

Sprachkonzepte  
der Parallelen Programmierung  
Vorlesung  
SS 11, WS 12, SS 13

Johannes Waldmann, HTWK Leipzig

18. Juni 2013

Herb Sutter: *The free lunch is over*: a fundamental turn towards concurrency in software. Dr. Dobb's Journal, März 2005.

CPUs werden nicht schneller, sondern bekommen mehr Kerne  
2, 4 (i7-920), 6, 8, ... 512 (GTX 580)

Wie programmiert man für solche Hardware?

## Nebenläufige und verteilte Programme

- ▶ Modellierung von Prozessen (CPS-Kalkül)
- ▶ Spezifikation von Prozessen (LTL-Logik)
- ▶ Primitiven und Abstraktionen zur Thread-Synchronisation: Semaphore, Monitore, Kanäle,
- ▶ Transaktionen (Software Transactional Memory)
- ▶ Aktoren

## Parallele Programme:

- ▶ deklarativer Parallelismus durch Strategien
- ▶ Rekursionsschemata für parallele Programme
- ▶ Anwendung: map/reduce-Framework

- ▶ jede Woche eine Vorlesung
- ▶ jede Woche eine Übung (Pool Z423)
- ▶ Prüfungsvoraus.: regelmäßiges und erfolgreiches Bearbeiten von Übungsaufgaben
- ▶ Prüfung: Klausur 120 min ohne Hilfsmittel

- ▶ Maurice Herlihy und Nir Shavit: *The Art of Multiprocessor Programming*, Morgan Kaufmann 2008,  
<http://www.elsevierdirect.com/v2/companion.jsp?ISBN=9780123705914>
- ▶ Brian Goetz u.a.: *Java Concurrency in Practice*, Addison-Wesley 2006,  
<http://www.javaconcurrencyinpractice.com/>
- ▶ Brian O'Sullivan u.a.: *Real World Haskell*, O'Reilly 2008,  
<http://book.realworldhaskell.org/read/concurrent-and-multicore-programming.html>
- ▶ Simon P. Jones: *Beautiful concurrency*, in: Wilson et al., *Beautiful Code*, O'Reilly 2007,  
<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/simonpj/papers/stm/index.htm>

## Nebenläufigkeit

- ▶ Synchronisation von Prozessen (Threads) durch Sperren (Locks)
- ▶ dadurch Schutz kritischer Code-Abschnitte (für atomaren Zugriff auf gemeinsame Ressourcen)
- ▶ Realisierungen: z. B. wait/notify in Java
- ▶ die klassische Beispiel-Aufgabe: 5 Philosophen

## Datenaustausch

- ▶ gemeinsamer Speicherbereich, aber exklusive Zugriffe durch Locks
- ▶ Speicherzellen mit atomaren Zugriffen:  
Semaphore, MVar, AtomicLong
- ▶ lokale Parameterübergabe zwischen Co-Routinen  
Ada: Rendezvous (synchron)
- ▶ asynchroner Datentransport  
Aktoren, Nachrichten, Kanäle

## Objekte, ... in Datenstrukturen

- ▶ anstatt:

```
long s; Object lock;  
synchronized (lock) { s += 1; }
```

**benutze** `AtomicLong s; s.incrementAndGet();`

- ▶ um Zustandsänderung während *check-then-act* zu vermeiden:

```
s.compareAndSet (expected, update);
```

- ▶ desgl. für `AtomicReference<V>`, **benutzt in verketteten Datenstrukturen (Liste, Stack)**
- ▶ Vorteil: keine globalen Locks, Nachteil: verteilter Zustand

## Transactional Memory

Nachteil von Locks: Programmierung ist nicht modular.

Anderer Ansatz: spekulative Nebenläufigkeit:

Transaktionen mit optimistischer Ausführung

- ▶ innerhalb einer Transaktion: Protokollierung der Speicherzugriffe
- ▶ Abschluß (Commit) der Transaktion nur, wenn Protokoll konsistent ist
- ▶ sonst später erneut ausführen und Protokoll validieren
- ▶ eine abgebrochene Transaktion muß unbeobachtbar sein

Clojure: Transactions, Haskell: STM (das Typsystem hilft!)

und paralleles Programmieren  
(rein) funktionales Programmieren:

- ▶ keine (Neben-)Wirkungen, keine Zuweisungen,
- ▶ alle „Variablen“ und „Objekte“ sind konstant,
- ▶ nur Auswertung von Unterprogrammen,

*ist trivial parallelisierbar und thread-sicher.*

alle Argumente eines Unterprogrammes können parallel ausgewertet werden.

## Auswertungsstrategien

Steuern der Auswertung durch Angabe von Strategien,  
unter Benutzung der Kombinatoren

- ▶ `par x y`: *Spark* für `x`, Resultat ist `y`
- ▶ `pseq x y`: auf `x` warten, dann Resultat `y`

Spark kann vom Laufzeitsystem gestartet werden (zu Thread konvertiert)

typische Anwendung: `par x ( pseq y ( f x y ) )`

<http://hackage.haskell.org/packages/archive/parallel/3.1.0.1/doc/html/Control-Parallel.html>

### Beispiel mergesort

und paralleles Programmieren

Pro:

- ▶ leichte Parallelisierbarkeit für deklarativen Code
- ▶ deklaratives Modell für imperativen Code (MVar, STM)

Con:

- ▶ lazy evaluation
- ▶ garbage collection

aber:

- ▶ lazy evaluation ist selbst eine Form der Nebenläufigkeit (vgl. Iteratoren in OO)
- ▶ Nebenläufige garbage-collection wollen viele andere auch

- ▶ welche Programme lassen sich gut (= flexibel) parallelisieren?  
(balancierter Berechnungsbaum, Tiefe anhängig von Prozessoren, nicht von Eingabe)
- ▶ welche Algorithmen kann man in dieser Form schreiben?  
(jedes fold über einen assoziativen Operator)
- ▶ wie findet man diese Operatoren, wie beweist man Assoziativität?

Beispiele:

- ▶ Summe der Zahlen einer Liste
- ▶ binäre Addition (Überträge!)
- ▶ Teilfolge mit maximaler Summe

## /Reduce

Dean and Gemawat: *Simplified Data Processing on Large Clusters*, OSDI, 2004.

Ralf Lämmel: *Google's Map/Reduce Programming Model, Revisited*, in: *Science of Computer Programming*, 2006. <http://userpages.uni-koblenz.de/~laemmel/MapReduce/>

```
mapReduce :: ( (k1,v1) -> [(k2,v2)] )  
           -> ( k2 -> [v2] -> v3 )  
           -> ( Map k1 v1 ) -> ( Map k2 v3 )
```

```
mapReduce m r  
  = reducePerKey r -- 3. Apply r to each group  
  . groupByKey    -- 2. Group per key  
  . mapPerKey m   -- 1. Apply m to each key/value
```

erzeugen und starten Thread-Objekt implementiert `run()`,  
diese Methode wird aufgerufen durch `start()`.

```
for (int t=0; t<8; t++) {  
    new Thread() {  
        public void run() {  
            System.out.println ("foo");  
        }  
    }.start();  
}
```

## Speicher, Synchronisation

dieses Beispiel zeigt die Probleme:

```
long s = 0; // gemeinsamer Speicher
for (int t=0; t<8; t++) {
    new Thread() {
        public void run() {
            for (...) s += 1;
        } }.start(); }
// Synchronisation?
System.out.println (s);
```

### Quelltext aus Vorlesung:

```
git clone git://dfa.imn.htwk-leipzig.de/srv/git/skpp
```

**browse:** <http://dfa.imn.htwk-leipzig.de/cgi-bin/gitweb.cgi?p=skpp13.git>

## bung: einfache Thread-Operationen in Java

- ▶ direkte Thread-Erzeugung mit  
`new Thread() { void run () { .. } }.start()`
- ▶ gegenseitiger Ausschluß durch  
`synchronized (lock) { .. }`
- ▶ Synchronisation durch `CountDownLatch`
- ▶ Thread-Erzeugung und -Verwaltung durch  
`void ExecutorService.execute(Runnable)`
- ▶ Synchronisation und Datentransport durch  
`Future<V> ExecutorService.submit(Callable<V>)`

-Sicherheit: Definitionen

Eine Klasse heißt *thread-sicher*,

- ▶ wenn sie korrekt ist (= ihre Spezifikation erfüllt)
- ▶ auch bei Benutzung (Methodenaufruf) durch mehrere Threads mit beliebiger (durch das Laufzeitsystem ermöglichter) Ausführungsreihenfolge
- ▶ und ohne zusätzliche Synchronisation der Aufrufer.

thread-sichere Klassen synchronisieren selbst (Clients synchronisieren gar nicht)

zustandslose Klassen (Objekte) sind thread-sicher

(Brian Goetz et al.: *Java Concurrency in Practice*, A-W, 2006; Kap. 2/3)

änderungen

wenn mehrere Threads eine gemeinsame Variable ohne Synchronisation benutzen, ist das Programm nicht thread-sicher.

Auswege:

- ▶ die Variable nicht an verschiedene Threads exportieren
- ▶ die Variable als unveränderlich (final) deklarieren
- ▶ Zugriffe synchronisieren

## Confinement

Sichtbarkeit von Objekten (Objektverweisen) einschränken:

- ▶ Thread confinement: nur in einem Thread sichtbar, Beispiel: GUI-Frameworks (mit einem GUI-Thread, den der Programmierer der Applikation nie sieht)
- ▶ Stack confinement: Variable lebt nur während eines Methodenaufrufs (im Laufzeitkeller im Frame dieses Aufrufs)

gefährlich sind immer ungewollt exportierte Verweise, z. B. auf `this` im Konstruktork.

## Übung: *this* escapes during construction

- ▶ `class C { final int foo; ... }`  
Attribut `foo` wird erst im Konstruktor initialisiert
- ▶ der Konstruktor exportiert aber vorher `this`, dann kann das nicht initialisierte `foo` in einem anderen Thread beobachtet werden
- ▶ benutze  
`class Receiver { void receive (C x) { ... } }`
- ▶ versteckter Export von `this`: als statischer Vorgänger einer lokalen Klasse (z. B. `ActionListener`)

## Aktionen

- ▶ Operationen  $A_1$  und  $A_2$  sind *atomar zueinander*, wenn zu keinem Zeitpunkt ein Thread  $T_1$  die Operation  $A_1$  ausführt und gleichzeitig ein Thread  $T_2$  die Operation  $A_2$  ausführt.
- ▶ Operation  $A$  ist *atomar*, wenn sie atomar zu jeder anderen Operation ist (einschließlich sich selbst).

## Aktionen

### check-then-act

```
Stack<Foo> l = ... ;  
if (! l.empty()) { Foo x = l.pop (); ... }
```

### read-modify-write

```
int x = ... ;    x = x + 1 ;
```

sind nicht atomar und damit nicht thread-sicher

Auswege:

- ▶ Datentypen mit atomaren Operationen (AtomicLong)  
(später)
- ▶ Locking (jetzt)

jedes Java-Objekt kann als *lock* (Monitor, Sperre) dienen  
`synchronized`-Blöcke: Betreten bei Lock-Besitz, Verlassen  
mit Lock-Rückgabe,  
für jeden Lock: zu jedem Zeitpunkt kann ihn höchstens ein  
Thread besitzen

```
Object lock = ...  
synchronized (lock) { ... } // Anweisung  
  
synchronized void m () { ... } // Methode  
=> void m () { synchronized (this) { ... } }
```

Locks sind *re-entrant*, damit aus einer synchronisierten  
Methode eine andere aufgerufen werden kann (mit dem Lock,  
den der Thread schon besitzt)

## ät der Locks

- ▶ jede Zustandsvariable sollte durch genau einen Lock bewacht werden (im Quelltext dokumentieren!)
- ▶ Synchronisation einzelner Variablenzugriffe ist oft zu wenig
- ▶ Synchronisation einer gesamten Methode ist oft zu teuer (verhindert mögliche Nebenläufigkeit)

Für jede Klassen-Invariante: alle Variablen, die in der Invariante benutzt werden, müssen durch einen gemeinsamen Lock geschützt werden.

## , Locks, Übung

- ▶ Ryan Brase: *Avoid these Java threading gotchas*,  
<http://www.techrepublic.com/article/avoid-these-java-threading-gotchas/1049534>  
(Bsp: synchronized deadlock)
- ▶ was geht mit `CountDownLatch`, aber nicht mit `Thread.join`?
- ▶ Sean Anderson: *Bit Twiddling Hacks*,  
<http://www-graphics.stanford.edu/~seander/bithacks.html>

(allgemeiner) Semaphore ist abstrakter Datentyp mit Zustand  $S \in \mathbb{Z}$  und *atomaren* Operationen:

- ▶ `Wait(S)` : wenn  $S > 0$  dann  $S := S - 1$ , sonst blockiere
- ▶ `Signal(S)` : wenn es Prozesse gibt, die auf  $S$  warten, dann wecke einen davon auf, sonst  $S := S + 1$

binärer Semaphore:  $S \in \{0, 1\}$  und ...

- ▶ `Signal(S)` : ...sonst  $S := 1$

E. W. Dijkstra: *Cooperating Sequential Processes*,  
4. *The General Semaphore*, TU Eindhoven 1965

<http://www.cs.utexas.edu/~EWD/transcriptions/EWD01xx/EWD123.html>

## Ausschluß (grundsätzlich)

```
Semaphore s := 1;  
Gemeinsame Ressource r;  
Prozeß Nr i { non_critical_section;  
              Wait (s);  
              cricial_section; // benutze r  
              Signal (s);    }
```

### Eigenschaften:

- ▶ gegenseitiger Ausschluß
- ▶ *fairness* für 2 Prozesse
- ▶ für  $\geq 3$  Prozesse nur *progress*
- ▶ *fairness* für  $\geq 3$ , wenn blockierte Prozesse in Queue (statt Menge) verwaltet werden

## Ausschluß (in Java)

jedes Objekt kann als Semaphor verwendet werden, dem vorigen Programm entspricht:

```
Object lock = new Object ();
Gemeinsame Ressource r;
Prozeß Nr i {
    non_critical_section
    synchronized (lock) { ... }
}
```

Ist eine Methode `synchronized` deklariert, dann ist `this` der Semaphor.

## für Semaphore

- ▶ hier definiert: Wait / Signal
- ▶ original Dijkstra: P / V
- ▶ `java.util.concurrent.Semaphore`: acquire / release
- ▶ `java.lang.Object`: wait / notify

und explizite Semaphore in Java

- ▶ für gegenseitigen Ausschluß während eines Methodenaufwurfes:

verwende `synchronized` (Semaphor ist implizit)

- ▶ für längere Zeiträume:

`wait, notify` (Semaphor ist explizit)

Benutzung von `obj.wait()`, `obj.notify()` nur innerhalb von `synchronized (obj) { ... }`

: Philosophen in der Mensa  
(Edsger Dijkstra, Tony Hoare, ca. 1965)

- ▶ Prozess = Philosoph
- ▶ gemeinsame Ressource = Gabel

gewünschte System-Eigenschaften:

- ▶ liveness (kein Verklemmen)  
die Folge der Aktionen ist unendlich
- ▶ fairness (kein Verhungern)  
falls ein Prozeß eine Ressource anfordert, bekommt er sie  
nach endlich vielen Aktionen tatsächlich

## des Ressourcenzugriffs

### Modellierung des ausschließlichen Ressourcenzugriffs:

```
class Fork {
    private boolean taken = false;
    synchronized void take () {
        while (taken) { wait (); }
        taken = true;
    }
    synchronized void drop () {
        taken = false; notify ();
    } }
```

#### beachte:

- ▶ beide Methoden sind `synchronized`
- ▶ `wait()` innerhalb einer Schleife, die die Bedingung testet (nach Aufwachen)

## Philosophen: Aufgaben/Übung

### Programmstruktur:

```
class Fork { void take() ; void drop () }  
Philosoph i : new Thread () { void run () {  
    while(true) { this.nachdenken();  
        fork[i].take(); fork[i+1].take();  
        this.essen();  
        fork[i].drop(); fork[i+1].drop();  
    }  
}} . start();
```

welche Eigenschaften hat dieses Programm,

- ▶ global: progress oder deadlock?
- ▶ lokal: fairness?

wie kann man das ggf. reparieren?

## Simulation Semaphore

### Simulation allgemeiner Semaphor durch binären Semaphor

- ▶ Warum ist Solution 1 falsch, worin besteht Unterschied zu Solution 2? <http://www.csc.uvic.ca/~mcheng/460/notes/gensem.pdf>

### Philosophen: Algorithmen implementieren und Eigenschaften (Liveness, Fairness) diskutieren/beweisen:

- ▶ trivialer Ansatz: <http://dfa.imn.htwk-leipzig.de/cgi-bin/gitweb.cgi?p=skpp13.git;a=tree;f=philos;hb=HEAD>
- ▶ Philosoph 0 ist Linkshänder
- ▶ ein Kellner, der immer nur maximal 4 Leute an den Tisch läßt

weiter Beispiele zu Semaphoren: Allen B. Downey: *The Little Book of Semaphores*, <http://greenteapress.com/semaphores/downey08semaphores.pdf>

wie überall,

- ▶ Trennung von Spezifikation und Implementierung
- ▶ jeweils ein mathematisches Modell
- ▶ Sätze über Eigenschaften, Beziehungen dieser Modelle
- ▶ Algorithmen zur Beantwortung der Frage:  
erfüllt die Implementierung die Spezifikation?

so auch hier:

- ▶ Spezifikation: PLTL (propositional linear time logic)
- ▶ Implementierung: Omega-Wörter, -Sprachen, -Automaten

- ▶ Mordechai Ben-Ari: *Principles of Concurrent and Distributed Programming*, Prentice Hall 1990
- ▶ Beatrice Berard et al.: *Systems and Software Verification*, Springer 2001

erfordert eigentlich eine eigene Vorlesung, vergleiche

- ▶ Bertrand Meyer: *Concepts of Concurrent Computation*,  
[http://se.inf.ethz.ch/courses/2012a\\_spring/ccc/](http://se.inf.ethz.ch/courses/2012a_spring/ccc/)
- ▶ Sibylle Schwarz: Verifikations- und Spezifikationsmethoden (Abschnitt 3: Model Checking) <http://whz-cms-10.zw.fh-zwickau.de/sibsc/lehre/ws11/veri/>

-Strukturen, Omega-Wörter

allgemein: Kripke-Struktur zu Variablenmenge  $V$  ist

- ▶ Graph  $(S, T)$  mit  $S =$  Menge der Systemzustände,  
 $T \subseteq S \times S$  Menge der Zustandsübergänge
- ▶ Knotenbeschriftung  $b : S \rightarrow (V \rightarrow \mathbb{B})$   
d.h.,  $b(s)$  ist eine Belegung der Variablen  $V$

hier speziell:

- ▶  $S = \mathbb{N}$  (Zeitpunkte  $0, 1, \dots$ )
- ▶  $T = \{(s, s + 1) \mid s \in \mathbb{N}\}$  (linear time)

Beispiel:

- ▶  $V = \{p, q\}$ ,
- ▶  $b(s) = \{(p, (s \geq 3)), (q, (2 \mid s))\}$

## -Wörter und -Sprachen

- ▶ jede lineare Kripke-Struktur über  $V$  entspricht einem unendlichen Wort über  $\Sigma = 2^V$   
Bsp:  $(0, 1)(0, 0)(0, 1)(1, 0)(1, 1)(1, 0)(1, 1) \dots$
- ▶ ein unendliches Wort (Omega-Wort) über  $\Sigma$  ist eine Abbildung  $\mathbb{N} \rightarrow \Sigma$
- ▶  $\Sigma^\omega$  bezeichnet die Menge aller Omega-Wörter über  $\Sigma$
- ▶ Schreibweise für Omega-Wörter mit schließlich periodischer Struktur:  
 $(0, 1)(0, 0)(0, 1) ((1, 0)(1, 1))^\omega$   
vgl. unendl. Dezimalbrüche  $3/22 = 0.1\overline{36}$

: propositional linear time logic

Syntax:

- ▶ Variablen  $p, q, \dots$ , logische Operatoren  $\neg, \vee, \wedge, \Rightarrow, \dots$
- ▶ temporale Operatoren: immer  $\square$ , irgendwann  $\diamond, \dots$

Beispiele:  $\diamond(p \vee q), \square\diamond p, \diamond\square p$

Semantik: Wert der Formel  $F$  in Struktur  $K$  zur Zeit  $s$ :

- ▶ für  $v \in V$ :  $\text{wert}(v, K, s) = b_K(s)(v)$
- ▶  $\text{wert}(F_1 \wedge F_2, K, s) = \min\{\text{wert}(F_1, K, s), \text{wert}(F_2, K, s)\}$
- ▶  $\text{wert}(\square F_1, K, s) = \min\{\text{wert}(F_1, K, s') \mid s' \in \mathbb{N}, s' \geq s\}$
- ▶  $\text{wert}(\diamond F_1, K, s) = \max\{\text{wert}(F_1, K, s') \mid s' \in \mathbb{N}, s' \geq s\}$

Übung:  $\diamond\square\phi \Rightarrow \square\diamond\phi$  ist allgemeingültig (gilt in jeder Struktur),  
... aber die Umkehrung nicht

## -Spezifikationen von Systemeigenschaften

- ▶ gegenseitiger Ausschluß (*mutual exclusion*):  
Variablen:  $p_i$  := Prozeß  $i$  besitzt eine Ressource
  - ▶ Spezifikation (2 Prozesse):  $\Box \neg(p_1 \wedge p_2)$
  - ▶ Übung: für 3 Prozesse lautet die Formel nicht  $\Box \neg(p_1 \wedge p_2 \wedge p_3)$ . Warum nicht? Wie dann?
- ▶ Fairness (kein Verhungern, *no starvation*)  
Variablen:  $A_i$  := Prozeß  $i$  beantragt Ressource;  $P_i$   
Spezifikation:  $\Box(A_1 \Rightarrow \Diamond P_1) \wedge \dots \wedge \Box(A_n \Rightarrow \Diamond P_n)$

: Algorithmen

Satz: die folgenden Fragen sind entscheidbar:

- ▶ Modell-Problem:
  - ▶ Eingaben: eine PLTL-Formel  $F$  über  $V$ ,  
ein schließlich periodisches Wort  $w \in \Sigma^\omega$  mit  $\Sigma = \mathbb{B}^V$
  - ▶ Frage: gilt  $1 = \text{wert}(F, w, 0)$
- ▶ Erfüllbarkeits-Problem:
  - ▶ Eingabe: eine PLTL-Formel  $F$
  - ▶ Frage: gibt es  $w \in \Sigma^\omega$  mit  $1 = \text{wert}(F, w, 0)$

Beweis-Idee: die Mengen  $\{w \in \Sigma^\omega \mid 1 = \text{wert}(F, w, 0)\}$

sind  $\omega$ -regulär (Def. auf nächster Folie)

und lassen sich durch endliche Automaten beschreiben.

(J. R. Büchi 1962, A. Pnueli 1977)

## $\omega$ -(reguläre) Sprachen

- ▶ Alphabet  $\Sigma$ ,
- ▶  $\omega$ -Wort  $w \in \Sigma^\omega$ : Abbildung  $\mathbb{N} \rightarrow \Sigma$
- ▶  $\omega$ -Sprache  $L \subseteq \Sigma^\omega$ : Menge von  $\omega$ -Wörtern
  
- ▶  $\omega$ -reguläres Wort: hat die Form  $u \cdot v^\omega$  mit  $v \neq \epsilon$ .

Achtung: es gibt kein Produkt von  $\omega$ -Wörtern,  
also auch keine geschachtelten Omegas.

- ▶  $\omega$ -reguläre Sprache:

beschrieben durch  $\omega$ -regulären Ausdruck:

$$P_1 \cdot K_1^\omega \cup \dots \cup P_n \cdot K_n^\omega \quad \text{mit } P_i, K_i \text{ regulär und } \neq \emptyset, \epsilon \notin K_i$$

Achtung: eine  $\omega$ -reguläre Sprache (Bsp.  $(a + b)^\omega$ )  
kann auch nicht-reguläre  $\omega$ -Wörter enthalten.

## bung PLTL

- ▶ Ist die Struktur  $0(001)^\omega$  ein Modell der Formel  $\diamond\Box p$  ?
  - ▶ Gibt es ein Modell für  $\Box(p \iff \diamond\neg p)$ ?
  - ▶ Formalisieren Sie (mit den Variablen  $p_i$  für „Prozeß  $i$  besitzt Ressource“)
    - ▶  $F$  = Prozeß 1 besitzt die Ressource unendlich oft,
    - ▶  $G$  = Prozesse 1 und 2 besitzen die Ressource nie gleichzeitig,
    - ▶  $H$  = immer, wenn Prozeß 1 die Ressource besitzt, dann besitzt Prozeß 2 diese nicht, wird sie aber später erhalten.
  - ▶ Für alle 8 Konjunktionen von  $\{F, G, H, \neg F, \neg G, \neg H\}$ : geben Sie jeweils ein Modell als  $\omega$ -reguläres Wort an (falls möglich).
  - ▶ durch die Operatoren
    - ▶  $FUG$ :  
Es gibt einen Zeitpunkt, zu dem  $G$  gilt. Bis dahin gilt  $F$ .
    - ▶  $XF$ : im nächsten Zeitpunkt gilt  $F$ .
- wird PLTL erweitert.
- ▶ Gegeben Sie die formale Semantik von U und X an.
  - ▶ Wie kann man  $\diamond$  durch Until realisieren?

## Synchronisation (geordneter Zugriff auf gemeinsame Ressourcen) durch

- ▶ explizite Sperren (lock)  
pessimistische Ausführung  
Gefahr von Deadlock, Livelock, Prioritätsumkehr
- ▶ ohne Sperren (lock-free)  
optimistische Ausführung  
ein Prozeß ist erfolgreich (andere müssen wiederholen)
  - ▶ nur feingranular (`AtomicLong`, `compareAndSet()`)
  - ▶ atomare zusammengesetzte Transaktionen

- ▶ *Atomic Variables and Nonblocking Synchronization*, Kapitel 15 in Brian Goetz et al.: *Java Concurrency in Practice*
- ▶ *Counting, Sorting and Distributed Coordination*, Kapitel 12 in Maurice Herlihy and Nir Shavit: *The Art of Multiprocessor Programming*
- ▶ Which CPU architectures support Compare And Swap (CAS)?  
<http://stackoverflow.com/questions/151783/>

-and-Set (Benutzung)

Der Inhalt einer Variablen soll um 1 erhöht werden.

Mit STM wäre es leicht:

```
atomically $ do
  v <- readTVar p ; writeTVar p $! (v+1)
```

ohne STM, mit einfachen atomaren Transaktionen:

```
AtomicInteger p; boolean ok;
do { int v = p.get();
    ok = p.compareAndSet(v, v+1);
} while ( ! ok);
```

- ▶ Vorteil: das geht schnell (evtl. sogar in Hardware)
- ▶ Nachteil: nicht modular (keine längeren Transaktionen)
- ▶ Auswirkung: kompliziertere Algorithmen

## -and-Set (Implementierung)

### Modell der Implementierung:

```
class AtomicInteger { private int value;
    synchronized int get () { return value; }
    synchronized boolean
        compareAndSet (int expected, int update) {
        if (value == expected) {
            value = update ; return true;
        } else {
            return false; } } }
```

moderne CPUs haben CAS (oder Äquivalent)  
im Befehlssatz (Ü: suche Beispiele in x86-Assembler)

JVM (ab 5.0) hat CAS für Atomic{Integer,Long,Reference}

-and-Set (JVM)

Assembler-Ausgabe (des JIT-Compilers der JVM):

```
javac CAS.java
```

```
java -Xcomp -XX:+UnlockDiagnosticVMOptions -XX:+Pri
```

[http://wikis.sun.com/display/HotSpotInternals/  
PrintAssembly](http://wikis.sun.com/display/HotSpotInternals/PrintAssembly)

**Vorsicht, Ausgabe ist groß. Mit `nohup` in Datei umleiten, nach `AtomicInteger.compareAndSet` suchen.**

**auch nützlich:** [http://blogs.sun.com/watt/resource/  
jvm-options-list.html](http://blogs.sun.com/watt/resource/jvm-options-list.html)

## -Blocking Stack

Anwendung: Scheduling-Algorithmen:

(jeder Thread hat Stack mit Aufgaben, andere Threads können dort Aufgaben hinzufügen und entfernen)

```
private static class Node<E> {
    E item; Node<E> next;
}
class Stack<E> {
    AtomicReference<Node<E>> top
        = new AtomicReference<Stack.Node<E>> ();
    public void push (E x)
    public E pop ()
}
```

## f. Concurrent Stacks

Stack-spezifisch:

- ▶ correct set semantics

allgemein:

- ▶ linearizability
- ▶ lock-free (lebendig), wait-free (fair)

vgl. Hendler, Shavit, Yerushalmi: *A Scalable Lock-free Stack Algorithm* (Sect. 5) (16th ACM Symp. on Parallelism in Algorithms and Architectures) <http://www.cs.bgu.ac.il/~hendlerd/papers/scalable-stack.pdf>

## , Linearisierbarkeit

- ▶ nebenläufige Implementierung  $N$  einer Datenstrukturspezifikation  $P$
- ▶ mit *abstraction map*  $a$  von  $N$  zu einer sequentiellen Implementierung  $S$
- ▶  $N$  heißt *linearisierbar*, falls es für jede nebenläufige Ausführung von  $N$  eine Folge von *Linearisierungspunkten*  $n_1, n_2, \dots$  gibt, so daß  $a(n_1), a(n_2), \dots$  eine  $P$ -korrekte Ausführung von  $S$  ist.

vgl. Shavit: *Art of Multiproc. Prog.* Sect. 9.3 *Concurrent Reasoning*

## -Blocking Queue (Problem)

- ▶ einfach verkettete Liste

```
private static class Node<E> {  
    E item; AtomicReference<Node<E>> next; }  
}
```

- ▶ Zeiger `head`, `tail` auf Anfang/Ende, benutze Sentinel (leerer Startknoten)

Auslesen (am Anfang) ist leicht,  
Problem beim Einfügen (am Ende):

- ▶ zwei Zeiger `next` und `tail` müssen geändert werden,
- ▶ aber wir wollen keinen Lock benutzen.

## -Blocking Queue (Lösung)

(Michael and Scott, 1996)

<http://www.cs.rochester.edu/research/synchronization/pseudocode/queues.html>

Idee: die zwei zusammengehörigen Änderungen mglw. durch verschiedene Threads ausführen (!)

Queue hat zwei Zustände:

- ▶ A: tail zeigt auf letzten Knoten
- ▶ B: tail zeigt auf vorletzten Knoten

wer B bemerkt, muß reparieren.

in Java realisiert als `ConcurrentLinkedQueue`

## -Blocking Übung

- ▶ CAS-Maschinenbefehler in JVM-Assemblercode
- ▶ Testfälle für nebenläufige Stacks/Queues
- ▶ push/pop für non-blocking Stack
- ▶ enqueue/dequeue für non-blocking Queue

/Plan

für nebenläufige Programme, die gemeinsamen Speicher benutzen:

- ▶ bisher: Synchronisation durch Sperren (locks)  
wesentlicher Nachteil: nicht modular
- ▶ jetzt: nichtblockierende Synchronisation

Quelle: Simon Peyton Jones: *Beautiful Concurrency*, = Kapitel 24 in: Andy Oram und Greg Wilson (Hrsg.): *Beautiful Code*, O'Reilly, 2007. <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/simonpj/papers/stm/>

: Kontoführung (I)

das ist das (bisher) naheliegende Modell:

```
class Account { int balance;
    synchronized void withdraw (int m)
        { balance -= m; }
    synchronized void deposit (int m)
        { withdraw (-m); }
```

welche Fehler können hier passieren:

```
void transfer
    (Account from, Account to, int m)
{
    from.withdraw (m);
    to.deposit (m);
}
```

## : Kontoführung (II) ist das eine Lösung?

```
void transfer
    (Account from, Account to, int m)
{
    from.lock(); to.lock ();
    from.withdraw (m);
    to.deposit (m);
    from.unlock(); to.unlock();
}
```

: Kontoführung (III) wann funktioniert diese Lösung und wann nicht?

```
if (from < to) { from.lock(); to.lock() }  
else          { to.lock(); from.lock() }  
...
```

are Bad

- ▶ taking too few locks
- ▶ taking too many locks
- ▶ taking the wrong locks
- ▶ taking locks in the wrong order
- ▶ error recovery
- ▶ lost wakeups, erroneous retries

*locks do not support modular programming*

John Ousterhout: *Why Threads are a Bad Idea (for most purposes)* USENIX 1996,

[http://www.cc.gatech.edu/classes/AY2009/cs4210\\_fall/papers/ousterhout-threads.pdf](http://www.cc.gatech.edu/classes/AY2009/cs4210_fall/papers/ousterhout-threads.pdf)

## -Transaktionen

### Benutzung:

- ▶ Transaktions-Variablen
- ▶ Lese- und Schreibzugriffe nur innerhalb einer Transaktion
- ▶ Transaktion wird atomar und isoliert ausgeführt

### Implementierung:

- ▶ während der Transaktion: Zugriffe in Log schreiben
- ▶ am Ende (commit): prüfen, ob Log konsistent mit  
derzeitigem Speicherzustand ist
- ▶ ..., wenn nicht, dann Transaktion wiederholen

in Haskell: IO a

Werte:

```
4 :: Int ; "foo" ++ "bar" :: String
```

**Aktionen mit Resultat und Nebenwirkung:**

```
writeFile "foo.text" "bar" :: IO ()  
readFile "foo.text" :: IO String  
putStrLn (show 4) :: IO ()
```

**Nacheinanderausführung von Aktionen:**

```
do s <- readFile "foo.text"  
    putStrLn (show (length s))
```

**Start einer Aktion: im Hauptprogramm**

```
main :: IO ()  
main = do ...
```

## auf den Speicher

```
import Data.IORef
data IORef a -- abstrakt
newIORef :: a -> IO (IORef a)
readIORef :: IORef a -> IO a
writeIORef :: IORef a -> a -> IO ()
```

- ▶ damit kann man die üblichen imperativen Programme schreiben (jede Variable ist eine IORef)
- ▶ die Kombinatoren zur Programmablaufsteuerung kann man sich selbst bauen, z. B.

```
while :: IO Bool -> IO () -> IO ()
```

Übung: while implementieren, Fakultät ausrechnen

: STM a jede Transaktion soll *atomar sein*  
⇒ darf keine IO-Aktionen enthalten (da man deren Nebenwirkungen sofort beobachten kann)  
⇒ neuer Typ STM a für Aktionen mit Nebenwirkungen *nur auf Transaktionsvariablen* TVar a

```
type Account = TVar Int
withdraw :: Account -> Int -> STM ()
withdraw account m = do
    balance <- readTVar account
    writeTVar account ( balance - m )
transfer :: Account -> Account -> Int -> IO ()
transfer from to m = atomically
    ( do withdraw from m ; deposit to m      )
```

## und Auswahl

- ▶ eine Transaktion abbrechen: `retry`
- ▶ eine Transaktion nur ausführen, wenn eine Bedingung wahr ist

```
check :: Bool -> STM ()
```

```
check b = if b then return () else retry
```

- ▶ eine Transaktion nur ausführen, wenn eine andere erfolglos ist: `orElse`

## -Typen und -Operationen

```
data STM a -- Transaktion mit Resultat a
data IO a  -- (beobachtbare) Aktion
           -- mit Resultat a
atomically :: STM a -> IO a
retry      :: STM a
orElse     :: STM a -> STM a -> STM a
```

```
data TVar a -- Transaktions-Variable
           -- mit Inhalt a
newTVar    :: a -> STM ( TVar a )
readTVar   ::
writeTVar  ::
```

(= Tab. 24-1 in Beautiful Concurrency)

vgl.

<http://hackage.haskell.org/packages/archive/stm/2.2.0.1/doc/html/Control-Monad-STM.html>

## Santa Claus Problem

Santa repeatedly sleeps until wakened by either all of his nine reindeer, back from their holidays, or by a group of three of his ten elves. If awakened by the reindeer, he harnesses each of them to his sleigh, delivers toys with them and finally unharnesses them (allowing them to go off on holiday). If awakened by a group of elves, he shows each of the group into his study, consults with them on toy R&D and finally shows them each out (allowing them to go back to work). Santa should give priority to the reindeer in the case that there is both a group of elves and a group of reindeer waiting.

J.A. Trono, *A new Exercise in Concurrency*, SIGCSE Bulletin 26, 1994, p. 8-10

mit STM

kein Deadlock (trivial).

```
forM [ 1 .. num ] $ \ p -> forkIO $ forever $ do
    atomically $ do
        take $ left  p
        take $ right p
    atomically $ drop $ left  p
    atomically $ drop $ right p
take f = do
    busy <- readTVar f
    when busy $ retry
    writeTVar f True
```

**nicht fair. Vergleiche Diskussion hier:** <http://thread.gmane.org/gmane.comp.lang.haskell.parallel/305>

Motivation: zentrale Ausgabe von Tickets (mit eindeutigen und aufsteigenden Nummern).

mit höherem Durchsatz als mit einen *zentralen* Zähler

```
class Counter { int count;  
synchronized int next () { return count++;}}
```

James Aspnes, Maurice Herlihy, and Nir Shavit.

*Counting networks*, JACM 41(5):1020–1048, Sept. 1994

[http://www.cs.yale.edu/homes/aspnes/papers/  
ahs-abstract.html](http://www.cs.yale.edu/homes/aspnes/papers/ahs-abstract.html)

wesentlicher Baustein: `AtomicBoolean.negate()`

## für Zählnetze

korrekte Behandlung der Token:

- ▶ Netzwerk mit  $n$  Eingängen,  $n$  Ausgängen, Tiefe  $d$
- ▶ jedes Token, das einen Eingang betritt, verläßt das Netzwerk nach  $\leq d$  Schritten an einem Ausgang (das Netzwerk vergißt und erfindet keine Token)

gute Verteilung der Token:

- ▶ (informal) bei *beliebiger* Verteilung der Token auf die Eingänge: jeder Ausgang wird (etwa) *gleich oft* benutzt.
- ▶ (formal) betrachte Anzahlen  $[x_1, \dots, x_n]$  der Token je Eingang, Anzahlen  $[y_1, \dots, y_n]$  der Token je Ausgang; im *Ruhezustand* ( $\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n y_i$ ) soll gelten:  
 $[y_1, \dots, y_n]$  ist *Schrittfolge*:  $y_1 \geq \dots \geq y_n \geq y_1 - 1$

aus Spezifikation für Zählnetze

Satz: für jedes  $n > 0$ ,  $S \geq 0$  gibt es *genau eine* Schrittfolge  $[z_1, \dots, z_n]$  mit  $S = \sum z_i$ .

Satz: für *jeden* Zustand jedes Zählnetzes gilt:

- ▶ wenn  $\sum x_i - \sum y_i = D > 0$   
(es befinden sich noch  $D$  Token im Netz),
- ▶ dann gilt  $\forall i : z_i - \square \leq y_i \leq z_i$   
wobei  $[z_1, \dots]$  die (eindeutige) Schrittfolge mit  $\sum z_i = \sum x_i$

Folgerung: auch wenn der Ruhezustand nie eintritt, sind die Ausgänge gut verteilt

(hoher Durchsatz  $\implies$  kleines  $D \implies$  gute Verteilung)

aus Verteilern

Verteiler:

- ▶ ein *Verteiler* (balancer) ist Schaltkreis mit zwei Eingängen, zwei Ausgängen, einem Zustand.
- ▶ Wenn Zustand *hoch*, erscheint nächstes Eingangstoken am oberen Ausgang. Wenn Zustand *tief*, am unteren.
- ▶ Nach jedem Token wechselt der Zustand.

Eigenschaften/Fragen:

- ▶ jeder Verteiler ist ein Zählnetz für 2 Eingänge
- ▶ gibt es Zählnetze aus Verteilern (z. B. für 4 Eingänge)?
- ▶ kann man diese systematisch konstruieren?

## Zählen und Zusammenfügen (I)

Ansatz für Konstruktion eines  $2^k$ -Zählnetzes aus Verteilern:

- ▶ Zählnetze  $C$  benutzen Teilnetzwerke  $M$ , deren *Eingangsfolgen* (nach Induktion) Schrittfolgen sind.  
(vergleiche `mergesort`: die Funktion `merge` wird nur auf geordnete Folgen angewendet)
- ▶ Konstruktion der Zählnetze: Induktionsanfang:  $C_1(x_1) =$   
Induktionsschritt:  $C_{2n}(x_1, \dots, x_{2n}) =$   
 $C_n(x_1, \dots, x_n); C_n(x_{n+1}, \dots, x_{2n}); M_{2n}(x_1, \dots, x_n; x_{n+1}, \dots, x_{2n})$
- ▶ Konstruktion der Merge-Netze: (Spezifikation?)  
Induktionsanfang:  $M_2(x_1, x_2)$ ; Induktionsschritt?

## Zählen und Zusammenfügen (II)

Induktionsschritt:

$$M_{2n}(\vec{x}, \vec{y}) = \begin{cases} M_n(\text{odd } \vec{x}, \text{even } \vec{y}); \\ M_n(\text{even } \vec{x}, \text{odd } \vec{y}); \\ V(x_1, x_2); \dots; V(y_{n-1}, y_n) \end{cases}$$

mit  $V(p, q) = \text{Verteiler}$ ,  $\text{odd}(x_1, x_2, \dots) = (x_1, x_3, \dots)$ ,  
 $\text{even}(x_1, x_2, \dots) = (x_2, x_4, \dots)$ .

Satz: jedes solche  $M_n$  erfüllt die Spezifikation.

Übung: konstruiere  $C_4, M_4$

Übung: Beweis für  $M_8$  mit Eingangsfolge  $(3, 3, 2, 2; 4, 3, 3, 3)$ ,  
unter der Annahme, daß der Satz für  $M_4$  gilt.

Übung: Beweis für  $M_{2n}$  mit beliebiger Eingangsfolge,  
unter der Annahme, daß der Satz für  $M_n$  gilt.

## für Verteiler und Netze

### Plan:

```
struct Balancer {
    AtomicBoolean state;
    Balancer [Boolean] next;
}
traverse (Balancer b) {
    while (nicht fertig) {
        boolean i = b.state.getAndNegate();
        traverse(b.next[i]);    } }
}
```

### Aufgaben:

- ▶ implementiere `negate`
- ▶ implementiere Verteiler mit STM

## von Zählnetzen

<http://www.cs.yale.edu/homes/aspnes/papers/ahs-abstract.html> **Section 5**

- ▶ **verteiltes Zählen**  
 $n$  Ein/Ausgänge, an jedem Ausgang ein Zähler mit Schrittweite  $n$
- ▶ **verteilter Producer/Consumer-Puffer**  
benutzt zwei Netze der Breite  $n$  zum verteilten Zählen sowie  $n$  1-Element-Container
- ▶ **Synchronisationsbarriere** (vgl. CyclicBarrier)

## bung Zählnetze

Beweise: die folgenden Bedingungen sind äquivalent:

- ▶  $(x_1, \dots, x_n)$  ist Schrittfolge
- ▶  $\forall 1 \leq i < j \leq n : 1 \geq x_i - x_j \geq 0$ .
- ▶ Wenn  $m = \sum x_i$ , dann  $\forall i : x_i = \lceil \frac{m-i+1}{n} \rceil$

Wenn  $x$  eine Schrittfolge ist, welche Beziehungen gelten zwischen  $\sum \text{odd}(x)$ ,  $\sum(x)/2$ ,  $\sum \text{even}(x)$ ?  
(Möglichst genau! Benutze ggf.  $\lceil \cdot \rceil$ ,  $\lfloor \cdot \rfloor$ )

Beweise: Wenn  $x$  und  $y$  gleichlange Schrittfolgen mit  $\sum x = 1 + \sum y$ , dann gilt für alle bis auf ein  $i$ :  $x_i = y_i$ .  
Was gilt stattdessen für dieses  $i$ ?

periodische Zählnetze

bisher betrachtete Modelle zur Thread-Kommunikation:

- ▶ Datenaustausch über gemeinsamen Speicher
- ▶ Synchronisation durch Locks, Transaktionen

jetzt:

- ▶ kein gemeinsamer Speicher
- ▶ Datentransport durch Nachrichten
- ▶ dabei ggf. Synchronisation

Beispiel: Rendezvous (Ada), Actors (Scala), Channels (Go)

## Sequential Processes (CSP)

- ▶ abstraktes Modell für Kommunikation von Prozessen
- ▶ Abstraktion: (endliches) Alphabet von (einfachen) Nachrichten, synchrone Kommunikation
- ▶ entwickelt 1978 von C. A. R. Hoare  
<http://research.microsoft.com/en-us/people/thoare/>
- ▶ Grundlage für Prozeßmodell in Occam, Ada, Go, ...

: Syntax  $E$  ist eine Menge von Ereignissen

Die Menge  $\mathbb{P}(E)$  der Prozesse über  $E$  definiert durch:

- ▶  $\text{STOP} \in \mathbb{P}$ ,
- ▶ wenn  $e \in E$  und  $P \in \mathbb{P}$ , dann  $(e \rightarrow P) \in \mathbb{P}$
- ▶ wenn  $P_1, P_2 \in \mathbb{P}$ , dann sind in  $\mathbb{P}$ :
  - ▶  $P_1; P_2$  (Nacheinanderausführung)
  - ▶  $P_1 \square P_2$  (Auswahl)
  - ▶ für  $C \subseteq E$ :  $P_1 \parallel_C P_2$  (nebenläufige Ausführung mit Kommunikation)
- ▶  $P_1^* \in \mathbb{P}$  (eine Form der Iteration)

: Semantik (Spur-Semantik)

zu  $P \in \mathbb{P}(E)$  konstruiere Automaten  $A$  (mit  $\epsilon$ -Übergängen) über  $E$ .

Die *Spur-Sprache* von  $P$  := die Sprache von  $A$

Startzustand von  $A$  ist  $P$ , Übergangsrelation von  $A$  ist:

- ▶  $(a \rightarrow P) \xrightarrow{a} P$
- ▶  $(\text{STOP}; Q) \xrightarrow{\epsilon} Q$ , wenn  $P \xrightarrow{a} P'$ , dann  $(P; Q) \xrightarrow{a} (P'; Q)$ ,
- ▶  $(P \square Q) \xrightarrow{\epsilon} P$ ,  $(P \square Q) \xrightarrow{\epsilon} Q$
- ▶  $a \in C \wedge P \xrightarrow{a} P' \wedge Q \xrightarrow{a} Q' \Rightarrow (P \parallel_C Q) \xrightarrow{a} (P' \parallel_C Q')$ ,
- ▶  $a \notin C \wedge P \xrightarrow{a} P' \Rightarrow (P \parallel_C Q) \xrightarrow{a} (P' \parallel_C Q)$ ,
- ▶  $a \notin C \wedge Q \xrightarrow{a} Q' \Rightarrow (P \parallel_C Q) \xrightarrow{a} (P \parallel_C Q')$ ,
- ▶  $P^* \xrightarrow{\epsilon} \text{STOP}$ ,  $P^* \xrightarrow{\epsilon} (P; P^*)$ .

## Prozeß-Semantiken

### bisherige Semantik:

- ▶ Menge der vollständigen Spuren (*complete traces*)  
(entspr. Sprache eines endlichen Automaten)
- ▶ keine Beschreibung von „laufenden“ Prozessen

### Variante:

- ▶ Menge der unvollständigen Spuren (*partial traces*)  
(jeder Automatenzustand ist akzeptierend)
- ▶ keine Beschreibung von Verklemmungen (*deadlocks*)

## -Semantik

Semantik eines Prozesses ist Menge von Paaren von

- ▶ partieller Spur
- ▶ und Folge-Menge (mögliche nächste Ereignisse)

dann verschiedene Auswahl-Operatoren:

- ▶ external (deterministic) choice  $\square$   
(Umgebung bestimmt, wie es weitergeht)
- ▶ internal (nondeterministic) choice  $\sqcap$   
(Prozeß entscheidet)

## -Vous (I) in Ada

```
task body Server is
  Sum : Integer := 0;
begin loop
  accept Foo (Item : in Integer)
    do Sum := Sum + Item; end Foo;
  accept Bar (Item : out Integer)
    do Item := Sum; end Bar;
  end loop;
end Server;
A : Server; B : Integer;
begin
  A.Foo (4); A.Bar (B); A.Foo (5); A.Bar (B);
end B;
```

(II)

- ▶ ein Prozeß (Server) führt `accept` aus,  
anderer Prozeß (Client) führt Aufruf aus.
- ▶ beide Partner müssen aufeinander warten
- ▶ `accept Foo ( .. ) do .. end Foo` ist atomar

(III)

**allgemeinere Formen von accept:**

- ▶ `select accept Foo (Item : in Integer)  
          do .. end;  
      or accept Bar ( ... )  
end select;`
- ▶ `when X < Y => accept Foo (...)  
select ... or terminate; end select;  
select ... or delay 1.0 ; ... end select;  
select ... else .. end select;`

[http://en.wikibooks.org/wiki/Ada\\_Programming/Tasking](http://en.wikibooks.org/wiki/Ada_Programming/Tasking)  
[http://www.adaic.org/resources/add\\_content/standards/05aarm/html/AA-9-7-1.html](http://www.adaic.org/resources/add_content/standards/05aarm/html/AA-9-7-1.html)

-Kanäle

zur asynchronen Kommunikation

(Eigenschaften: vgl. Postbrief statt Rendezvous)

- ▶ Kapazität des Kanals/Briefkastens  
(Kapazität 0  $\Rightarrow$  Rendezvous)
- ▶ Ordnung der Nachrichten (FIFO oder ungeordnet)
- ▶ Typisierung der Nachrichten

Bsp. in Go: (<http://golang.org>)

```
ch := make (chan int) // anlegen
ch <- 41 // schreiben
x := <- ch // lesen
```

## äle in Haskell

Kanal ist *typisiert*, FIFO, *unbeschränkt*.

```
data Chan a -- abstrakt
newChan    :: IO (Chan a)
writeChan ::
readChan  ::
```

Dok.: <http://www.haskell.org/ghc/docs/latest/html/libraries/base/Control-Concurrent-Chan.html>

## Übungen

- ▶ Implementierung ansehen
- ▶ Anwendung: Aufsammeln von Teilergebnissen
- ▶ Anwendung: Mergesort in Aktor-Style
- ▶ vergleiche mit `Control.Concurrent.STM.TChan`

## (Scala)

- ▶ Briefkasten ist nicht typisiert
- ▶ Nachrichten sind typisiert

<http://www.scala-lang.org/node/242>

```
object Stop
class Server extends Actor { def act() {
  var running = true;
  while (running) { receive {
    case x : Int => println(x)
    case Stop => running = false; } } } }
var s = new Server()
s.start ; s ! 42 ; s ! Stop
```

## Actors Style

Kap. 30.5 in: Odersky, Spoon, Villers: *Programming in Scala*,  
Artima 2007,

- ▶ ein Akteur soll nicht blockieren  
... sondern lieber Arbeit an andere Akteure weitergeben
- ▶ kommuniziere mit Akteuren nur durch Nachrichten  
... und nicht durch gemeinsame Variablen
- ▶ Nachrichten sollten *immutable* sein  
... sonst Gefahr von inkonsistenten Daten
- ▶ Nachrichten sollten *self-contained* sein  
... damit der Akteur nicht nachfragen muß  
unveränderliche Objekte kann man billig mitschicken

## -Zusammenfassung

- ▶ unmittelbar synchron, kein Puffer:
  - ▶ Ada-Rendezvous (task entry call/accept)
  - ▶ Go: `ch = make(chan int); ch <- .. ; .. <- ch`
  - ▶ Scala: `Actor a ; ... = a !? msg`
- ▶ gepuffert synchron (Nachrichten der Reihe nach)
  - ▶ beschränkte Kapazität:  
Go: `make(chan int, 10)`  
java.util.concurrent.LinkedBlockingQueue
  - ▶ unbeschränkt:  
Haskell: `Control.Concurrent.newChan`
- ▶ asynchron Scala: `Actor a ; ... = a ! msg`

bung: Kanäle in Go

Sprachdefinition: <http://golang.org/>

Compiler/Runtime:

- ▶ **google:** `go run hello.go`
- ▶ **gcc:** `gcc-go -o hello hello.go ; ./hello`

Kanäle:

- ▶ Syntax (Deklaration, Benutzung)
- ▶ Kapazität
- ▶ Schließen von Kanälen

Anwendung: Mergesort mit Kanälen

- ▶ vervollständige Quelltext aus Git-Repo
- ▶ untersuche verschiedene Kapazitäten

## Rechnen

- ▶ Prozesse mit gemeinsamem Speicher
- ▶ Prozesse (Aktoren), Nachrichten/Kanäle
- ▶ Prozesse (Aktoren) verteilt auf verschiedene Rechner

## Realisierungen:

- ▶ Erlang (1987...)
- ▶ Cloud Haskell (2012...)

*Ericsson Language*, <http://www.erlang.org/>  
Anwendung: Steuerung von Telekommunikationsanlagen

grundsätzliche Spracheigenschaften:

- ▶ funktional
- ▶ dynamisch typisiert
- ▶ mit Nebenwirkungen

(also ungefähr LISP)

Besonderheiten:

- ▶ leichtgewichtige verteilte Prozesse
- ▶ *hot code replacement* (paßt gut zu *tail recursion*)

## Haskell: Übersicht

[http://www.haskell.org/haskellwiki/Cloud\\_Haskell](http://www.haskell.org/haskellwiki/Cloud_Haskell)

- ▶ keine Sprache, sondern Bibliothek  
(= eDSL, *eingebettete* domainspezifische Sprache)
- ▶ Semantik angelehnt an Erlang-Prozesse

Jeff Epstein, Andrew Black, and and Simon Peyton Jones. *Towards Haskell in the Cloud*, Haskell Symposium, Tokyo, Sept 2011.

<http://research.microsoft.com/en-us/um/people/simonpj/papers/parallel/>

## -Haskell: elementare Operationen

```
findSlaves :: Backend -> Process [NodeId]
spawn :: NodeId -> Closure (Process ())
      -> Process ProcessId
send :: Serializable a
     => ProcessId -> a -> Process ()
expect :: Serializable a => Process a

newChan :: Serializable a
        => Process (SendPort a, ReceivePort a)
sendChan :: Serializable a
         => SendPort a -> a -> Process ()
receiveChan :: Serializable a
            => ReceivePort a -> Process a
```

## berblick

- ▶ bei Ausdrücken  $f(X, Y)$  kann man Werte von  $X$  und  $Y$  parallel und unabhängig berechnen,
- ▶ wenn die Auswertung von  $X$  und  $Y$  nebenwirkungsfrei ist.
- ▶ im einfachsten Fall sind *alle* Ausdrücke nebenwirkungsfrei (Haskell)
- ▶ Haskell benutzt Bedarfsauswertung.  
Strategie-Kombinatoren und -Annotationen erzwingen frühere/verteilte Auswertung von Teilausdrücken:
  - ▶ Kombinatoren: `par X (pseq Y (f X Y))`
  - ▶ Strategie-Annotationen: `xs `using` parList rseq`

## Datentypen und Pattern Matching

ein Datentyp mit zwei Konstruktoren:

```
data List a
  = Nil          -- nullstellig
  | Cons a (List a) -- zweistellig
```

### Programm mit Pattern Matching:

```
length :: List a -> Int
length xs = case xs of
  Nil      -> 0
  Cons x ys -> 1 + length ys
```

**beachte: Datentyp rekursiv  $\Rightarrow$  Programm rekursiv**

```
append :: List a -> List a -> List a
```

## . Datentypen (Beispiele)

```
data Bool = False | True
data Maybe a = Nothing | Just a
```

```
data Tree a =
  Leaf | Branch ( Tree a ) a ( Tree a )
```

Ü: inorder, preorder, leaves, depth

Ü: Schlüssel in Blättern

```
data N = Z | S N
```

Ü: Rechenoperationen

Notation für Listen in Haskell:

**anstatt** `data List a = Nil | Cons a (List a)`

**wird benutzt** `data [a] = [] | (a : [a])`

- ▶ Konstruktoren werten Argumente (zunächst) nicht aus  
statt Wert wird *thunk* (closure) gespeichert
- ▶ Wert eines Ausdrucks wird erst bestimmt, wenn er wegen  
Pattern Matching benötigt wird
- ▶ dann wird der Wert nur soweit nötig bestimmt  
d. h., bis man den obersten Konstruktor sieht  
eine solche Form heißt *Kopfnormalform*

(der andere Begriff ist *Normalform*: alle Konstruktoren)

: Primzahlen

Aufgabe: bestimme  $\pi(n) :=$  Anzahl der Primzahlen in  $[1..n]$  auf naive Weise (durch Testen und Abzählen)

```
num_primes_from_to :: Int -> Int -> Int
num_primes_from_to lo hi
    = length $ filter id
      $ map prime [ lo .. hi ]
prime :: Int -> Bool
```

parallele Auswertung von `map prime [lo..hi]`:

```
map prime [lo..hi]
    `using` parListChunk 100000 rseq
```

http:

[//hackage.haskell.org/packages/archive/parallel/3.2.0.3/doc/html/Control-Parallel-Strategies.html](http://hackage.haskell.org/packages/archive/parallel/3.2.0.3/doc/html/Control-Parallel-Strategies.html)

## : Mergesort

### Sequentieller Algorithmus:

```
merge :: Ord a => [a] -> [a] -> [a]
split :: [a] -> ([a], [a])
msort :: Ord a => [a] -> [a]
msort [] = [] ; msort [x] = [x] ; msort xs =
    let ( here, there ) = split xs
        mshere = msort here
        msthere = msort there
    in merge mshere msthere
```

Strategie-Annotation in `msort`,  
dabei Auswertung der Teilresultate erzwingen.

vgl. <http://article.gmane.org/gmane.comp.lang.haskell.parallel/181>

## LINQ

### Beispiel:

```
(from n in Enumerable.Range(lo, hi-lo)
                        .AsParallel()
 where Prime(n)  select true).Count ();
```

### Typen:

- ▶ System.IEnumerable<E>
- ▶ System.Linq.ParallelEnumerable<E>

<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd997425.aspx>

### Übung:

- ▶ **paralleles** foreach
- ▶ Steuerung der Parallelität durch Partitioner

(allgemein)

homo-morph = gleich-förmig

Signatur  $\Sigma$  (= Menge von Funktionssymbolen)

Abbildung  $h$  von  $\Sigma$ -Struktur  $A$  nach  $\Sigma$ -Struktur  $B$  ist

Homomorphie, wenn:

$\forall f \in \Sigma, x_1, \dots, x_k \in A :$

$$h(f_A(x_1, \dots, x_k)) = f_B(h(x_1), \dots, h(x_k))$$

Beispiel:

$\Sigma =$  Monoid (Eins-Element 1, binäre Operation  $\circ$ )

$A =$  List a (Listen) mit  $1_A = \text{Nil}$ ,  $\circ_A = \text{append}$

$B = \mathbb{N}$  (Zahlen) mit  $1_B = 0$ ,  $\circ_B = \text{plus}$

$h = \text{length}$

## -Sätze für Listen

1. für jeden Hom exist. Zerlegung in map und reduce — und das reduce kann man flexibel parallelisieren!

Bsp: `length = reduce (+) . map (const 1)`

map: parallel ausrechnen, reduce: balancierter Binärbaum.

2. jeden Hom. kann man als foldl und als foldr schreiben
3. (Umkehrung von 2.) Wenn eine Funktion sowohl als foldl als auch als foldr darstellbar ist, dann ist sie ein Hom. — und kann (nach 1.) flexibel parallelisiert werden  
*m.a.W: aus der Existenz zweier sequentieller Algorithmen folgt die Existenz eines parallelen Alg.*

- ▶ Jeremy Gibbons: *The Third Homomorphism Theorem*, Journal of Functional Programming, May 1995.

http:

`//citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?  
doi=10.1.1.45.2247&rep=rep1&type=pdf`

- ▶ Kazutaka Morita, Akimasa Morihata, Kiminori Matsuzaki, Zhenjiang Hu, Masato Takeichi: *Automatic Inversion Generates Divide-and-Conquer Parallel Programs*, PLDI 2007.

, foldl, map, reduce

- ▶ **Rechnung beginnt am rechten Ende**

```
foldr :: (a -> b -> b) -> b -> [a] -> b
```

```
foldr (-) 0 [1,2,3] = 2
```

- ▶ **Rechnung beginnt am linken Ende:**

```
foldl :: (b -> a -> b) -> b -> [a] -> b
```

```
foldl (-) 0 [1,2,3] = -6
```

- ▶ **für assoziative Operation, beliebige Klammerung:**

```
reduce :: b -> (b -> b -> b) -> [b] -> b
```

- ▶ **mit elementweiser Transformation (map):**

```
foldb :: b -> (a -> b) -> (b -> b -> b) -> [a] -> b
```

```
map    :: (a -> b) -> [a] -> [b]
```

```
foldb n f g xs = reduce n g ( map f xs )
```

## : maximale Präfix-Summe

```
mps :: [Int] -> Int
mps xs = maximum
    $ do ys <- inits xs ; return $ sum ys
```

zur Darstellung durch fold(l/r): benutze

```
mpss :: [ Int ] -> ( Int, Int )
mpss xs = ( mps xs, sum xs )
```

### Bestimme

- ▶ `mpss (x : xs) aus mpss xs`  
ergibt `mpss = foldr ...`
- ▶ `mpss (xs ++ [x]) aus mpss xs`  
ergibt `mpss = foldl ...`

nach 3. Homomorphiesatz existiert `mpss = foldb ...`

## Inverse

- ▶ Def:  $f'$  heißt *schwach invers* zu  $f$ , wenn  $\forall x : f(f'(f(x))) = f(x)$ .

Bsp:  $\text{sum}' :: \dots \rightarrow \dots ; \text{sum}' x = \dots$

- ▶ Ziel:  $f = \text{foldb } \dots h$  mit

$h x y = f (f' x ++ f' y)$

- ▶ Satz: diese Darstellung existiert und ist korrekt, wenn  $f$  sowohl als  $\text{foldr}$  als auch  $\text{foldl}$  darstellbar ist.
- ▶ Bemerkung: die Argument von  $\text{fold}(l/r)$  braucht man nicht für den Satz, aber man kann daraus  $f'$  bestimmen (teilw. automatisch).

Ü: schwaches Inverses von  $\text{mpss}$

### 3. Homomorphie-Satz

Plan:

- ▶ wenn  $h = \text{foldl } f \ e$  und  $h = \text{foldr } g \ e$ , dann  
(A)  $\forall x_1, y_1, x_2, y_2 : h(x_1) = h(x_2) \wedge h(y_1) = h(y_2) \Rightarrow$   
 $h(x_1 ++ y_1) = h(x_2 ++ y_2)$

Beweis: ausrechnen

- ▶ Wenn (A), dann ist  $h$  homomorph, d. h. es ex.  $b$  mit  
 $\forall x, y : h(x ++ y) = b(h(x), h(y))$ .

Beweis: wähle ein schwaches Inverses  $i$  von  $h$ , setze  
 $b(l, r) = h(i(l) ++ i(r))$  und ausrechnen

## : Größte Teilsumme

```
mss :: [ Int ] -> Int
mss xs = maximum $ map sum $ do
  ys <- inits xs; zs <- tails ys; return zs
```

- ▶ Darstellung als foldl/foldr?
- ▶ ...benutze `mss`, `mps`, `mps . reverse`, `sum`
- ▶ schwaches Inverses
- ▶ resultierende Darstellung als `foldb`
- ▶ Implementierung in Haskell oder Java

## : Binäre Addition

- ▶ genauer: Bestimmung des ausgehenden Übertrags bei der Addition von zwei (gleich-)langen Binärzahlen
- ▶ allgemeines Prinzip, um eine assoziative Verknüpfung zu erhalten: Funktionskomposition ist assoziativ
- ▶ im speziellen Fall betrachte

$$[(\text{Bool}, \text{Bool})] \rightarrow (\text{Bool} \rightarrow \text{Bool})$$

d. h. jedem Teilsegment wird eine Funktion von Übertrag (eingehend) nach Übertrag (ausgehend) zugeordnet.

- ▶ Diese Fkt. lassen sich explizit repräsentieren (als lineare Fkt. im Halbring  $(\text{Bool}, \text{xor}, \text{and})$ )
- ▶  $\Rightarrow$  Ladner-Fischer-Addierschaltkreis.

von Folgen

als persistente Datenstruktur (in Haskell, aber nicht nur dort)

- ▶ Listen:
  - ▶ einfach verkettet: lineare Kosten
  - ▶ Cons ist lazy: Streams
- ▶ Arrays:
  - ▶ direkter Zugriff (get in  $O(1)$ )
  - ▶ immutable: put linear
  - ▶ append linear
- ▶ Data.Sequence: Ü: Kosten in API-Doc. nachlesen
- ▶ Data.Vector(.Unboxed):  
effiziente Kompilation durch RULES (siehe Quelltext)

## Max.-Präfixsumme

siehe git-Archiv `skpp-ws12/hom/mps-*.hs`

zusätzl. Informationen:

- ▶ **Vektoren:**

`http://hackage.haskell.org/package/vector`

- ▶ **effiziente Code-Erzeugung (Inlining)**

`http://article.gmane.org/gmane.comp.lang.haskell.cafe/90211`

- ▶ **paper folding sequence:** `http://oeis.org/A014577`

: Kommutativität

Methode aus PLINQ (<http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ff963547.aspx>)

```
Aggregate<S, A, R>(
    this ParallelQuery<S> source,
    Func<A> seedFactory,
    Func<A, S, A> updateAccumulatorFunc,
    Func<A, A, A> combineAccumulatorsFunc,
    Func<A, R> resultSelector);
```

- ▶ in Haskell nachbauen (Typ und Implementierung)
- ▶ combine muß kommutativ sein  
(<http://blogs.msdn.com/b/pfxteam/archive/2008/01/22/7211660.aspx>) — warum?

## und Beispiel

map\_reduce

```
:: ( (ki, vi) -> [(ko, vm)] ) -- ^ map  
-> ( (ko, [vm]) -> vo ) -- ^ reduce  
-> [(ki, vi)] -- ^ eingabe  
-> [(ko, vo)] -- ^ ausgabe
```

## Beispiel (word count)

ki = Dateiname, vi = Dateiinhalt  
ko = Wort, vm = vo = Anzahl

- ▶ parallele Berechnung von map
- ▶ parallele Berechnung von reduce
- ▶ verteiltes Dateisystem für Ein- und Ausgabe

- ▶ Jeffrey Dean and Sanjay Ghemawat: *MapReduce: Simplified Data Processing on Large Clusters*, OSDI'04: Sixth Symposium on Operating System Design and Implementation, San Francisco, CA, December, 2004.  
<http://labs.google.com/papers/mapreduce.html>
- ▶ Ralf Lämmel: *Google's MapReduce programming model - Revisited*, Science of Computer Programming - SCP , vol. 70, no. 1, pp. 1-30, 2008 <http://www.systems.ethz.ch/education/past-courses/hs08/map-reduce/reading/mapreduce-progmodel-scp08.pdf>

- ▶ Haskell:  
wenige Zeilen, zur Demonstration/Spezifikation
- ▶ Google:  
C++, geheim
- ▶ Hadoop:  
Java, frei (Apache-Projekt, Hauptsponsor: Yahoo)  
<http://hadoop.apache.org/>

## in Haskell

```
import qualified Data.Map as M

map_reduce :: ( Ord ki, Ord ko )
  => ( (ki, vi) -> [(ko,vm)] ) -- ^ distribute
  -> ( ko -> [vm] -> vo ) -- ^ collect
  -> M.Map ki vi -- ^ eingabe
  -> M.Map ko vo -- ^ ausgabe
map_reduce distribute collect input
  = M.mapWithKey collect
  $ M.fromListWith (++)
  $ map ( \ (ko,vm) -> (ko,[vm]) )
  $ concat $ map distribute
  $ M.toList $ input
```

## : Wörter zählen

```
main :: IO ()
main = do
  files <- getArgs
  texts <- forM files readFile
  let input = M.fromList $ zip files texts
      output = map_reduce
        ( \ (ki,vi) -> map ( \ w -> (w,1) )
          ( words vi ) )
        ( \ ko nums -> Just ( sum nums))
      input
  print $ output
```

wo liegen die Möglichkeiten zur Parallelisierung?  
(in diesem Programm nicht sichtbar.)

## Bestandteile:

- ▶ verteiltes Dateisystem
- ▶ verteilte Map/Reduce-Implementierung

## Betriebsarten:

- ▶ local-standalone (ein Prozeß)
- ▶ pseudo-distributed (mehrere Prozesse, ein Knoten)
- ▶ fully-distributed (mehrere Knoten)

## Voraussetzungen:

- ▶ java
- ▶ ssh (Paßwortfreier Login zwischen Knoten)

## -Benutzung

- ▶ (lokal) konfigurieren

```
conf/{hadoop-env.sh,*-site.xml}
```

- ▶ Service-Knoten starten

```
bin/start-all.sh --config /path/to/conf
```

- ▶ Job starten

```
bin/hadoop --config /path/to/conf \<\  
    jar examples.jar terasort in out
```

## Informationen:

- ▶ Dateisystem: <http://localhost:50070>,
- ▶ Jobtracker: <http://localhost:50030>

## örter zählen

```
public static class TokenizerMapper
    extends Mapper<Object, Text, Text, IntWritable>{
    public void map(Object key, Text value, Context
public static class IntSumReducer
    extends Reducer<Text, IntWritable, Text, IntWritable>{
    public void reduce(Text key, Iterable<IntWritable>
    }
public static void main(String[] args) { ...
    job.setMapperClass(TokenizerMapper.class);
    job.setCombinerClass(IntSumReducer.class);
    job.setReducerClass(IntSumReducer.class); .. }
```

```
hadoop/src/examples/org/apache/hadoop/examples/
WordCount.java
```

vgl. <http://sortbenchmark.org/>, Hadoop gewinnt 2008.

Beispielcode für

- ▶ Erzeugen der Testdaten
- ▶ Sortieren
- ▶ Verifizieren

(jeweils mit map/reduce)

## -Berechnung

- ▶ **Eingabe:** `Map<Quelle, List<Wort>>`
- ▶ **Ausgabe:** `Map<Wort, List<Quelle>>`

Spezialfall: `Quelle = Wort = URL`, ergibt „das Web“.

## Rank (I)

„Definition“: eine Webseite (URL) ist wichtig, wenn wichtige Seiten auf sie zeigen.

- ▶ Eingabe: Matrix  $\text{link} :: (\text{URL}, \text{URL}) \rightarrow \text{Double}$  mit  $\text{link}(u, v) =$  Wahrscheinlichkeit, daß der Besucher von  $u$  zu  $v$  geht.
- ▶ Gesucht: Vektor  $w :: \text{URL} \rightarrow \text{Double}$  mit  $w * \text{link} = w$

## Modifikationen für

- ▶ eindeutige Lösbarkeit
- ▶ effiziente Lösbarkeit

## Rank (Eindeutigkeit)

- ▶ aus der Link-Matrix: Sackgassen entfernen (dort zufällig fortsetzen)
- ▶ diese Matrix mit völlig zufälliger Verteilung überlagern

Resultat ist (quadr.) stochastische Matrix mit positiven Einträgen, nach Satz von Perron/Frobenius

- ▶ besitzt diese einen eindeutigen größten reellen Eigenwert
- ▶ und zugehöriger Eigenvektor hat positive Einträge.

Rank (Berechnung)

durch wiederholte Multiplikation:  
beginne mit  $w_0 =$  Gleichverteilung,  
dann  $w_{i+1} = L \cdot w_i$  genügend oft  
(bis  $|w_{i+1} - w_i| < \epsilon$ )

diese Vektor/Matrix-Multiplikation kann ebenfalls mit  
Map/Reduce ausgeführt werden.  
(Welches sind die Schlüssel?)  
(Beachte: Matrix ist dünn besetzt. Warum?)

Quelle: Massimo Franceschet: *PageRank: Standing on the  
Shoulders of Giants* Comm. ACM 6/2011,  
<http://cacm.acm.org/magazines/2011/6/108660>

## bung Map/Reduce

- ▶ PLINQ/Aggregate:  
wie oft und für welche Argumente werden aufgerufen:  
update, combine? (abhängig von  
MaxDegreeOfParallelism)
- ▶ Map/Reduce (Haskell):  
Wordcount ausprobieren (Beispieltext:  
`http://www.gutenberg.org/etext/4300`)  
Wie bestimmt man die häufigsten Wörter? (allgemeinster  
Typ? Implementierung mit map/red?)  
wie multipliziert man (dünn besetzte) Matrizen mit map/red?
- ▶ Map/Reduce mit Hadoop:  
`http://www.michael-noll.com/tutorials/  
running-hadoop-on-ubuntu-linux-multi-node-cluster/`

: Hochparallele preiswerte Hardware

Grafikkarten mit z. B. 500 Rechenkernen (CUDA, OpenCL)

Eigenschaften:

- ▶ Verarbeitungsmodell ist low-level (C), aber (in Grenzen) hardwareunabhängig
- ▶ Rechnungen (im Kern) sehr schnell
- ▶ schneller Speicher (je Kern) sehr klein

vgl. Übersichtsvortrag <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/talk/11/cuda/>

## Ästhetiktheorie

... für parallele Algorithmen

Klassen:

- ▶  $NC$  = polylogarithmische Zeit, polynomielle Anzahl von Prozessoren
- ▶  $P$  = polynomielle Zeit
- ▶  $NC \subseteq P$

Reduktionen:

- ▶  $\leq_L$  logspace-Reduktion, Eigenschaften
- ▶  $P$ -vollständige Probleme (Bsp: Tiefensuchreihenfolge)

(vgl. für sequentielle Algorithmen: Klasse  $NP$ ,  
Polynomialzeitreduktion  $\leq_P$ ,  $NP$ -Vollständigkeit)

- ▶ Temporal-Logik (zur Beschreibung von Eigenschaften nebenläufiger Systeme)
- ▶ sicherer Zugriff auf gemeinsamen Speicher: software transactional memory (STM, TVar, ...)
- ▶ Prozesse mit lokalem Speicher: CSP, Kanäle, Agenten; verteilte Programme
- ▶ parallele Auswertung funktionaler Programme (Strategie-Annotationen)
- ▶ balancierte folds, map/reduce

Beispielklausur: <http://www.imn.htwk-leipzig.de/~waldmann/edu/ss11/skpp/klausur/>