

Concurrent Haskell

Prof. Dr. David Sabel

LFE Theoretische Informatik



- 1 Einleitung
- 2 Primitive von Concurrent Haskell
- 3 Beispiele zur Programmierung
- 4 Nichtdeterministische Operatoren
- 5 Futures und die Async-Bibliothek

Concurrent Haskell

- Erweiterung von Haskell um Nebenläufigkeit
- Integriert in das monadische IO
- Beachte: Das Welt-Modell passt nicht
- Besseres Modell: Operationale Semantik direkt angeben

Concurrent Haskell (2)

- Neue Konstrukte in Bibliothek: Control.Concurrent
- zum Erzeugen nebenläufiger Threads:
 - eine neue primitive Operation
- zur Kommunikation / Synchronisation von Threads
 - ein neuer Datentyp mit drei primitiven Operationen

Erzeugen eines nebenläufigen Threads

`forkIO :: IO () -> IO ThreadId`

- `forkIO t` führt Aktion `t` in nebenläufigem Thread aus
- im Hauptthread: `sofortiges` Ergebnis = eindeutige ID
- Hauptthread läuft weiter
- Ende des Hauptthreads `beendet` alle nebenläufigen
- `killThread :: ThreadId -> IO ()`

Beispiel: Zweimal Echo

```
echo i = do
  putStr $ "Eingabe fuer Thread" ++ show i ++ ":"
  line <- getLine
  putStrLn $ "Letzte Eingabe fuer Thread" ++ show i ++ ":" ++ line
  echo i
```

```
zweiEchos = do
  forkIO (echo 1)
  forkIO (echo 2)
  block -- Hauptthread blockieren
```

```
block = do block
```

Der Datentyp MVar

MVar (mutable variable) = Bounded Buffer der Größe 1

Basisoperationen:

- `newEmptyMVar :: IO (MVar a)`
erzeugt leere MVar

Der Datentyp MVar

MVar (mutable variable) = Bounded Buffer der Größe 1

Basisoperationen:

- `newEmptyMVar :: IO (MVar a)`
erzeugt leere MVar
- `takeMVar :: MVar a -> IO a`
 - liest Wert aus MVar, danach ist die MVar leer
 - falls MVar vorher leer: Thread wartet
 - Bei mehreren Threads: FIFO-Warteschlange

Der Datentyp MVar

MVar (mutable variable) = Bounded Buffer der Größe 1

Basisoperationen:

- `newEmptyMVar :: IO (MVar a)`
erzeugt leere MVar
- `takeMVar :: MVar a -> IO a`
 - liest Wert aus MVar, danach ist die MVar leer
 - falls MVar vorher leer: Thread wartet
 - Bei mehreren Threads: FIFO-Warteschlange
- `putMVar :: MVar a -> a -> IO ()`
 - speichert Wert in der MVar, **wenn** diese **leer** ist
 - Falls belegt: Thread wartet
 - Bei mehreren Threads: FIFO-Warteschlange

Der Datentyp MVar (2)

MVar	takeMVar
leer	warten
gefüllt	lesen

MVar	putMVar
leer	schreiben
gefüllt	warten

Darstellung:



Leere MVar



Volle MVar

MVars zur Synchronisation

Main-Thread wartet auf nebenläufige Threads:

```
main = do
    syncT1 <- newEmptyMVar
    syncT2 <- newEmptyMVar
    forkIO (thread1 >> putMVar syncT1 ())
    forkIO (thread2 >> putMVar syncT2 ())
    takeMVar syncT1
    takeMVar syncT2

thread1 = ...
thread2 = ...
```

MVars zum Schützen von Daten

Zähler mit atomarer Operation zum Inkrementieren

```
type Counter = MVar Int
```

```
atomicIncrement m = do  
  r <- takeMVar m  
  putMVar m (r+1)
```

MVars zum Schützen von Kritischen Abschnitten

```
takeMVar mutex  
... kritischer Abschnitt ...  
putMVar mutex ()
```

Dabei ist `mutex` eine mit `()` gefüllte `MVar` vom Typ `MVar ()`
Analog geht auch (wenn `mutex` am Anfang leer)

```
putMVar mutex ()  
... kritischer Abschnitt ...  
takeMVar mutex
```

MVars als binärer Semaphor

```
type Semaphore = MVar ()

newSem      :: IO Semaphore
newSem      = newEmptyMVar

wait        :: Semaphore -> IO ()
wait sem    = takeMVar sem

signal      :: Semaphore -> IO ()
signal sem  = putMVar sem ()
```

- `newSem` “erzeugt Semaphor mit 0 initialisiert”
(= leere MVar)
- `wait` blockiert leere MVar (also wenn $k = 0$)
- `signal` füllt MVar, wenn es blockierte Prozesse gibt, kann einer `wait` durchführen
- `signal` bei voller MVar blockiert (bei binären Semaphore: undefiniert)

Schützen kritischer Abschnitte mit Semaphor

```
echoS sem i =
  do
    wait sem
    putStr $ "Eingabe fuer Thread" ++ show i ++ ":"
    line <- getLine
    signal sem
    wait sem
    putStrLn $ "Letzte Eingabe fuer Thread" ++ show i ++ ":" ++ line
    signal sem
    echoS sem i

zweiEchosS = do
  sem <- newSem
  signal sem
  forkIO (echoS sem 1)
  forkIO (echoS sem 2)
  block
```

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus `take` und `put`)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von `takeMVar`
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von `putMVar`
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus take und put)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von takeMVar
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von putMVar
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus take und put)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von takeMVar
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von putMVar
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus take und put)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von `takeMVar`
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von `putMVar`
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus take und put)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von takeMVar
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von putMVar
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus take und put)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von takeMVar
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von putMVar
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Bibliotheksfunktionen für MVar's

- `newMVar :: a -> IO (MVar a)`
Erzeugt eine gefüllte MVar
- `readMVar :: MVar a -> IO a`
Liest den Wert einer MVar (Kombination aus take und put)
- `swapMVar :: MVar a -> a -> IO a`
Tauscht den Wert einer MVar aus (Race Condition möglich)
- `tryTakeMVar :: MVar a -> IO (Maybe a)`
Nicht-blockierende Version von takeMVar
- `tryPutMVar :: MVar a -> a -> IO Bool`
Nicht-blockierende Version von putMVar
- `isEmptyMVar :: MVar a -> IO Bool`
Testet, ob MVar leer ist
- `modifyMVar_ :: MVar a -> (a -> IO a) -> IO ()`
Funktion anwenden auf den Inhalt einer MVar. Sicher bei Exceptions: Tritt ein Fehler auf, bleibt der alte Wert erhalten

Weitere Funktionalitäten in Concurrent Haskell

- `forkIO :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt: Einen neuen “lightweight thread”: Verwaltung durch das Laufzeitsystem
- `forkOS :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt einen “bound thread”: Verwaltung durch das Betriebssystem
- `killThread :: ThreadId -> IO ()`
beendet den Thread. Wenn Thread schon beendet, kein Effekt.
- `yield :: IO ()`
Forciert einen Context-Switch: Der aktuelle Thread wird von aktiv auf bereit gesetzt. Ein anderer Thread darf Schritte machen.
- `threadDelay :: Int -> IO ()`
Verzögert den aufrufenden Thread um die gegebene Zahl an Mikrosekunden.

Weitere Funktionalitäten in Concurrent Haskell

- `forkIO :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt: Einen neuen “lightweight thread”: Verwaltung durch das Laufzeitsystem
- `forkOS :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt einen “bound thread”: Verwaltung durch das Betriebssystem
- `killThread :: ThreadId -> IO ()`
beendet den Thread. Wenn Thread schon beendet, kein Effekt.
- `yield :: IO ()`
Forciert einen Context-Switch: Der aktuelle Thread wird von aktiv auf bereit gesetzt. Ein anderer Thread darf Schritte machen.
- `threadDelay :: Int -> IO ()`
Verzögert den aufrufenden Thread um die gegebene Zahl an Mikrosekunden.

Weitere Funktionalitäten in Concurrent Haskell

- `forkIO :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt: Einen neuen “lightweight thread”: Verwaltung durch das Laufzeitsystem
- `forkOS :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt einen “bound thread”: Verwaltung durch das Betriebssystem
- `killThread :: ThreadId -> IO ()`
beendet den Thread. Wenn Thread schon beendet, kein Effekt.
- `yield :: IO ()`
Forciert einen Context-Switch: Der aktuelle Thread wird von aktiv auf bereit gesetzt. Ein anderer Thread darf Schritte machen.
- `threadDelay :: Int -> IO ()`
Verzögert den aufrufenden Thread um die gegebene Zahl an Mikrosekunden.

Weitere Funktionalitäten in Concurrent Haskell

- `forkIO :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt: Einen neuen “lightweight thread”: Verwaltung durch das Laufzeitsystem
- `forkOS :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt einen “bound thread”: Verwaltung durch das Betriebssystem
- `killThread :: ThreadId -> IO ()`
beendet den Thread. Wenn Thread schon beendet, kein Effekt.
- `yield :: IO ()`
Forciert einen Context-Switch: Der aktuelle Thread wird von aktiv auf bereit gesetzt. Ein anderer Thread darf Schritte machen.
- `threadDelay :: Int -> IO ()`
Verzögert den aufrufenden Thread um die gegebene Zahl an Mikrosekunden.

Weitere Funktionalitäten in Concurrent Haskell

- `forkIO :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt: Einen neuen “lightweight thread”: Verwaltung durch das Laufzeitsystem
- `forkOS :: IO () -> IO ThreadId`
Erzeugt einen “bound thread”: Verwaltung durch das Betriebssystem
- `killThread :: ThreadId -> IO ()`
beendet den Thread. Wenn Thread schon beendet, kein Effekt.
- `yield :: IO ()`
Forciert einen Context-Switch: Der aktuelle Thread wird von aktiv auf bereit gesetzt. Ein anderer Thread darf Schritte machen.
- `threadDelay :: Int -> IO ()`
Verzögert den aufrufenden Thread um die gegebene Zahl an Mikrosekunden.

Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer

Erzeuger berechnet Werte und gibt sie an den **Verbraucher**

Synchronität: Erzeuger gibt erst den nächsten Wert, wenn Verbraucher den alten erhalten hat.

Puffer durch MVar: Lässt sich direkt implementieren

- `type Buffer a = MVar a`
- neuer Puffer: `newBuffer = newEmptyMVar`
- schreiben (Erzeuger): `writeToBuffer = putMVar`
- lesen (Verbraucher): `readFromBuffer = takeMVar`

Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar  
writeToBuffer = putMVar  
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```

Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar  
writeToBuffer = putMVar  
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```



Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar  
writeToBuffer = putMVar  
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```

...

Prozess 1

do

```
readFromBuffer buff
```

Prozess 2

do

```
writeToBuffer buff 1
```

```
writeToBuffer buff 2
```

```
writeToBuffer buff 3
```



Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar  
writeToBuffer = putMVar  
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```

```
...
```

Prozess 1

```
do
```

```
  readFromBuffer buff
```

Prozess 2

```
do
```

```
  writeToBuffer buff 1
```

```
  writeToBuffer buff 2
```

```
  writeToBuffer buff 3
```



1

Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar  
writeToBuffer = putMVar  
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```

...

Prozess 1

do

```
  readFromBuffer buff
```

Prozess 2

do

```
  writeToBuffer buff 1
```

```
  writeToBuffer buff 2
```

```
  writeToBuffer buff 3
```



Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar
writeToBuffer = putMVar
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```

```
...
```

Prozess 1

```
do
```

```
  readFromBuffer buff
```

Prozess 2

```
do
```

```
  writeToBuffer buff 1
```

```
  writeToBuffer buff 2
```

```
  writeToBuffer buff 3
```

2

Erzeuger / Verbraucher mit 1-Platz Puffer (2)

```
newBuffer = newEmptyMVar  
writeToBuffer = putMVar  
readFromBuffer = takeMVar
```

```
buff <- newBuffer
```

```
...
```

Prozess 1

```
do
```

```
  readFromBuffer buff
```

Prozess 2

```
do
```

```
  writeToBuffer buff 1
```

```
  writeToBuffer buff 2
```

```
  writeToBuffer buff 3
```

2

MVars zur Verwaltung von Zuständen

- Beispiel aus Buch von Simon Marlow
- Telefonbuch als Map von Name auf Telefonnummer
- Threads greifen auf das Telefonbuch zu
- Zustand wird in einer MVar gespeichert

```
type Name           = String
type Telefonnummer  = String
type Telefonbuch    = Map.Map Name Telefonnummer
type TelefonbuchZustand = MVar Telefonbuch
```

(Map ist eine Datenstruktur aus der Bibliothek `Data.Map`)

MVars zur Verwaltung von Zuständen (2)

```
neu :: IO TelefonbuchZustand
neu = newMVar Map.empty

einfuegen :: TelefonbuchZustand -> Name -> Telefonnummer -> IO ()
einfuegen m name nummer = do
  buch <- takeMVar m
  putMVar m (Map.insert name nummer buch)

nachschaen :: TelefonbuchZustand -> Name -> IO (Maybe Telefonnummer)
nachschaen m name = do
  buch <- takeMVar m
  putMVar m buch
  return (Map.lookup name buch)

mainTel = do
  s <- neu
  sequence_ [einfuegen s ("name" ++ show i) (show i) | i <- [1..10000]]
  nachschaen s "name123" >>= print
  nachschaen s "unkown" >>= print
```

Auswirkungen der call-by-need Auswertung

Beim Einfügen wird in

```
putMVar m (Map.insert name nummer buch)
```

der unausgewertete Ausdruck

```
(Map.insert name nummer buch)
```

in die MVar geschrieben. Kann zu einem **space-leak** führen!

Auswirkungen der call-by-need Auswertung

Beim Einfügen wird in

```
putMVar m (Map.insert name nummer buch)
```

der unausgewertete Ausdruck

```
(Map.insert name nummer buch)
```

in die MVar geschrieben. Kann zu einem **space-leak** führen!

Lösungen:

```
putMVar m $! (Map.insert name nummer buch)
```

Auswirkungen der call-by-need Auswertung

Beim Einfügen wird in

```
putMVar m (Map.insert name nummer buch)
```

der unausgewertete Ausdruck

```
(Map.insert name nummer buch)
```

in die MVar geschrieben. Kann zu einem **space-leak** führen!

Lösungen:

```
putMVar m $! (Map.insert name nummer buch)
```

noch besser:

```
einfuegen m name nummer = do
```

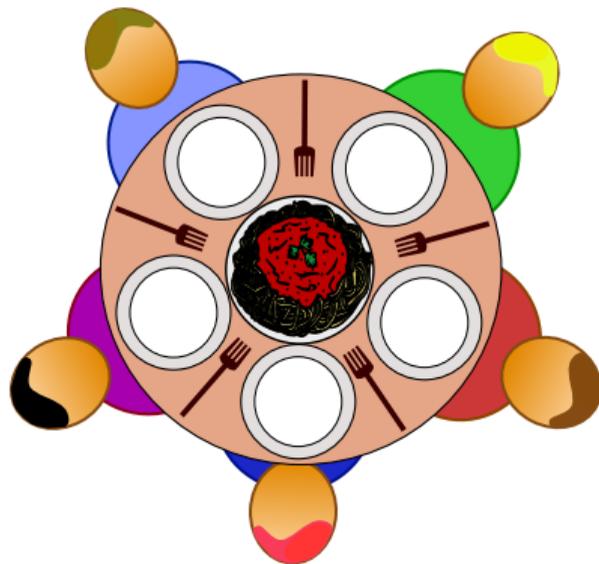
```
  buch <- takeMVar m
```

```
  let buch' = Map.insert name nummer buch
```

```
  putMVar m buch'
```

```
  seq buch' (return ())
```

Speisende Philosophen



Implementierung:

- Eine Gabel durch eine MVar `()`
- Ein Philosoph durch einen Thread

Speisende Philosophen (2)

1. Implementierung: i -ter Philopsoph:

```
philosoph i gabeln =
  do
    let n = length gabeln           -- Anzahl Gabeln
        takeMVar $ gabeln!!i        -- nehme linke Gabel
        putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat linke Gabel ..."
        takeMVar $ gabeln!!(mod (i+1) n) -- nehme rechte Gabel
        putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " isst ..."
        putMVar (gabeln!!i) ()      -- lege linke Gabel ab
        putMVar (gabeln!!(mod (i+1) n)) () -- lege rechte Gabel ab
        putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " denkt ..."
    philosoph i gabeln
```

Speisende Philosophen (3)

1. Implementierung: Erzeugen der Philosophen

```
philosophen n =  
  do  
    -- erzeuge Gabeln (n MVars):  
    gabeln <- sequence $ replicate n (newMVar ())  
    -- erzeuge Philosophen:  
    sequence_ [forkIO (philosoph i gabeln) | i <- [0..n-1]]  
  block
```

Speisende Philosophen (3)

1. Implementierung: Erzeugen der Philosophen

```
philosophen n =  
  do  
    -- erzeuge Gabeln (n MVars):  
    gabeln <- sequence $ replicate n (newMVar ())  
    -- erzeuge Philosophen:  
    sequence_ [forkIO (philosoph i gabeln) | i <- [0..n-1]]  
  block
```

Beachte: Deadlock möglich!

Speisende Philosophen (4)

2. Implementierung: N .-Philosoph in anderer Reihenfolge

```
philosophAsym i gabeln =
  do
    let n = length gabeln -- Anzahl Gabeln
    if length gabeln == i+1 then -- letzter Philosoph
      do takeMVar $ gabeln!!(mod (i+1) n) -- nehme rechte Gabel
         putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat rechte Gabel ..."
         takeMVar $ gabeln!!i -- nehme linke Gabel
         putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat linke Gabel und isst"
    else
      do
        takeMVar $ gabeln!!i -- nehme linke Gabel
        putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat linke Gabel ..."
        takeMVar $ gabeln!!(mod (i+1) n) -- nehme rechte Gabel
        putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat rechte Gabel und isst"
    putMVar (gabeln!!i) () -- lege linke Gabel ab
    putMVar (gabeln!!(mod (i+1) n)) () -- lege rechte Gabel ab
  philosophAsym i gabeln
```

Generelle Semaphore

- Man kann generelle Semaphore mit binären Semaphore implementieren
- Aber: Kodierung ziemlich kompliziert
- Mit Haskell's MVars jedoch leicht
- Implementierung in Bibliothek `Control.Concurrent.QSem`

```
type QSem = MVar (Int, [MVar ()])
```

Generelle Semaphore

- Man kann generelle Semaphore mit binären Semaphore implementieren
- Aber: Kodierung ziemlich kompliziert
- Mit Haskell's MVars jedoch leicht
- Implementierung in Bibliothek `Control.Concurrent.QSem`

```
type QSem = MVar (Int, [MVar ()])
```

- Das Paar `(Int, [MVar ()])` stellt die Komponenten des Semaphores dar: Zahl k und Menge der wartenden Prozesse.
- Warten durch blockieren an MVars
- Die äußere MVar hält dieses Paar. Dadurch ist exklusiver Zugriff auf die Komponenten gesichert.

Generelle Semaphore (2)

Erzeugen einer QSem

```
newQSem :: Int -> IO QSem
newQSem k = do
    sem <- newMVar (k, [])
    return sem
```

Generelle Semaphore (3)

wait-Operation

```
waitQSem :: QSem -> IO ()
waitQSem sem = do
  (k,blocked) <- takeMVar sem
  if k > 0 then
    putMVar sem (k-1,[])
  else do
    block <- newEmptyMVar
    putMVar sem (0, blocked++[block])
    takeMVar block
```

signal-Operation

```
signalQSem :: QSem -> IO ()
signalQSem sem = do
  (k,blocked) <- takeMVar sem
  case blocked of
    [] -> putMVar sem (k+1,[])
    (block:blocked') -> do
      putMVar sem (0,blocked')
      putMVar block ()
```

Speisende Philosophen 3. Implementierung

3. Implementierung: Mit Semaphor Raum

```
philosophRaum i raum gabeln = do
  let n = length gabeln -- Anzahl Gabeln
      waitQSem raum -- genereller Semaphor
  putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " im Raum"
  takeMVar $ gabeln!!i -- nehme linke Gabel
  putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat linke Gabel ..."
  takeMVar $ gabeln!!(mod (i+1) n) -- nehme rechte Gabel
  putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " hat rechte Gabel und isst"
  putMVar (gabeln!!i) () -- lege linke Gabel ab
  putMVar (gabeln!!(mod (i+1) n)) () -- lege rechte Gabel ab
  signalQSem raum
  putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " aus Raum raus"
  putStrLn $ "Philosoph " ++ show i ++ " denkt ..."
philosophRaum i raum gabeln

philosophenRaum n =
do
  gabeln <- sequence $ replicate n (newMVar ())
  raum <- newQSem (n-1)
  sequence [forkIO (philosophRaum i raum gabeln) | i <- [0..n-1]]
block
```

Erweiterte generelle Semaphore

- `wait` und `signal` erhalten zusätzlich eine Zahl.
- Bei `wait` bedeutet die Zahl: Soviel “Ressourcen” müssen vorhanden sein, um entblockiert zu werden
- Bei `signal`: Soviel Ressourcen werden zu den vorhandenen hinzu gegeben.

```
type QSemN = MVar (Int, [(Int, MVar ())])
```

Erweiterte generelle Semaphore

- `wait` und `signal` erhalten zusätzlich eine Zahl.
- Bei `wait` bedeutet die Zahl: Soviel “Ressourcen” müssen vorhanden sein, um entblockiert zu werden
- Bei `signal`: Soviel Ressourcen werden zu den vorhandenen hinzu gegeben.

```
type QSemN = MVar (Int, [(Int, MVar ())])
```

- In der Liste werden nun Paare gespeichert:
 - Zahl, wieviel Ressourcen noch benötigt werden
 - `MVar` zum blockieren.

Erweiterte generelle Semaphore (2)

Erzeugen:

```
newQSemN :: Int -> IO QSemN
newQSemN initial = do
    sem <- newMVar (initial, [])
    return sem
```

Erweiterte generelle Semaphore (3)

Warten:

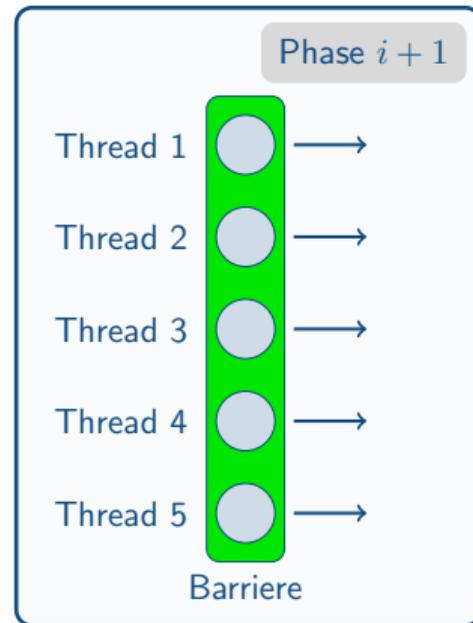
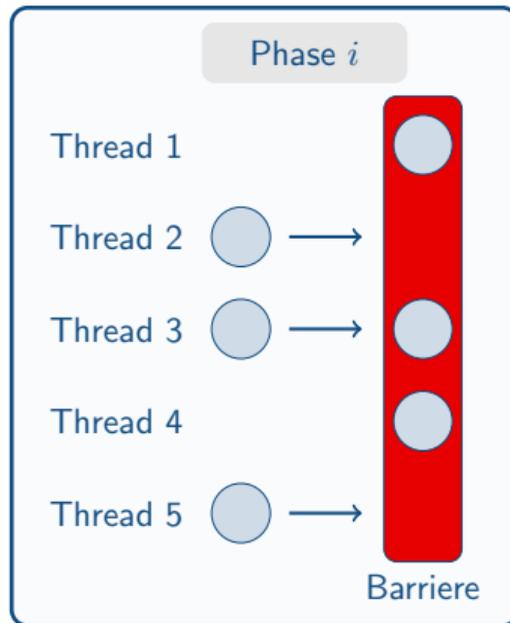
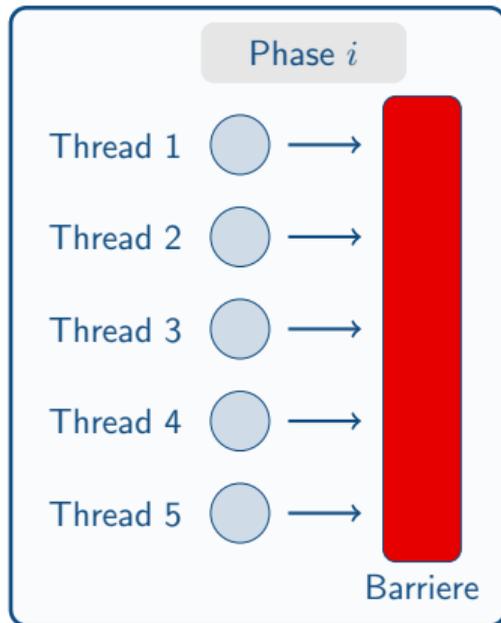
```
waitQSemN :: QSemN -> Int -> IO ()
waitQSemN sem sz = do
  (k,blocked) <- takeMVar sem
  if (k - sz) >= 0 then
    putMVar sem (k-sz,blocked)
  else do
    block <- newEmptyMVar
    putMVar sem (k, blocked++[(sz,block)])
    takeMVar block
```

Erweiterte generelle Semaphore (4)

Signalisieren:

```
signalQSemN :: QSemN -> Int -> IO ()
signalQSemN sem n = do
  (k,blocked)  <- takeMVar sem
  (k',blocked') <- free (k+n) blocked
  putMVar sem (k',blocked')
where
  free k []      = return (k,[])
  free k ((req,block):blocked)
    | k >= req = do
      putMVar block ()
      free (k-req) blocked
    | otherwise = do
      (k',blocked') <- free k blocked
      return (k',(req,block):blocked')
```

Barrierimplementierung mit QSemN



Barrierimplementierung mit QSemN (2)

```
type Barrier = (Int, MVar (Int, QSemN))
```

- Erste Zahl: Anzahl der zu synchronisierenden Prozesse
- Zweite Zahl: Anzahl der aktuell angekommenen Prozesse
- QSemN: Wird benutzt um Prozesse zu blockieren
- MVar: Schützt Zugriff auf aktuelle Anzahl und QSemN

Barrierimplementierung mit QSemN (3)

`newBarrier` erzeugt einen neuen Barrier

```
newBarrier n =  
  do  
    qsem <- newQSemN 0  
    mvar <- newMVar (0,qsem)  
    return (n,mvar)
```

Barrierimplementierung mit QSemN (4)

Die Hauptfunktion ist `synchBarrier`

```
synchBarrier :: Barrier -> IO ()
synchBarrier (maxP, barrier) = do
  (angekommen, qsem) <- takeMVar barrier
  if angekommen+1 < maxP then do
    putMVar barrier (angekommen+1, qsem)
    waitQSemN qsem 1
  else do
    signalQSemN qsem (maxP-1)
    putMVar barrier (0, qsem)
```

Barrierimplementierung mit QSemN (5)

Code für die einzelnen Prozesse ist von der Form

```
prozess_i barrier = do
  -- Code fuer die aktuelle Phase ..
  synchBarrier barrier -- warte auf Synchronisierung
  prozess_i barrier -- starte n\"achste Phase
```

Unbounded Buffer

FIFO-Kanal, an einem Ende schreiben, am anderen Ende lesen

Gewünschte Schnittstelle

- `type Kanal a`
- `neuerKanal :: IO (Kanal a)`
- `schreibe :: Kanal a -> a -> IO ()`
- `lese :: Kanal a -> IO a`

Außerdem: Keine Fehler, wenn mehrere Threads schreiben / lesen.

Unbounded Buffer (2)

Veränderbarer Strom

- ähnlich zu Listen, aber:
- jeder Tail eine MVar (dadurch veränderbar)
- leerer Strom = leere MVar

```
type Strom a = MVar (SCons a)
data SCons a = SCons a (Strom a)
```

Unbounded Buffer (2)

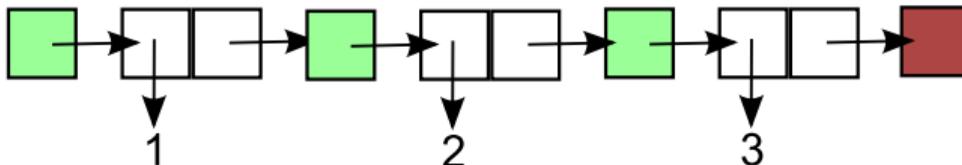
Veränderbarer Strom

- ähnlich zu Listen, aber:
- jeder Tail eine MVar (dadurch veränderbar)
- leerer Strom = leere MVar

```
type Strom a = MVar (SCons a)
data SCons a = SCons a (Strom a)
```

Strom der 1,2 und 3 enthält:

```
do ende <- newEmptyMVar
    drei <- newMVar (SCons 3 ende)
    zwei <- newMVar (SCons 2 drei)
    eins <- newMVar (SCons 1 zwei)
    return eins
```



Auf Strömen operieren

Strom ausdrucken

```
type Strom a = MVar (SCons a)
data SCons a = SCons a (Strom a)

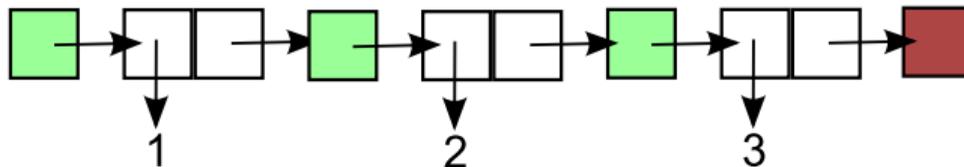
printStrom strom =
  do
    test <- isEmptyMVar strom
    if test then putStrLn "[]" +
    else do
      SCons el tl <- readMVar strom
      putStr (show el ++ ":")
      printStrom tl
```

Auf Strömen operieren

Strom ausdrucken

```
type Strom a = MVar (SCons a)
data SCons a = SCons a (Strom a)

printStrom strom =
  do
    test <- isEmptyMVar strom
    if test then putStrLn "[]"
    else do
      SCons el tl <- readMVar strom
      putStr (show el ++ ":")
      printStrom tl
```

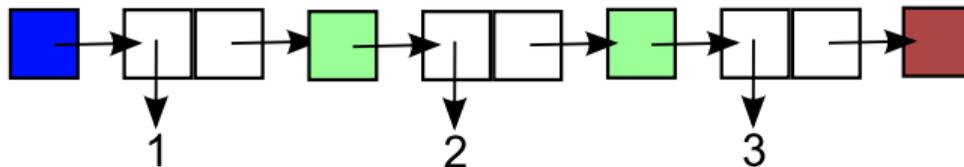


Auf Strömen operieren

Strom ausdrucken

```
type Strom a = MVar (SCons a)
data SCons a = SCons a (Strom a)

printStrom strom =
  do
    test <- isEmptyMVar strom
    if test then putStrLn "[]"
    else do
      SCons el tl <- readMVar strom
      putStr (show el ++ ":")
      printStrom tl
```

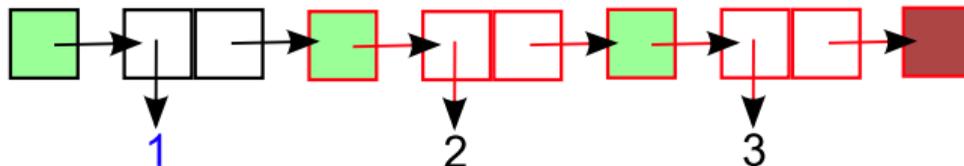


Auf Strömen operieren

Strom ausdrucken

```
type Strom a = MVar (SCons a)
data SCons a = SCons a (Strom a)

printStrom strom =
  do
    test <- isEmptyMVar strom
    if test then putStrLn "[]"
    else do
      SCons el tl <- readMVar strom
      putStr (show el ++ ":")
      printStrom tl
```



Ströme aneinanderhängen

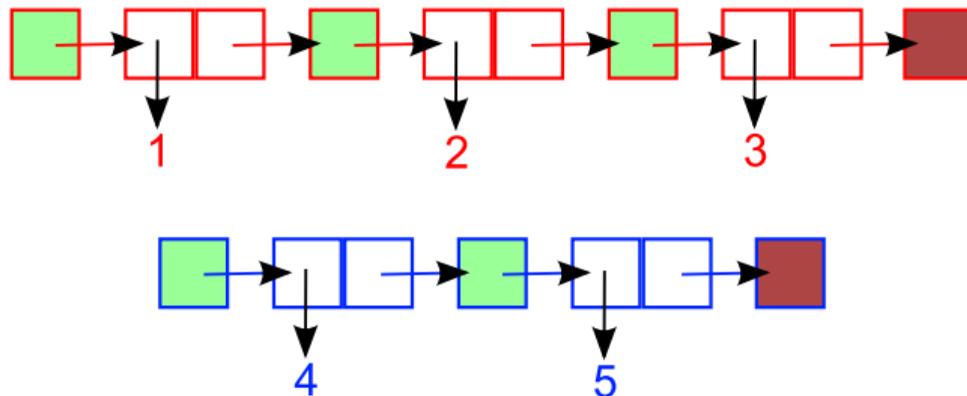
```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```

Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

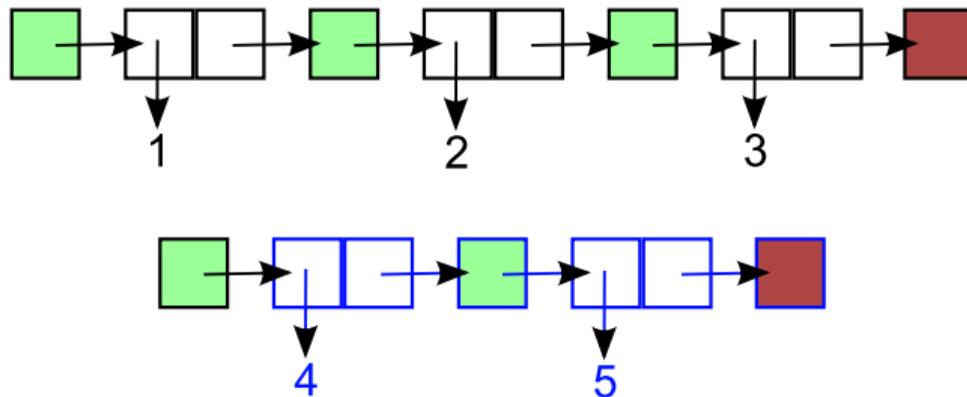
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

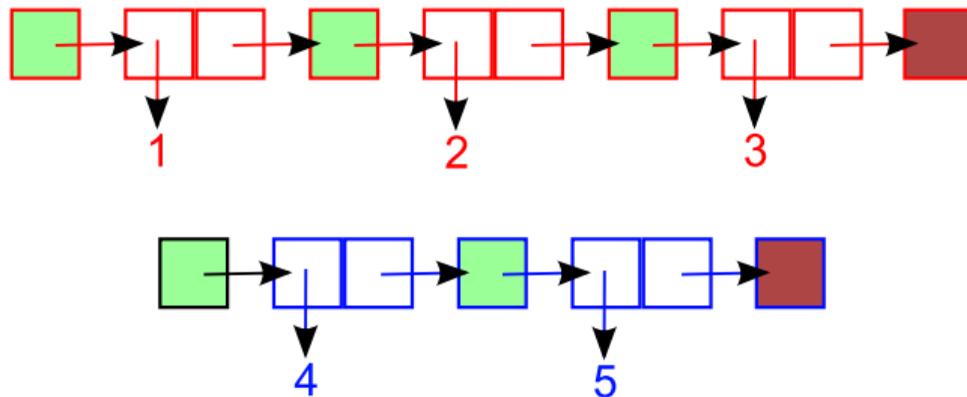
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

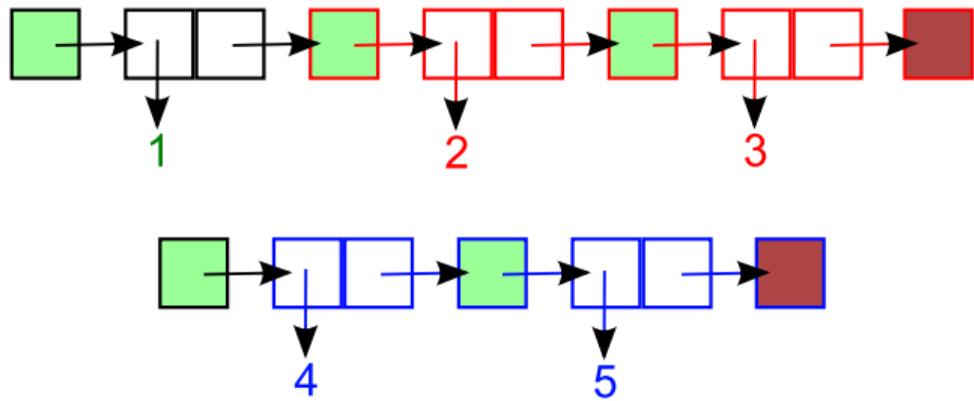
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

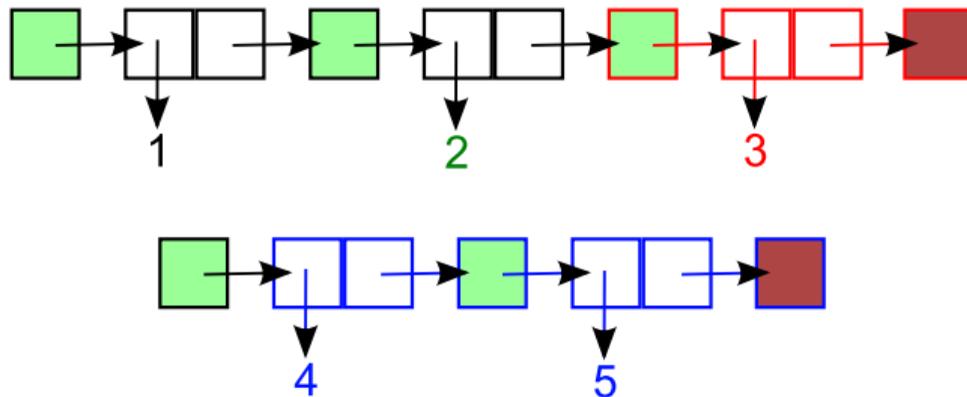
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd t1 <- readMVar strom  
      findeEnde t1
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

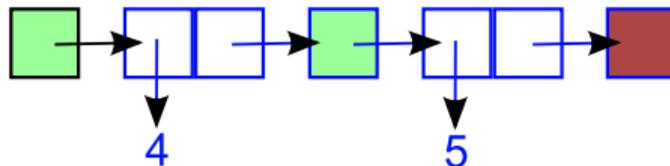
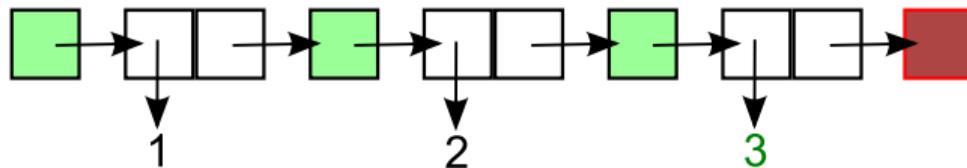
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

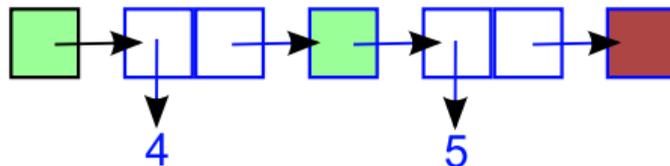
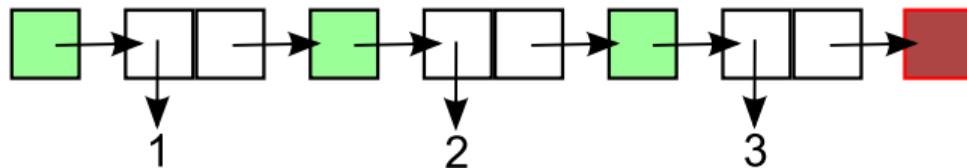
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

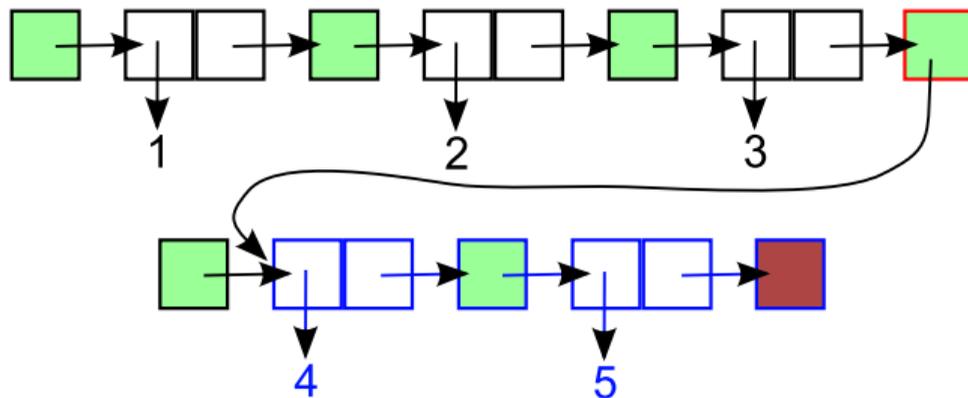
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Ströme aneinanderhängen

```
appendStroeme strom1 strom2 =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom2  
    if test then return strom1  
    else do  
      kopf2 <- readMVar strom2  
      ende <- findeEnde strom1  
      putMVar ende kopf2  
      return strom1
```

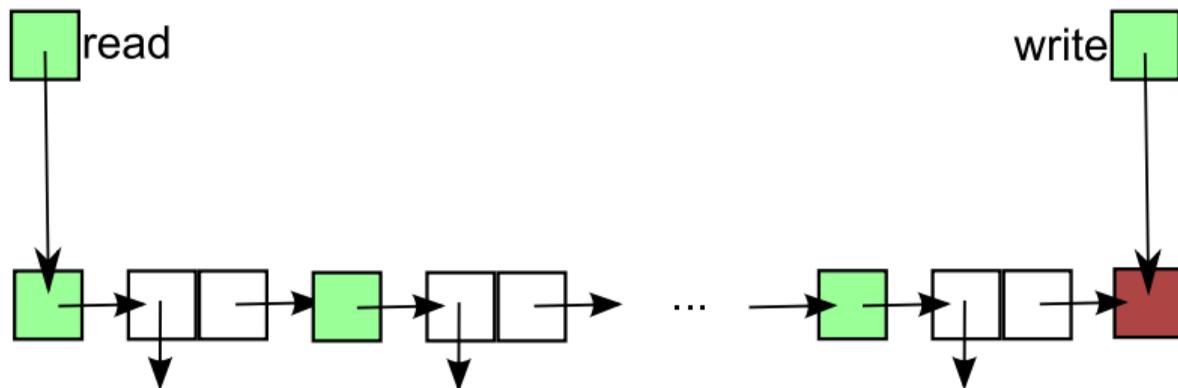
```
findeEnde strom =  
  do  
    test <- isEmptyMVar strom  
    if test then return strom  
    else do  
      SCons hd tl <- readMVar strom  
      findeEnde tl
```



Kanal

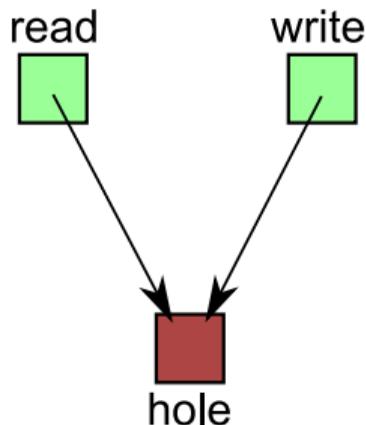
Zwei MVars, die auf Lese- und Schreibe-Ende des Stroms zeigen
(Die beiden MVars **synchronisieren** den Zugriff)

```
type Kanal a = (MVar (Strom a), -- Lese-Ende  
              MVar (Strom a)) -- Schreibe-Ende
```



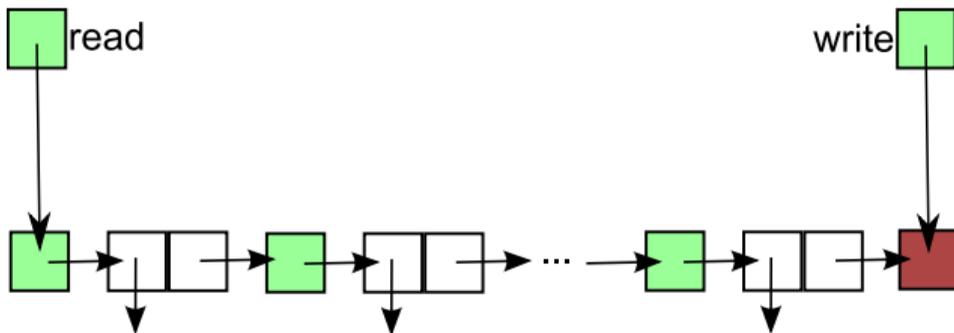
Leeren Kanal erzeugen

```
neuerKanal :: IO (Kanal a)
neuerKanal =
  do
    hole  <- newEmptyMVar
    read  <- newMVar hole
    write <- newMVar hole
    return (read, write)
```



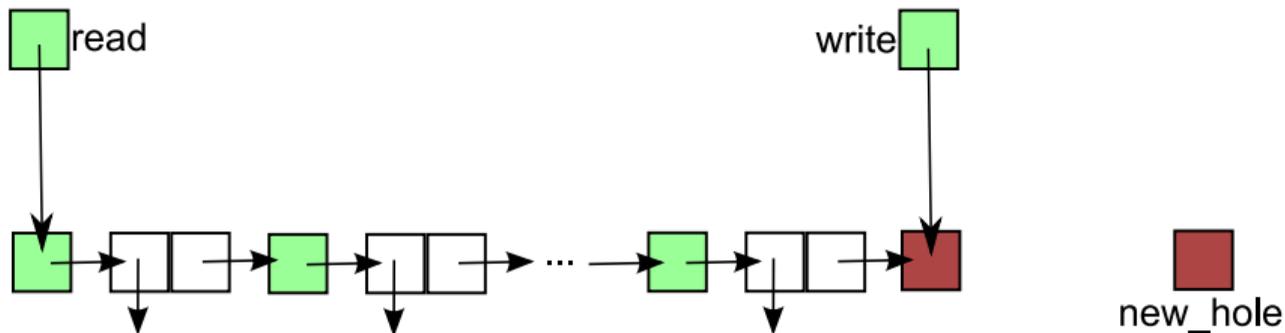
Auf Kanal schreiben

```
schreibe :: Kanal a -> a -> IO ()
schreibe (read,write) val =
  do
    new_hole <- newEmptyMVar
    old_hole <- takeMVar write
    putMVar old_hole (SCons val new_hole)
    putMVar write new_hole
```



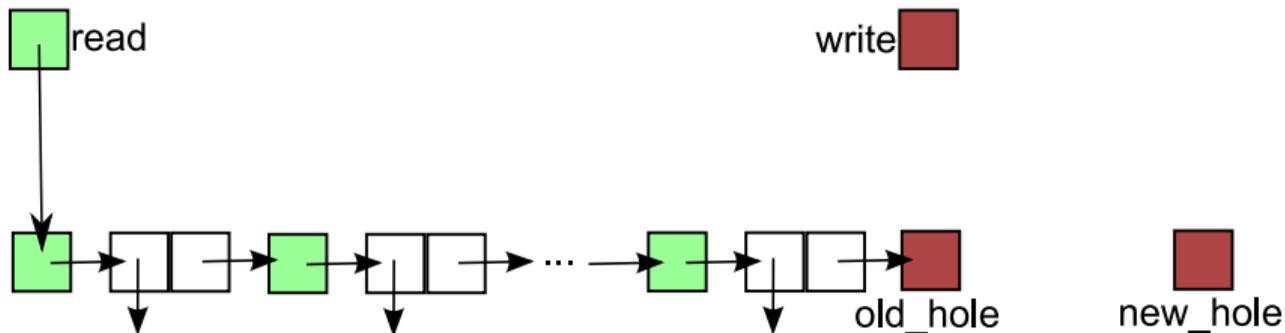
Auf Kanal schreiben

```
schreibe :: Kanal a -> a -> IO ()
schreibe (read,write) val =
  do
    new_hole <- newEmptyMVar
    old_hole <- takeMVar write
    putMVar old_hole (SCons val new_hole)
    putMVar write new_hole
```



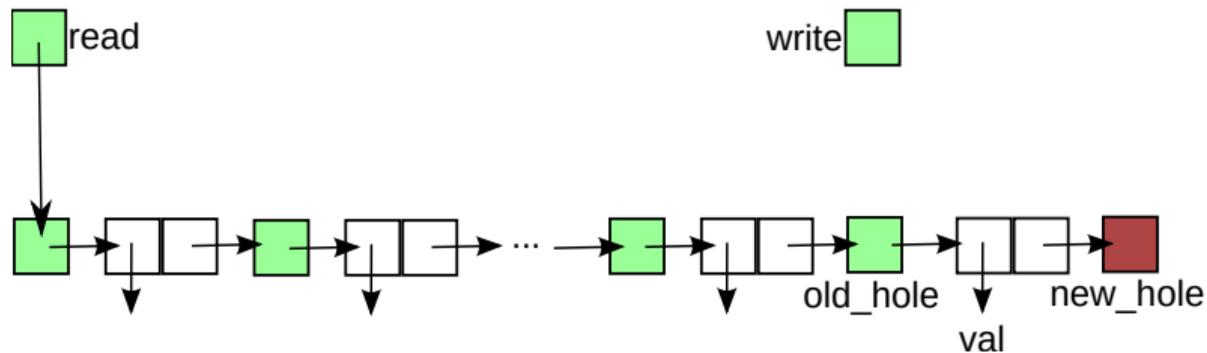
Auf Kanal schreiben

```
schreibe :: Kanal a -> a -> IO ()
schreibe (read,write) val =
  do
    new_hole <- newEmptyMVar
    old_hole <- takeMVar write
    putMVar old_hole (SCons val new_hole)
    putMVar write new_hole
```



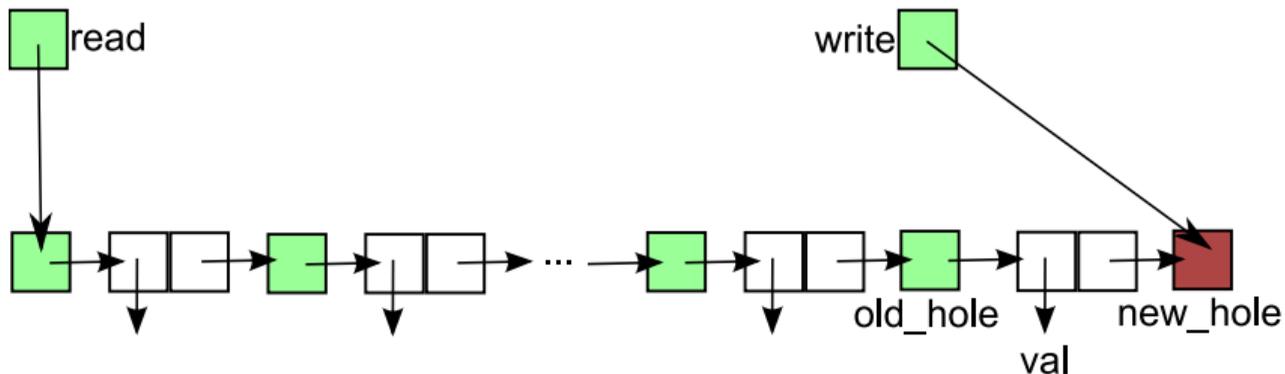
Auf Kanal schreiben

```
schreibe :: Kanal a -> a -> IO ()  
schreibe (read,write) val =  
  do  
    new_hole <- newEmptyMVar  
    old_hole <- takeMVar write  
    putMVar old_hole (SCons val new_hole)  
    putMVar write new_hole
```



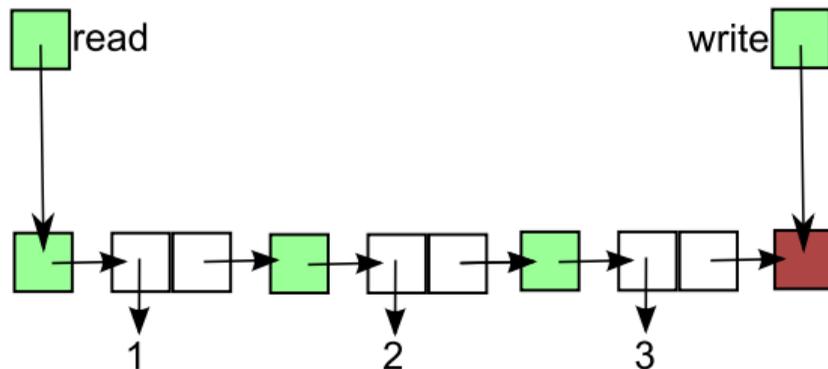
Auf Kanal schreiben

```
schreibe :: Kanal a -> a -> IO ()
schreibe (read,write) val =
  do
    new_hole <- newEmptyMVar
    old_hole <- takeMVar write
    putMVar old_hole (SCons val new_hole)
    putMVar write new_hole
```



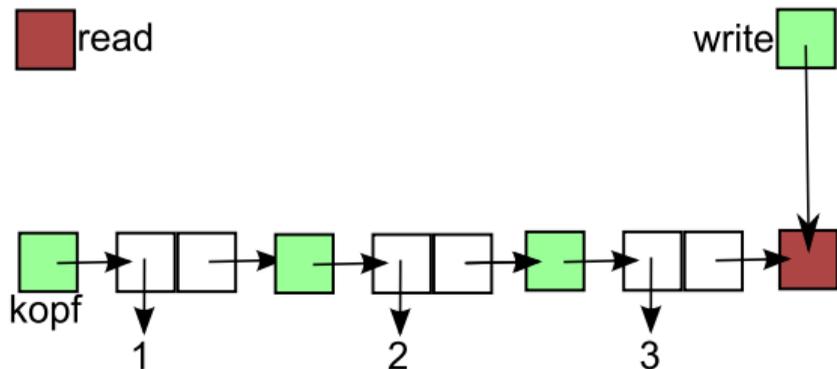
Vom Kanal lesen

```
lese :: Kanal a -> IO a
lese (read,write) =
  do
    kopf <- takeMVar read
    (SCons val stream) <- takeMVar kopf
    putMVar read stream
    return val
```



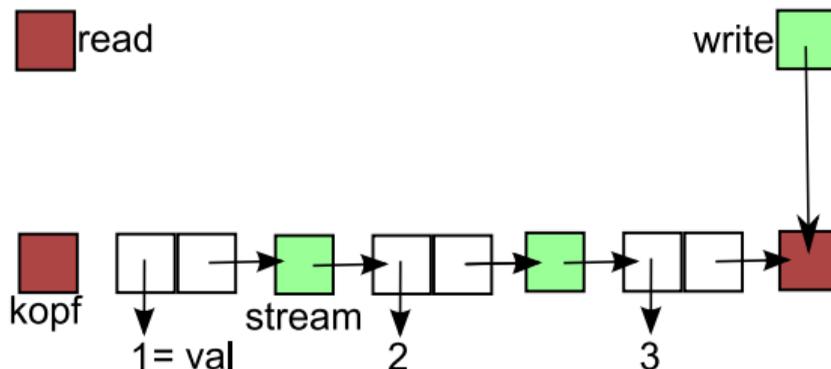
Vom Kanal lesen

```
lese :: Kanal a -> IO a
lese (read,write) =
  do
    kopf <- takeMVar read
    (SCons val stream) <- takeMVar kopf
    putMVar read stream
    return val
```



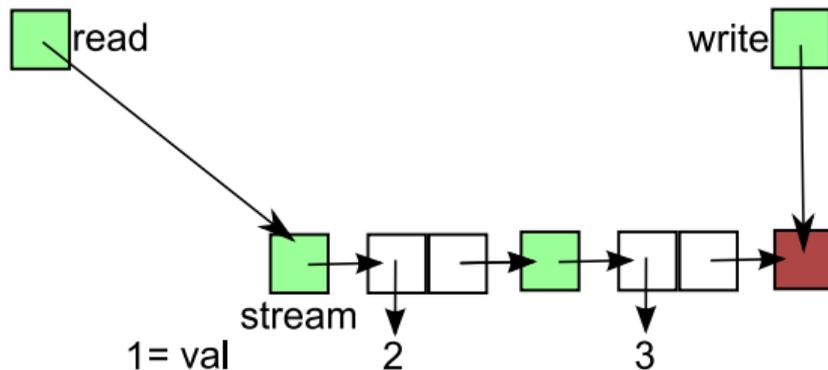
Vom Kanal lesen

```
lese :: Kanal a -> IO a
lese (read,write) =
  do
    kopf <- takeMVar read
    (SCons val stream) <- takeMVar kopf
    putMVar read stream
    return val
```



Vom Kanal lesen

```
lese :: Kanal a -> IO a
lese (read,write) =
  do
    kopf <- takeMVar read
    (SCons val stream) <- takeMVar kopf
    putMVar read stream
    return val
```



Generalisierung zu Multicast-Kanälen

Funktion dupliziere zum Duplizieren des Kanals, sodass alle schreibe-Zugriffe von nun an auch im neuen Kanal vorhanden sind.

```
dupliziere :: Kanal a -> IO (Kanal a)
```

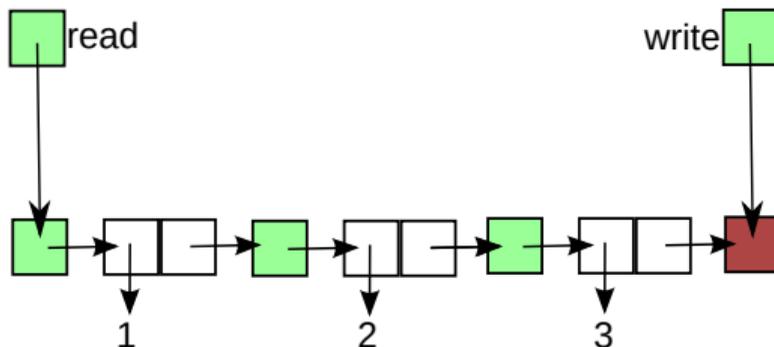
```
dupliziere (read,write) =
```

```
do
```

```
hole <- readMVar write
```

```
new_read <- newMVar hole
```

```
return (new_read,write)
```



Generalisierung zu Multicast-Kanälen

Funktion dupliziere zum Duplizieren des Kanals, sodass alle schreibe-Zugriffe von nun an auch im neuen Kanal vorhanden sind.

```
dupliziere :: Kanal a -> IO (Kanal a)
```

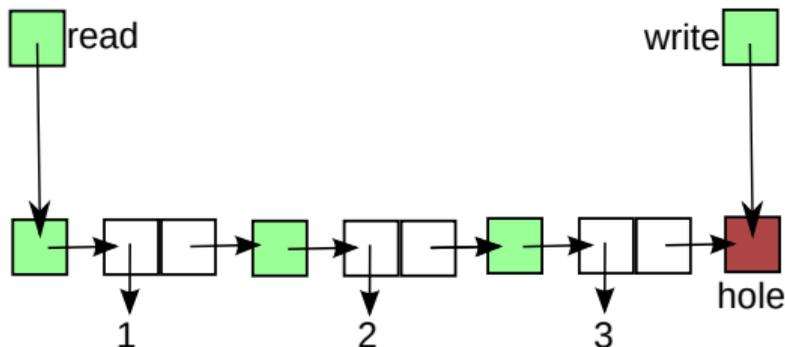
```
dupliziere (read,write) =
```

```
do
```

```
  hole <- readMVar write
```

```
  new_read <- newMVar hole
```

```
  return (new_read,write)
```



Generalisierung zu Multicast-Kanälen

Funktion dupliziere zum Duplizieren des Kanals, sodass alle schreibe-Zugriffe von nun an auch im neuen Kanal vorhanden sind.

```
dupliziere :: Kanal a -> IO (Kanal a)
```

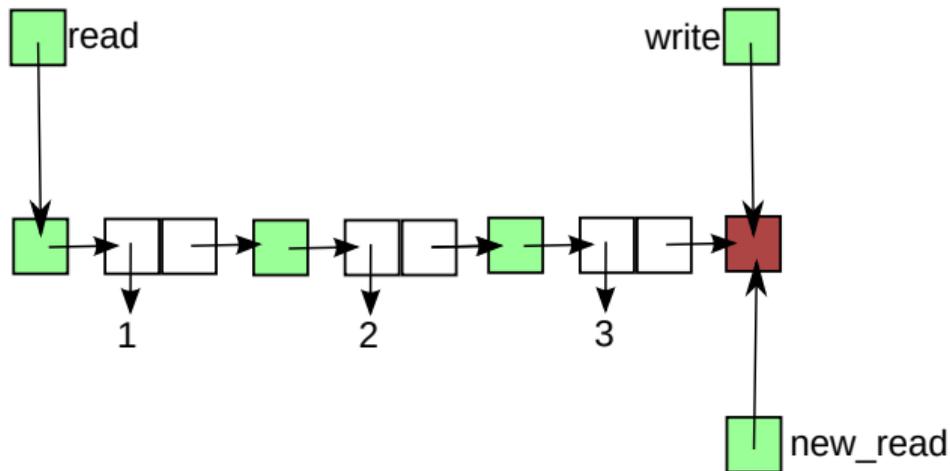
```
dupliziere (read,write) =
```

```
do
```

```
hole <- readMVar write
```

```
new_read <- newMVar hole
```

```
return (new_read,write)
```



Generalisierung zu Multicast-Kanälen (2)

Funktioniert nur, wenn man die lese-Operation anpasst:

```
lese :: Kanal a -> IO a
lese (read,write) =
  do
    kopf <- takeMVar read
    (SCons val stream) <- readMVar kopf -- readMVar statt takeMVar
    putMVar read stream
    return val
```

Undo einer Lese-Operation?

```
undoLese :: Kanal a -> a -> IO a
undoLese (read,write) val =
  do
    new_read <- newEmptyMVar
    hole <- takeMVar read
    putMVar new_read (SCons val hole)
    putMVar read new_read
```

funktioniert nicht!

Betrachte Fall: Kanal ist leer und eine lese-Operation wartet bereits

Kanäle in der Bibliothek

- Die gezeigten Kanäle sind in der Bibliothek

`Control.Concurrent.Chan`

bereits definiert

- Der Datentyp ist `Chan a`

- Die Operationen heißen `newChan`, `writeChan`, `readChan`, `dupChan`

Beispiel: Arztpraxis

Eine Gemeinschaftspraxis bestehe aus n Ärzten, die in FIFO-Reihenfolge auf Patienten warten.

Ankommende Patienten reihen sich in FIFO-Ordnung in eine Warteschlange ein.

Die Arzthelferin am Empfang verteilt je einen Patienten am Anfang der „Patientenschlange“ auf einen Arzt am Anfang der „Ärzteschlange“.

Wenn ein Arzt mit seiner Behandlung fertig ist, reiht er sich hinten in die „Ärzteschlange“ ein.

Beispiel: Arztpraxis (2)

Hauptthread

```
> arztpraxis n m =  
> do  
>   outputsem <- newEmptyMVar  
>   patienten_Kanal <- neuerKanal  
>   forkIO (mapM_(schreibe patienten_Kanal) [1..m])  
>   aerzte_Kanal <- neuerKanal  
>   forkIO (mapM_(schreibe aerzte_Kanal) [1..n])  
>   ordne patienten_Kanal aerzte_Kanal outputsem
```

Beispiel: Arztpraxis (3)

Arzthelferin (ordne)

```
> ordne patienten aerzte outputsem =  
> do  
>   patient <- lese patienten  
>   arzt <- lese aerzte  
>   forkIO (behandle arzt patient aerzte outputsem)  
>   ordne patienten aerzte outputsem
```

Beispiel: Arztpraxis (2)

Behandlung

```
> behandle arzt patient aerzte outputsem =
> do
>   j <- randomIO
>   let i = (abs j 'mod' 10000000) 'div' 1000000
>   atomar outputsem (
>     putStrLn
>       ("Arzt " ++ show arzt ++ " behandelt Patient "
>         ++ show patient ++ " in " ++ show i ++ " Sekunden")
>   )
>   threadDelay (i*1000000)
>   schreibe aerzte arzt
```

Beispiel: Arztpraxis (3)

Problem bei bisherigen Lösung:

- Die Funktion `ordne` terminiert nicht, wenn alles verteilt wurde.
- Führt zum Deadlock
- Wünschenswert: Operation um Kanal zu schließen.
- Abhilfe: Markiere das Ende

Beispiel: Arztpraxis (4)

```
> arztpraxis n m = do
>   outputsem <- newEmptyMVar
>   patienten_Kanal <- neuerKanal
>   forkIO (mapM_ (schreibe patienten_Kanal)
>               ([Just i | i <- [1..m]] ++ [Nothing]))
>   aerzte_Kanal <- neuerKanal
>   forkIO (mapM_ (schreibe aerzte_Kanal) [1..n])
>   ordne n patienten_Kanal aerzte_Kanal outputsem

> ordne n patienten aerzte outputsem = do
>   p <- lese patienten
>   case p of
>     Nothing -> sequence_(replicate n (lese aerzte))
>     Just p -> do
>       arzt <- lese aerzte
>       forkIO (behandle arzt patient aerzte outputsem)
>       ordne n patienten aerzte outputsem
```

Nichtdeterministisches Mischen

- Gegeben: Zwei Listen xs und ys
- Mische beide Listen zu einer Liste zusammen, so dass
 - die relative Sortierung von xs und ys erhalten bleibt.
 - Wenn eine Liste partiell ist (d.h. ein Tail ist \perp) dann erscheinen die Elemente der anderen Liste

Nichtdeterministisches Mischen

- Gegeben: Zwei Listen xs und ys
- Mische beide Listen zu einer Liste zusammen, so dass
 - die relative Sortierung von xs und ys erhalten bleibt.
 - Wenn eine Liste partiell ist (d.h. ein Tail ist \perp) dann erscheinen die Elemente der anderen Liste

Sowohl `ndMerge (1:2:bot) [3..]` als auch `ndMerge [3..] (1:2:bot)` liefern eine unendlich lange Liste

Nichtdeterministisches Mischen

- Gegeben: Zwei Listen xs und ys
- Mische beide Listen zu einer Liste zusammen, so dass
 - die relative Sortierung von xs und ys erhalten bleibt.
 - Wenn eine Liste partiell ist (d.h. ein Tail ist \perp) dann erscheinen die Elemente der anderen Liste

Sowohl `ndMerge (1:2:bot) [3..]` als auch `ndMerge [3..] (1:2:bot)` liefern eine unendlich lange Liste

Sequentiell: **Nicht möglich!** (Auswertung bleibt stecken beim \perp)

Nichtdeterministisches Mischen (2)

Mischen mit Kanal:

- Schreibe beide nebenläufig auf den Kanal
- Hauptthread liest den Kanal aus in eine Liste

```
ndMerge xs ys =  
  do  
    chan <- neuerKanal  
    id_s <- forkIO (schreibeListeAufKanal chan xs)  
    id_t <- forkIO (schreibeListeAufKanal chan ys)  
    leseKanal chan False
```

Nichtdeterministisches Mischen (3)

```
schreibeListeAufKanal chan []      = schreibe chan (True,undefined)
schreibeListeAufKanal chan (x:xs) =
  do
    schreibe chan (False,x)
    schreibeListeAufKanal chan xs

leseKanal chan flag =
  do
    (flag1,el) <- lese chan
    if flag1 && flag then return [] else
      do
        rest <- unsafeInterleaveIO (leseKanal chan (flag || flag1))
        if flag1 then return rest else return (el:rest)
```

Paralleles Oder

Sequentielles Oder:

`a || b = if a then True else b`

a	b	a b
True	<i>s</i>	True
False	<i>s</i>	<i>s</i>
\perp	<i>s</i>	\perp

$s \in \{\perp, \text{False}, \text{True}\}$

Gewünscht: Paralleles Oder mit

a	b	por a b
True	<i>s</i>	True
<i>s</i>	True	True
False	<i>s</i>	<i>s</i>
\perp	<i>s</i>	\perp

Sequentiell: **nicht möglich!**

Paralleles Oder (2)

```
por :: Bool -> Bool -> IO Bool
por s t = do
  ergebnisMVar <- newEmptyMVar
  id_s <- forkIO (if s then (putMVar ergebnisMVar True)
                 else (putMVar ergebnisMVar t))
  id_t <- forkIO (if t then (putMVar ergebnisMVar True)
                 else (putMVar ergebnisMVar s))
  ergebnis <- takeMVar ergebnisMVar
  killThread id_s
  killThread id_t
  return ergebnis
```

- „**amb**iguous choice“
- binärer Operator, der beide Argumente parallel auswertet
- Falls eine der beiden Auswertungen ein Ergebnis liefert, wird dies als Gesamtergebnis übernommen.

McCarthys amb (2)

```
amb :: a -> a -> IO a
amb s t =
  do
    ergebnisMVar <- newEmptyMVar
    id_s <- forkIO (let x = s in seq x (putMVar ergebnisMVar x))
    id_t <- forkIO (let x = t in seq x (putMVar ergebnisMVar x))
    ergebnis <- takeMVar ergebnisMVar
    killThread id_s
    killThread id_t
    return ergebnis
```

McCarthy's amb (3)

Semantisch

$$\text{amb } s \ t = \begin{cases} t, & \text{wenn } s \text{ nicht terminiert} \\ s, & \text{wenn } t \text{ nicht terminiert} \\ s \text{ oder } t, & \text{wenn } s \text{ und } t \text{ terminieren} \end{cases}$$

Kodierung anderer Operatoren mit `amb`

- Paralleles Oder:

```
por2 :: Bool -> Bool -> IO Bool
por2 s t = amb (if s then True else t) (if t then True else s)
```

- Nichtdeterministische Auswahl („erratic choice“):

```
choice :: a -> a -> IO a
choice s t = do res <- (amb (\x -> s) (\x -> t))
              return (res ())
```

- Nichtdeterministische Auswahl („demonic choice“):

```
dchoice :: a -> a -> IO a
dchoice s t = do res <- amb (seq s t) (seq t s)
                  return res
```

Erweiterung auf n Argumente

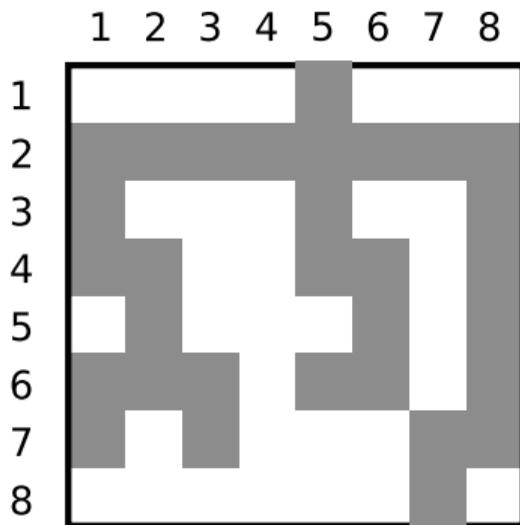
Statt zwei Argumente, eine Liste von Argumenten

```
ambList [x] = return x
ambList (x:xs) =
  do
    l <- unsafeInterleaveIO (ambList xs)
    amb x l
```

Beispiel: Parallele Suche

Gegeben: Labyrinth

Gesucht: Weg vom Eingang (oben) zum Ausgang (unten)



Beispiel: Parallele Suche (2)

```
data Suchbaum a = Ziel a | Knoten a [Suchbaum a]
```

```
labyrinth =
```

```
  let
```

```
    kn51 = Knoten (5,1) [kn52]
```

```
    kn52 = Knoten (5,2) [kn42, kn53, kn62]
```

```
    ...
```

```
    kn78 = Ziel (7,8)
```

```
  in kn51
```

Beispiel: Parallele Suche (3)

```
suche =
  do
    result <- ndBFsearch [] labyrinth
    print result

ndBFsearch res (Ziel a)      =
  return (reverse $ a:res)

ndBFsearch res (Knoten a []) =
  do
    yield
    ndBFsearch res (Knoten a [])

ndBFsearch res (Knoten a nf) =
  do
    nf' <- mapM (unsafeInterleaveIO . ndBFsearch (a:res)) nf
    ambList nf'
```

- **Futures** = Variablen deren Wert am Anfang unbekannt ist, aber in der **Zukunft** verfügbar wird, sobald zugehörige Berechnung beendet ist.
- In Haskell: Jede Variable “eine Future”, da verzögert ausgewertet wird.
- **Nebenläufige Futures** = Wert der Future wird durch **nebenläufige Berechnung** ermittelt.

Explizite Futures

- Wert einer Future muss explizit angefordert werden
- Wenn Thread den Wert benötigt, führt er eine `force`-Operation aus: Warte bis Wert berechnet ist.

Implizite Futures

- keine `force`-Operation
- Auswertung fordert Wert **automatisch** an, wenn er benötigt wird.

Programmierung mit impliziten Futures komfortabler!

Explizite Futures mit MVars

```
type EFuture a = MVar a

efuture :: IO a -> IO (EFuture a)
efuture act =
  do  ack <- newEmptyMVar
      forkIO (act >>= putMVar ack)
      return ack

force :: EFuture a -> IO a
force = readMVar
```

Beispiel: Parallele Baumsumme

```
data BTree a =
  Leaf a
| Node a (BTree a) (BTree a)

treeSum (Leaf a)      = return a
treeSum (Node a l r) =
  do
    futl <- efuture (treeSum l)
    futr <- efuture (treeSum r)
    resl <- force futl
    resr <- force futr
    let result = (a + resl + resr)
    in seq result (return result)
```

Implizite Futures: unsafeInterleaveIO

```
future :: IO a -> IO a
future code = do
  ack <-newEmptyMVar
  thread <- forkIO (code >>= putMVar ack)
  unsafeInterleaveIO
    (do
      result <- takeMVar ack
      killThread thread
      return result)
```

Baumsumme mit impliziten Futures

```
treeSum (Leaf a)      = return a
treeSum (Node a l r) = do
  futl <- future (treeSum l)
  futr <- future (treeSum r)
  let result = (a + futl + futr)
  in seq result (return result)
```

Bibliothek `Control.Concurrent.Async`

- ähnlicher Mechanismus wie explizite Futures
- statt Futures: „asynchrone Berechnungen“
- statt `force` nun `wait`
- Verpacken des Ergebnisses durch zusätzlichen Datenkonstruktor

Implementierung: Basis

```
data Async a = Async (MVar a)
```

```
async :: IO a -> IO (Async a)
```

```
async action = do
```

```
  var <- newEmptyMVar
```

```
  forkIO (action >>= \r -> putMVar var r)
```

```
  return (Async var)
```

```
wait :: Async a -> IO a
```

```
wait (Async var) = readMVar var
```

Beispiel zur Verwendung

```
import Control.Concurrent.Async
import Control.Concurrent
import GetURL
import qualified Data.ByteString as B
main = do
  a1 <- async (getURL "http://www2.tcs.ifi.lmu.de/~letz/informationen.shtml")
  a2 <- async (getURL "http://www.ifi.lmu.de")
  r1 <- wait a1
  r2 <- wait a2
  print (B.length r1, B.length r2)
```

- Die Async-Bibliothek hat noch mehr Features und Funktionalitäten
- Insbesondere: Behandlung und Weitergabe von Exceptions
- Für Details: siehe Buch von Simon Marlow
- Die echte Implementierung verwendet keine MVars, sondern STM-Haskell