

Systemprogrammierung

Betriebsmittelverwaltung

Wolfgang Schröder-Preikschat

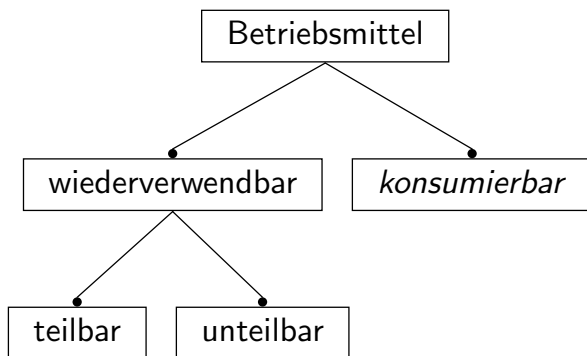
Lehrstuhl Informatik 4

4. Juni 2012

Gliederung

- 1 Betriebsmittel
 - Klassifikation
 - Verwaltung
- 2 Verklemmungen
 - Grundlagen
 - Beispiel
 - Gegenmaßnahmen
 - Vorbeugung
 - Vermeidung
 - Erkennung und Erholung
- 3 Zusammenfassung

Wiederholung: Betriebsmittel und Betriebsmittelarten



Hardware

- CPU, Speicher
- Geräte (Peripherie)
- *Signale*

Software

- Dateien, E/A-Puffer
- Seitenrahmen
- Deskriptoren, ...
- *Signale, Nachrichten*

Wettbewerb um Betriebsmittel (engl. *resource contention*)

konsumierbare Betriebsmittel

- **unbegrenzte Anzahl**
- einseitige Synchronisation

wiederverwendbare Betriebsmittel

- **begrenzte Anzahl**
- mehrseitige Synchronisation

Wiederholung: Konfliktfall bei der Betriebsmittelzuteilung

Prozesse befinden sich untereinander im **Konflikt**, wenn:

- 1 eine **begrenzte Anzahl gemeinsamer Betriebsmittel** vorrätig ist
- 2 diese Betriebsmittel **unteilbar** und von derselben Art sind
- 3 ein Zugriff darauf gleichzeitig geschieht: **gleichzeitige Prozesse** [3]

Prozesse sind im **Streit** (engl. *contention*) um ein Betriebsmittel, wenn einer das Betriebsmittel anfordert, das ein anderer bereits besitzt

- der anfordernde Prozess blockiert und wartet auf die Freigabe des Betriebsmittels durch den Prozess, der das Betriebsmittel belegt
- der das Betriebsmittel belegende Prozess löst den auf die Freigabe des Betriebsmittels wartenden Prozess aus, deblockiert ihn wieder

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 Verhungering/Verklemmung

Allgemein

- Durchsetzung der vorgegebenen Betriebsstrategie
- eine optimale Realisierung in Bezug auf relevante Kriterien

Aufgaben

- **Buchführung** über die im Rechensystem 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

Betriebsmittelentzug

- Zurücknahme (engl. *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

Verfahrensweisen

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

Gliederung

1 Betriebsmittel

- Klassifikation
- Verwaltung

2 Verklemmungen

- Grundlagen
- Beispiel
- Gegenmaßnahmen
 - Vorbeugung
 - Vermeidung
 - Erkennung und Erholung

3 Zusammenfassung

Parallele und Funktionale Programmierung, 2. Semester

Ergänzung, Verfeinerung bzw. Vertiefung von PFP



- Teil I, 5. **Lebendigkeitsprobleme** [6], speziell...
 - ✓ Verklemmung
 - ✓ Bedingungen
 - ✓ Gegenmaßnahmen

... bei Verwendung blockierender Synchronisation, genauer:

- in Semaphore verborgene „Untiefen“ in Maschinenprogrammen
- zur sequentiellen Ausführung kritischer Abschnitte auf Ebene₃
 - verdeutlicht durch Programme der Ebene₅ (C)

Stillstand von Prozessen bei passivem Warten

dead·lock [5]

- ① *a standstill resulting from the action of equal and opposed forces; stalemate*
- ② *a tie between opponents in the course of a contest*
- ③ DEADBOLT — *to bring or come to a deadlock*

Der Begriff bezeichnet (in der Informatik)

[...] 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. [4]

- das „geringere Übel“ (im Vergleich zum *livelock*), da dieser Zustand eindeutig erkennbar ist und so die Basis zur „Erholung“ gegeben ist
 - die verklemmten Prozesse sind im **Einplanungszustand** „**blockiert**“

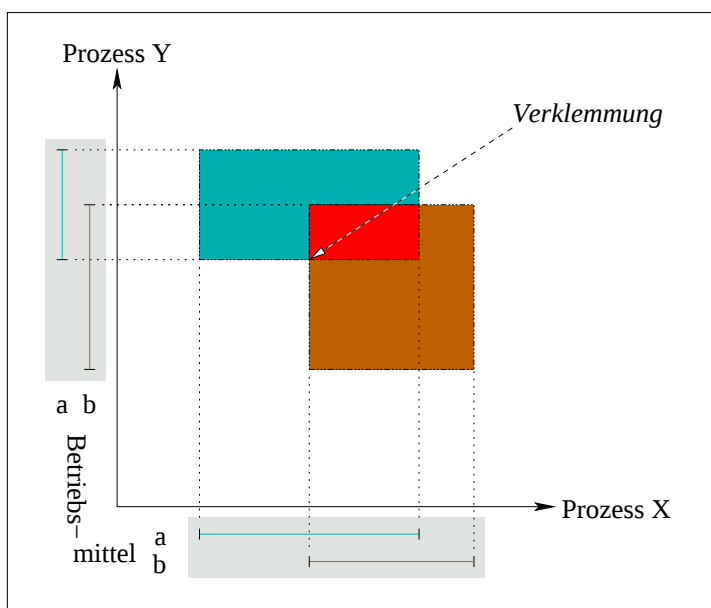
Stillstand von Prozessen bei aktivem Warten

live-lock ist ...

- ein *deadlock*-ähnlicher Zustand, in dem die involvierten Prozesse zwar nicht blockieren, sie aber auch keine wirklichen Fortschritte in der weiteren Programmausführung erreichen
- wenn die an der Verklemmung beteiligten Prozesse **wechselseitig aktiv** auf die Bereitstellung von Betriebsmitteln **warten**:
 - ohne Prozessorabgabe $\mapsto$ *busy waiting*
 - mit Prozessorabgabe, in Laufbereitschaft bleibend $\mapsto$ *lazy waiting*
- das „größere Übel“, da dieser Zustand nicht eindeutig erkennbar ist und damit die Basis zur „Erholung“ fehlt
 - die verklemmten Prozesse haben die **Einplanungszustände** „*laufend*“ oder „*bereit*“ (d.h., jeden anderen außer „blockiert“)
 - die Unterscheidung von unverklemmten Prozessen ist kaum möglich

Entstehung von Verklemmungen

Überlappender Zugriff auf gemeinsame unteilbare Betriebsmittel



Alles hängt davon ab,

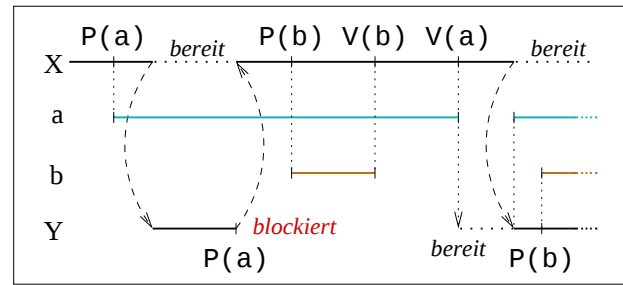
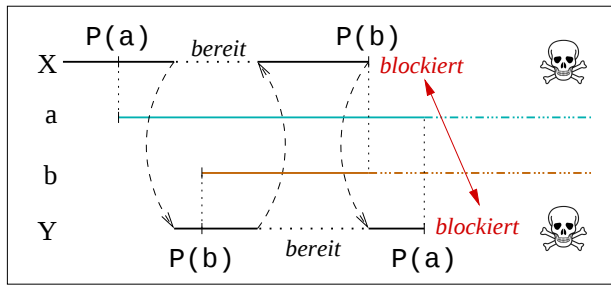
- 1 ob sich die Prozesse einander überlappen und
- 2 welche Auswirkung die Überlappung auf den Zugriff auf gemeinsame Betriebsmittel hat.

Keine Verklemmung, falls ...

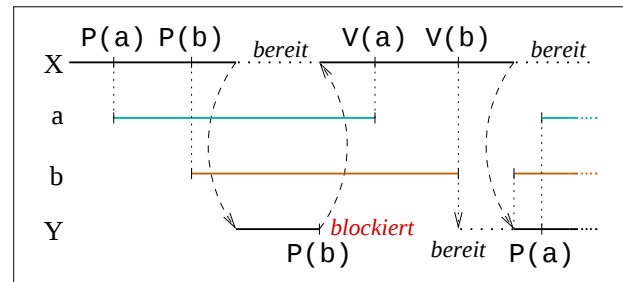
P_X B_a erst nach P_Y oder

P_Y B_b erst nach P_X belegt.

Gleichzeitige Prozesse und Betriebsmittelanforderungen



Verklemmungen sind durch geschickte Prozesseinplanung verhinderbar — vorausgesetzt, die Prozesse wie auch ihre Betriebsmittelanforderungen sind alle bekannt.



- **kooperative Ausführung** von P_X und $P_Y \leadsto$ Verklemmungsfreiheit

Voraussetzungen für Verklemmungen

Notwendige und hinreichende Bedingungen

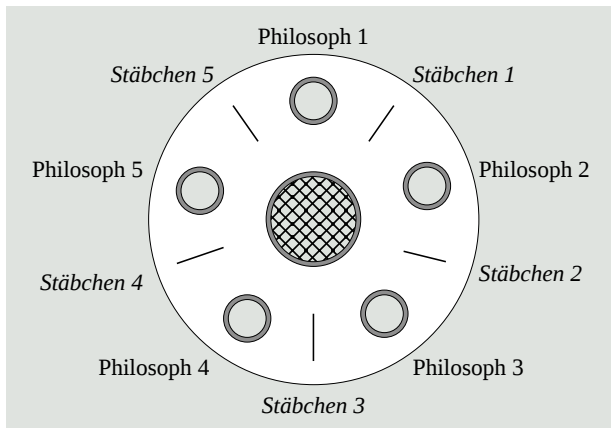
notwendige Bedingungen (müssen erfüllt sein, damit die Aussage zutreffen kann)

1. **exklusive Belegung von Betriebsmitteln („mutual exclusion“)**
 - die umstrittenen Betriebsmittel sind nur unteilbar nutzbar
2. **Nachforderung von Betriebsmitteln („hold and wait“)**
 - die umstrittenen Betriebsmittel sind nur schrittweise belegbar
3. **kein Entzug von Betriebsmitteln („no preemption“)**
 - die umstrittenen Betriebsmittel sind nicht rückforderbar

hinreichende Bedingung (muss erfüllt sein, damit die Aussage zutrifft bzw. „bewiesen“ ist)

4. **zirkulares Warten (engl. circular wait)**
 - Existenz einer geschlossenen Kette wechselseitig wartender Prozesse

Speisende Philosophen: Szenario



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.

Prozess $\mapsto$ Philosoph

Betriebsmittel $\mapsto$ Stäbchen

- unteilbar

Verklemmungsfall...

Die Philosophen nehmen zugleich das eine Stäbchen auf und greifen anschließend auf das andere zu.

Speisende Philosophen: Umsetzung — mit Problemen

```
void phil(int who) {
    for (;;) {
        think();
        grab(who);
        munch();
        drop(who);
    }
}
```

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

```
semaphore_t rod[5] = {
    {1, 0}, {1, 0}, {1, 0}, {1, 0}, {1, 0}
};

void grab(int who) {
    P(&rod[who]);
    P(&rod[(who + 1) % NPHIL]);
}

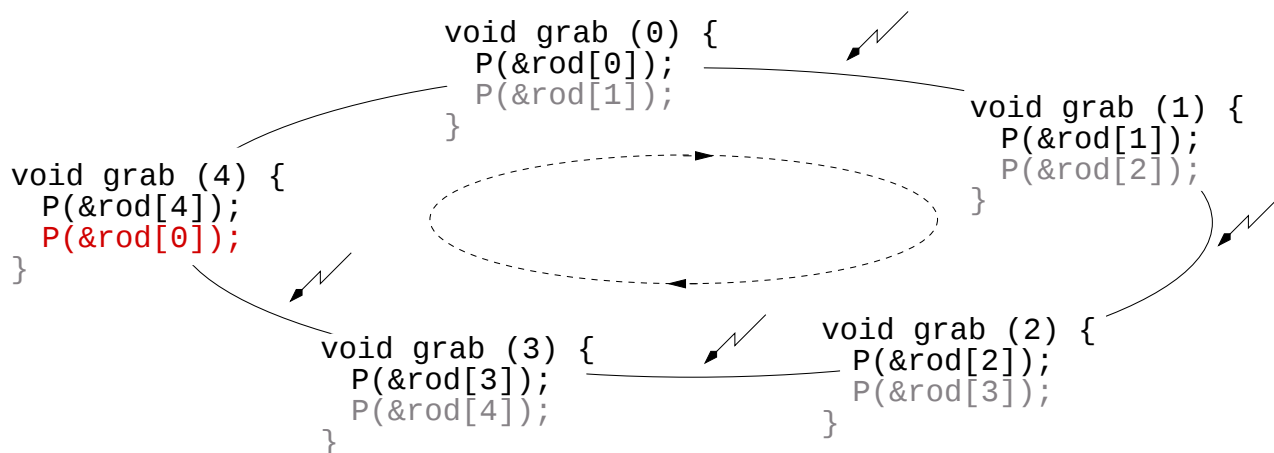
void drop(int who) {
    V(&rod[who]);
    V(&rod[(who + 1) % NPHIL]);
}
```

$P()$ fordert zu einem Zeitpunkt nur ein Stäbchen (engl. *rod*) an

$V()$ gibt ein Stäbchen frei

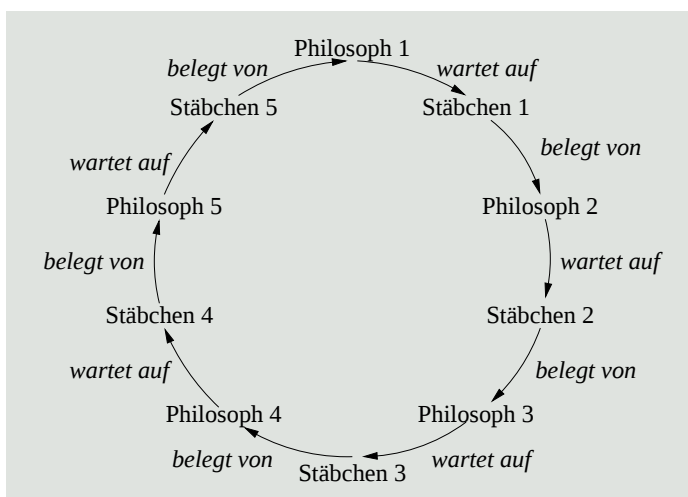
Speisende Philosophen: Verklemmung

„Ende einer Dienstfahrt“: $\text{grab}(i-1) \models \text{Philosoph}_i, \text{rod}[i-1] \models \text{Stäbchen}_i$



- 1 Philosoph₁ nimmt Stäbchen₁ auf
- 2 Philosoph₂ überlappt Philosoph₁, nimmt Stäbchen₂ auf
- 3 Philosoph₃ überlappt Philosoph₂, nimmt Stäbchen₃ auf
- 4 Philosoph₄ überlappt Philosoph₃, nimmt Stäbchen₄ auf
- 5 Philosoph₅ überlappt Philosoph₄, nimmt Stäbchen₅ auf, **fordert Stäbchen₁ an**

Speisende Philosophen: Zirkulares Warten



Betriebsmittelgraph zeigt für jedes Betriebsmittel, welcher Prozess es belegt

Wartegraph verbucht für jeden Prozess, auf welches Betriebsmittel er wartet

- ein geschlossener Kreis (im Wartegraphen) erfasst all die 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

Speisende Philosophen: Kritischer Abschnitt

```
semaphore_t lock = {1, 0};

void grab(int who) {
    P(&lock);
    P(&rod[who]);
    P(&rod[(who + 1) % NPHIL]);
    V(&lock);
}
```

Philosoph_{who} fordert die benötigten Stäbchen „atomar“ (unteilbar) an

- ein **binärer Semaphor** (lock) zum wechselseitigen Ausschluss
- „*hold and wait*“ vorgebeugt

Problemfall: Verdrängung in `munch()`, Überlappung mit `grab(int)`

- Philosoph_{who+1} muss auf Stäbchen_{who+1} (rechte Hand) warten
 - blockiert im kritischen Abschnitt, ohne diesen freizugeben
- Philosoph_{who+2} muss auf Freigabe des kritischen Abschnitts warten
 - ebenso ergeht es den beiden anderen Philosophen
- schlimmstenfalls kann immer nur ein Philosoph essen

Speisende Philosophen: Synchronisationsaspekte [2]

mehrseitige Synchronisation

- **wechselseitiger Ausschluss** beim Gebrauch wiederverwendbarer, unteilbarer (nicht entziehbarer) Betriebsmittel
- keine zwei benachbarten Philosophen können gleichzeitig dasselbe Stäbchen gemeinsam benutzen

einseitige Synchronisation

- ein Philosoph muss warten, bis seine beiden Nachbarn ihm ein Stäbchen zur Verfügung gestellt haben

Randbedingungen

- jeder Philosoph fordert die Stäbchen **nacheinander** an
 - kein Philosoph legt ein Stäbchen zurück, wenn er feststellt, dass das andere bereits vom Nachbarn aufgenommen worden ist
- ein Philosoph kann seinem Nachbarn ein bereits aufgenommenes Stäbchen **nicht entziehen**

Speisende Philosophen: Praxisrelevanz

⋮

- auf mehreren Magnetbändern vorliegende Daten sortieren
 - einen kontinuierlichen Strom kodierter Informationen umkodieren
 - Nachrichten von einem Eingangsport auf einen Ausgangsport leiten
 - Pakete auf einem Ringnetz zur übernächsten Station durchschleusen
 - Daten von dem einen *Backup Medium* auf ein anderes transferieren
-
- überall dort, wo eine von mehreren Prozessen benutzte Routine (mindestens) zwei wiederverwendbare Betriebsmittel zugleich benötigt, diese aber nur nacheinander angefordert werden können

Verklemmungsvorbeugung (engl. *deadlock prevention*)

indirekte Methoden entkräften eine der Bedingungen 1–3

- 1 nicht-blockierende Verfahren verwenden
- 2 Betriebsmittelanforderungen unteilbar (atomar) auslegen
- 3 Betriebsmittelentzug durch **Virtualisierung** ermöglichen
 - virtueller Speicher, virtuelle Geräte, virtuelle Prozessoren

direkte Methoden entkräften Bedingung 4

- 4 lineare/totale Ordnung von Betriebsmittelklassen einführen:
 - Betriebsmittel B_i ist nur dann erfolgreich vor B_j belegbar, wenn i linear vor j angeordnet ist (d.h. $i < j$).

- Regeln, die das Eintreten von Verklemmungen verhindern
- Methoden, die zur Entwurfs- bzw. Implementierungszeit greifen

Verklemmungsvermeidung (engl. *deadlock avoidance*)

Verhinderung von Wartezyklen durch **strategische Maßnahmen**:

- keine der drei notwendigen Bedingungen wird entkräftet
- fortlaufende **Bedarfsanalyse** schließt zirkulares Warten aus

Prozesse und ihre Betriebsmittelanforderungen sind zu steuern:

- das System wird (laufend) auf „**unsichere Zustände**“ hin überprüft
- Zuteilungsablehnung im Falle ungedeckten Betriebsmittelbedarfs
- anfordernde Prozesse nicht bedienen bzw. frühzeitig suspendieren
- Betriebsmittelnutzung einschränken $\leadsto$ „**sichere Zustände**“

- *à priori* Wissen erforderlich: maximaler Betriebsmittelbedarf

Sicherer/Unsicherer Zustand: Speisende Philosophen

Ausgangspunkt fünf Stäbchen sind insgesamt vorhanden

- jeder der fünf Philosophen braucht zwei Stäbchen zum Essen

Situation P_1 , P_2 und P_3 haben je ein Stäbchen; zwei Stäbchen sind frei

- P_4 fordert ein Stäbchen an $\rightarrow$ ein Stäbchen wäre dann noch frei
 - **sicherer Zustand**: einer von dann 4 Philosophen könnte essen
 - die Anforderung von P_4 wird akzeptiert
- P_5 fordert ein Stäbchen an $\rightarrow$ kein Stäbchen wäre dann mehr frei
 - **unsicherer Zustand**: keiner der Philosophen könnte essen
 - die Anforderung von P_5 wird abgelehnt, P_5 muss warten
- haben vier Philosophen je ein Stäbchen, wird der fünfte gestoppt

Sicherer/Unsicherer Zustand: Leistungsvermittlung

Ausgangspunkt ein Vermittlungsrechner mit 12 Kommunikationskanälen

- Prozess P_1 benötigt max. 10 Kanäle, P_2 vier und P_3 neun

Situation: P_1 belegt fünf Kanäle, P_2 und P_3 je zwei; drei Kanäle sind frei

- P_3 fordert einen Kanal an, zwei blieben frei → **unsicherer Zustand**
 - P_3 könnte noch sechs Kanäle anfordern: $6 > 2$
 - die Anforderung von P_3 wird abgelehnt, P_3 muss warten
- P_1 fordert zwei Kanäle an, einer bliebe frei → **unsicherer Zustand**
 - P_1 könnte noch drei Kanäle anfordern: $3 > 1$
 - die Anforderung von P_1 wird abgelehnt, P_1 muss warten
- **sichere Prozessfolge:** $P_2 \rightarrow P_1 \rightarrow P_3$

Verklemmungsfreiheit

Verhinderung unsicherer Zustände

sicherer Zustand ist, wenn eine Folge der Verarbeitung vorhandener

Prozesse existiert, in der alle Betriebsmittelanforderungen erfüllbar sind

unsicherer Zustand ist, wenn eine solche Folge nicht existiert; Erkennung dieses Zustands z.B. durch:

- **Betriebsmittelbelegungsgraph** (engl. *resource allocation graph*)
 - damit Vorhersage über das Eintreten von Zyklen treffen $\leadsto O(n^2)$
 - bei jeder Betriebsmittelanforderung den Graphen überprüfen
- **Bankiersalgorithmus** (engl. *banker's algorithm* [1])
 - 1 Prozesse beenden ihre Operationen in endlicher Zeit
 - 2 Betriebsmittelbedarf aller Prozesse übersteigt Gesamtvorrat nicht
 - 3 Prozesse definieren einen verbindlichen **Kreditrahmen**
 - 4 Betriebsmittelzuteilung erfolgt variabel innerhalb dieses Rahmens
- die Verfahrensweisen führen Prozesse dem *long-term scheduling* zu

Verklemmungserkennung (engl. *deadlock detection*)

Verklemmungen werden (stillschweigend) in Kauf genommen. . .

- nichts im System verhindert das Auftreten von Wartezyklen
- keine der vier Bedingungen wird entkräftet

Ansatz: Wartegraph erstellen und auf Zyklen hin untersuchen $\leadsto O(n^2)$

- zu häufige Überprüfung verschwendet Betriebsmittel/Rechenleistung
- zu seltene Überprüfung lässt Betriebsmittel brach liegen

Zyklensuche geschieht zumeist in großen Zeitabständen, wenn. . .

- Betriebsmittelanforderungen zu lange andauern
- die Auslastung der CPU trotz Prozesszunahme sinkt
- die CPU bereits über einen sehr langen Zeitraum untätig ist

Verklemmungsauflösung (engl. *deadlock resolution*)

Erholungsphase nach der Erkennungsphase

Prozesse abbrechen und dadurch Betriebsmittel frei bekommen

- verklemmte Prozesse schrittweise abbrechen (gr. Aufwand)
 - mit dem „effektivsten Opfer“ (?) beginnen
- alle verklemmten Prozesse terminieren (gr. Schaden)

Betriebsmittel entziehen und mit dem „effektivsten Opfer“ (?) beginnen

- der betreffende Prozess ist zurückzufahren/wieder aufzusetzen
 - Transaktionen, *checkpointing/recovery* (gr. Aufwand)
- ein Aushungern der zurückgefahrenen Prozesse ist zu vermeiden

Gratwanderung zwischen Schaden und Aufwand

- Schäden sind unvermeidbar und die Frage ist, wie sie sich auswirken

Gliederung

- 1 Betriebsmittel
 - Klassifikation
 - Verwaltung
- 2 Verklemmungen
 - Grundlagen
 - Beispiel
 - Gegenmaßnahmen
 - Vorbeugung
 - Vermeidung
 - Erkennung und Erholung
- 3 Zusammenfassung

Nachlese ...

Verfahren zum **Vermeiden/Erkennen** sind eher praxisirrelevant

- sie sind kaum umzusetzen, zu aufwändig und damit nicht einsetzbar
- zudem macht die — nach wie vor stark ausgeprägte — Vorherrschaft sequentieller Programmierung diese Verfahren wenig notwendig

Vorbeugung ist besser als heilen — notwendige Bedingungen entkräften:

- 1 durch **nicht-blockierende Synchronisation** kritischer Abschnitte
 - keine exklusive Belegung von kritischen Abschnitten durchführen
- 2 durch **Virtualisierung**, wenn 1. nicht möglich/unpraktisch ist
 - Prozesse beanspruchen/belegen nur **virtuelle Betriebsmittel**
 - der Trick besteht darin, in kritischen Momenten den Prozessen (ohne ihr Wissen) **physische Betriebsmittel** entziehen zu können
 - dadurch wird die Bedingung der Nichtentziehbarkeit entkräftet

Resümee

- **Betriebsmittel** zeigen sich als Entitäten von Hardware und Software
 - wiederverwendbar
 - konsumierbar
 - begrenzt verfügbar: teilbar, unteilbar
 - unbegrenzt verfügbar
- Ziele, Aufgaben und Verfahrensweise der **Betriebsmittelverwaltung**
 - Betriebsmittelanforderung frei von Verhungering/Verklemmung
 - Buchführung der Betriebsmittel, Steuerung der Anforderungen
 - statische/dynamische Zuteilung von Betriebsmitteln
- für eine Verklemmung müssen **vier Bedingungen** gleichzeitig 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

Literaturverzeichnis

- [1] 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)
- [2] DIJKSTRA, E. W.:
Hierarchical Ordering of Sequential Processes.
In: *Acta Informatica* 1 (1971), Jun., Nr. 2, S. 115–138
- [3] HANSEN, P. B.:
Operating System Principles.
Prentice Hall International, 1973
- [4] NEHMER, J. ; STURM, P. :
Systemsoftware: Grundlagen moderner Betriebssysteme.
dpunkt.Verlag GmbH, 2001. –
ISBN 3-898-64115-5
- [5] NEUFELD, V. E. (Hrsg.):
Webster's New World Dictionary.
Third College.
Simon & Schuster, Inc., 1988. –
ISBN 0-13-947169-3
- [6] PHILIPPSEN, M. :
Parallele und Funktionale Programmierung.
<http://www2.cs.fau.de/Lehre/SS20??/PFP/material/>, jährlich. –
Vorlesungsfolien