Betriebssystembau (BSB)

VL 13 – Interprozesskommunikation

Alexander Krause

Lehrstuhl für Informatik 12 – Arbeitsgruppe Systemsoftware / IRB
Technische Universität Dortmund

`https://sys.cs.tu-dortmund.de/de/lehre/ws25/bsb`

WS 25 – 20. Januar 2026

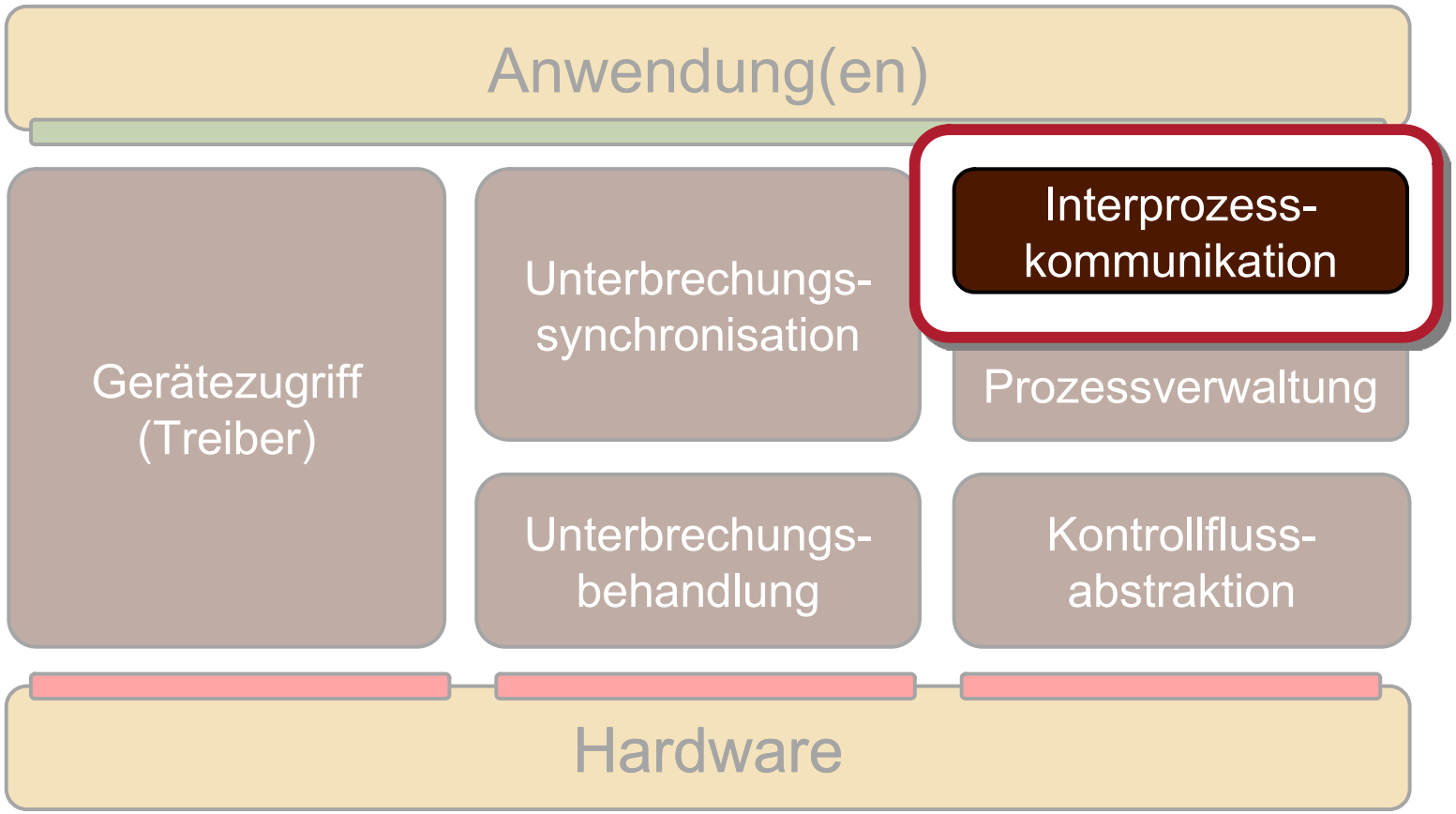
technische universität dortmund

arbeitsgruppe systemsoftware

Prüfungen

- 30 min. Fachgespräch über Betriebssystembau
- Termine
  - 23. + 24. Februar
  - 24. + 25. März
  - Weitere bei Bedarf
- Anmeldung
  - Anmeldung für mündl. Prüfung ausfüllen und ausdrucken
  - Termin und Unterschrift von mir abholen
  - Wir senden den Zettel an das PA

Überblick: Einordnung dieser VL



Agenda

- Prüfungen
- Einordnung
- IPC über Speicher
- IPC über Nachrichten
- Basisabstraktionen
- Trennung der Belange mit AOP
- Zusammenfassung

Agenda

Kommunikation und Synchronisation

- ... sind durch das Kausalprinzip immer verbunden:

> Wenn **A** eine Information von **B** benötigt, um weiterzuarbeiten, muss **A** solange ***warten***, bis **B** die Information bereitstellt.

- ➔ nachrichtenbasierte Kommunikation impliziert Synchronisation (z.B. bei `send()` und `receive()`)
- ➔ Synchronisationsprimitiven eignen sich als Basis für die Implementierung von Kommunikationsprimitiven (z.B. Semaphore)

Agenda

- Prüfungen
- Einordnung
- IPC über Speicher
  - Monitore
  - Pfadausdrücke
- IPC über Nachrichten
- Basisabstraktionen
- Trennung der Belange mit AOP
- Zusammenfassung

IPC über gemeinsamen Speicher

- **Anwendungsfälle/Voraussetzungen**
  - ungeschütztes System (alle Prozesse im selben Adressraum)
  - System mit sprachbasiertem Speicherschutz
  - Kommunikation zwischen Fäden im selben Adressraum
  - gemeinsamer Speicher mit Hilfe des BS und einer MMU (z.B. UNIX System V shared memory)
  - gemeinsamer Kern-Adressraum von isolierten Prozessen
- **Positive Eigenschaften:**
  - atomare Speicherzugriffe erfordern keine zusätzliche Synchronisation
  - schnell: kein Kopieren
  - einfache IPC Anwendungen leicht zu realisieren
  - unsynchronisierte Kommunikationsbeziehungen möglich
  - M:N Kommunikation leicht möglich

Semaphore – einfache Interaktionen

- gegenseitiger Ausschluss

```
// gem. Speicher
Semaphore mutex(1);
SomeType  shared;
```

```
void process_1() {
  mutex.wait();
  shared.access();
  mutex.signal();
}
```

```
void process_2() {
  mutex.wait();
  shared.access();
  mutex.signal();
}
```

- einseitige Synchronisation

```
// gem. Speicher
Semaphore elem(0);
SomeQueue shared;
```

```
void producer() {
  shared.put();
  elem.signal();
}
```

```
void consumer() {
  elem.wait();
  shared.get();
}
```

- betriebsmittelorientierte Synchronisation

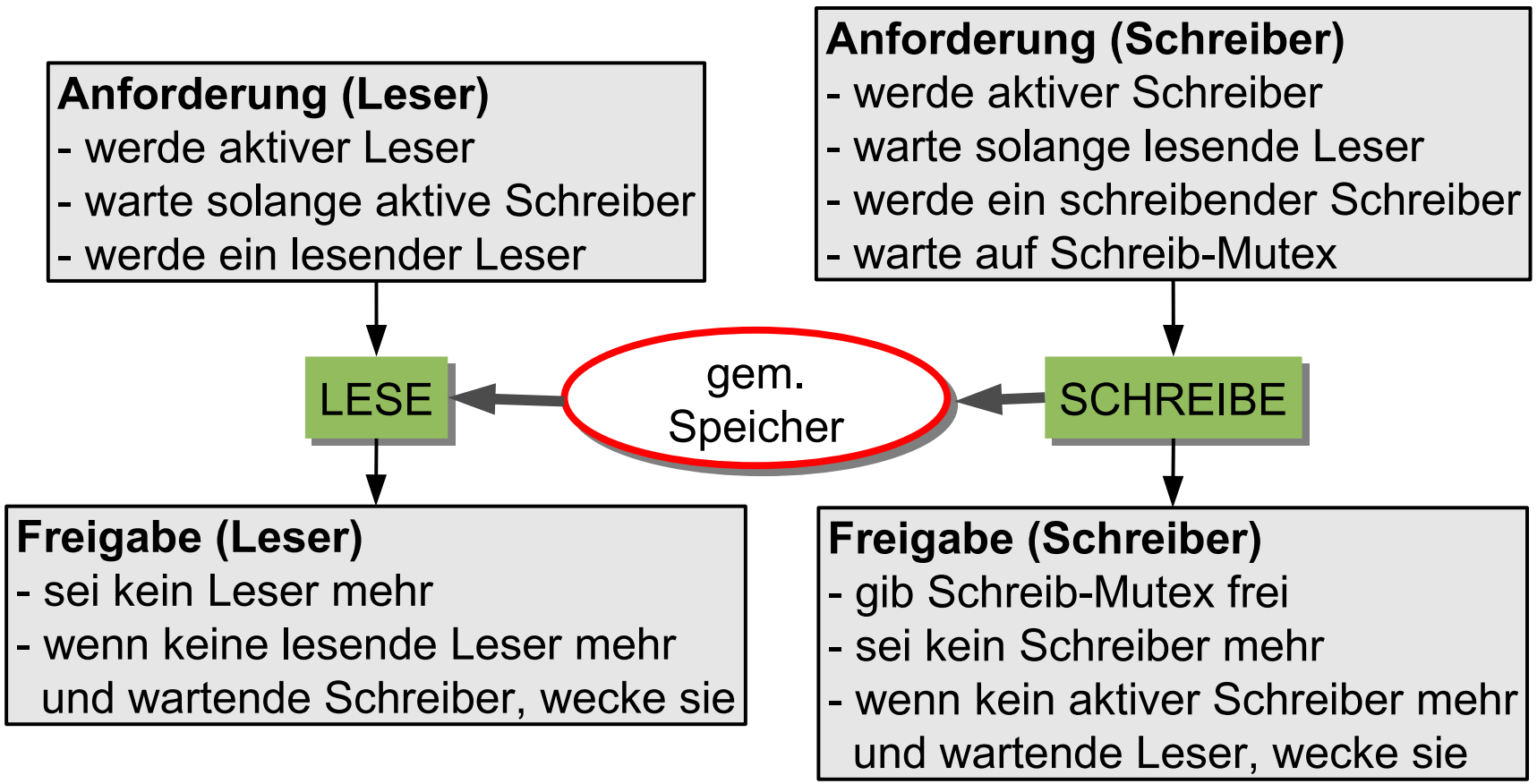
```
// gem. Speicher
Semaphore     resource(N); // N>1
SomeResource  shared;
```

sonst wie beim gegenseitigen Ausschluss

Semaphore – komplexere Interaktionen

Leser/Schreiber-Problem

- Schreiber benötigen den Speicher exklusiv
- mehrere Leser können gleichzeitig arbeiten



Semaphore – Leser/Schreiber-Problem

```
// Anforderung (Leser)
mutex.p();
ar++; // aktive Leser
if (aw==0) {
  rr++; // lesende Leser
  read.v();
}
mutex.v();
read.p();
```

```
// Anforderung (Schreiber)
mutex.p();
aw++; // aktive Schreiber
if (rr==0) {
  ww++; // schreibende S.
  write.v();
}
mutex.v();
write.p();
w_mutex.p();
```

```
// Freigabe (Leser)
mutex.p();
ar--; rr--;
while (rr==0 && ww<aw) {
  ww++;
  write.v();
}
mutex.v();
```

```
// Freigabe (Schreiber)
w_mutex.v();
mutex.p();
aw--; ww--;
while (aw==0 && rr<ar) {
  rr++;
  read.v();
}
mutex.v();
```

Semaphore – Diskussion

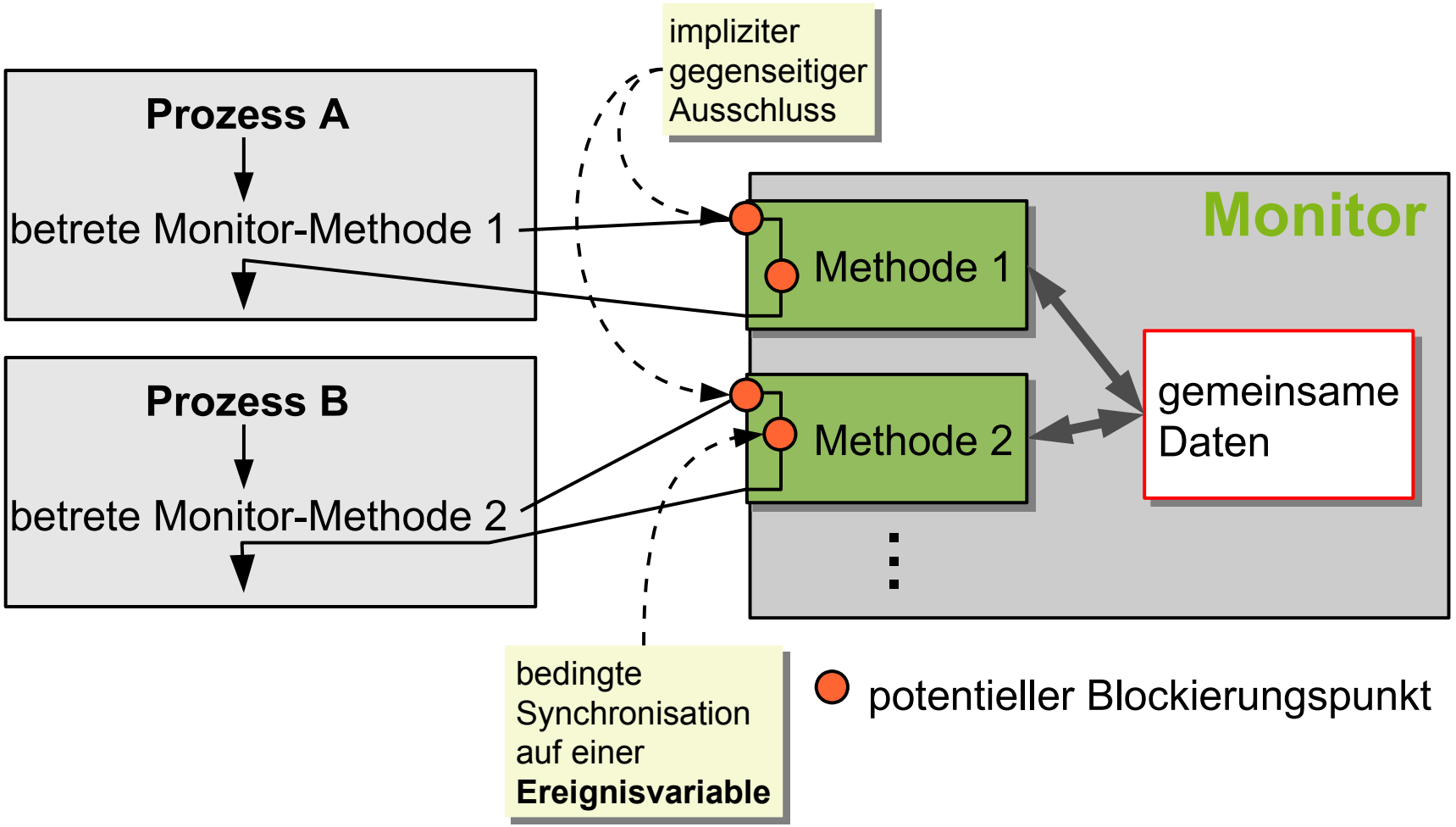
- **Erweiterungen**
  - nicht-blockierendes p()
  - *Timeout*
  - Felder von Zählern
- **Fehlerquellen**
  - Semaphorbenutzung wird nicht erzwungen
  - Abhängigkeit kooperierender Prozesse
    - jeder muss die Protokolle exakt einhalten
  - Aufwand bei der Implementierung

➔ **Unterstützung durch die Programmiersprache**

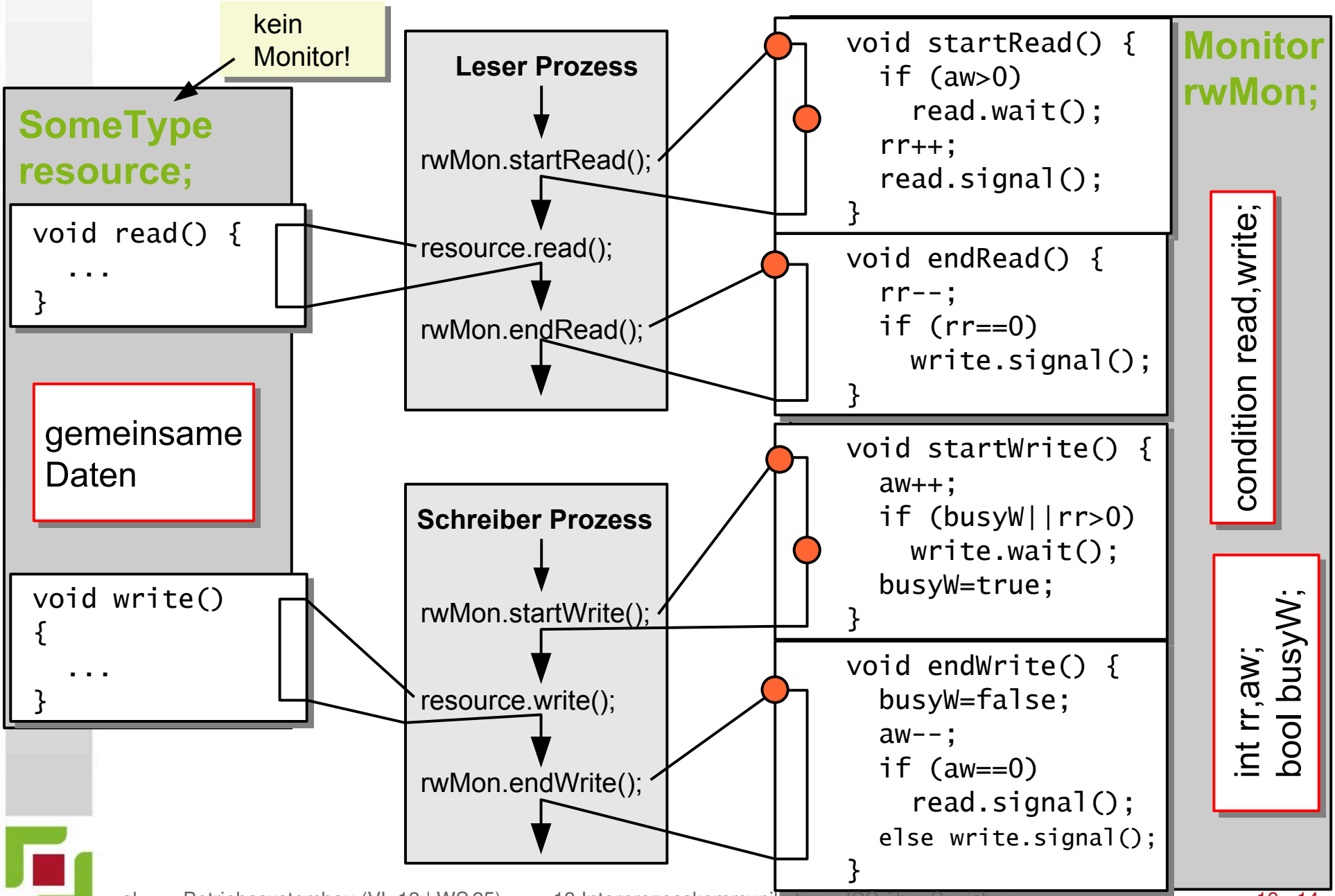
- Korrekte Synchronisation wird erzwungen

Monitore – synchronisierte ADTs [1]

- **Ansatz:** Abstrakte Datentypen werden mit Synchronisationseigenschaften gekoppelt



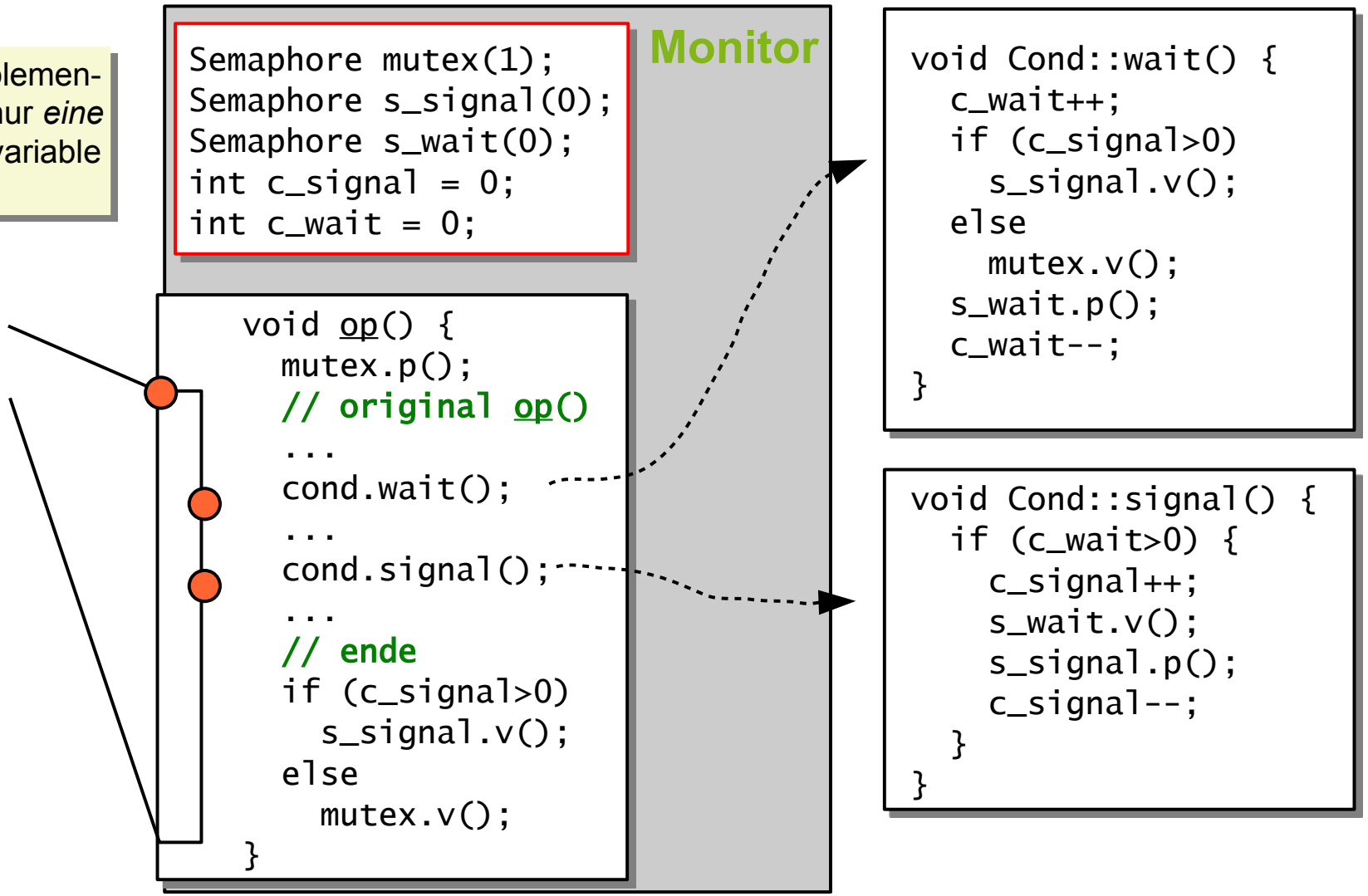
Monitore – Leser/Schreiber-Problem



Monitore – Implementierung

- ... auf Basis von Semaphoren

einfache Implementierung, die nur *eine* Bedingungsvariable unterstützt.



Monitore – Diskussion

- Einschränkung der Nebenläufigkeit auf vollständigen gegenseitigen Ausschluss.
  - in Java daher 'synchronized' auch für einzelne Methoden
- Kopplung von logischer Struktur und Synchronisation ist jedoch nicht immer natürlich.
  - siehe Leser/Schreiber Beispiel
  - gleiches Problem wie beim Semaphor: Programmierer müssen ein Protokoll einhalten

➔ Die Synchronisation sollte von der Organisation der Daten und Methoden besser getrennt werden.

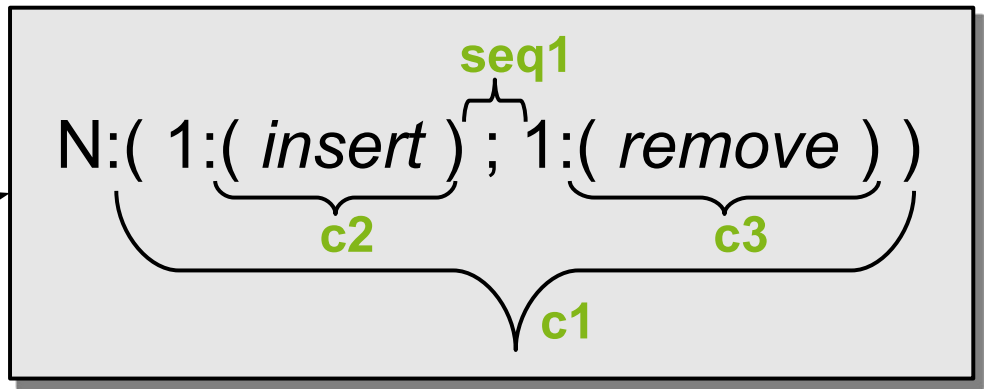
Pfadausdrücke [2]

- **Idee:** flexible Ausdrücke beschreiben erlaubte Reihenfolgen und den Grad der Nebenläufigkeit
- **path** *name1*, *name2*, *name3* **end**
  - bel. Reihenfolge und bel. nebenläufige Ausführung von *name1-3*
- **path** *name1*; *name2* **end**
  - vor jeder Ausführung von *name2* mindestens einmal *name1*
- **path** *name1* + *name2* **end**
  - alternative Ausführung: entweder *name1* oder *name2*
- **path** 2:(*Pfadausdruck*) **end**
  - max. 2 Kontrollflüsse dürfen gleichzeitig im *Pfadausdruck* sein
- **path** N:(1:(insert); 1:(remove)) **end**
  - z.B. Synchronisation eines N-elementigen Puffers
    - gegenseitiger Ausschluss während *insert* und *remove*
    - vor jedem *remove* muss mindestens ein *insert* erfolgt sein
    - nie mehr als N abgeschlossene *insert*-Operationen

Pfadausdrücke – Implementierung (1)

- Transformation in Zustandsautomaten
  - Zustandsänderung bei Ein-/Austritt in die/aus der Operation
- Beispiel:

für jedes '*X*:(..)' und ';' wird ein Zähler eingeführt.




```
int c1=0;
int c2=0;
int c3=0;
int
seq1=0;
```

```
bool mayInsert () {
  return c1<N && c2<1;
}

void startInsert () {
  c1++; c2++;
}

void endInsert () {
  c2--; seq1++;
}
```

```
bool mayRemove () {
  return c1<N && seq1>0 && c3<1;
}

void startRemove () {
  c3++; seq1--;
}

void endRemove () {
  c3--; c1--;
}
```

Pfadausdrücke – Implementierung (2)

- Transformation der Operationen

für jede Operation wird ein Semaphor und ein Zähler eingeführt.

N:(1:(*insert*) ; 1:(*remove*))

sem1/csem1 sem2/csem2

```
Semaphore mutex(1);
int csem1=0;
Semaphore sem1(0);
int csem2=0;
Semaphore sem2(0);
```

```
void Insert() {
  mutex.p();
  if (!mayInsert()) {
    csem1++;
    mutex.v();
    sem1.wait();
  }
  startInsert();
  mutex.v();
  // original insert-Code
  mutex.p();
  endInsert();
  if (!wakeup())
    mutex.v();
}
```

```
bool wakeup() {
  if (csem1>0 &&
    mayInsert()) {
    csem1--;
    sem1.v();
    return true;
  }
  if (csem2>0 &&
    mayRemove()) {
    csem2--;
    sem2.v();
    return true;
  }
  return false;
}
```

Pfadausdrücke – Diskussion

Vorteile

- komplexere Interaktionsmuster als mit Monitoren möglich
  - read + 1: write
- Einhaltung der Interaktionsprotokolle wird erzwungen
  - weniger Fehler!

Nachteile

- Synchronisationsverhalten kann nicht von Zustandsvariablen oder Parametern abhängen
  - Erweiterung: Pfadausdrücke mit Prädikaten
- Synchronisation des Zustandsautomaten kann Flaschenhals werden
- keine Unterstützung für Pfadausdrücke in gebräuchlichen Programmiersprachen

Agenda

- Prüfungen
- Einordnung
- IPC über Speicher
- IPC über Nachrichten
- Basisabstraktionen
- Trennung der Belange mit AOP
- Zusammenfassung

IPC über Nachrichten

- **Anwendungsfälle/Voraussetzungen**
  - IPC über Rechnergrenzen
  - Interaktion isolierter Prozesse
- **positive Eigenschaften:**
  - einheitliches Paradigma für IPC mit lokalen und entfernten Prozessen
  - ggf. Pufferung und Synchronisation
  - Indirektion erlaubt transparente Protokollerweiterungen
    - Verschlüsselung, Fehlerkorrektur, ...
  - Hochsprachenmechanismen wie OO-Nachrichten oder Prozeduraufrufe lassen sich gut auf IPC über Nachrichten abbilden (RPC, RMI)

Nachrichtenbasierte Kommunikation

- Bekannt (aus BS):
  Variationen von `send()` und `receive()`
  - synchron/asynchron (blockierend/nicht blockierend)
  - gepuffert/ungepuffert
  - direkt/indirekt
  - feste Nachrichtengröße/variable Größe
  - symmetrische/asymmetrische Kommunikation
  - mit/ohne *Timeout*
  - *Broadcast/Multicast*

Agenda

- Prüfungen
- Einordnung
- IPC über Speicher
- IPC über Nachrichten
- Basisabstraktionen
  - Windows/Unix/...
  - Dualität der Konzepte
- Trennung der Belange mit AOP
- Zusammenfassung

Basisabstraktionen

- Welche **IPC-Basisabstraktionen** bieten Betriebssysteme?
  - UNIX-Systeme: Sockets, System V Semaphore, Messages, Shared Memory
  - Windows NT/2000/XP: Shared Memory, Events, Semaphore, Mutant (Mutex), Sockets, Pipes, Named Pipes, Mailslots, ...
  - Mach: Nachrichten an Ports und Shared Memory (mit *Copy on Write*)
- Welche **Mechanismen** nutzen die Systeme i.d.R. intern?
  - Semaphore erlauben gegenseitigen Ausschluss und einseitige Synchronisation, also sehr häufige Anwendungsfälle
    - werden praktisch immer benutzt
  - Mikrokerne und verteilte Betriebssysteme: Nachrichten
  - Monolithische Systeme: Semaphore und gemeinsamen Speicher

Dualität – Nachrichten in gemeinsamem Speicher

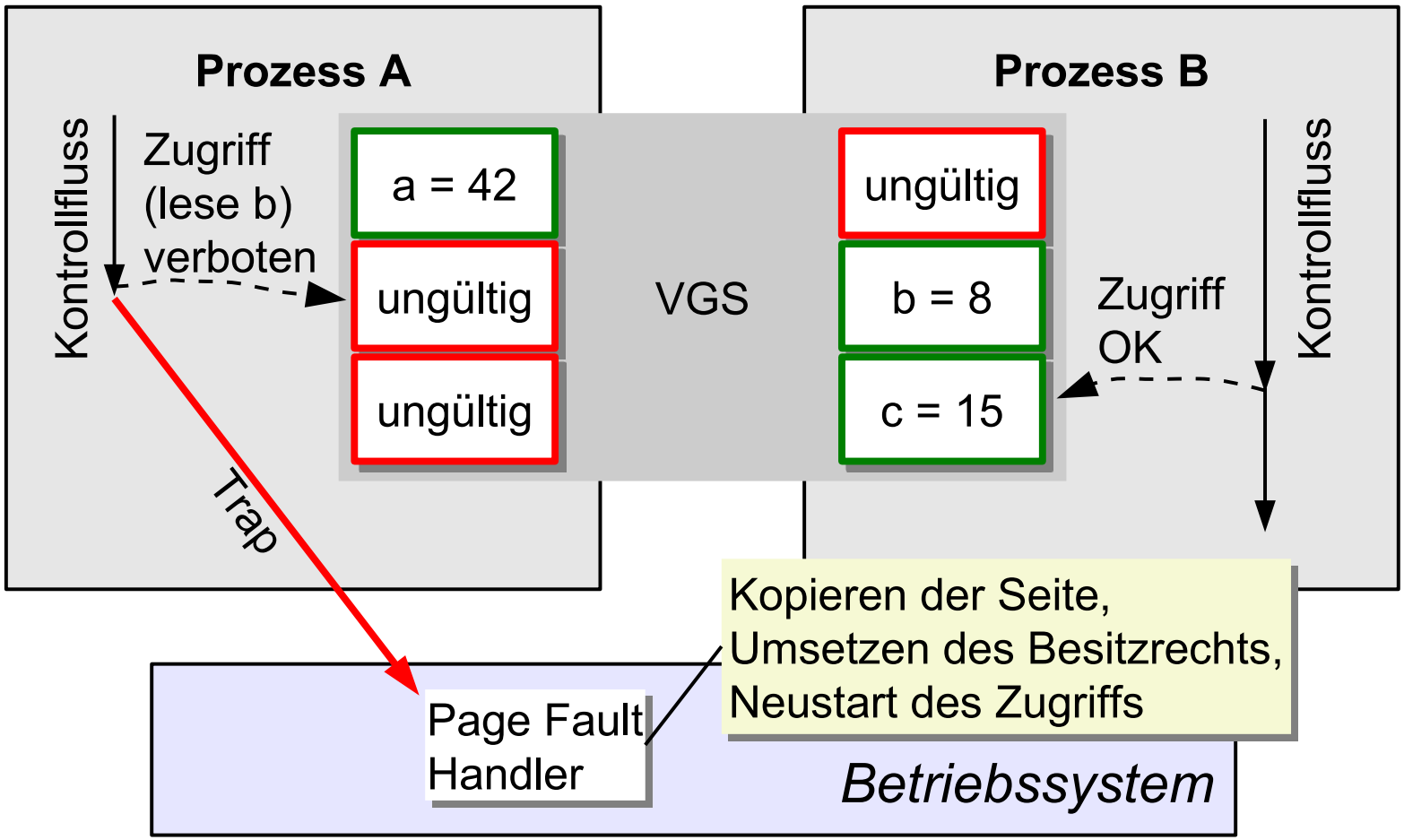
- Auf Basis von Semaphoren und gemeinsamem Speicher lässt sich leicht eine *Mailbox*-Abstraktion realisieren:

- Nachrichten werden nicht kopiert
  - Sender sorgt für Speicher
- `receive` blockiert ggf.
- Mailbox-Abstraktion erlaubt M:N IPC

```
class Mailbox : public List {
  Semaphore mutex;    // (1)
  Semaphore has_elem; // (0)
public:
  Mailbox() : mutex(1), has_elem(0) {}
  void send(Message *msg) {
    mutex.p();
    enqueue(msg); // aus List
    mutex.v();
    has_elem.v();
  }
  Message *receive() {
    has_elem.p();
    mutex.p();
    Message *result = dequeue (); // List
    mutex.v();
    return result;
  }
};
```

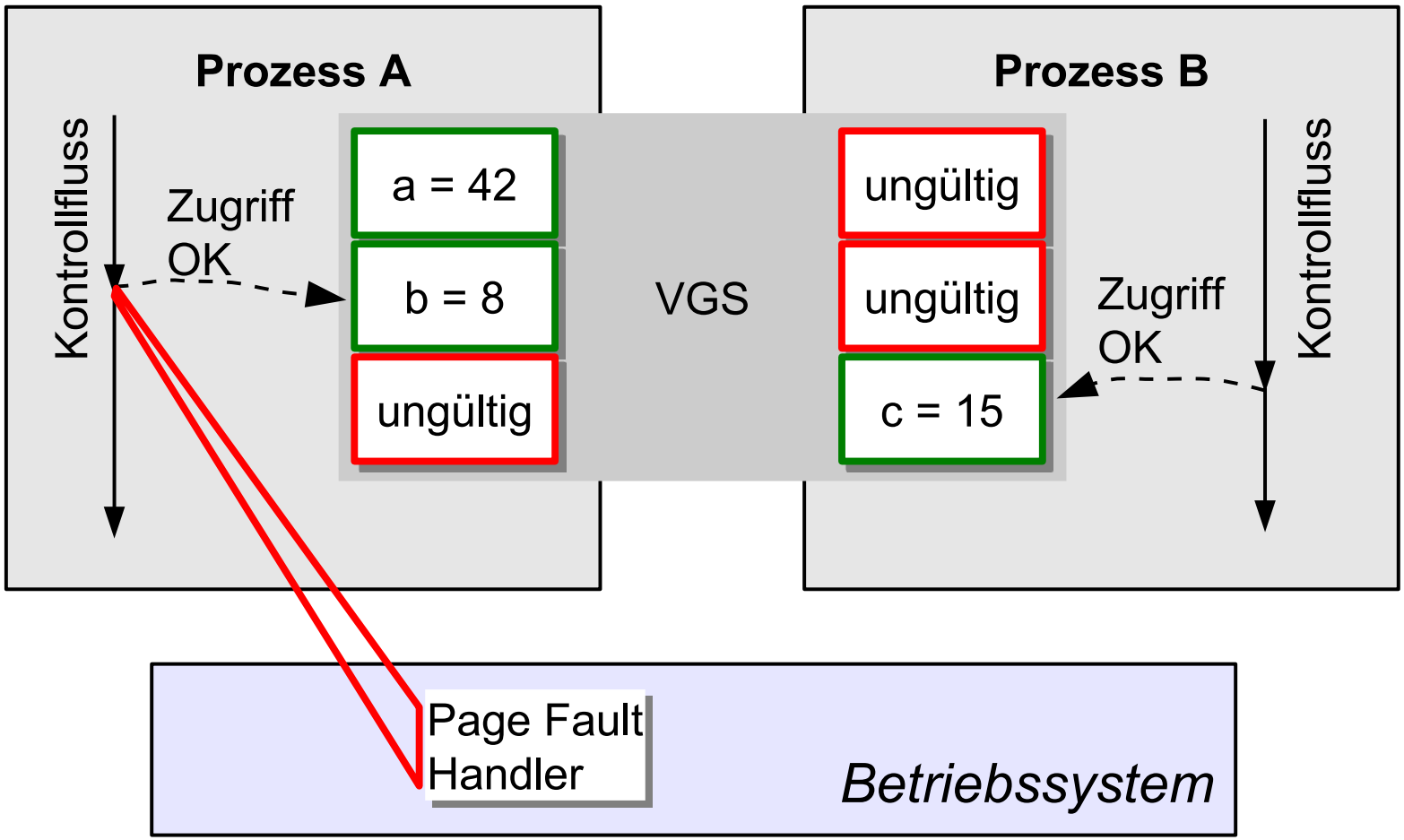
Dualität – Gemeinsamer Speicher mit Nachrichten

- „Virtueller gemeinsamer Speicher“ (VGS [3])



Dualität – Gemeinsamer Speicher mit Nachrichten

- „Virtueller gemeinsamer Speicher“ (VGS [3])



Dualität – VGS Diskussion

- Verteilter virtueller gemeinsamer Speicher ermöglicht...
  - das Programmiermodell von Multiprozessoren auf Mehrrechnersystemen zu nutzen
  - IPC über (virtuellen) gemeinsamen Speicher trotz getrennter Adressräume
- **Probleme:**
  - Latenzen der Kommunikation und Trap-Behandlung
  - „*false sharing*“ - Seitengröße entspricht nicht Objektgröße
- **Lösungsansätze:**
  - schwache Konsistenzmodelle, z.B.:
    - nicht jeder Zugriff führt zu einem Trap, veraltete Werte werden in Kauf genommen
  - Änderungen asynchron per *Broad-/Multicast* verbreiten

Dualität – Aktive Objekte

- Objekte mit Kontrollfluss
- gut geeignet zur Zugriffssynchronisation in Systemen mit nachrichtenbasierter IPC

```
void client1() {
  Message msg(DO_THIS);
  send(srv, msg);
}
```

```
void client2() {
  Message msg(DO_THAT);
  send(srv, msg);
}
```

Gegenseitiger Ausschluss durch die Verarbeitungsschleife wird garantiert. Durch das synchrone `send()` blockiert ein Client solange der Server noch beschäftigt ist.

→ genau wie ein **Monitor**

```
class Server : public ActiveObject {
  Msg msg; // Nachrichtenpuffer
public:
  ...
  // Objekt mit Kontrollfluss!
  void action() {
    while (true) {
      receive(ANY, msg); // empfange Nachr.
      switch (msg.type()) {
        case DO_THIS:  doThis(); break;
        case DO_THAT:  doThat(); break;
        default:       handleError();
      }
      reply(msg);
    }
  }
};
```

Dualität – Aktive Objekte

- Leser/Schreiber Problem mit Nachrichtenaustausch

```
void reader() {
  Msg start_read(START_READ);
  send(srv, start_read);
  Msg read_msg(DO_READ);
  send(srv, read_msg);
  Msg end_read(END_READ);
  send(srv, end_read);
  // benutze Daten in 'read_msg'
}
```

```
void writer() {
  Msg start_write(START_WRITE);
  send(srv, start_write);
  // hier Nachricht füllen
  Msg write_msg(DO_WRITE);
  send(srv, write_msg);
  Msg end_write(END_WRITE);
  send(srv, end_write);
}
```

```
class RWServer : public ActiveObject {
  Msg msg; // Nachrichtenpuffer
public:
  ...
  // Kontrollfluss
  void action() {
    while (true) {
      receive(ANY, msg); // empfange N.
      switch (msg.type()) {
      case START_READ:  startRead();  break;
      case DO_READ:     doRead();     break;
      case END_READ:    endRead();    break;
      case START_WRITE: startWrite(); break;
      case DO_WRITE:    doWrite();    break;
      case END_WRITE:   endWrite();   break;
      default: msg.type(ERROR); reply(msg);
      }
    }
  }
};
```

Dualität – Aktive Objekte

- Leser/Schreiber Problem mit Nachrichtenaustausch
  - die eigentliche Lese- und Schreiboperation erfolgt nebenläufig durch einen Kindprozess

die 'request' Nachricht muss kopiert werden, da sie während der Ausführung des Kindprozesses überschrieben werden könnte

```
void RWServer::doRead() {
  Msg copy=msg;
  if (fork()==0) {
    // das eigentliche Lesen
    copy.set(...) // Antwort
    reply(copy);
  }
  else {
  } // Elternprozess: nichts
}
```

```
void RWServer::doWrite() {
  Msg copy=msg;
  if (fork()==0) {
    // das eigentlich
Schreiben
    // (benutzt 'copy')
    reply(copy);
  }
  else {
  } // Elternprozess: nichts
}
```

der Server-Prozess kann sofort wieder auf 'requests' warten

Dualität – Aktive Objekte

- Leser/Schreiber Problem mit Nachrichtenaustausch

```
void RWServer::startRead() {
  ar++;
  if (aw>0)
    read.copy_enqueue(msg);
  else {
    rr++; reply(msg);
  }
}

void RWServer::endRead() {
  ar--; rr--;
  if (rr==0 && aw>0) {
    Msg wmsg=write.dequeue();
    ww++; reply(wmsg);
  }
  reply(msg);
}
```

```
void RWServer::startWrite() {
  aw++;
  if (ww>0 || rr>0)
    write.copy_enqueue(msg);
  else {
    ww++; reply(msg);
  }
}

void RWServer::endWrite() {
  aw--; ww--;
  if (aw>0) {
    Msg wmsg=write.dequeue();
    ww++; reply(wmsg);
  }
  else while (rr < ar) {
    Msg rmsg=read.dequeue();
    rr++; reply(rmsg);
  }
  reply(msg);
}
```

Ergebnis: Die Semantik / Parallelität entspricht der Monitor-basierten Implementierung.

Dualität – Diskussion

- Gibt es einen fundamentalen Unterschied zwischen IPC über gem. Speicher und IPC über Nachrichten?
  - zugespitzt: sind oder prozedurorientierte BS (Monolithen) oder prozessorientierte BS (Mikrokerne) besser?
- Beispiel: Leser/Schreiber Monitor vs. *Server*:
  - Monitor: 2 potentielle Wartepunkte
    - Client wird verzögert für gegenseitigen Ausschluss.
    - Client wird ggf. wegen einer Ereignisvariablen weiter verzögert.
  - *Server*: 2 potentielle Wartepunkte
    - *Reply* wird verzögert, da der *Server* noch andere *Requests* bearbeitet.
    - *Reply* wird ggf. weiter verzögert, wenn der *Request* in eine Warteschlange gehängt werden muss.
- Fazit: Dualität in Synchronisation und Nebenläufigkeit [4]

Agenda

- Prüfungen
- Einordnung
- IPC über Speicher
- IPC über Nachrichten
- Basisabstraktionen
- Trennung der Belange mit AOP
- Zusammenfassung

Trennung der Belange mittels AOP

- „Aspektorientierte Programmierung“ erlaubt die *modulare* Implementierung „querschneidender“ Belange
- Beispiel in AspectC++:

```
// Festlegung der Monitore des Systems
pointcut monitors() = "FileTable"||"BufferCache";

// Synchronisation per Aspekt
aspect MonitorSynch {
  advice monitors() : slice struct {
    Semaphore _mutex;
  };
  advice construction(monitors()) : before() {
    tjp->that()->_mutex.init(1);
  }
  advice execution(monitors()) : around() {
    tjp->that()->_mutex.p(); // Monitor sperren
    tjp->proceed();          // Fkt. ausführen
    tjp->that()->_mutex.v(); // Monitor freigeben
  }
};
```

"Einfügung" eines Semaphors in die Monitor-Klassen

"Code-Advice" für Ereignisse im Programmablauf

Agenda

- Prüfungen
- Einordnung
- IPC über Speicher
- IPC über Nachrichten
- Basisabstraktionen
- Trennung der Belange mit AOP
- Zusammenfassung

Zusammenfassung und Ausblick

- Es gibt zwei Hauptklassen von IPC Mechanismen:
  - IPC über gemeinsamen Speicher
  - nachrichtenbasierte IPC
- Mechanismen beider Klassen sind in realen Betriebssystemen anzutreffen
  - Sprachmechanismen wie Monitore und Pfadausdrücke können bei der BS-Entwicklung allerdings i.d.R. nicht verwendet werden
- Bzgl. des Synchronisationsverhaltens und dem Grad der Nebenläufigkeit zeichnet sich keine Klasse besonders aus
  - Vor- und Nachteile liegen woanders
  - Ausblick: mit AOP Techniken könnte man von den konkreten Kommunikations- und Synchronisations*mechanismen* abstrahieren

Literatur

[1] C. A. R. Hoare, Monitor – An Operating System Structuring Concept, Communications of the ACM 17, 10, S. 549-557, 1974

[2] R. H. Campbell and A. N. Habermann, The Specification of Process Synchronization by Path Expressions, Lecture Note in Computer Science 16, Springer, 1974

[3] K. Li, Shared Virtual Memory on Loosely Coupled Multiprocessors, PhD Thesis, Yale University, 1986

[4] Lauer, H. C. and Needham, R. M. 1979. On the duality of operating system structures. SIGOPS Oper. Syst. Rev. 13, 2 (Apr. 1979), 3-19