Systemprogrammierung

Grundlagen von Betriebssystemen

Teil C – X.1 Prozesssynchronisation: Nichtsequentialität

6. November 2025

Rüdiger Kapitza

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Technische Fakultät

Einschub: Miniklausur-Termin

- Termin für die Miniklausur: **14.11.2025** in H20
- Zur Abschätzung der Teilnehmerzahl **Anmeldung notwendig**
  - Möglich bis zum 11.11.2025
  - Veranstaltungstermin in Waffel
    $\Rightarrow$ `https://waffel.cs.fau.de/signup?course=499`
  - Bitte meldet euch wieder ab, falls ihr nicht teilnehmen wollt
- Erlaubte Hilfsmittel: ein beidseitig handbeschriebener **DIN-A5**-Zettel (nicht am Tablet geschrieben)

Mit der Miniklausur können bis zu *18 Übungspunkte* erreicht werden
$\Rightarrow$ **Ausgleich verlorener Übungspunkte**

Agenda

Gliederung

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

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

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
- Prinzipen kennenlernen/vertiefen, um **kausal zusammenhängende Aktionen** nacheinander stattfinden zu lassen
  - **Sequentialisierung** von gleichzeitigen (gekoppelten) Prozessen erzwingen
  - Konkurrenz von Prozesse durch wechselseitigen Ausschluss koordinieren
  - verstehen, dass Aktionen auf vertikaler Ebene nicht unteilbar sein müssen
  - **Unteilbarkeit** in Bezug auf Betriebsmittel und Aktionen kennenlernen

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
- Prinzipen kennenlernen/vertiefen, um **kausal zusammenhängende Aktionen** nacheinander stattfinden zu lassen
  - **Sequentialisierung** von gleichzeitigen (gekoppelten) Prozessen erzwingen
  - Konkurrenz von 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

Kausalitätsprinzip

Parallelisierbarkeit

Nebenläufige Aktionen

Sequentielles $\mapsto$ Nichtsequentielles Programm

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

Nebenläufige Aktionen

Sequentielles $\mapsto$ *Nichtsequentielles Programm*

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

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

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

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

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

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

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

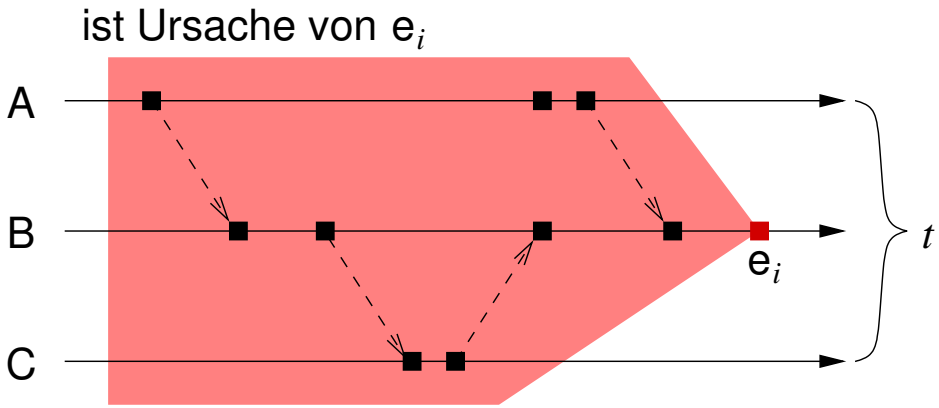
[1] Aktion: Anweisungsausführung einer (virtuellen/realen) Maschine. [8, S. 12]

Kausalitätsprinzip

Kausalordnung

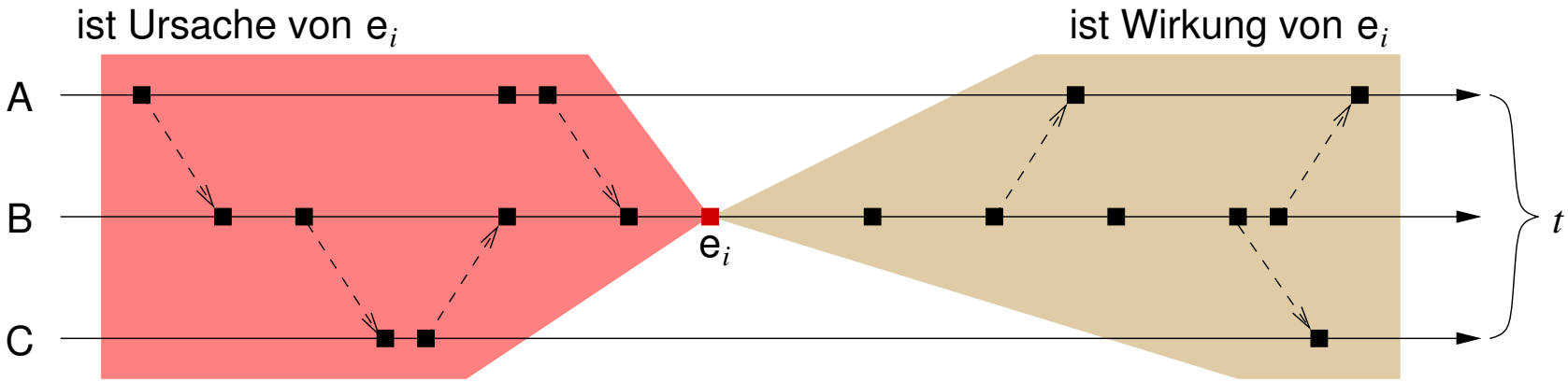
Ursache und Wirkung

Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit:



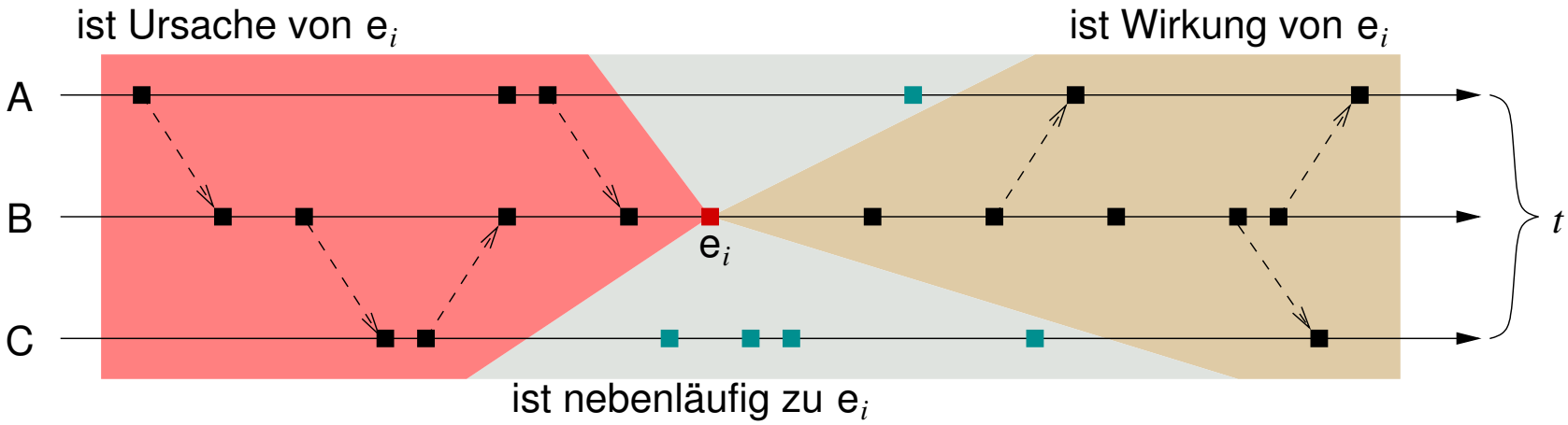
Ursache und Wirkung

Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit:



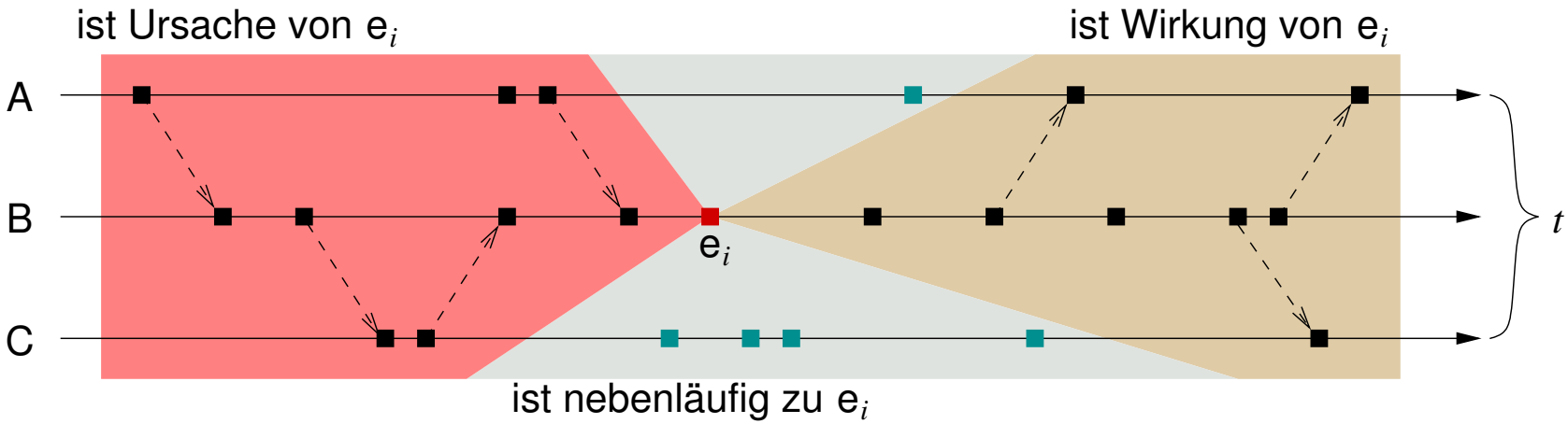
Ursache und Wirkung

Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit:



Ursache und Wirkung

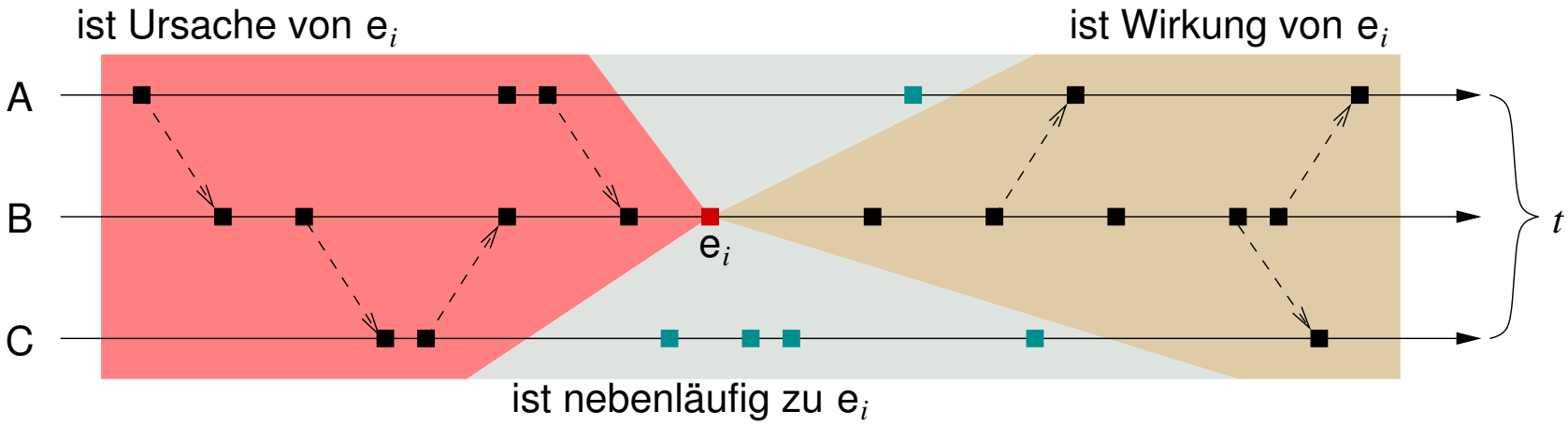
Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit:



- 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

Ursache und Wirkung

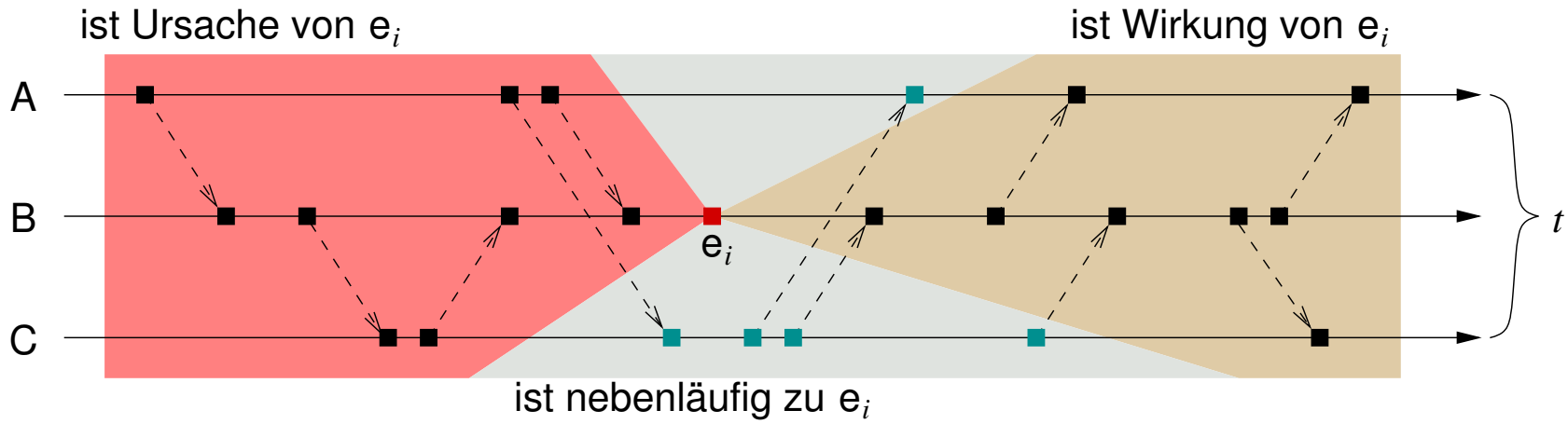
Nebenläufigkeit als relativistischer Begriff von Gleichzeitigkeit:



- 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)

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

Daten- und Zeit(un)abhängigkeit

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

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. 11)
  - **Datenabhängigkeiten** gleichzeitiger Prozesse beachten

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. 11)
- **Datenabhängigkeiten** gleichzeitiger Prozesse beachten

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

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. 11)
    - **Datenabhängigkeiten** gleichzeitiger Prozesse beachten
  - **speziell**
    - keine die **Zeitbedingungen** der anderen verletzt
    - zusätzliches, zwingendes Merkmal 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“ / „ist Wirkung von“ $\rightsquigarrow$ **Koordinierung** (vor/zur Laufzeit)

„ist nebenläufig zu“ $\rightsquigarrow$ **Parallelität** (implizit)

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. 11)
    - **Datenabhängigkeiten** gleichzeitiger Prozesse beachten
  - **speziell**
    - keine die **Zeitbedingungen** der anderen verletzt
    - zusätzliches, zwingendes Merkmal 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“
„ist Wirkung von“ } $\rightsquigarrow$ **Koordinierung** (vor/zur Laufzeit)

„ist nebenläufig zu“ $\rightsquigarrow$ **Parallelität** (implizit)

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

Kausalitätsprinzip

Aktionsfolgen

Gleichzeitige Prozesse

vgl. auch [3]

Definition (*concurrent/simultaneous processes*)

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

Gleichzeitige Prozesse

vgl. auch [3]

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

Gleichzeitige Prozesse

vgl. auch [3]

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*)

Gleichzeitige Prozesse

vgl. auch [3]

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

Gleichzeitige Prozesse

vgl. auch [3]

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

Gekoppelte Prozesse

vgl. auch [3]

Definition (*interacting processes*)

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

Gekoppelte Prozesse

vgl. auch [3]

Definition (*interacting processes*)

Gleichzeitige Prozesse, die durch direkte order 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

[2] Abgeleitet von (altfrz.) *s'entreferir* „sich gegenseitig schlagen".

Gekoppelte Prozesse

vgl. auch [3]

Definition (*interacting processes*)

Gleichzeitige Prozesse, die durch direkte order 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)

[2] Abgeleitet von (altfrz.) *s'entreferir* „sich gegenseitig schlagen".

Gekoppelte Prozesse

vgl. auch [3]

Definition (*interacting processes*)

Gleichzeitige Prozesse, die durch direkte order 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)

[2] Abgeleitet von (altfrz.) *s'entreferir* „sich gegenseitig schlagen".

Gliederung

Sequentialisierung

Koordinierung

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**

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

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

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)

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

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

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***.

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

[3](gr). *sýn* : zusammen, *chrónos* : Zeit

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*)

[3](gr). *sýn* : zusammen, *chrónos* : Zeit

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

[3](gr). *sýn* : zusammen, *chrónos* : Zeit

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

[3](gr). *sýn* : zusammen, *chrónos* : Zeit

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). *sýn* : zusammen, *chrónos* : Zeit

Sequentialisierung

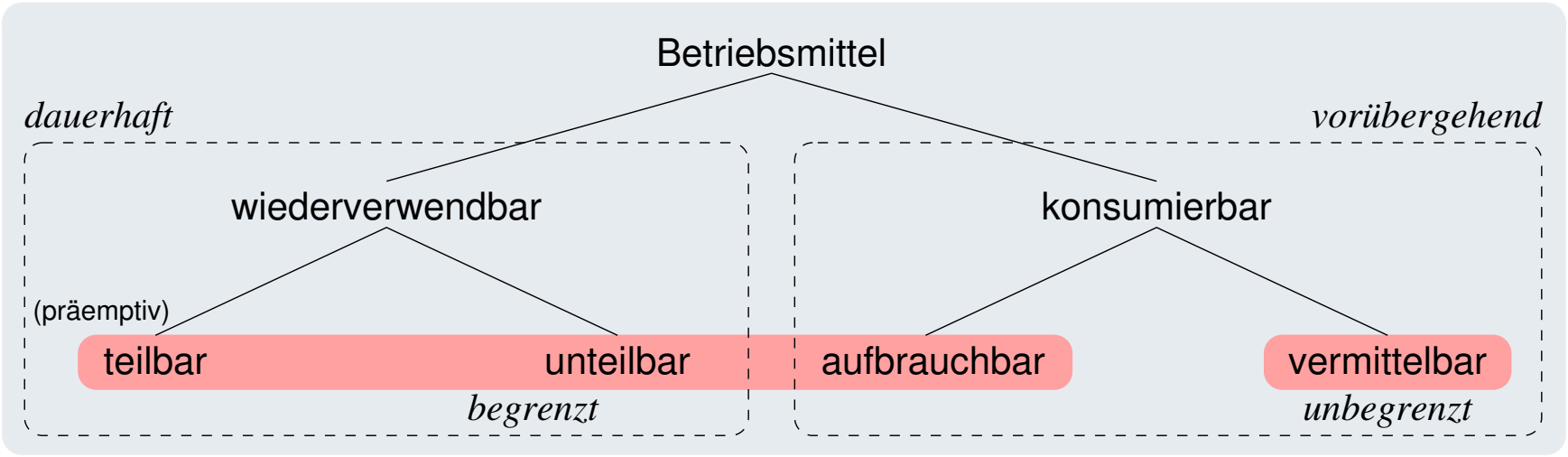
Konkurrenz

Betriebsmittel und Aktionen

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

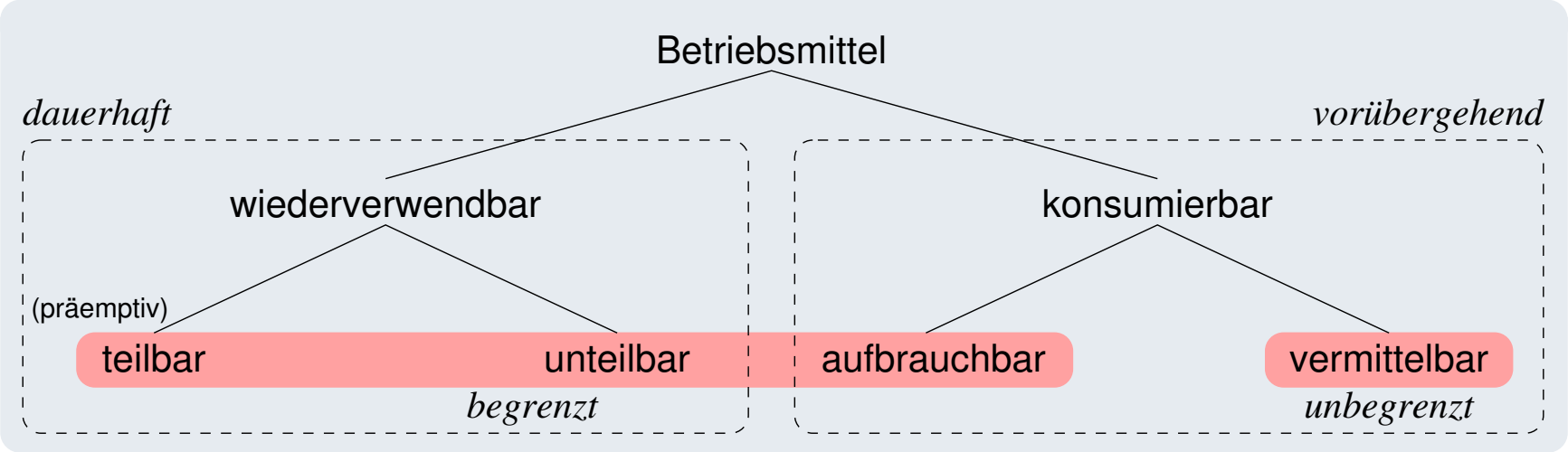
Betriebsmittel und Aktionen

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



Betriebsmittel und Aktionen

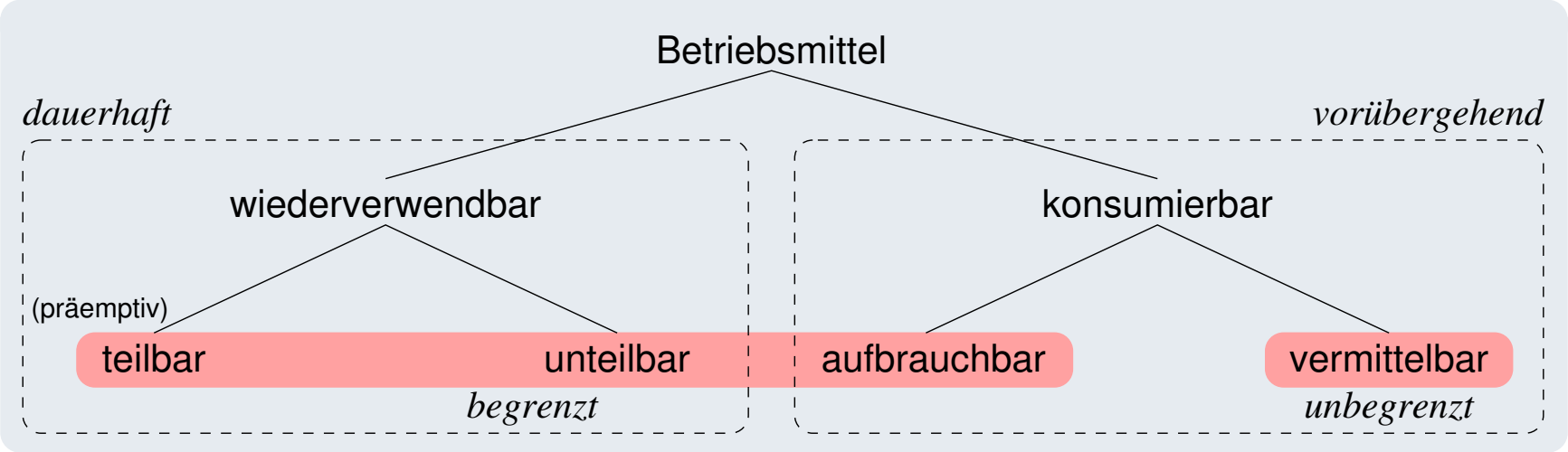
- je nach **Betriebsmittelart** (vgl. [8, S. 9–10]) ist die Nutzung durch gleichzeitige Prozesse eingeschränkt:



- bereits Aktionen zum **Zugriff** auf ein unteilbares wiederverwendbares Betriebsmittel unterliegen dem wechselseitigen Ausschluss
  - **mehrseitige/multilaterale Synchronisation** gekoppelter Prozesse

Betriebsmittel und Aktionen

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



- 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.

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

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

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 nichtsequen. Programm
  - das *Unteilbarsein* auf Maschinenprogramm- oder Befehlssatzebene (S. 48)

Wettstreit

Definition (Duden)

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

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

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

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederver./unteilbares Betriebsmittel

Wechselseitiger Ausschluss

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederver./unteilbares Betriebsmittel:
  Vergabe $\mapsto$ vor der Aktion das Betriebsmittel sperren

  Freigabe $\mapsto$ nach der Aktion das Betriebsmittel entsperren

Wechselseitiger Ausschluss

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederver./unteilbares Betriebsmittel:

  Vergabe $\mapsto$ 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 $\mapsto$ nach der Aktion das Betriebsmittel entsperren

Wechselseitiger Ausschluss

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederver./unteilbares Betriebsmittel:

  Vergabe $\mapsto$ 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 $\mapsto$ nach der Aktion das Betriebsmittel entsperren
  - sollten Aktionen die Freigabe dieses Betriebsmittels erwarten, wird es zur **Wiedervergabe** bereitgestellt
    - alle Aktionen deblockieren, erneut das Vergabeprotokoll durchlaufen

    oder
    - eine Aktion deblockieren, für sie das Betriebsmittel (weiterhin) sperren

Wechselseitiger Ausschluss

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederver./unteilbares Betriebsmittel:

  Vergabe $\mapsto$ 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 $\mapsto$ nach der Aktion das Betriebsmittel entsperren
  - sollten Aktionen die Freigabe dieses Betriebsmittels erwarten, wird es zur **Wiedervergabe** bereitgestellt
    - alle Aktionen deblockieren, erneut das Vergabeprotokoll durchlaufen

    oder
    - eine Aktion deblockieren, für sie das Betriebsmittel (weiterhin) sperren
  - i.d.R. nur durch den das Betriebsmittel „besitzenden“ Prozess

Wechselseitiger Ausschluss

- Protokoll zur **Sequentialisierung** gleichzeitiger Aktionen bei Zugriff auf ein gemeinsames wiederver./unteilbares Betriebsmittel:

  Vergabe $\mapsto$ 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

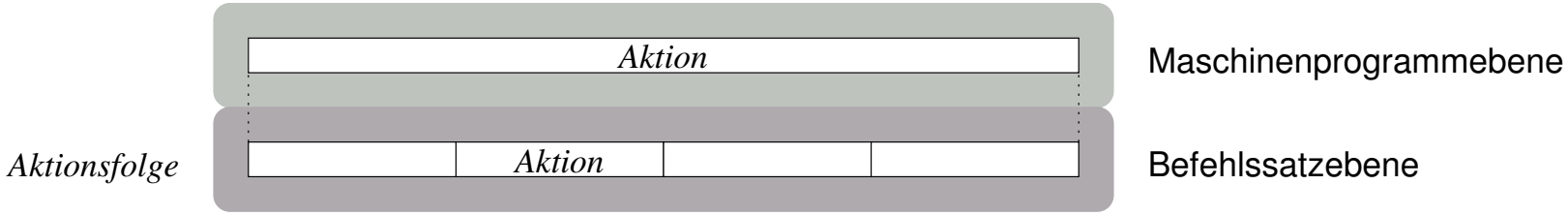
  Freigabe $\mapsto$ nach der Aktion das Betriebsmittel entsperren
  - sollten Aktionen die Freigabe dieses Betriebsmittels erwarten, wird es zur **Wiedervergabe** bereitgestellt
    - alle Aktionen deblockieren, erneut das Vergabeprotokoll durchlaufen

    oder
    - eine Aktion deblockieren, für sie das Betriebsmittel (weiterhin) sperren
  - i.d.R. 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. 48)

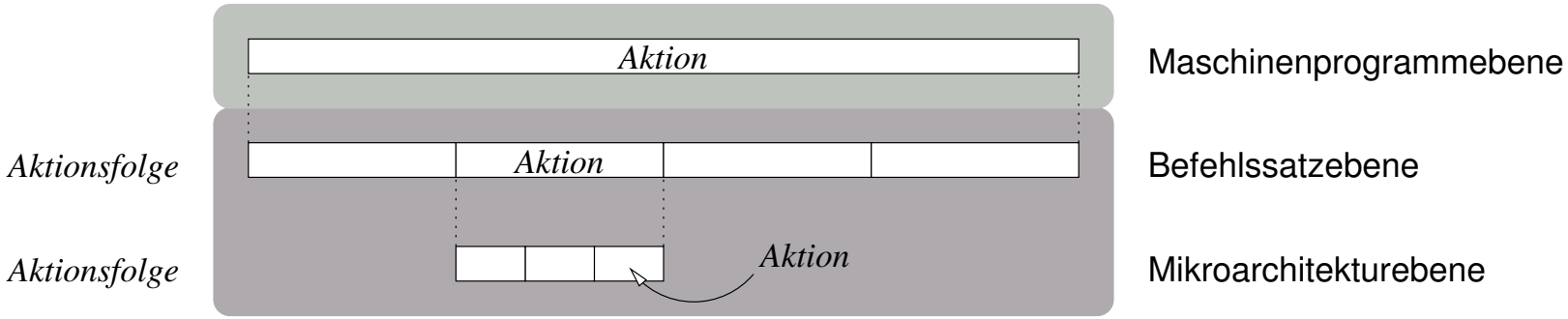
Teilbarkeit in vertikaler Hinsicht

Maschinenprogrammebene

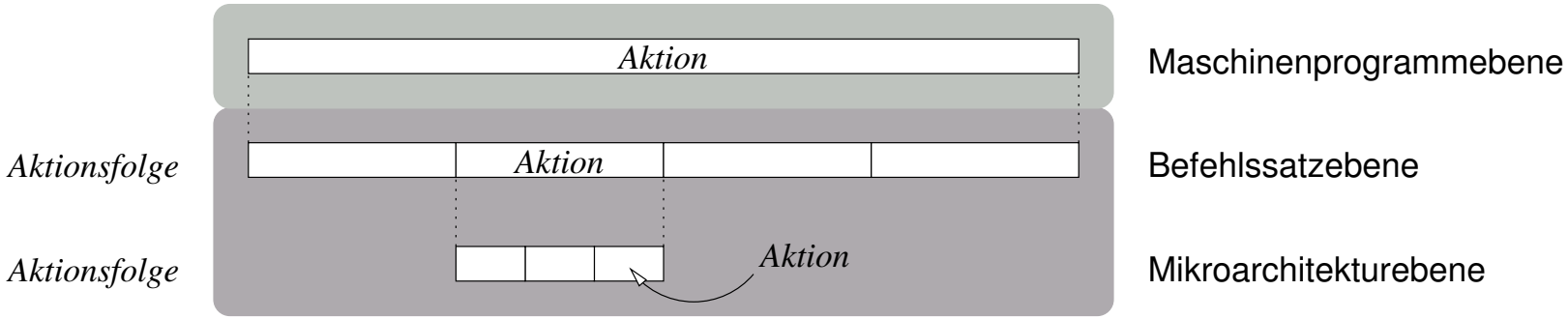
Teilbarkeit in vertikaler Hinsicht



Teilbarkeit in vertikaler Hinsicht



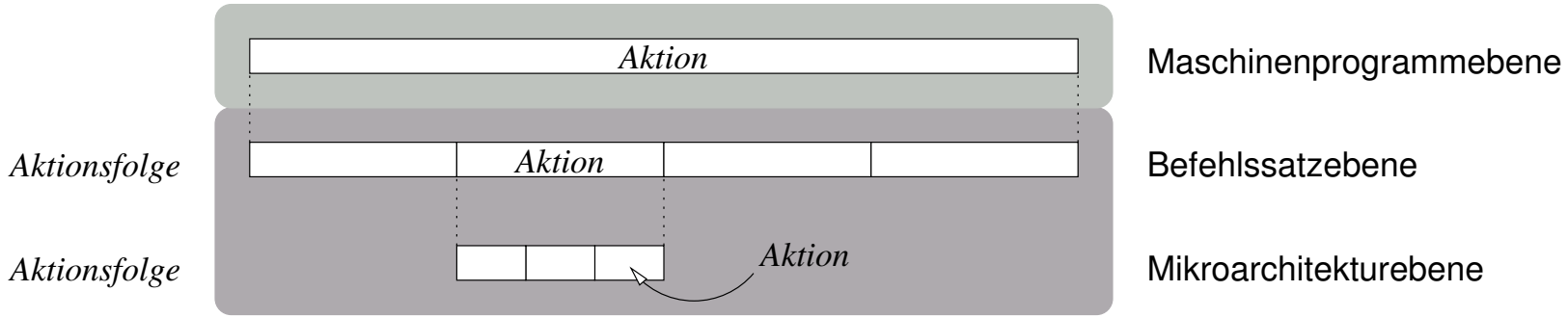
Teilbarkeit in vertikaler Hinsicht



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

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

Teilbarkeit in vertikaler Hinsicht

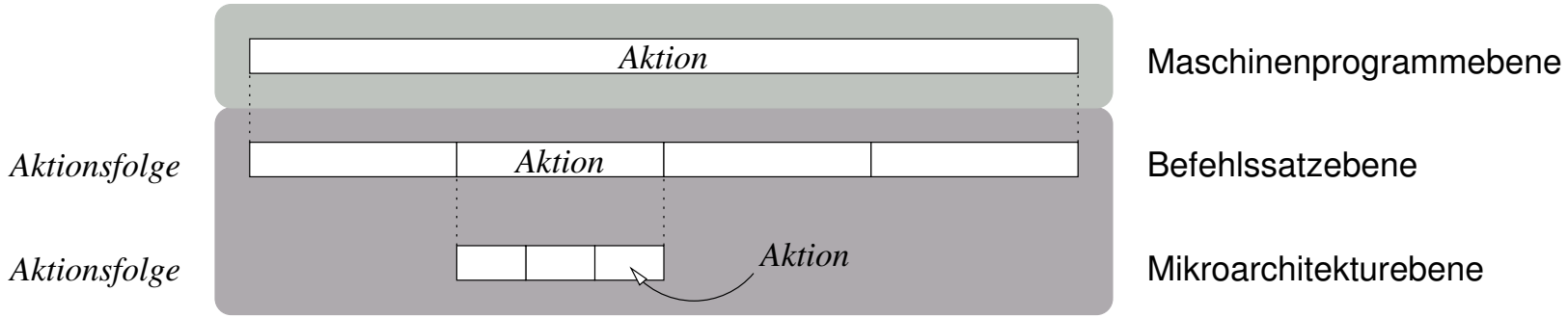


Beachte: Aktion ∼ Programmablauf (vgl. [8, S. 11–12])

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…

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 nichblockierend auf zu synchronisierende gleichzeitige Prozesse aus

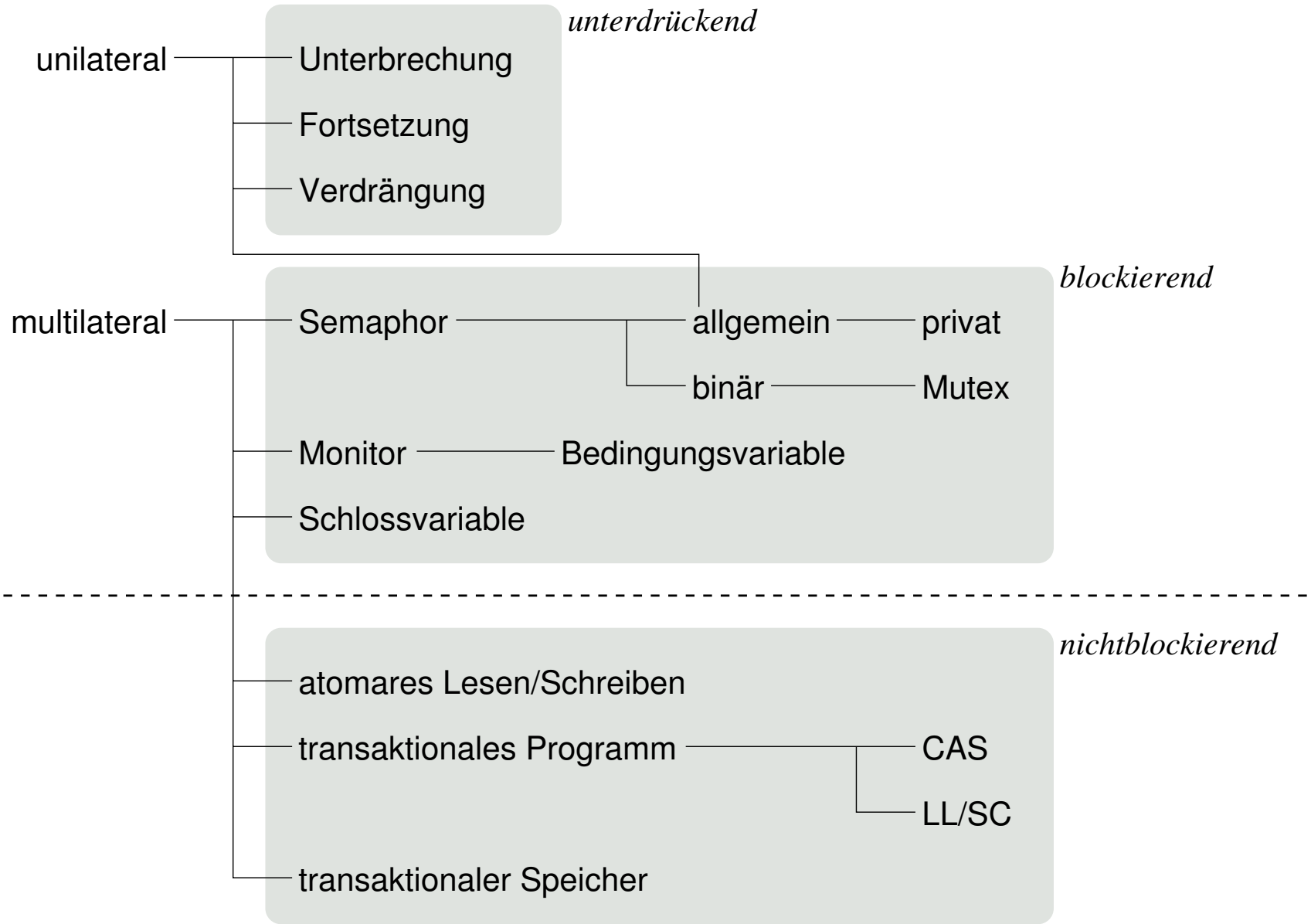
Gliederung

Verfahrensweisen

Einordnung

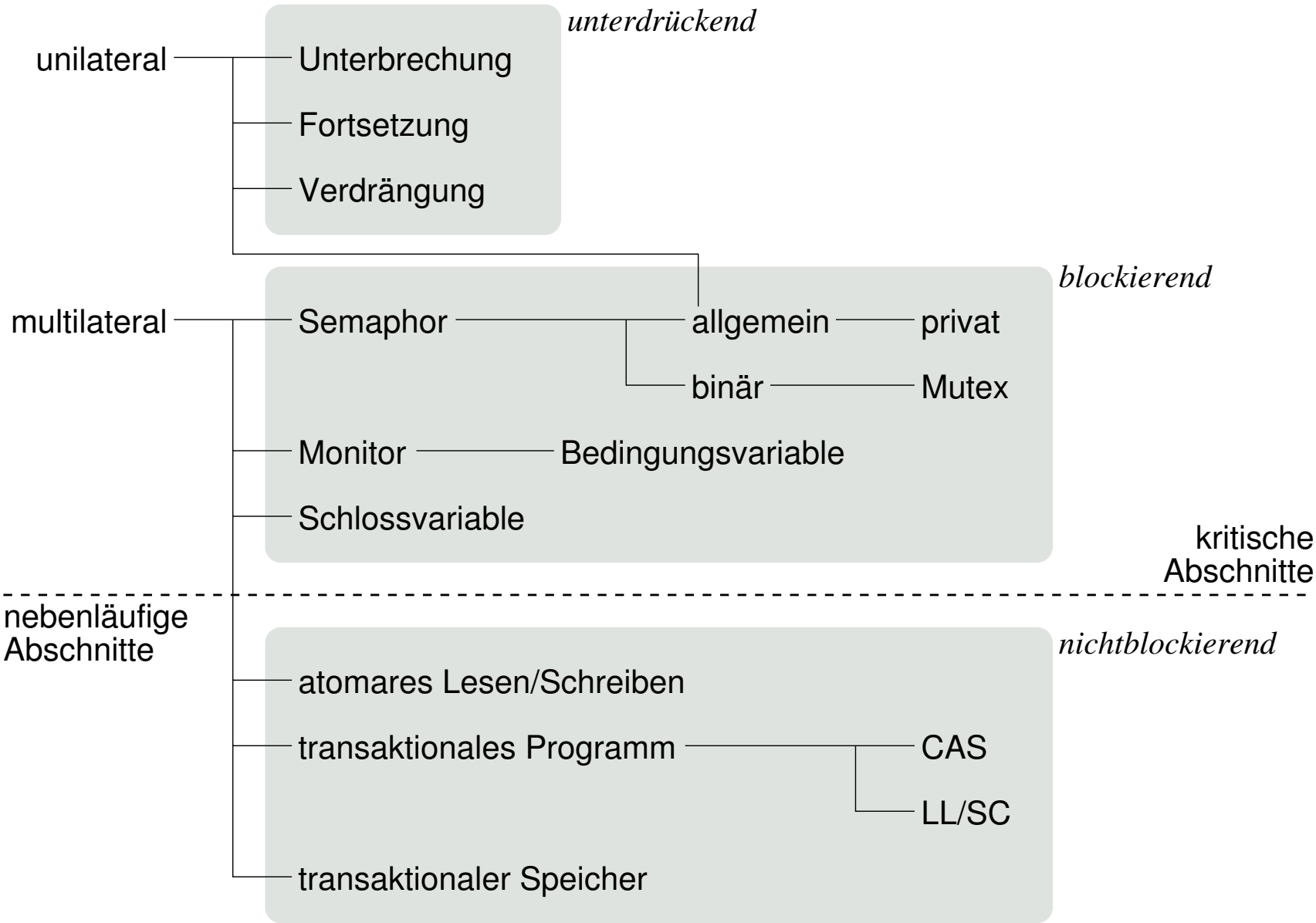
Synchronisationarten-/techniken

betriebssystemrelevant



Synchronisationarten-/techniken

betriebssystemrelevant



Wirkung

- je nach Art und Technik ist der Effekt von Synchronisation auf die gleichzeitigen Prozesse sehr unterschiedlich

Wirkung

- 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
- der aktuelle Prozess wird dabei nicht verzögert

Wirkung

- 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
- der aktuelle Prozess wird dabei nicht verzögert

blockierend

- sperrt die **Betriebsmittelvergabe** an Prozesse
  - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
  - betrifft wiederverwendbare/konsumierbare Betriebsmittel
- der aktuelle Prozess wird möglicherweise suspendiert

Wirkung

- 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
- der aktuelle Prozess wird dabei nicht verzögert

blockierend

- sperrt die **Betriebsmittelvergabe** an Prozesse
  - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
  - betrifft wiederverwendbare/konsumierbare Betriebsmittel
- der aktuelle Prozess wird möglicherweise suspendiert

nichtblockierend

- unterbindet **Zustandsverstetigung** durch Prozesse
  - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
  - betrifft wiederverwendbare Betriebsmittel: **Speicher**
- der aktuelle Prozess wird möglicherweise zurückgerollt

Wirkung

- 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
- der aktuelle Prozess wird dabei nicht verzögert

blockierend

- sperrt die **Betriebsmittelvergabe** an Prozesse
  - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
  - betrifft wiederverwendbare/konsumierbare Betriebsmittel
- der aktuelle Prozess wird möglicherweise suspendiert

nichtblockierend

- unterbindet **Zustandsverstetigung** durch Prozesse
  - ist nur bei gleichzeitigem Geschehen wirksam
  - betrifft wiederverwendbare Betriebsmittel: **Speicher**
- der aktuelle Prozess wird möglicherweise zurückgerollt

- es gibt keine einzige Methode, die nur Vorteile hat, allen Ansprüchen genügt und jeder Anforderung gerecht wird…

Einseitige Synchronisation

- die Verfahren wirken lediglich auf einen der beteiligten Prozesse
  - die anderen beteiligten Prozesse schreiten ungehindert fort[4]

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

Einseitige Synchronisation

- die Verfahren wirken lediglich auf einen der beteiligten Prozesse
  - die anderen beteiligten Prozesse schreiten ungehindert fort[4]
- dabei gibt ein **logischer Programmablauf** die **Bedingungen** vor

  Bedingungssynchronisation

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

Einseitige Synchronisation

- die Verfahren wirken lediglich auf einen der beteiligten Prozesse
  - die anderen beteiligten Prozesse schreiten ungehindert fort[4]
- 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

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

Einseitige Synchronisation

- die Verfahren wirken lediglich auf einen der beteiligten Prozesse
  - die anderen beteiligten Prozesse schreiten ungehindert fort[4]
- 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

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

Einseitige Synchronisation

- die Verfahren wirken lediglich auf einen der beteiligten Prozesse
  - die anderen beteiligten Prozesse schreiten ungehindert fort[4]
- 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…

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

Mehrseitige Synchronisation

- die Verfahren wirken auf alle in dem Moment beteiligten Prozesse
  - welcher dieser Prozesse ungehindert fortschreitet, ist unbestimmt

Mehrseitige Synchronisation

- 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 $\sim$ pessimistisch: wahrscheinliche, häufige Konkurrenz

Mehrseitige Synchronisation

- 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 $\sim$ 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**

Mehrseitige Synchronisation

- 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 $\sim$ 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 $\sim$ 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 **Befehlssatzebene**
  - **Spezialbefehle** mit atomaren Aktionen der Mikroarchitekturebene
- ungeeignet für wiederverwendbare unteilbare Betriebsmittel

Verfahrensweisen

Fallstudie

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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 }
```

↪ mit `buffer` als wiederverwendbares und `item` als konsumierbares Betriebsmittel

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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 }
```

↪ mit `buffer` als wiederverwendbares und `item` als konsumierbares Betriebsmittel

- logische Probleme:
  - gepufferte Daten werden ggf. überschrieben: Überlauf
  - ein leerer Puffer gibt ggf. Daten zurück: Unterlauf

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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 }
```

↪ mit `buffer` als wiederverwendbares und `item` als konsumierbares Betriebsmittel

- logische Probleme:
  - gepufferte Daten werden ggf. überschrieben: Überlauf
  - ein leerer Puffer gibt ggf. Daten zurück: Unterlauf
- andere Probleme

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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 }
```

↪ mit `buffer` als wiederverwendbares und `item` als konsumierbares Betriebsmittel

- logische Probleme:
  - gepufferte Daten werden ggf. überschrieben: Überlauf
  - ein leerer Puffer gibt ggf. Daten zurück: Unterlauf
- andere Probleme:
  - überlappendes Schreiben an dieselbe Speicherstelle

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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 }
```

↪ mit `buffer` als wiederverwendbares und `item` als konsumierbares Betriebsmittel

- 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

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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 }
```

↪ mit `buffer` als wiederverwendbares und `item` als konsumierbares Betriebsmittel

- 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

Zusammenführendes Beispiel

vgl. [8, S. 23]

- 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

- `put` & `get` unterliegen der uni- und multilateralen Synchronisation
  - eine uneingeschränkt gleichzeitige Ausführung darf nicht geschehen

Nichtsequentieller Programmablauf

`await(e)`

- erwarte Ereignis *e*

`cause(e)`

- zeige Ereignis *e* an

`FAA(c,n)`

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

Nichtsequentieller Programmablauf

```
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 }
```

`await(e)`

- erwarte Ereignis *e*

`cause(e)`

- zeige Ereignis *e* an

`FAA(c,n)`

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

```
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*
- liefere vorherigen Zählerstand
- tue dies unteilbar

Vorbeugung des Ereignisverlusts

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

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.

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

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]

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

Verfahrensweisen

Lebendigkeit

Fortschrittsgarantien

vgl. [4, 5]

- Aussagen zur **Lebendigkeit** (*liveliness*) nichtsequentieller Programme

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

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

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

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

Resümee

Resümee

- **Nebenläufigkeit** setzt voneinander unabhängige Prozesse voraus
  - bezeichnet das Verhältnis von nicht kausal abhängigen Ereignissen
  - schränkt sich ein aus Gründen von Daten- oder Zeitabhängigkeit

Resümee

- **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

Resümee

- **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

Resümee

- **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

Resümee

- **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 Rechensystem $\rightsquigarrow$ nächsten Vorlesungen:

Hochsprachenebene	Bedingungsvariable, Monitor
Maschinenprogrammebene	Verdrängungssteuerung, Semaphor
Befehlssatzebene	Schlossvariable, Spezialbefehle (CPU)

Resümee

- **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 Rechensystem $\rightsquigarrow$ nächsten Vorlesungen:

    Hochsprachenebene Bedingungsvariable, Monitor

    Maschinenprogrammebene Verdrängungssteuerung, Semaphor

    Befehlssatzebene Schlossvariable, Spezialbefehle (CPU)
- Aussagen zur „Lebendigkeit“ nichtsequentieller Programme leiten sich aus den **Fortschrittsgarantien** der Synchronisationsverfahren ab

Zusammenfassung

Bibliographie

Literaturverzeichnis (1)

[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)

Literaturverzeichnis (2)

[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,*

Literaturverzeichnis (3)

Providence, Rhode Island, USA, IEEE Computer Society, 2003, S. 522–529

[6] Herrtwich, 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

Literaturverzeichnis (4)

[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)

Anhang

Fallstudie

Logische Synchronisation

Logische Synchronisation

zählender Semaphor (*counting semaphore*)

```
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 }
```

```
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]

Wechselseitiger Ausschluss beim Zählen

fetch and add

Wechselseitiger Ausschluss beim Zählen

fetch and add

- **binärer Semaphor**, Lösung auf Maschinenprogrammebene:

```
1  int FAA(int_t *ref, int val) {
2    P(&ref->mutex);
3    int aux = ref->value;
4    ref->value += val;
5    V(&ref->mutex);
6
7    return aux;
8  }
```

Wechselseitiger Ausschluss beim Zählen

- **binärer Semaphor**, Lösung auf Maschinenprogrammebene:

```
1  int FAA(int_t *ref, int val) {
2    P(&ref->mutex);
3    int aux = ref->value;
4    ref->value += val;
5    V(&ref->mutex);
6
7    return aux;
8  }
```

```
9  typedef struct {
10   int value;
11   semaphore_t mutex;
12 } int_t;

13 int_t in = {0,1}, out = {0,1};
```

Wechselseitiger Ausschluss beim Zählen

- **binärer Semaphor**, Lösung auf Maschinenprogrammebene:

```
1  int FAA(int_t *ref, int val) {
2    P(&ref->mutex);
3    int aux = ref->value;
4    ref->value += val;
5    V(&ref->mutex);
6
7    return aux;
8  }
```

```
9  typedef struct {
10   int value;
11   semaphore_t mutex;
12 } int_t;

13 int_t in = {0,1}, out = {0,1};
```

- **atomarer Spezialbefehl**, Lösung auf Befelssatzebene:

```
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 }
```

Wechselseitiger Ausschluss beim Zählen

fetch and add

- **binärer Semaphor**, Lösung auf Maschinenprogrammebene: ☹

```
1  int FAA(int_t *ref, int val) {
2    P(&ref->mutex);
3    int aux = ref->value;
4    ref->value += val;
5    V(&ref->mutex);
6
7    return aux;
8  }
```

```
9  typedef struct {
10   int value;
11   semaphore_t mutex;
12 } int_t;

13 int_t in = {0,1}, out = {0,1};
```

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

```
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 }
```