

Reaktive Programmierung Vorlesung 4 vom 10.05.2022 Aktoren

Christoph Lüth, Martin Ring

Universität Bremen

Sommersemester 2022

Fahrplan

- ▶ Einführung
- ▶ Monaden und Monadentransformer
- ▶ Nebenläufigkeit: Futures and Promises
- ▶ **Aktoren: Grundlagen & Implementierung**
- ▶ Bidirektionale Programmierung
- ▶ Meta-Programmierung
- ▶ Reaktive Ströme I
- ▶ Reaktive Ströme II
- ▶ Funktional-Reaktive Programmierung
- ▶ Software Transactional Memory
- ▶ Eventual Consistency
- ▶ CRDTs
- ▶ Robustheit, Entwurfsmuster und Theorie der Nebenläufigkeit, Abschluss
- ▶ Reaktive Programmierung in der Praxis

Das Aktorenmodell



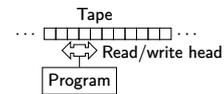
- ▶ Eingeführt von Carl Hewitt, Peter Bishop und Richard Steiger (1973)
- ▶ Grundlage für nebenläufige Programmiersprachen und Frameworks. (Unter anderem Akka)
- ▶ Theoretisches Berechnungsmodell

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

Die Turingmaschine



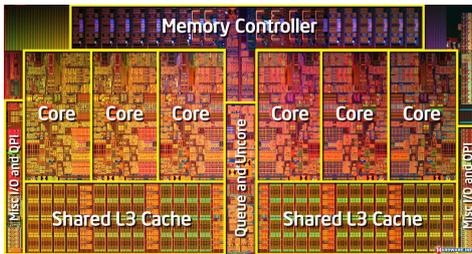
“the behavior of the computer at any moment is determined by the symbols which he [the computer] is observing, and his ‘state of mind’ at that moment”
— Alan Turing



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



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

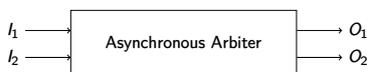
Synchronisation



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

Der Arbitrer

- ▶ Die Lösung: **Asynchrone Arbitrer**



- ▶ 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 Arbitrer 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 Arbitrer 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!)

RP SS 2022

9 [35]



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

- ▶ $\text{Aktor} \neq (\text{Thread} \mid \text{Task} \mid \text{Channel} \mid \dots)$

Ein Aktor kann (darf) **nicht**

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

RP SS 2022

10 [35]



Aktoren (Technisch)

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

RP SS 2022

11 [35]



Verhalten vs. Protokoll

Verhalten

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

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
```

$\square(a(\text{Ping}, b) \rightarrow \diamond b(\text{Pong}))$

RP SS 2022

12 [35]



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 $\neq (\text{Queue} \mid \text{Lock} \mid \text{Channel} \mid \dots)$

RP SS 2022

13 [35]



Kommunikation (Technisch)

- ▶ Der Versand einer Nachricht M an Aktor A bewirkt, dass zu **höchstens 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

RP SS 2022

14 [35]



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

RP SS 2022

15 [35]



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
 - ▶ ...

RP SS 2022

16 [35]



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.

RP SS 2022

17 [35]



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**)

RP SS 2022

18 [35]



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 ...

RP SS 2022

19 [35]



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 Protokoll kriegt Identität übertragen
 - ▶ oder Berechnung ist Fehlgeschlagen

RP SS 2022

20 [35]



"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



RP SS 2022

21 [35]



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, ...

RP SS 2022

22 [35]



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

RP SS 2022

23 [35]



Aktoren in Scala

- ▶ Eine kurze Geschichte von Akka:
 - ▶ 2006: Aktoren in der Scala Standardbücherei (Philipp Haller, `sca1a.actors`)
 - ▶ 2010: Akka 0.5 wird veröffentlicht (Jonas Bonér)
 - ▶ 2012: Scala 2.10 erscheint ohne `sca1a.actors` und Akka wird Teil der Typesafe Plattform
- ▶ Auf Akka aufbauend:
 - ▶ Apache Spark
 - ▶ Play! Framework
 - ▶ Akka HTTP (Früher Spray Framework)

RP SS 2022

24 [35]



Akka

- ▶ Akka ist ein Framework für Verteilte und Nebenläufige Anwendungen
- ▶ Akka bietet verschiedene Ansätze mit Fokus auf Aktoren
- ▶ Nachrichtengetrieben und asynchron
- ▶ Location Transparency
- ▶ Hierarchische Aktorenstruktur

Rückblick

- ▶ Aktor Systeme bestehen aus Aktoren
- ▶ Aktoren
 - ▶ haben eine Identität,
 - ▶ haben ein veränderliches Verhalten und
 - ▶ kommunizieren mit anderen Aktoren ausschließlich über unveränderliche Nachrichten.

Aktoren in Akka

```
abstract class Behavior[-T]:  
  def receive(ctx: ActorContext[T], msg: T): Behavior[T]  
  def receiveSignal(ctx: ActorContext[T], msg: Signal): Behavior[T]
```

Aktoren Erzeugen

```
enum Message  
  case Count  
  
def counter(count: Int) = Behaviors.receiveMessage  
  case Message.Count => counter(count + 1)
```

Global:

```
val system = ActorSystem(counter(0), "counter")
```

In Aktoren:

```
val counter = context.spawn(counter(0), "counter")
```

Nachrichtenversand

```
enum Message:  
  case Count  
  case Get(sender: ActorRef[Int])  
  
def counter(count: Int) = Behaviors.receive  
  case Message.Count => counter(count + 1)  
  case Message.Get(sender) =>  
    sender ! count  
    Behaviors.same  
)
```

```
val aCounter = context.spawn(counter(0), "counter")  
aCounter ! Count
```

"!" ist asynchron – Der Kontrollfluss wird sofort an den Aufrufer zurückgegeben.

Eigenschaften der Kommunikation

- ▶ Nachrichten von einer Aktor identität zu einer anderen kommen in der Reihenfolge des Versands an. (Im Aktorenmodell ist die Reihenfolge undefiniert)
- ▶ Abgesehen davon ist die Reihenfolge des Nachrichtenempfangs undefiniert.
- ▶ Nachrichten sollen unveränderlich sein. (Das kann derzeit allerdings nicht überprüft werden)

Modellieren mit Aktoren

Aus "Principles of Reactive Programming" (Roland Kuhn):

- ▶ Imagine giving the task to a group of people, dividing it up.
- ▶ Consider the group to be of very large size.
- ▶ Start with how people with different tasks will talk with each other.
- ▶ Consider these "people" to be easily replaceable.
- ▶ Draw a diagram with how the task will be split up, including communication lines.

Supervision und Fehlerbehandlung in Akka

```
Behaviors.supervise(counter(0))  
  .onFailure[ArithmeticException]({  
    SupervisorStrategy.restart.withLimit(maxNrOfRetries = 10,  
    withinTimeRange = 10.seconds))  
  })
```

Aktorsysteme Testen

▶ Tests mit TestKit

```
"A counter" must {
  "be able to count to three" in {
    val c = testKit.spawn(counter(0))
    val p = testKit.createTestProbe[Int]()
    c ! Count
    c ! Count
    c ! Count
    c ! Get(p)
    createTestProbe[Echo.Pong](3)
  }
}
```

Bewertung

▶ Vorteile:

- ▶ Nah am Aktorenmodell (Carl-Hewitt-approved)
- ▶ Aber nicht zu nahe (Referenzen sind typisiert)
- ▶ keine Race Conditions
- ▶ Effizient
- ▶ Stabil und ausgereift
- ▶ Umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten

▶ Nachteile:

- ▶ Aktoren sind nicht komponierbar
- ▶ Tests können aufwendig werden
- ▶ Unveränderlichkeit kann in Scala nicht garantiert werden
- ▶ Umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten

Zusammenfassung

▶ Unterschiede Akka / Aktormodell:

- ▶ Nachrichtenordnung wird pro Sender / Receiver Paar garantiert
- ▶ Futures sind keine Aktoren
- ▶ ActorRef identifiziert einen eindeutigen Aktor
- ▶ Die Regeln können gebrochen werden (zu Testzwecken)
- ▶ Fehlerbehandlung steht im Vordergrund
- ▶ Verteilte Aktorensysteme können per Akka Remoting miteinander kommunizieren
- ▶ Mit Event-Sourcing können Zustände über Systemausfälle hinweg wiederhergestellt werden.