

Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

Teil C – X.1 Prozesssynchronisation: Nichtsequentialität

Wolfgang Schröder-Preikschat

9. November 2021



Agenda

- Einführung
- Kausalitätsprinzip
 - Parallelisierbarkeit
 - Kausalordnung
 - Aktionsfolgen
- Sequentialisierung
 - Koordinierung
 - Konkurrenz
- Verfahrensweisen
 - Einordnung
 - Fallstudie
 - Lebendigkeit
- Zusammenfassung



Gliederung

Einführung

Kausalitätsprinzip

- Parallelisierbarkeit
- Kausalordnung
- Aktionsfolgen

Sequentialisierung

- Koordinierung
- Konkurrenz

Verfahrensweisen

- Einordnung
- Fallstudie
- Lebendigkeit

Zusammenfassung



Lehrstoff

- **Nebenläufigkeit** von Prozessen als Eigenschaft begreifen, die ein Betriebssystem fördern und schon gar nicht behindern sollte
 - um das Leistungspotential mehr- oder vielkerniger Prozessoren zu nutzen
 - **Parallelrechner** sind gang und gäbe, brauchen aber parallele Abläufe
- erkennen, dass Nebenläufigkeit jedoch nur für **kausal unabhängige Prozesse** gilt, die nicht durchgängig gegeben sind
 - problembedingte Rollenspiele von Prozessen (Konsument vs. Produzent)
 - Konkurrenzsituationen bei Zugriffen auf gemeinsame Betriebsmittel
- Prinzipien kennenlernen/vertiefen, um **kausal zusammenhängende Aktionen** nacheinander stattfinden zu lassen
 - **Sequentialisierung** von gleichzeitigen (gekoppelten) Prozessen erzwingen
 - Konkurrenz dieser Prozesse durch wechselseitigen Ausschluss koordinieren
 - verstehen, dass Aktionen auf vertikaler Ebene nicht unteilbar sein müssen
 - **Unteilbarkeit** in Bezug auf Betriebsmittel und Aktionen kennenlernen
- Verfahrensweisen zur Synchronisation erklären, mit einer **Fallstudie** Probleme und deren Lösungen aufzeigen
 - ein- und mehrseitige Synchronisation am Beispiel „*bounded buffer*“



Gliederung

Einführung

Kausalitätsprinzip

Parallelisierbarkeit

Kausalordnung

Aktionsfolgen

Sequentialisierung

Koordinierung

Konkurrenz

Verfahrensweisen

Einordnung

Fallstudie

Lebendigkeit

Zusammenfassung



Nebenläufige Aktionen

Sequentielles \mapsto Nichtsequentielles Programm

- **Nebenläufigkeit** (*concurrency*) bezeichnet das Verhältnis von nicht kausal abhängigen Ereignissen, die sich also nicht beeinflussen

```
1   foo = 4711;
2   bar = 42;
3   foobar = foo + bar;
4   barfoo = bar + foo;
5   hal = foobar + barfoo;
```

- Aktion „=" in Zeile 1 ist nebenläufig zu der in Zeile 2
- die Aktionen „=" und „+“ in Zeile 3 sind nebenläufig zu denen in Zeile 4

- in logischer Hinsicht sind Aktionen potentiell nebenläufig, wenn keine das Resultat der anderen benötigt
- in physischer (d.h., körperlicher) Hinsicht ist für jede dieser Aktionen ein Aktivitätsträger erforderlich, der autonom agieren kann

- **Kausalität** (lat. *causa*: Ursache) ist die Beziehung zwischen **Ursache** und **Wirkung**, d.h., die ursächliche Verbindung zweier Ereignisse

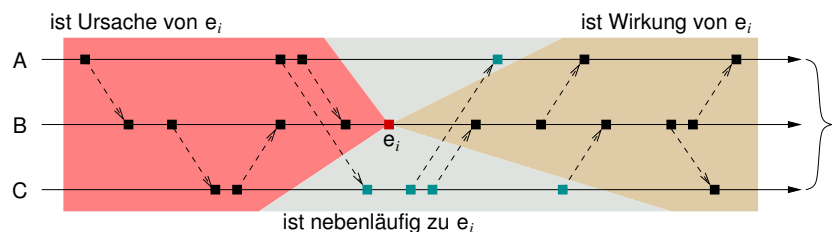
- Ereignisse sind nebenläufig, wenn keines Ursache des anderen ist

¹Aktion: Anweisungsausführung einer (virtuellen/realen) Maschine. [8, S. 12]



Ursache und Wirkung

Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit:



- ein Ereignis **ist nebenläufig zu** einem anderen (e_i), wenn es im **Anderswo** des anderen Ereignisses (e_i) liegt
 - d.h., weder in der Zukunft noch in der Vergangenheit des anderen
- das Ereignis ist nicht Ursache/Wirkung des anderen Ereignisses (e_i)
 - ggf. aber Ursache/Wirkung anderer (von e_i verschiedener) Ereignisse



Daten- und Zeit(un)abhängigkeit

- ein „im Anderswo anderer Ereignisse liegendes“ Ereignis steht für eine **nebenläufige Aktion**, sofern eben:

allgemein ■ keine das Resultat der anderen benötigt (S. 6)

- **Datenabhängigkeiten** gleichzeitiger Prozesse beachten
- speziell** ■ keine die **Zeitbedingungen** der anderen verletzt
 - zusätzliches, zwingendes Merkmal nur für Echtzeitbetrieb
 - Zeitpunkte dürfen nicht/nur selten verpasst werden
 - Zeitintervalle dürfen nicht/nur begrenzt gedehnt werden

- je nach Art der Beziehung zwischen den Ereignissen bzw. Aktionen, ist die **Konsequenz für gleichzeitige Prozesse** verschieden

„ist Ursache von“ } \leadsto **Koordinierung** (vor/zur Laufzeit)
„ist Wirkung von“ }
„ist nebenläufig zu“ \leadsto **Parallelität** (implizit)

- Koordinierung durch **Sequentialisierung**: Schaffen einer Ordnung für eine Menge von Aktionen entlang der Kausalordnung



Definition (*concurrent/simultaneous processes*)

Mehrere (ggf. **nichtsequentielle**) **Prozesse**, durch die sich mehr als eine Aktionsfolge in Raum und Zeit überlappen.

- **notwendige Bedingung** dazu ist die Fähigkeit des Betriebssystems zur **Simultanverarbeitung** (*multiprocessing*) von Programmen
 - **vertikal** ausgelegt, durch Multiplexen ein und desselben Prozessors
 - Mehrbenutzer-, Teilnehmer- oder Zeitmultiplexbetrieb: *time sharing* [1]
 - pseudo Parallelität durch asynchrone Programmunterbrechungen (*interrupts*)
 - **horizontal** ausgelegt, durch Vervielfachung des Prozessors
 - symmetrischer oder asymmetrischer Multiprozessorbetrieb: *multiprocessing*
 - echte Parallelität durch mehrere physische Ausführungseinheiten
- **hinreichende Bedingung** ist die Verfügbarkeit von Programmen, durch die zugleich mehrere Ausführungsstränge möglich werden
 - ein nichtsequentielles Programm oder mehrere sequentielle Programme
 - eine beliebige Kombination derartiger Programme



Definition (*interacting processes*)

Gleichzeitige Prozesse, die durch direkte oder indirekte Nutzung einer oder mehrerer gemeinsamer Variablen bzw. Ressourcen interagieren.

- dabei interagieren die Prozesse schon im Moment des Zugriffs, da sie dadurch **Interferenz**² in zeitlicher Hinsicht erzeugen
 - durch logisch gleichzeitige Zugriffe auf höherer Ebene, wenn diese jedoch auf tieferer Ebene nur sequentiell durchgeführt werden können/dürfen
 - z.B. Sequentialisierung durch den Bus oder einen kritischen Abschnitt
- entscheidend ist jedoch die **logische Bedeutung** der Variablen bzw. Ressource für die beteiligten gleichzeitigen Prozesse
 - Medium zur Kommunikation mit dem jeweils anderen internen Prozess
 - Instrument zur Interaktion mit einem externen Prozess (Peripherie)
- diese Bedeutung schließt **Datenabhängigkeiten** ein und bezieht sich gerade auch auf das **Rollenspiel** der Prozesse
 - Produzent/Konsument (Datum), Sender/Empfänger (Signal, Nachricht)

²Abgeleitet von (altfrz.) *s'entrefeir* „sich gegenseitig schlagen“.



Gliederung

Einführung

Kausalitätsprinzip

Parallelisierbarkeit

Kausalordnung

Aktionsfolgen

Sequentialisierung

Koordinierung

Konkurrenz

Verfahrensweisen

Einordnung

Fallstudie

Lebendigkeit

Zusammenfassung



Koordination von Konkurrenz

- **gleichzeitige Aktionen** überlappen einander in Raum und Zeit
 - i der **Moment** ihres Zusammentreffens ist i. A. nicht vorherbestimmt
 - ii Aktionen können komplex sein (d.h., **mehrere Einzelschritte** umfassen)
 - iii ihre besondere Eigenschaft ist die **Teilbarkeit in zeitlicher Hinsicht**
- kausal zusammenhängende Aktionen müssen nacheinander stattfinden
 - off-line* ■ statische Einplanung, Daten- und Kontrollflussabhängigkeiten
 - der Ablaufplan sorgt für die **implizite Synchronisation**
 - **analytischer Ansatz**, der Vorabwissen erfordert (s. aber i, oben)
 - on-line* ■ dynamische Einplanung, ausgelöst durch externe Ereignisse
 - **explizite Synchronisation** durch Programmanweisungen
 - **konstruktiver Ansatz**, der ohne Vorabwissen auskommen muss
- explizite Prozesssynchronisation kann **Wettstreit** hervorbringen
 - bei Mitbenutzung (*sharing*) desselben wiederverwendbaren Betriebsmittels
 - bei Übergabe (*handover*) eines konsumierbaren Betriebsmittels

Hinweis

Die gewählte Methode sollte *minimal invasiv* auf die Prozesse wirken, bei expliziter Synchronisation ist **Interferenz** unvermeidbar. . .



Atomare Aktionen

Definition (atomare Aktion)

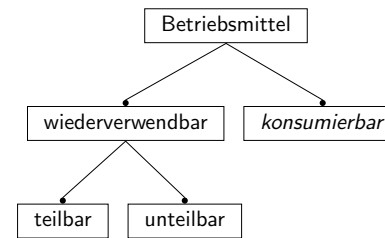
Eine Aktion, **deren Einzelschritte** nach außen sichtbar im Verbund **scheinbar gleichzeitig stattfinden**.

- dabei wird das Herstellen von Gleichzeitigkeit (Simultanität) durch **Synchronisation**³ der gekoppelten Aktionen/Prozesse erreicht
 - **Koordination** der Kooperation und Konkurrenz zwischen Prozessen [6]
 - Sequentialisierung von Ereignissen entlang einer Kausalordnung
 - Aktionen gleichzeitig/in einer bestimmten Reihenfolge stattfinden lassen
- zentrales Konzept, um **gleichzeitige Aktionen** zu **koordinieren**, ist der **wechselseitige Ausschluss** (*mutual exclusion*)
 - i ein **kritischer Abschnitt** [2, S. 11] der Maschinenprogrammebene
 - ii eine **Elementaroperation** (*read-modify-write*) der Befehlssatzebene
- dabei ist die Auswirkung auf die beteiligten Prozesse je nach Ebene der Abstraktion bzw. Paradigma sehr unterschiedlich
 - d.h., die Synchronisation wirkt blockierend (i) oder nichtblockierend (ii)

³(gr). *syn*: zusammen, *chrónos*: Zeit

Betriebsmittel und Aktionen

- je nach **Betriebsmittelart** (vgl. [8, S. 9–10]) ist die Nutzung durch gleichzeitige Prozesse eingeschränkt:



- Hardware**
 - CPU, Speicher
 - Geräte (Peripherie)
 - *Signale*
- Software**
 - Dateien, E/A-Puffer
 - Seitenrahmen
 - Deskriptoren, ...
 - *Signale, Nachrichten*

- bereits Aktionen zum **Zugriff** auf ein unteilbares wiederverwendbares Betriebsmittel unterliegen dem wechselseitigen Ausschluss
 - **mehrseitige/multilaterale Synchronisation** gekoppelter Prozesse
- wohingegen die Aktion der **Entgegennahme** eines konsumierbaren Betriebsmittels nur auf einen Prozess verzögernd wirkt
 - **einseitige/unilaterale Synchronisation** gekoppelter Prozesse

Unteilbarkeit

Definition (in Anlehnung an den Duden)

(Betriebssystem) Umstand, der die Verteilung der Betriebsmittel auf mehrere Prozessoren *oder* Prozesse verhindert.

- unteilbar ist ein Betriebsmittel, wenn es zu einem Zeitpunkt von nur genau einem Prozessor/Prozess genutzt werden darf
 - Zugriffsoperationen darauf können/dürfen **nicht zeitlich zerteilt** werden
 - sie müssen **atomar**, d.h., als **Elementaroperation** ausgeführt werden
 - ↔ Aktion/Aktionsfolge mehrerer kausal abhängender Einzelschritte
- teilbar ist ein Betriebsmittel, wenn mehrere Prozessoren/Prozesse es gleichzeitig benutzen dürfen
 - es dem einem entzogen und einem anderen gegeben werden darf
 - Zugriffe auf das Betriebsmittel können/dürfen **zeitlich zerteilt** werden
 - ↔ Aktion/Aktionsfolge mehrerer kausal unabhängiger Einzelschritte
- **beachte**: ein Betriebsmittel besonderer Art ist der Prozessor im Falle eines kritischen Abschnitts in einem nichtsequentiellen Programm
 - das **Unteilbarsein** auf Maschinenprogramm- *oder* Befehlssatzebene (S. 13)

Wettstreit

Definition (Duden)

Bemühen, einander in etwas zu übertreffen, einander den Vorrang streitig zu machen.

- ein unter gleichzeitigen Prozessen auftretender **Konflikt**, der diese implizit koppelt und damit zur **Interaktion** zwingt, wenn:
 1. Zugriffe auf wenigstens ein **gemeinsames Betriebsmittel** erfolgen,
 2. nur eine **begrenzte Anzahl** dieses Betriebsmittels vorrätig ist und
 3. die betreffenden Betriebsmittel **unteilbar** und von derselben Art sind
- es entsteht eine **Konkurrenzsituation** (*contention*), wenn einer dieser Prozesse ein 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

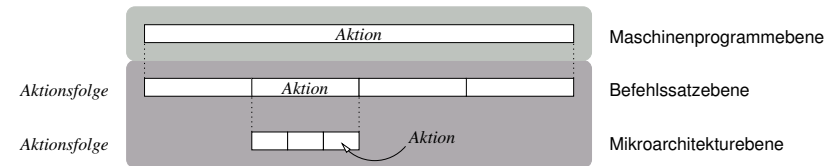
Wechselseitiger Ausschluss

Synchronisation

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederverwendbares/unteilbares Betriebsmittel:
 - Vergabe** → vor der Aktion das Betriebsmittel sperren
 - im Moment der Anforderung eines gesperrten Betriebsmittels wird die betreffende Aktion blockiert
 - die blockierte Aktion erwartet (mit/ohne Prozessorabgabe) das Ereignis zur Freigabe des gesperrten Betriebsmittels
 - Freigabe** → nach der Aktion das Betriebsmittel entsperren
 - sollten Aktionen die Freigabe dieses Betriebsmittels erwarten, wird es zur **Wiedervergabe** bereitgestellt; das bedeutet:
 - alle Aktionen deblockieren, erneut das Vergabeprotokoll durchlaufen oder
 - eine Aktion deblockieren, für sie das Betriebsmittel (weiterhin) sperren
 - normalerweise nur durch den das Betriebsmittel „besitzenden“ Prozess
- dabei beziehen sich die Aktionen auf ein und dieselbe **Phase** in einem Soft- oder Hardwareprozess, je nach Betrachtungsebene
 - d.h., der Maschinenprogramm- oder Befehlssatzebene (S. 13)



Teilbarkeit in vertikaler Hinsicht



Beachte: Aktion ~ Programmablauf (vgl. [8, S. 11–12])

Ein und derselbe Programmablauf kann auf einer Abstraktionsebene sequentiell, auf einer anderen parallel sein. [9]

- wechselseitiger Ausschluss ist eine Methode der Maschinenprogramm- oder Befehlssatzebene, um **atomare Aktionen** zu schaffen
 - kritischer Abschnitt auf höherer Ebene, Elementaroperation auf tieferer
 - letztere entspricht einem kritischen Abschnitt in der Hardware. . .
- je nach **Bezugssystem** wirken sich diese Methoden blockierend oder nichtblockierend auf zu synchronisierende gleichzeitige Prozesse aus



Gliederung

Einführung

Kausalitätsprinzip

Parallelisierbarkeit

Kausalordnung

Aktionsfolgen

Sequentialisierung

Koordinierung

Konkurrenz

Verfahrensweisen

Einordnung

Fallstudie

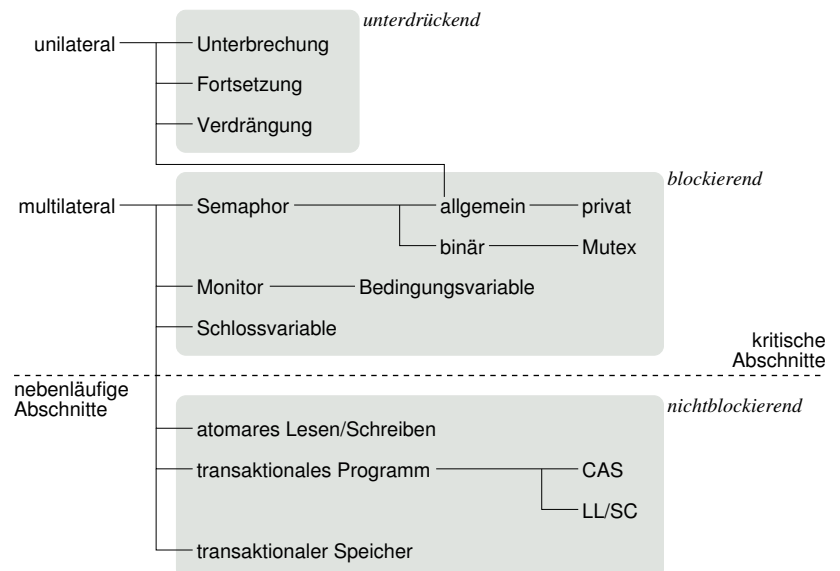
Lebendigkeit

Zusammenfassung



Synchronisationsarten-/techniken

betriebssystemrelevant



- je nach Art und Technik ist der Effekt von Synchronisation auf die gleichzeitigen Prozesse sehr unterschiedlich:
 - unterdrückend** ■ verhindert die **Prozessauslösung** anderer Prozesse
 - unabhängig des eventuellen gleichzeitigen Geschehens
 - betrifft konsumierbare Betriebsmittel
 - blockierend** ■ sperrt die **Betriebsmittelvergabe** an Prozesse
 - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
 - betrifft wiederverwendbare/konsumierbare Betriebsmittel
 - nichtblockierend** ■ unterbindet **Zustandsversteigerung** durch Prozesse
 - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
 - betrifft wiederverwendbare Betriebsmittel: **Speicher**
- es gibt keine einzige Methode, die nur Vorteile hat, allen Ansprüchen genügt und jeder Anforderung gerecht wird. . .



- die Verfahren wirken lediglich auf einen der beteiligten Prozesse
 - die anderen beteiligten Prozesse schreiten ungehindert fort⁴
- dabei gibt ein **logischer Programmablauf** die **Bedingungen** vor **Bedingungssynchronisation**
 - der Fortschritt des einen Prozesses ist abhängig von einer Bedingung, die in einem nichtsequentiellen Programm formuliert ist
 - der andere Prozess, der diese Bedingung aufhebt, erfährt dabei keine Verzögerung in seinem Ablauf
- logische Synchronisation**
 - die Maßnahme resultiert aus der logischen Abfolge der Aktivitäten
 - vorgegeben durch das „Rollenspiel“ der beteiligten Prozesse
- beachte: andere Prozesse sind jedoch nicht gänzlich unbeteiligt
 - die Aufhebung der Bedingung, die zum Warten eines Prozesses führte, ist von einem anderen Prozess zu leisten
 - **gekoppelte Prozesse** müssen ihrer jeweiligen Rolle gerecht werden. . .

⁴Ungeachtet der Gemeinkosten (*overhead*) der Verfahren.



- die Verfahren wirken auf alle in dem Moment beteiligten Prozesse
 - welcher dieser Prozesse ungehindert fortschreitet, ist unbestimmt
- den **Fortgang** der beteiligten Prozesse explizit kontrollieren
 - blockierend** ~ pessimistisch: wahrscheinliche, häufige Konkurrenz
 - der **wechselseitige Ausschluss** gleichzeitiger Prozesse
 - Warten mit (passiv) oder ohne (aktiv) Prozessorabgabe
 - die Verfahren profitieren von der **Maschinenprogrammebene**
 - Systemfunktionen zur Einplanung und Einlastung von Prozessen
 - im Regelfall zeitlich begrenzte, **exklusive Betriebsmittelvergabe**
 - nichtblockierend** ~ optimistisch: unwahrscheinliche, seltene Konkurrenz
 - auf Basis einer **Transaktion** zwischen gleichzeitigen Prozessen
 - eine Folge von Aktionen, die nur komplett oder gar nicht stattfinden
 - den Verfahren genügen Merkmale der **Befehlsatzebene**
 - **Spezialbefehle** mit atomaren Aktionen der Mikroarchitekturebene
 - ungeeignet für wiederverwendbare unteilbare Betriebsmittel



- angenommen, die folgenden Unterprogramme (put und get) werden in beliebiger Reihenfolge und gleichzeitig ausgeführt:


```

1 char buffer[64];
2 unsigned in = 0, out = 0;
3
4 void put(char item) {
5     buffer[in++ % 64] = item;
6 }
7
8 char get() {
9     return buffer[out++ % 64];
10 }

```

 - logische Probleme:
 - gepufferte Daten werden ggf. überschrieben: **Überlauf**
 - ein leerer Puffer gibt ggf. Daten zurück: **Unterlauf**
 - andere Probleme:
 - **überlappendes Schreiben** an dieselbe Speicherstelle
 - **überlappendes Lesen** von derselben Speicherstelle
 - **überlappendes Addieren** gibt ggf. falsche Zählerwerte
- ↔ mit buffer als **wiederverwendbares** und item als **konsumierbares** Betriebsmittel
- put und get unterliegen der uni- und multilateralen Synchronisation
 - eine uneingeschränkt gleichzeitige Ausführung darf nicht geschehen



Nichtsequentieller Programmablauf ... Lösung mit „Untiefe“

```
1 char buffer[64];
2 unsigned in = 0, out = 0;
3
4 void put(char item) {
5     if (((in + 1) % 64) == out) await(get);
6
7     buffer[FAA(&in, 1) % 64] = item;
8     cause(put);
9 }
10
11 char get() {
12     if (out == in) await(put);
13
14     char item = buffer[FAA(&out, 1)%64];
15     cause(get);
16
17     return item;
18 }
```

„Verlorenes Aufwachen“

Überlappt die Aktion zur Ereignisanzeige mit der Überprüfung der Wartebedingung, kann das Ereignis unbemerkt bleiben.

await(e)

- erwarte Ereignis e

cause(e)

- zeige Ereignis e an

FAA(c, n)

- verändere Zähler c um Wert n
- liefern vorherigen Zählerstand
- tue dies unteilbar



Vorbeugung des Ereignisverlusts

- if (condition) await(event): **wettlaufkritische Anweisung**

lost wake-up

Zwischen Feststellung der Wartebedingung eines Prozesses und seiner daraufhin logisch korrekten **Blockierung**, wird diese Bedingung durch einen gleichzeitigen Prozess aufgehoben.

- die Aktionsfolge 1. **Prüfen und** ggf. 2. **Warten** findet unwiderruflich statt
- sie eröffnet eine **Konkurrenzsituation** zwischen gleichzeitigen Prozessen
- die Anweisung ist als **bedingter kritischer Abschnitt** auszuführen
- dabei definiert die Wartebedingung ein **Prädikat** über die im kritischen Abschnitt von den Prozessen gemeinsam verwendeten Daten
- Auswertung und Folgerung erfolgen im kritischen Abschnitt, der während der Wartezeit des Prozesses für andere Prozesse aber frei sein muss [7]
- alternative und für das Pufferbeispiel besser geeignete Lösung:
- allgemeiner Semaphor**, der die Anzahl freier/belegter Einträge mitzählt



Fortschrittsgarantien

vgl. [4, 5]

- Aussagen zur **Lebendigkeit** (*liveliness*) nichtsequentieller Programme **behinderungsfrei** (*obstruction-free*)
 - ein einzelner, in Isolation stattfindender Prozess wird seine Aktion in begrenzter Anzahl von Schritten beenden
 - der Prozess findet isoliert statt, sofern alle anderen Prozesse, die ihn behindern könnten, zurückgestellt sind
- sperrfrei** (*lock-free*), umfasst Behinderungsfreiheit
 - jeder Schritt eines Prozesses trägt dazu bei, dass die Ausführung des nichtsequentiellen Programms insgesamt voranschreitet
 - systemweiter Fortschritt ist garantiert, jedoch können einzelne Prozesse der **Aushungerung** (*starvation*) unterliegen
- wartefrei** (*wait-free*), umfasst Sperrfreiheit
 - die Anzahl der zur Beendigung einer Aktion auszuführenden Schritte ist konstant oder zumindest nach oben begrenzt
 - garantiert systemweiten Fortschritt und ist frei von Aushungerung
- Merkmale von Verfahren für die **nichtblockierende Synchronisation**
 - Eigenschaften der Algorithmen, unabhängig von Umgebungswissen



Gliederung

Einführung

Kausalitätsprinzip

Parallelisierbarkeit

Kausalordnung

Aktionsfolgen

Sequentialisierung

Koordinierung

Konkurrenz

Verfahrenswissen

Einordnung

Fallstudie

Lebendigkeit

Zusammenfassung



- **Nebenläufigkeit** setzt voneinander unabhängige Prozesse voraus
 - bezeichnet das Verhältnis von nicht kausal abhängigen Ereignissen
 - schränkt sich ein aus Gründen von Daten- oder Zeitabhängigkeit
- gleichzeitige abhängige Prozesse implizieren **Koordinierung**
 - nämlich der Kooperation und Konkurrenz zwischen Prozessen
 - durch analytische (implizite) oder konstruktive (explizite) Techniken
- **Synchronisation** zeigt einen großen Facettenreichtum
 - klassifiziert nach der jeweiligen Auswirkung auf beteiligte Prozesse:
 - einseitig oder mehrseitig
 - unterdrückend, blockierend oder nichtblockierend
 - behinderungs-, sperr- oder wartefrei
 - klassifiziert nach der Ebene im Rechnerystem \rightsquigarrow nächsten Vorlesungen:
 - Hochsprachenebene Bedingungsvariable, Monitor
 - Maschinenprogrammzebene Verdrängungssteuerung, Semaphore
 - Befehlssatzebene Schlossvariable, Spezialbefehle (CPU)
- Aussagen zur „Lebendigkeit“ nichtsequentieller Programme leiten sich aus den **Fortschrittsgarantien** der Synchronisationsverfahren ab



- [1] CORBATÓ, F. J. ; MERWIN-DAGGETT, M. ; DALEX, R. C.:
An Experimental Time-Sharing System.
In: *Proceedings of the AIEE-IRE '62 Spring Joint Computer Conference, ACM, 1962*, S. 335–344
- [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] HANSEN, P. B.:
Concurrent Processes.
In: *Operating System Principles*.
Englewood Cliffs, N.J., USA : Prentice-Hall, Inc., 1973. –
ISBN 0–13–637843–9, Kapitel 3, S. 55–131
- [4] HERLIHY, M. :
Wait-Free Synchronization.
In: *ACM Transactions on Programming Languages and Systems* 11 (1991), Jan., Nr. 1, S. 124–149



- [5] HERLIHY, M. ; LUCHANGCO, V. ; MOIR, M. :
Obstruction-Free Synchronization: Double-Ended Queues as an Example.
In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2003), May 19–22, 2003, Providence, Rhode Island, USA*, IEEE Computer Society, 2003, S. 522–529
- [6] HERTTICH, R. G. ; HOMMEL, G. :
Kooperation und Konkurrenz — Nebenläufige, verteilte und echtzeitabhängige Programmsysteme.
Springer-Verlag, 1989. –
ISBN 3–540–51701–4
- [7] HOARE, C. A. R.:
Towards a Theory of Parallel Programming.
In: HOARE, C. A. R. (Hrsg.) ; PERROT, R. H. (Hrsg.): *Operating System Techniques*.
New York, NY : Academic Press, Inc., Aug. – Sept. 1971 (Proceedings of a Seminar at Queen's University, Belfast, Northern Ireland), S. 61–71
- [8] KLEINÖDER, J. ; SCHRÖDER-PREIKSCHAT, W. :
Prozesse.
In: LEHRSTUHL INFORMATIK 4 (Hrsg.): *Systemprogrammierung*.
FAU Erlangen-Nürnberg, 2015 (Vorlesungsfolien), Kapitel 6.1



- [9] LÖHR, K.-P. :
Nichtsequentielle Programmierung.
In: INSTITUT FÜR INFORMATIK (Hrsg.): *Algorithmen und Programmierung IV*.
Freie Universität Berlin, 2006 (Vorlesungsfolien)



```
1 semaphore free = 64, data = 0;
2
3 char buffer[64];
4 unsigned in = 0, out = 0;
5
6 void put(char item) {
7     P(&free); /* block iff buffer is full: free = 0 */
8     buffer[FAA(&in, 1) % 64] = item;
9     V(&data); /* signal data availability */
10 }
11
12 char get() {
13     P(&data); /* block iff buffer is empty: data = 0 */
14     char item = buffer[FAA(&out, 1) % 64];
15     V(&free); /* signal buffer-place availability */
16
17     return item;
18 }
```

- Prinzip „begrenzter Puffer“ (*bounded buffer*), siehe auch [8, S. 30–33]



- **binärer Semaphor**, Lösung auf Maschinenprogrammzebene: ☺

```
1 int FAA(int_t *ref, int val) {
2     P(&ref->mutex);           9     typedef struct {
3     int aux = ref->value;     10     int value;
4     ref->value += val;       11     semaphore_t mutex;
5     V(&ref->mutex);         12 } int_t;
6
7     return aux;              13 int_t in = {0,1}, out = {0,1};
8 }
```

- **atomarer Spezialbefehl**, Lösung auf Befelssatzzebene: ☺

```
14 inline int FAA(int *ref, int val) {
15     int aux = val;
16
17     asm volatile ("xaddl %0, %1"
18     : "=g" (aux), "=m" (*ref) : "0" (aux), "m" (*ref)
19     : "memory", "cc");
20
21     return aux;
22 }
```

