Reaktive Programmierung
Vorlesung 5 vom 02.05.19
Das Aktorenmodell

Christoph Lüth, Martin Ring

Universität Bremen

Sommersemester 2019

Fahrplan

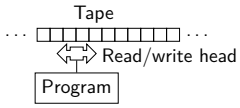
Das Aktorenmodell

- Eingeführt von Carl Hewitt, Peter Bishop und Richard Steiger (1973)
- Grundlage für nebenläufige Programmiersprachen und Frameworks. (Unter anderem Akka)
- Theoretisches Berechnungsmodell

Warum ein weiteres Berechnungsmodell? Es gibt doch schon die Turingmaschine!

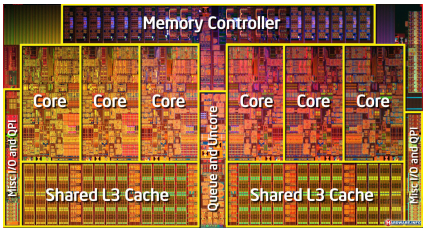
Die Turingmaschine

"the behavior of the computer at any moment is determined by the symbols which he [the computer] is observing, and his 'state of mind' at that moment" — Alan Turing



It is "absolutely impossible that anybody who understands the question [What is computation?] and knows Turing's definition should decide for a different concept." — Kurt Gödel

Die Realität



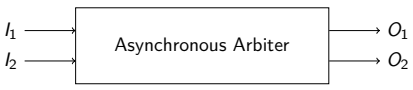
- $3GHz = 3'000'000'000Hz \implies$ Ein Takt $= 3,333 * 10^{-10}s$
- $c = 299'792'458\frac{m}{s}$
- Maximaler Weg in einem Takt $< 0,1m$ (Physikalische Grenze)

Synchronisation

- Während auf ein Signal gewartet wird, kann nichts anderes gemacht werden
- Synchronisation ist nur in engen Grenzen praktikabel! (Flaschenhals)

Der Arbiter

- Die Lösung: **Asynchrone Arbiter**



- Wenn I_1 und I_2 fast ($\approx 2fs$) gleichzeitig aktiviert werden, wird entweder O_1 oder O_2 aktiviert.
- Physikalisch unmöglich in konstanter Zeit. Aber Wahrscheinlichkeit, dass keine Entscheidung getroffen wird nimmt mit der Zeit exponentiell ab.
- Idealer Arbiter entscheidet in $O(ln(1/\epsilon))$
- kommen in modernen Computern überall vor

Unbounded Nondeterminism

- In Systemen mit Arbitern kann das Ergebnis einer Berechnung **unbegrenzt** verzögert werden,
- wird aber **garantiert** zurückgegeben.
- Nicht modellierbar mit (nichtdeterministischen) Turingmaschinen.

Beispiel

Ein Abiter entscheidet in einer Schleife, ob ein Zähler inkrementiert wird oder der Wert des Zählers als Ergebnis zurückgegeben wird.

Das Aktorenmodell

> Quantum mechanics indicates that the notion of a universal description of the state of the world, shared by all observers, is a concept which is physically untenable, on experimental grounds. — Carlo Rovelli

- Frei nach der relationalen Quantenphysik

Drei Grundlagen

- Verarbeitung
- Speicher
- **Kommunikation**

- Die (nichtdeterministische) Turingmaschine ist ein Spezialfall des Aktorenmodells
- Ein **Aktorensystem** besteht aus **Aktoren** (Alles ist ein Aktor!)

Aktoren

- Ein Aktor verarbeitet Nachrichten

Während ein Aktor eine Nachricht verarbeitet kann er

- neue Aktoren erzeugen
- Nachrichten an bekannte Aktor-Referenzen versenden
- festlegen wie die nächste Nachricht verarbeitet werden soll

- Aktor $\neq$ (Thread | Task | Channel | ...)

Ein Aktor kann (darf) nicht

- auf globalen Zustand zugreifen
- veränderliche Nachrichten versenden
- irgendetwas tun während er keine Nachricht verarbeitet

Aktoren (Technisch)

- Aktor $\approx$ Schleife über unendliche Nachrichtenliste + Zustand (Verhalten)
- $Behavior : (Msg, State) \rightarrow IO\ State$
- oder $Behavior : Msg \rightarrow IO\ Behavior$
- Verhalten hat Seiteneffekte (IO):
  - Nachrichtenversand
  - Erstellen von Aktoren
  - Ausnahmen

Verhalten vs. Protokoll

Verhalten

Das Verhalten eines Aktors ist eine seiteneffektbehaftete Funktion $Behavior : Msg \rightarrow IO\ Behavior$

Protokoll

Das Protokoll eines Aktors beschreibt, wie ein Aktor auf Nachrichten reagiert und resultiert implizit aus dem Verhalten.

- Beispiel:

```
case (Ping,a) =>
  println("Hello")
  counter += 1
  a ! Pong
```

$\square(a(Ping, b) \rightarrow \Diamond b(Pong))$

Kommunikation

- Nachrichten sind **unveränderliche** Daten, **reine** Funktionen oder **Futures**
- Die Zustellung von Nachrichten passiert höchstens einmal (Best-effort)
  - Wenn z.B. die Netzwerkverbindung abbricht, wird gewartet, bis der Versand wieder möglich ist
  - Wenn aber z.B. der Computer direkt nach Versand der Nachricht explodiert (oder der Speicher voll läuft), kommt die Nachricht möglicherweise niemals an
- Über den Zeitpunkt des Empfangs kann keine Aussage getroffen werden (Unbounded indeterminacy)
- Über die Reihenfolge der Empfangenen Nachrichten wird im Aktorenmodell keine Aussage gemacht (In vielen Implementierungen allerdings schon)
- Nachrichtenversand $\neq$ (Queue | Lock | Channel | ...)

Kommunikation (Technisch)

- Der Versand einer Nachricht M an Aktor A bewirkt, dass zu **genau einem** Zeitpunkt in der Zukunft, das Verhalten B von A mit M als Nachricht ausgeführt wird.
- Über den Zustand S von A zum Zeitpunkt der Verarbeitung können wir begrenzte Aussagen treffen:
  - z.B. Aktor-Invariante: Vor und nach jedem Nachrichtenempfang gilt $P(S)$
- Besser: Protokoll
  - z.B. auf Nachrichten des Typs T reagiert A immer mit Nachrichten des Typs U

Identifikation

- Aktoren werden über **Identitäten** angesprochen

Aktoren kennen Identitäten

- aus einer empfangenen Nachricht
- aus der Vergangenheit (Zustand)
- von Aktoren die sie selbst erzeugen

- Nachrichten können weitergeleitet werden
- Eine Identität kann zu mehreren Aktoren gehören, die der Halter der Referenz äußerlich nicht unterscheiden kann
- Eindeutige Identifikation bei verteilten Systemen nur durch Authentisierungsverfahren möglich

Location Transparency

- Eine Aktoridentität kann irgendwo hin zeigen
  - Gleicher Thread
  - Gleicher Prozess
  - Gleicher CPU Kern
  - Gleiche CPU
  - Gleicher Rechner
  - Gleiches Rechenzentrum
  - Gleicher Ort
  - Gleiches Land
  - Gleicher Kontinent
  - Gleicher Planet
  - ...

Sicherheit in Aktorsystemen

- Das Aktorenmodell spezifiziert nicht wie eine Aktoridentität repräsentiert wird
- In der Praxis müssen Identitäten aber **serialisierbar** sein
- Serialisierbare Identitäten sind auch **synthetisierbar**
- Bei Verteilten Systemen ein potentielles Sicherheitsproblem
- Viele Implementierungen stellen **Authentisierungsverfahren** und **verschlüsselte** Kommunikation zur Verfügung.

Inkonsistenz in Aktorsystemen

- Ein Aktorsystem hat **keinen** globalen Zustand (Pluralismus)
- Informationen in Aktoren sind global betrachtet **redundant**, **inkonsistent** oder **lokal**
- Konsistenz $\neq$ Korrektheit
- Wo nötig müssen duplizierte Informationen konvergieren, wenn *"längere Zeit"* keine Ereignisse auftreten (**Eventual consistency**)

Eventual Consistency

Definition

In einem verteilten System ist ein repliziertes Datum **schließlich Konsistent**, wenn über einen längeren Zeitraum keine Fehler auftreten und das Datum nirgendwo verändert wird

- Konvergente (oder Konfliktfreie) Replizierte Datentypen (CRDTs) garantieren diese Eigenschaft:
  - $(\mathbb{N}, \{+\})$ oder $(\mathbb{Z}, \{+, -\})$
  - Grow-Only-Sets
- Strategien auf komplexeren Datentypen:
  - Operational Transformation
  - Differential Synchronization
- dazu später mehr ...

Fehlerbehandlung in Aktorsystemen

- Wenn das Verhalten eines Aktors eine unbehandelte Ausnahme wirft:
  - Verhalten bricht ab
  - Aktor existiert nicht mehr
- Lösung: Wenn das Verhalten eine Ausnahme nicht behandelt, wird sie an einen überwachenden Aktor (**Supervisor**) weitergeleitet (**Eskalation**):
  - Gleiches Verhalten wird wiederbelebt
  - oder neuer Aktor mit gleichem Protkoll kriegt Identität übertragen
  - oder Berechnung ist Fehlgeschlagen

"Let it Crash!"(Nach Joe Armstrong)

- Unbegrenzter Nichtdeterminismus ist statisch kaum analysierbar
- **Unschärfe** beim Testen von verteilten Systemen
- Selbst wenn ein Programm fehlerfrei ist kann Hardware ausfallen
- Je verteilter ein System umso wahrscheinlicher geht etwas schief

- Deswegen:
  - Offensives Programmieren
  - Statt Fehler zu vermeiden, Fehler behandeln!
  - Teile des Programms kontrolliert abstürzen lassen und bei Bedarf neu starten

Das Aktorenmodell in der Praxis

- Erlang (Aktor-Sprache)
  - Ericsson - GPRS, UMTS, LTE
  - T-Mobile - SMS
  - WhatsApp (2 Millionen Nutzer pro Server)
  - Facebook Chat (100 Millionen simultane Nutzer)
  - Amazon SimpleDB
  - ...
- Akka (Scala Framework)
  - ca. 50 Millionen Nachrichten / Sekunde
  - ca. 2,5 Millionen Aktoren / GB Heap
  - Amazon, Cisco, Blizzard, LinkedIn, BBC, The Guardian, Atos, The Huffington Post, Ebay, Groupon, Credit Suisse, Gilt, KK, ...

Zusammenfassung

- Das Aktorenmodell beschreibt **Aktorensysteme**
- Aktorensysteme bestehen aus **Aktoren**
- Aktoren kommunizieren über **Nachrichten**
- Aktoren können überall liegen (**Location Transparency**)
- Inkonsistenzen können nicht vermieden werden: **Let it crash!**
- Vorteile: Einfaches Modell; keine Race Conditions; Sehr schnell in Verteilten Systemen
- Nachteile: Informationen müssen dupliziert werden; Keine vollständige Implementierung