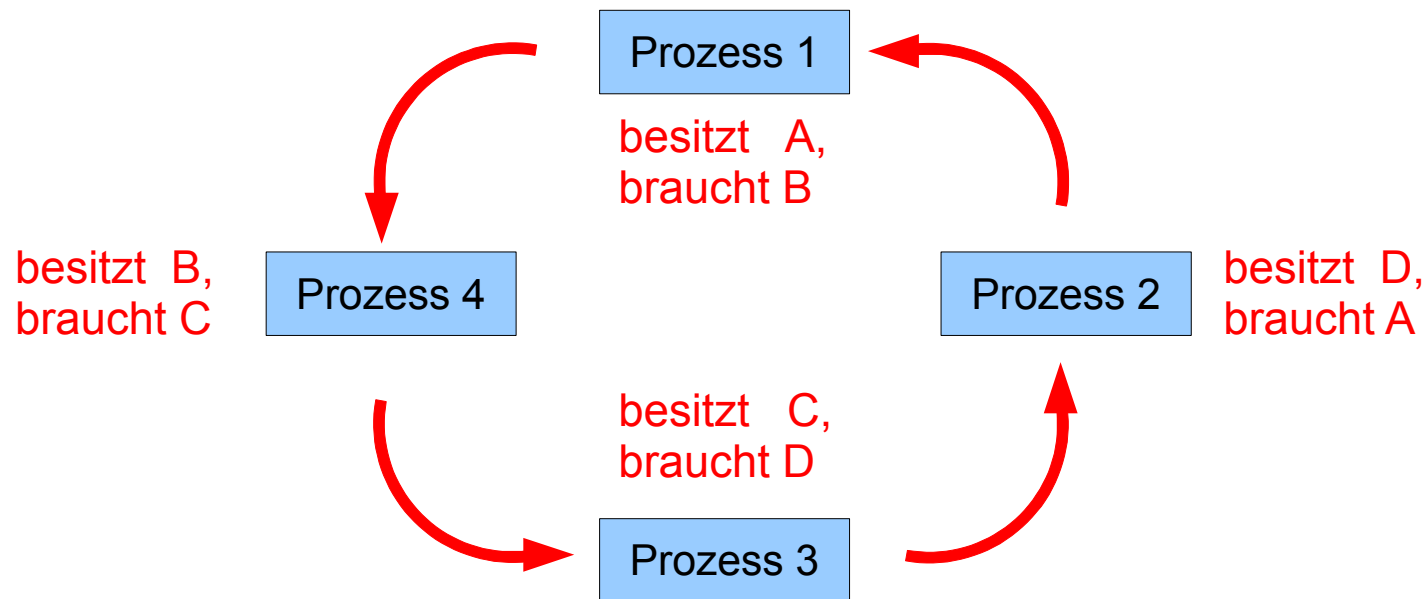
3. Ununterbrechbarkeit der Ressourcen

- Die Ressource kann nicht durch das Betriebssystem entzogen werden

- (1) bis (3) sind **notwendige** Bedingungen für einen Deadlock
- (1) bis (3) sind aber auch „wünschenswerte“ Eigenschaften eines Betriebssystems, denn:
 - gegenseitiger Ausschluss ist nötig für korrekte Synchronisation
 - Hold & Wait ist nötig, wenn Prozesse exklusiven Zugriff auf mehrere Ressourcen benötigen
 - Bei manchen Betriebsmitteln ist eine Präemption prinzipiell nicht sinnvoll (z. B. DVD-Brenner, Streamer)

4. Zyklisches Warten

- Man kann die Prozesse in einem Kreis anordnen, in dem jeder Prozess eine Ressource benötigt, die der folgende Prozess im Kreis belegt hat

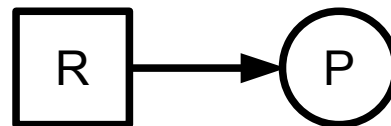


1. **Gegenseitiger Ausschluss**
 2. **Hold and Wait**
 3. **Ununterbrechbarkeit der Ressourcen**
 4. **Zyklisches Warten**
- (1) bis (4) sind **notwendige und hinreichende** Bedingungen für einen Deadlock
 - Das zyklische Warten (4) (und dessen Unauflösbarkeit) sind Konsequenzen aus (1) bis (3)
 - (4) ist der erfolgversprechendste Ansatzpunkt, um Deadlocks aus dem Weg zu gehen

- Belegung und (noch unerfüllte) Anforderung grafisch darstellen:



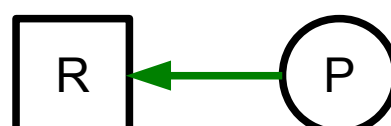
Ressource



P hat R belegt

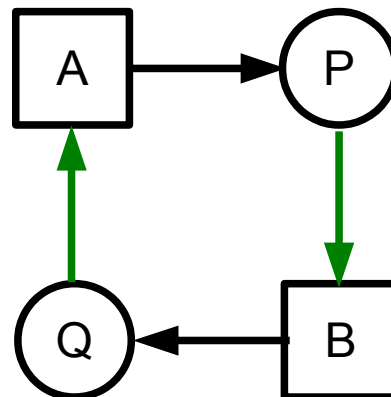


Prozess

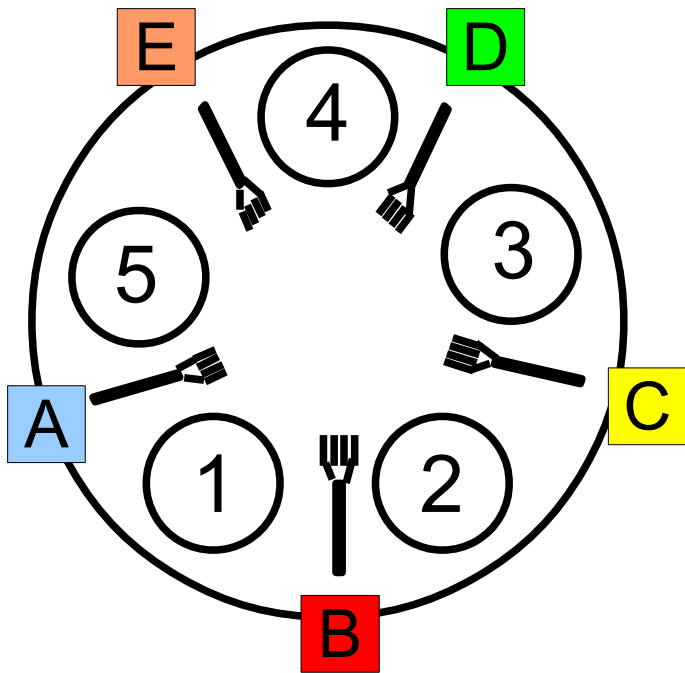


P hat R angefordert

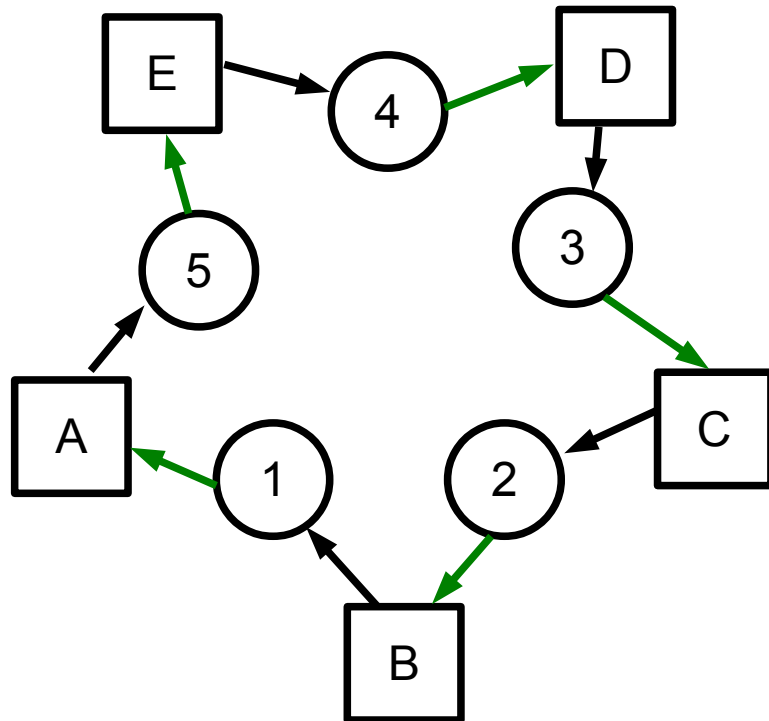
- P, Q aus Minimalbeispiel:
- Deadlock = Kreis im Graph



Philosophen-Beispiel



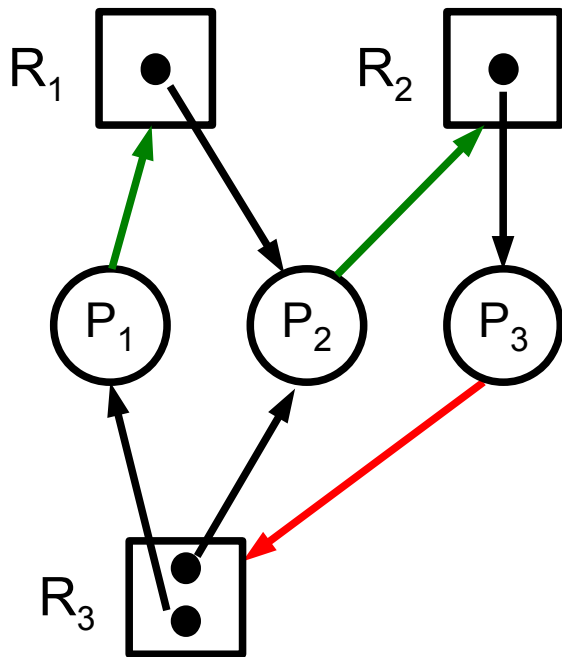
Situation, nachdem alle Philosophen ihre rechte Gabel aufgenommen haben



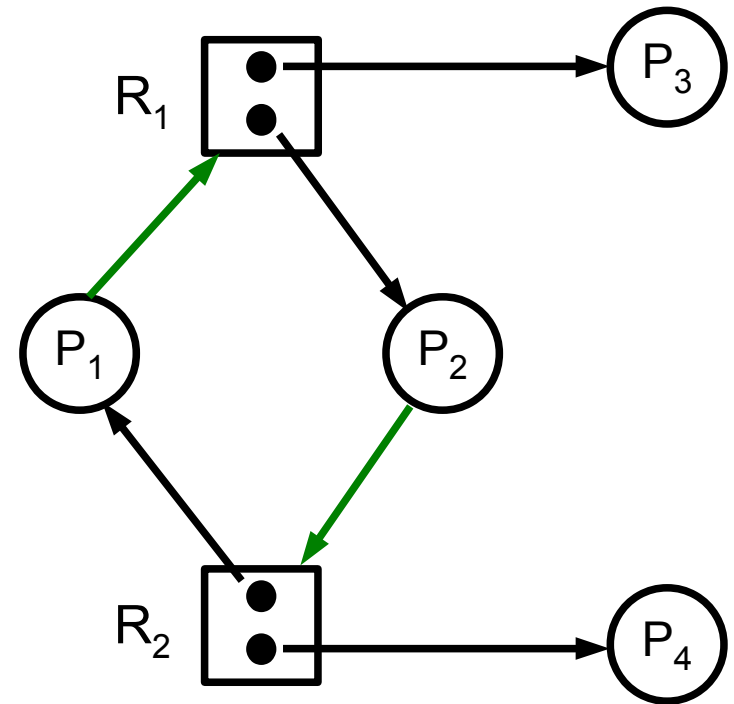
- Variante für Ressourcen, die mehrfach vorkommen können



- Beispiele mit mehreren Instanzen



Mit roter Kante ($P_3 \rightarrow R_3$) gibt es einen Deadlock (ohne nicht)

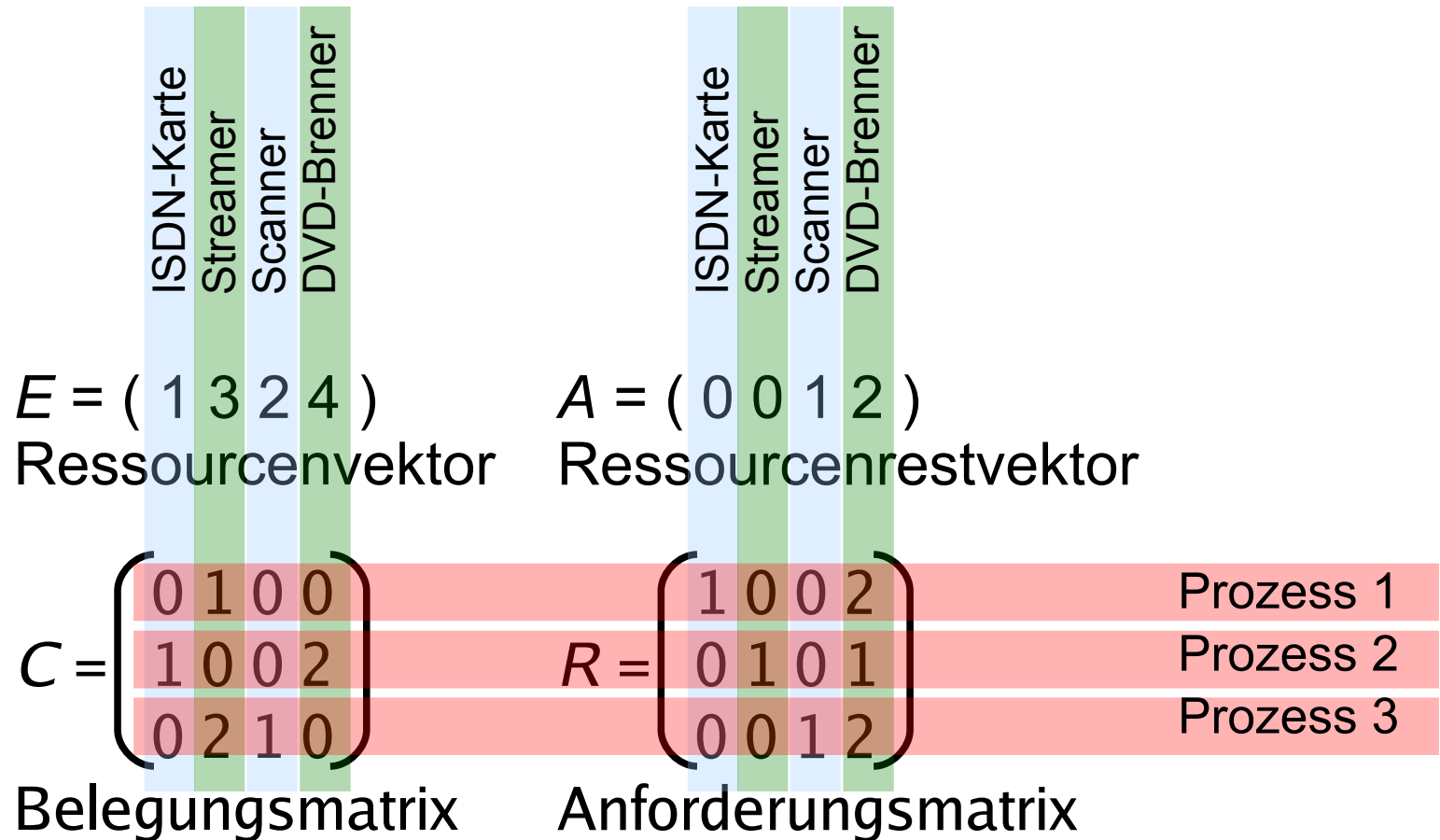


Kreis, aber kein Deadlock – Bedingung ist nur **notwendig**, nicht hinreichend!

- Idee: Deadlocks zunächst zulassen
- System regelmäßig auf Vorhandensein von Deadlocks überprüfen und diese dann abstellen
- Nutzt drei Datenstrukturen:
 - Belegungsmatrix
 - Ressourcenrestvektor
 - Anforderungsmatrix

- n Prozesse P_1, \dots, P_n
- m Ressourcentypen R_1, \dots, R_m
Vom Typ R_i gibt es E_i Ressourcen-Instanzen ($i=1, \dots, m$)
→ **Ressourcenvektor** $E = (E_1 \ E_2 \ \dots \ E_m)$
- **Ressourcenrestvektor** A (wie viele sind noch frei?)
- **Belegungsmatrix** C
 C_{ij} = Anzahl Ressourcen vom Typ j , die von Prozess i belegt sind
- **Anforderungsmatrix** R
 R_{ij} = Anzahl Ressourcen vom Typ j , die Prozess i noch benötigt

• Beispiel:



Algorithmus

1. Suche einen unmarkierten Prozess P_i , dessen verbleibende Anforderungen vollständig erfüllbar sind, also $R_{ij} \leq A_j$ für alle j
2. Gibt es keinen solchen Prozess, beende Algorithmus
3. Ein solcher Prozess könnte erfolgreich abgearbeitet werden. Simuliere die Rückgabe aller belegten Ressourcen:

$$A := A + C_i \text{ (} i\text{-te Zeile von } \mathbf{C} \text{)}$$
 Markiere den Prozess – er ist nicht Teil eines Deadlocks
4. Weiter mit Schritt 1

- Alle Prozesse, die nach diesem Algorithmus nicht markiert sind, sind an einem Deadlock beteiligt
- Beispiel

$$E = (1\ 3\ 2\ 4) \quad A = (0\ 0\ 1\ 2)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$E = (1\ 3\ 2\ 4) \quad A = (0\ 2\ 2\ 2)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

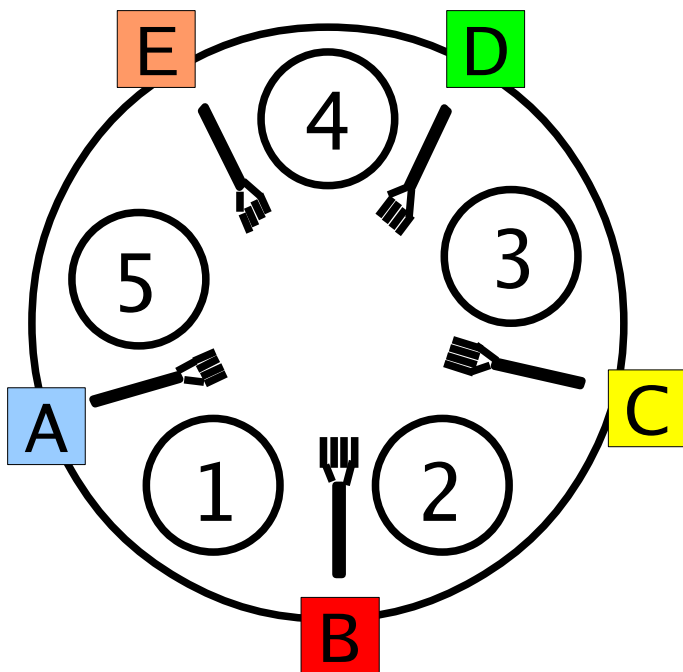
$$E = (1\ 3\ 2\ 4) \quad A = (1\ 2\ 2\ 4)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

$$E = (1\ 3\ 2\ 4) \quad A = (1\ 3\ 2\ 4)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Beispiel (5 Philosophen)



	A	B	C	D	E		A	B	C	D	E
$E =$	1	1	1	1	1	$A =$	0	0	0	0	0
$C =$	1	0	0	0	0	$R =$	0	0	0	0	1
	0	1	0	0	0		1	0	0	0	0
	0	0	1	0	0		0	1	0	0	0
	0	0	0	1	0		0	0	1	0	0
	0	0	0	0	1		0	0	0	1	0

- Algorithmus bricht direkt ab
- alle Prozesse sind Teil eines Deadlocks

Deadlock-Behebung:

Was tun, wenn ein Deadlock erkannt wurde?

- **Entziehen** einer Ressource?
In den Fällen, die wir betrachten, unmöglich
(ununterbrechbare Ressourcen)
- **Abbruch** eines Prozesses, der am Deadlock beteiligt ist
- **Rücksetzen** eines Prozesses in einen früheren Prozesszustand, zu dem die Ressource noch nicht gehalten wurde
 - erfordert regelmäßiges Sichern der Prozesszustände

Deadlock Avoidance (Vermeidung)

- **Idee:** BS erfüllt Ressourcenanforderung nur dann, wenn dadurch auf keinen Fall ein Deadlock entstehen kann
- Das funktioniert nur, wenn man die **Maximalforderungen aller Prozesse** kennt
 - Prozesse registrieren **beim Start** für alle denkbaren Ressourcen ihren Maximalbedarf
 - für die Praxis i. d. R. irrelevant
 - nur in wenigen Spezialfällen nützlich

Sichere vs. unsichere Zustände

- Ein Zustand heißt **sicher**, wenn es eine Ausführreihenfolge der Prozesse gibt, die auch dann keinen Deadlock verursacht, wenn alle Prozesse sofort ihre maximalen Ressourcenforderungen stellen.
- Ein Zustand heißt **unsicher**, wenn er nicht sicher ist.
- Unsicher bedeutet nicht zwangsläufig Deadlock!

Banker-Algorithmus (1)

- Idee: Liquidität im Kreditgeschäft
 - Kunden haben eine Kreditlinie (maximaler Kreditbetrag)
 - Kunden können ihren Kredit in Teilbeträgen in Anspruch nehmen, bis die Kreditlinie ausgeschöpft ist – dann zahlen sie den kompletten Kreditbetrag zurück
 - Prüfe bei Kreditanforderung, ob diese die Bank in einem **sicheren** Zustand lässt, was die Liquidität angeht – wird der Zustand unsicher, lehnt die Bank die Auszahlung ab

Banker-Algorithmus (2) – Beispiel

Bank: 1200 €,
900 € verliehen, 300 € Cash



	Max.	Aktueller Kredit
Kunde 1	1000 €	500 €
Kunde 2	400 €	200 €
Kunde 3	900 €	200 €

sicher, denn es gibt folgende Auszahlungs-/Rückzahlungsreihenfolge:

	(Bank)
K2: leiht	200 € (100 €)
K2: rückz.	400 € (500 €)
K1: leiht	500 € (0 €)
K1: rückz.	1000 € (1000 €)
K3: leiht	700 € (300 €)
K3: rückz.	900 € (1200 €)

Bank: 1200 €,
1000 € verliehen, 200 € Cash



	Max.	Aktueller Kredit
Kunde 1	1000 €	500 €
Kunde 2	400 €	200 €
Kunde 3	900 €	300 €

unsicher, weil es keine mögliche Auszahlungsreihenfolge gibt, die die Bank bedienen kann:

	(Bank)
K2: leiht	200 € (0 €)
K2: rückz.	400 € (400 €)
K1: leiht	500 € (-100 €)
K3: leiht	600 € (-200 €)

(letzte zwei unmöglich)

Banker-Algorithmus (3) – Beispiel

Bank: 1200 €,
900 € verliehen, 300 € Cash



	Max.	Aktueller Kredit
Kunde 1	1000 €	500 €
Kunde 2	400 €	200 €
Kunde 3	900 €	200 €



*Kunde 3 fordert
100 € an*

Bank: 1200 €,
1000 € verliehen, 200 € Cash



	Max.	Aktueller Kredit
Kunde 1	1000 €	500 €
Kunde 2	400 €	200 €
Kunde 3	900 €	300 €



*Kunde 2 fordert 200 € an
und zahlt alles zurück*

Bank: 400 € Cash

Kunde 1	1000 €	500 €
Kunde 2	400 €	0 €
Kunde 3	900 €	300 €



Übergang sicher → unsicher
nicht zulassen!

Banker-Algorithmus (4)

- Datenstrukturen wie bei Deadlock-Erkennung:
 - n Prozesse $P_1 \dots P_n$, m Ressourcentypen $R_1 \dots R_m$ mit je E_i Ressourcen-Instanzen ($i=1, \dots, m$)
 → **Ressourcenvektor $E = (E_1 \ E_2 \ \dots \ E_m)$**
 - **Ressourcenrestvektor A** (wie viele sind noch frei?)
 - **Belegungsmatrix C**
 C_{ij} = Anzahl Ressourcen vom Typ j , die Prozess i belegt
 - **Maximalbelegung Max :**
 Max_{ij} = max. Bedarf, den Prozess i an Ressource j hat
 - **Maximale zukünftige Anforderungen: $R = Max - C$,**
 R_{ij} = Anzahl Ressourcen vom Typ j , die Prozess i noch maximal anfordern kann

Banker-Algorithmus (5)

Anforderung zulassen, falls

- Anforderung bleibt im Limit des Prozesses
- Zustand nach Gewähren der Anforderung ist sicher

Feststellen, ob ein Zustand sicher ist = Annehmen, dass alle Prozesse sofort ihre Maximalforderungen stellen, und dies auf Deadlocks überprüfen
(siehe Algorithmus auf Folie G-67)

Banker-Algorithmus (6) – Beispiel

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} E = (10\ 5\ 7) \\ A = (3\ 3\ 2) \end{matrix} \quad \mathbf{Max} = \begin{pmatrix} 7 & 5 & 3 \\ 3 & 2 & 2 \\ 9 & 0 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \\ 4 & 3 & 3 \end{pmatrix} \quad \mathbf{R} = \mathbf{Max} - \mathbf{C} = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 1 & 2 & 2 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Anforderung (1 0 2) durch Prozess P2 – ok?

1. (1 0 2) < (1 2 2), also erste Bedingung erfüllt
2. Auszahlung simulieren

$$\mathbf{C}' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \mathbf{3} & \mathbf{0} & \mathbf{2} \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{matrix} E = (10\ 5\ 7) \\ A' = (\mathbf{2}\ \mathbf{3}\ \mathbf{0}) \end{matrix} \quad \mathbf{R}' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ \mathbf{0} & \mathbf{2} & \mathbf{0} \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Jetzt Deadlock-Erkennung durchführen}$$

Deadlock-Vermeidung (avoidance) (9)

1

$$E = (1057) \quad A' = (230)$$

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad R' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 0 & 2 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

2

$$E = (1057) \quad A' = (532)$$

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad R' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 0 & 2 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

3

$$E = (1057) \quad A' = (743)$$

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad R' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 0 & 2 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

4

$$E = (1057) \quad A' = (753)$$

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad R' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 0 & 2 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

5

$$E = (1057) \quad A' = (1055)$$

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad R' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 0 & 2 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

6

$$E = (1057) \quad A' = (1057)$$

$$C' = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 2 \\ 3 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \quad R' = \begin{pmatrix} 7 & 4 & 3 \\ 0 & 2 & 0 \\ 6 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 4 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

OK!

Deadlock-Verhinderung (prevention): Vorbeugendes Verhindern

- mache mindestens eine der vier Deadlock-Bedingungen unerfüllbar
 1. gegenseitiger Ausschluss
 2. Hold and Wait
 3. Ununterbrechbarkeit der Ressourcen
 4. Zyklisches Warten
- dann sind keine Deadlocks mehr möglich (denn die vier Bedingungen sind notwendig)

1. Gegenseitiger Ausschluss

- Ressourcen nur dann exklusiv Prozessen zuteilen, wenn es keine Alternative dazu gibt
- Beispiel: Statt mehrerer konkurrierender Prozesse, die einen gemeinsamen Drucker verwenden wollen, einen Drucker-Spooler einführen
 - keine Konflikte mehr bei Zugriff auf Drucker (Spooler-Prozess ist der einzige, der direkten Zugriff erhalten kann)
 - aber: Problem evtl. nur verschoben (Größe des Spool-Bereichs bei vielen Druckjobs begrenzt?)

2. Hold and Wait

- Alle Prozesse müssen die benötigten Ressourcen gleich beim Prozessstart anfordern (und blockieren)
- hat verschiedene Nachteile:
 - Ressourcen-Bedarf entsteht oft dynamisch (ist also beim Start des Prozesses nicht bekannt)
 - verschlechtert Parallelität (Prozess hält Ressourcen über einen längeren Zeitraum)
- Datenbanksysteme: **Two Phase Locking**
 - Sperrphase: Alle Ressourcen erwerben (wenn das nicht klappt → alle sofort wieder freigeben)
 - Zugriffsphase (anschließend Freigabe)

3. Ununterbrechbarkeit der Ressourcen

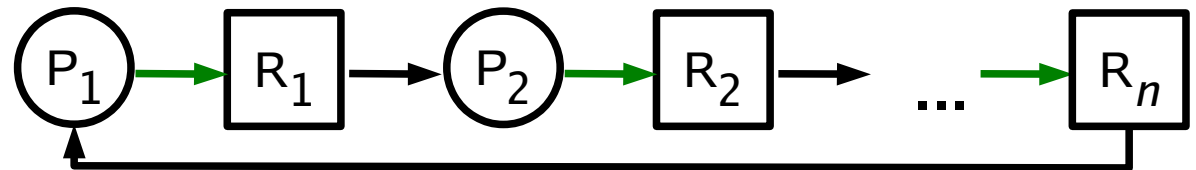
- Ressourcen entziehen?
- siehe Deadlock-Behebung (Abbruch / Rücksetzen)

4. Zyklisches Warten (1)

- Ressourcen durchnummerieren
 - $ord: \mathbf{R} = \{R_1, \dots, R_n\} \rightarrow \mathbb{N}$, $ord(R_i) \neq ord(R_j)$ für $i \neq j$
- Prozess darf Ressourcen nur in der durch ord vorgegebenen Reihenfolge anfordern
 - Wenn $ord(R) < ord(S)$, dann ist die Sequenz
 - lock (S);**
 - lock (R);**
 - ungültig
- Das macht Deadlocks unmöglich

4. Zyklisches Warten (2)

- Annahme: Es gibt einen Zykel



Für jedes i gilt: $ord(R_i) < ord(R_{i+1})$ und wegen des Zyklus auch $ord(R_n) < ord(R_1)$,
 daraus folgt $ord(R_1) < ord(R_1)$: Widerspruch

- Problem: Gibt es eine feste Reihenfolge der Ressourcenbelegung, die für alle Prozesse geeignet ist?
- reduziert Parallelität (Ressourcen zu früh belegt)