Betriebssysteme Theorie

SS 2011

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

Foliensatz E (12.05.2011)
Deadlocks

Deadlocks – Gliederung

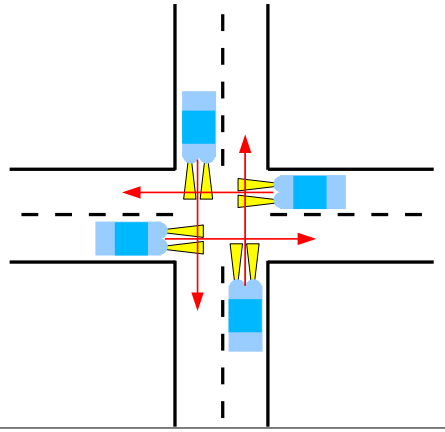
- Einführung
- Ressourcen-Typen
- Hinreichende und notwendige Deadlock-Bedingungen
- Deadlock-Erkennung und -Behebung
- Deadlock-Vermeidung (avoidance): Banker-Algorithmus
- Deadlock-Verhinderung (prevention)

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

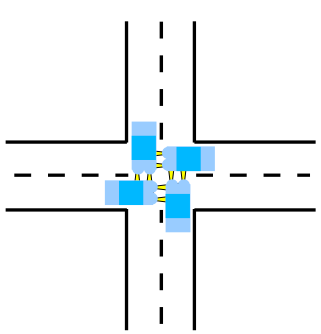
Deadlock: Rechts vor Links (1)

- Der Klassiker: Rechts-vor-Links-Kreuzung

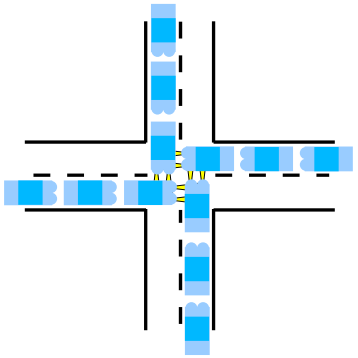


Wer darf fahren?
Potenzieller Deadlock

Deadlock: Rechts vor Links (2)

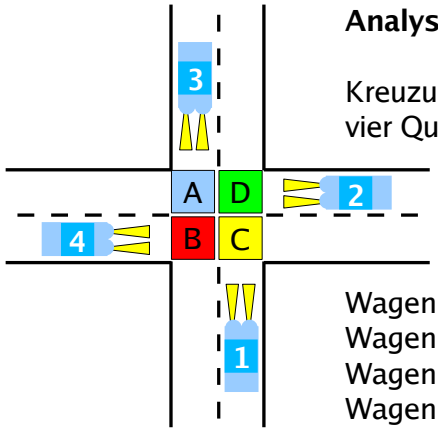


Deadlock, aber behebbar:
eines oder mehrere Autos
können zurücksetzen



Deadlock, nicht behebbar:
beteiligte Autos können nicht
zurücksetzen

Deadlock: Rechts vor Links (3)

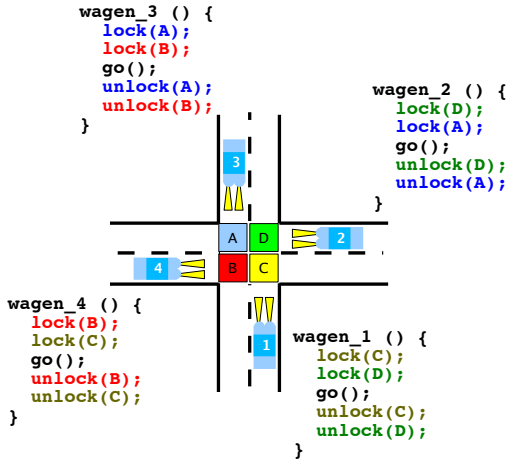


Analyse:

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)



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);
```

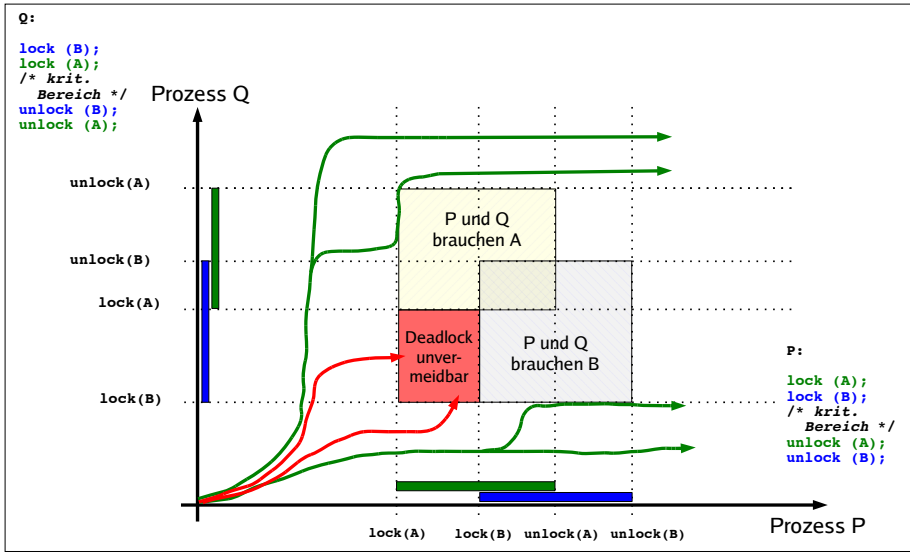
Prozess Q

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

/* krit. Bereich */

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

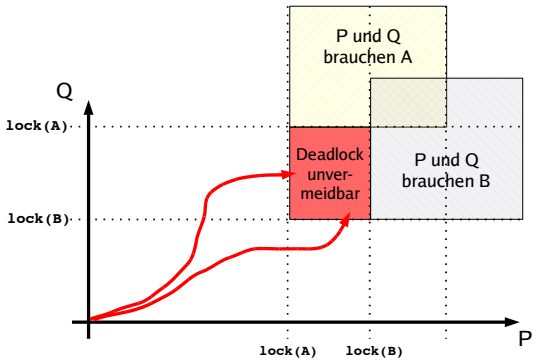
Problematische Reihenfolge:

P: lock(A)
Q: lock(B)
P: lock(B) ← blockiert
Q: lock(A) ← blockiert

Deadlock: kleinstes Beispiel (2)



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)`

Deadlock: kleinstes Beispiel (4)

- Problem beheben:
  P benötigt die Locks nicht gleichzeitig

Prozess P

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

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

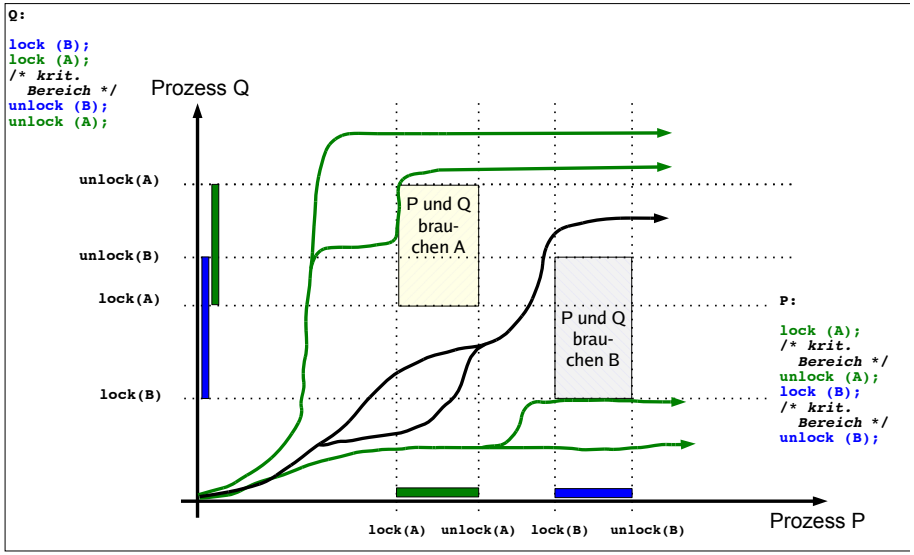
Prozess Q

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

/* krit. Bereich */

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

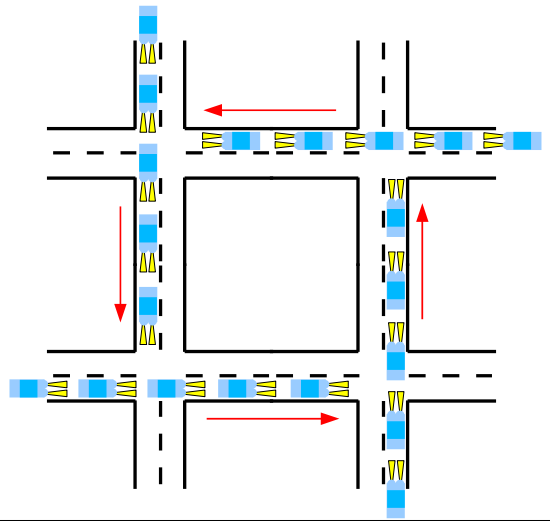
Jetzt kann kein Deadlock mehr auftreten

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

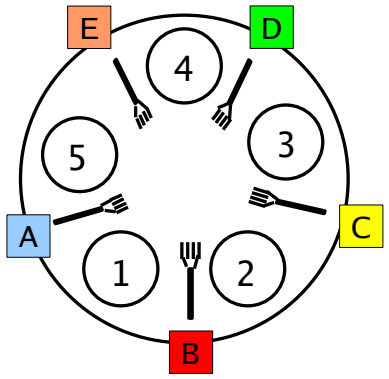
Deadlock: kleinstes Beispiel (5)



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

Ressourcen-Typen (1)

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

Ressourcen-Typen (2)

- 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

Ressourcen-Typen (3)

- 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, ...)

Deadlock-Bedingungen (1)

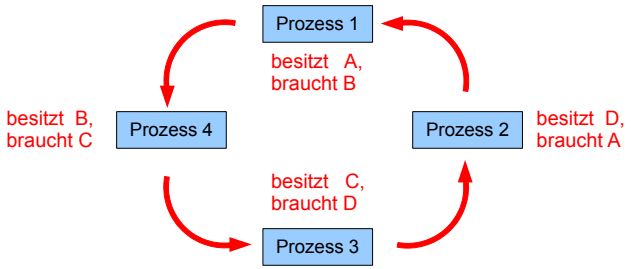
1. **Gegenseitiger Ausschluss (mutual exclusion)**
   - Ressource ist exklusiv: Es kann stets nur ein Prozess darauf zugreifen
2. **Hold and Wait (besitzen und warten)**
   - Ein Prozess ist bereits im Besitz einer oder mehrerer Ressourcen, und
   - er kann noch weitere anfordern
3. **Ununterbrechbarkeit der Ressourcen**
   - Die Ressource kann nicht durch das Betriebssystem entzogen werden

Deadlock-Bedingungen (2)

- (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)

Deadlock-Bedingungen (3)

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



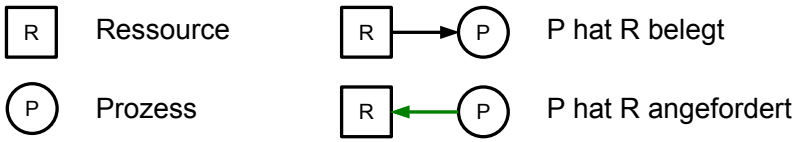
Deadlock-Bedingungen (4)

1. **Gegenseitiger Ausschluss**
2. **Hold and Wait**
3. **Ununterbrechbarkeit der Ressourcen**
4. **Zyklisches Warten**

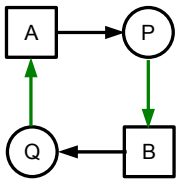
- (1) bis (4) sind **notwendige und hinreichende** Bedingungen für einen Deadlock
- Das zyklische Warten (4) (und dessen Unauflösbarkeit) sind Konsequenzen aus (1) bis (3)
- (4) ist der erfolgversprechendste Ansatzpunkt, um Deadlocks aus dem Weg zu gehen

Ressourcen-Zuordnungs-Graph (1)

- Belegung und (noch unerfüllte) Anforderung grafisch darstellen:

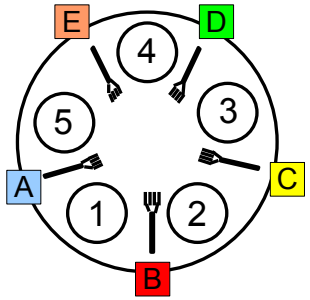


- P, Q aus Minimalbeispiel:
- Deadlock = Kreis im Graph

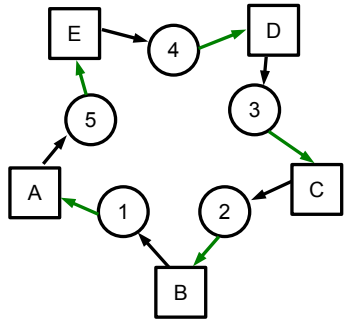


Ressourcen-Zuordnungs-Graph (2)

Philosophen-Beispiel

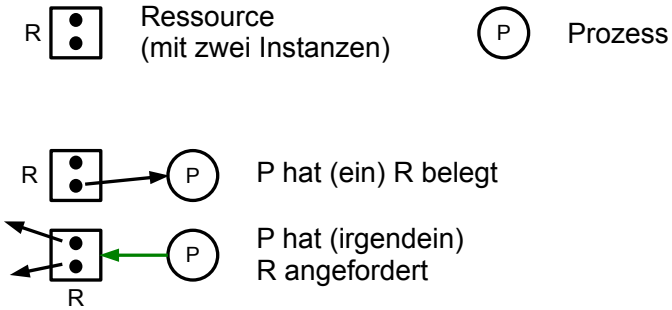


Situation, nachdem alle Philosophen ihre rechte Gabel aufgenommen haben



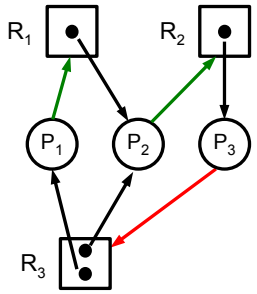
Ressourcen-Zuordnungs-Graph (3)

- Variante für Ressourcen, die mehrfach vorkommen können

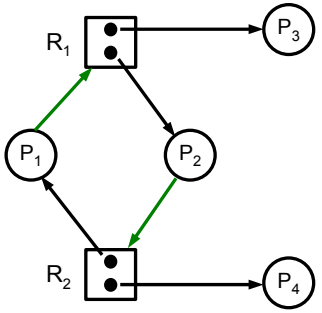


Ressourcen-Zuordnungs-Graph (4)

- 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!

Deadlock-Erkennung (detection) (1)
-Vermeidung (avoidance)
-Verhinderung (prevention)

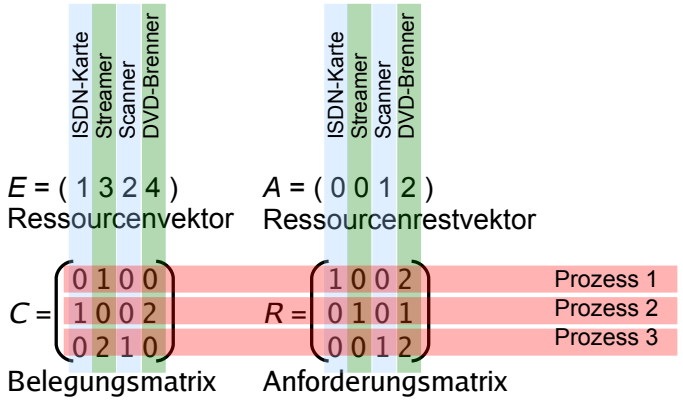
- Idee: Deadlocks zunächst zulassen
- System regelmäßig auf Vorhandensein von Deadlocks überprüfen und diese dann abstellen
- Nutzt drei Datenstrukturen:
  - Belegungsmatrix
  - Ressourcenrestvektor
  - Anforderungsmatrix

Deadlock-Erkennung (detection) (2)
-Vermeidung (avoidance)
-Verhinderung (prevention)

- n Prozesse P_1, ... , P_n
- m Ressourcentypen R_1, ... , R_m
  Vom Typ R_i gibt es E_i Ressourcen-Instanzen (i=1,...,m)
  → **Ressourcenvektor** $E = (E_1\ E_2\ ...\ E_m)$
- **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

Deadlock-Erkennung (detection) (3)
-Vermeidung (avoidance)
-Verhinderung (prevention)

- Beispiel:



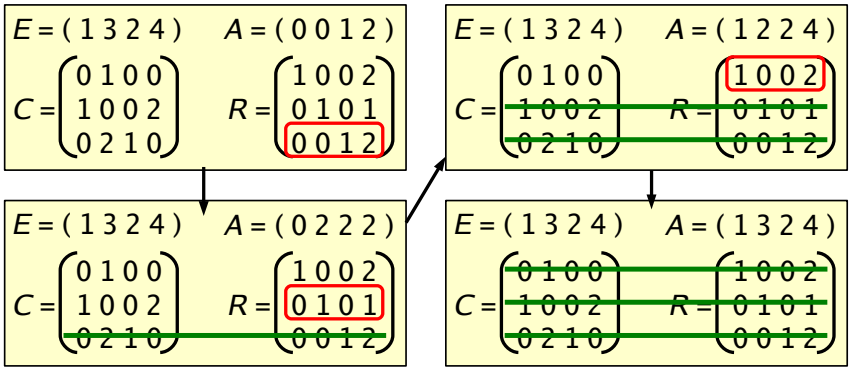
Algorithmus

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:

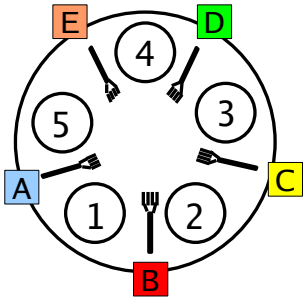
   $A := A + C_i$ (i-te Zeile von C)

   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



Beispiel (5 Philosophen)



A B C D E A B C D E

$E = (1\ 1\ 1\ 1\ 1)$ $A = (0\ 0\ 0\ 0\ 0)$

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

- 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 Ressourcen-forderungen 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 Auszah-lungs-/Rückzahlungs-reihenfolge:

		(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 Auszahlungsreihen-folge 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 ... P_n, *m* Ressourcentypen R_1 ... R_m
    mit je E_i Ressourcen-Instanzen (i=1,...,m)
    → **Ressourcenvektor *E*** = (E_1 E_2 ... 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 E-29)

Banker-Algorithmus (6) – Beispiel

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

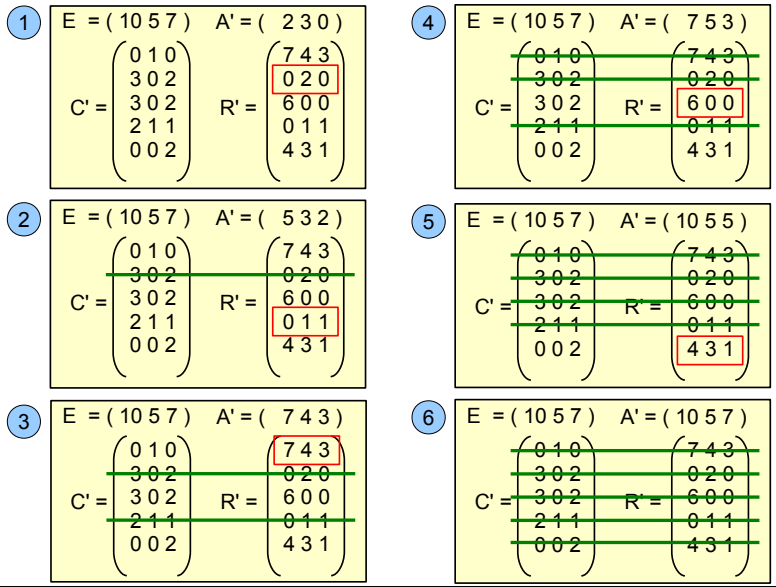
Anforderung (1 0 2) durch Prozess P2 – ok?

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

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

Jetzt Deadlock-Erkennung durchführen

Deadlock-Vermeidung (avoidance) (9)



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

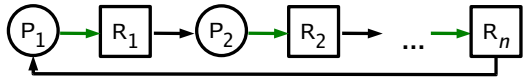
- Ressourcen entziehen?
- siehe Deadlock-Behebung (Abbruch / Rücksetzen)

4. Zyklisches Warten (1)

- Ressourcen durchnumerieren
  - *ord*: **R** = $\{R_1, ..., R_n\} \rightarrow \mathbb{N}$, *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 Zykels 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)