Verteilte Systeme

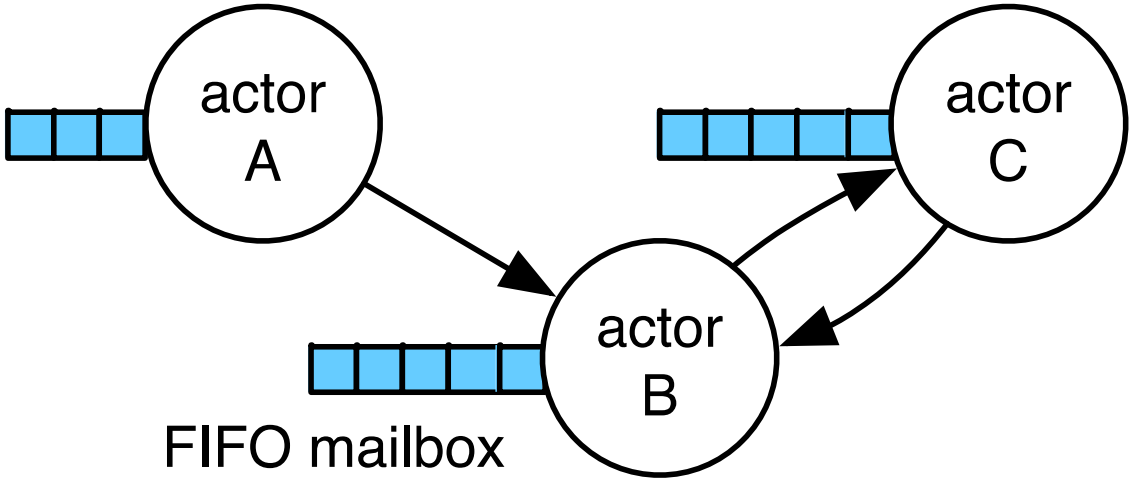
Programmieren im
Aktormodell mit C++

Aktoren in Verteilten Systemen

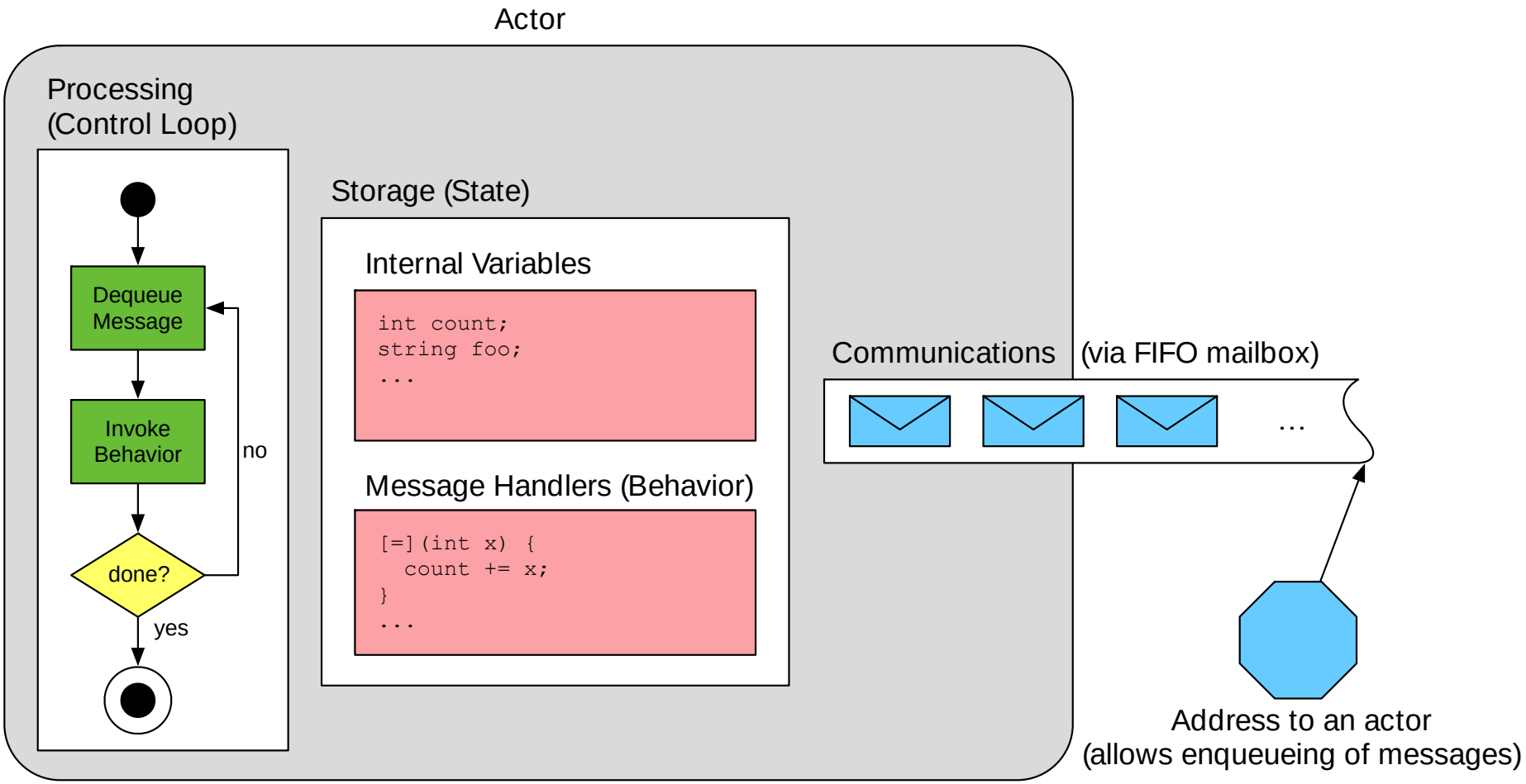
- Zunehmend relevant in hochskalierbaren, reaktiven Systemen
  - Web-Dienste, Datenbanken, IoT-Anwendungen, Kommunikationsdienste wie z.B. WhatsApp, ...
  - Microservice-Architekturen
- Für die Praxis wichtig:
  - Message Passing als Entwurfsmuster
  - Fehlerbehandlung in hochverfügbaren Diensten
  - Hochstehende Abstraktionen mit effizienter Laufzeit

Das Aktormodell

- Aktoren kapseln „Processing, Storage & Communications“
- Asynchroner Nachrichtenaustausch
- Keine geteilten Speicherbereiche
- Hierarchische Fehlerbehandlung



Anatomie eines Aktors



Orchestrierung von Aktoren

- Jedes Individuum agiert gemäß eines Skriptes
- Aktoren sind Agenten mit Zielen und Verhalten
- Ein Programm ist eine Choreographie vieler Aktoren
- „Actor Model“ entspringt einer „Theateraufführung“-Metapher

Hauptmerkmale von Aktoren

- Aktoren sind inhärent nebenläufig
  - Parallel ausführbar, da sie keine Speicherbereiche teilen
  - Einziger Synchronisationspunkt ist die Mailbox
- Kommunikation zwischen Aktoren ist netzwerktransparent
  - Auf Quellcode-Ebene nicht ersichtlich ob Komm. lokal ist
  - Entferntes Instanziieren ändert Anwendungslogik nicht
- Leichtgewichtige Aktoren skalieren besser als Threads*
  - Wenige hundert Bytes RAM statt mehrere tausend
  - Keine Verwaltung durch das Betriebssystem erforderlich

*vgl.: Philipp Haller and Martin Odersky. 2006. Event-Based Programming without Inversion of Control. In *Joint Modular Languages Conference*, Vol. 4228. Springer-Verlag Berlin, 4–22.

Programmiermodell

- Aktoren sind nachrichtengetrieben (reaktiv)
- In Reaktion auf eine Nachricht kann ein Aktor:
  1. Nachrichten senden
  2. Neue Aktoren starten
  3. Bestimmen wie die nächste Nachricht verarbeitet wird

Fehlerbehandlung

- Fehler haben keine Seiteneffekte auf andere Aktoren
  - Keine Propagierung durch Seitenkanäle wie Exceptions
- Explizites Monitoring/Linking zum behandeln entfernter Fehler
  - Fehler sind lokal, aber entfernt detektierbar / behandelbar
- Monitoring: unidirektional, signalisiert mit „down“ Nachrichten
  - Erlaubt „stilles Beobachten“ von Fehlern entfernter Aktoren
- Linking: bidirektional, signalisiert mit „exit“ Nachrichten
  - Erlaubt es Lebenszeit von Aktoren zu verknüpfen

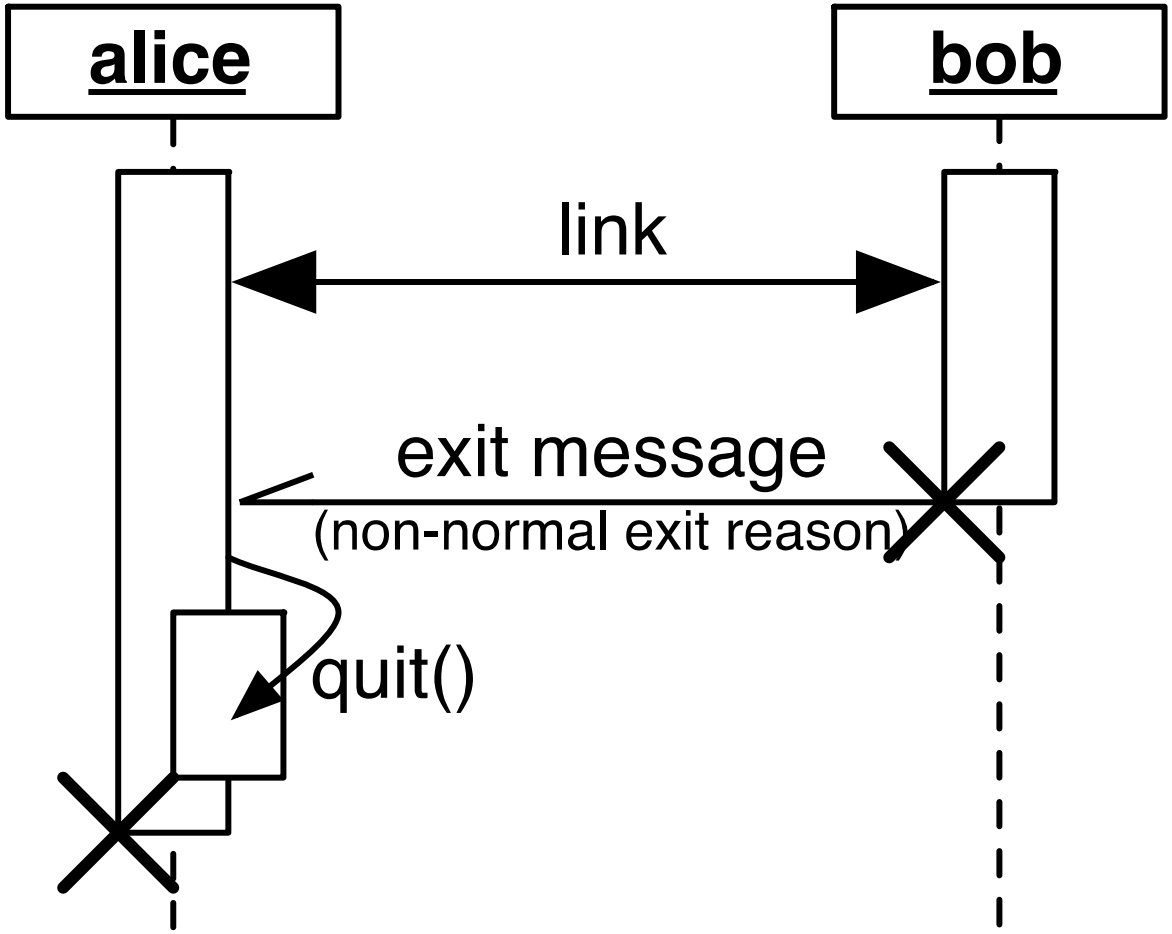
Monitoring

- Fehlerbehandlung bei lose/temporär gekoppelten Aktoren
  - Z.B.: Clients können auf Serverausfall reagieren
  - Erlaubt Fallback-Strategien auf Client-Ebene
- Vergleich zu Links:
  - Clients beobachten Server-Lebenszeit unidirektional
  - Server nicht benachrichtigt bei Client-Ausfällen
  - Keine Standardstrategien bei „down“ Nachrichten

Linking

- Linking koppelt die Lebenszeit von Aktoren
  - Fällt ein Aktor mit einem Fehler aus beendet er seine Links
  - Linking erlaubt „alle leben oder keiner“ Semantik
  - Ausnahme: Supervisor behandeln „exits“ manuell
  - Bei Supervision: Worker sollen mit Supervisor ausfallen
- Supervisor erlauben dynamisches Re-Deployment
  - Ausgefallene Worker werden ersetzt
  - Worker können auf anderen Knoten neugestartet werden

Standardverhalten von Links



CAF – Das „C++ Actor Framework“

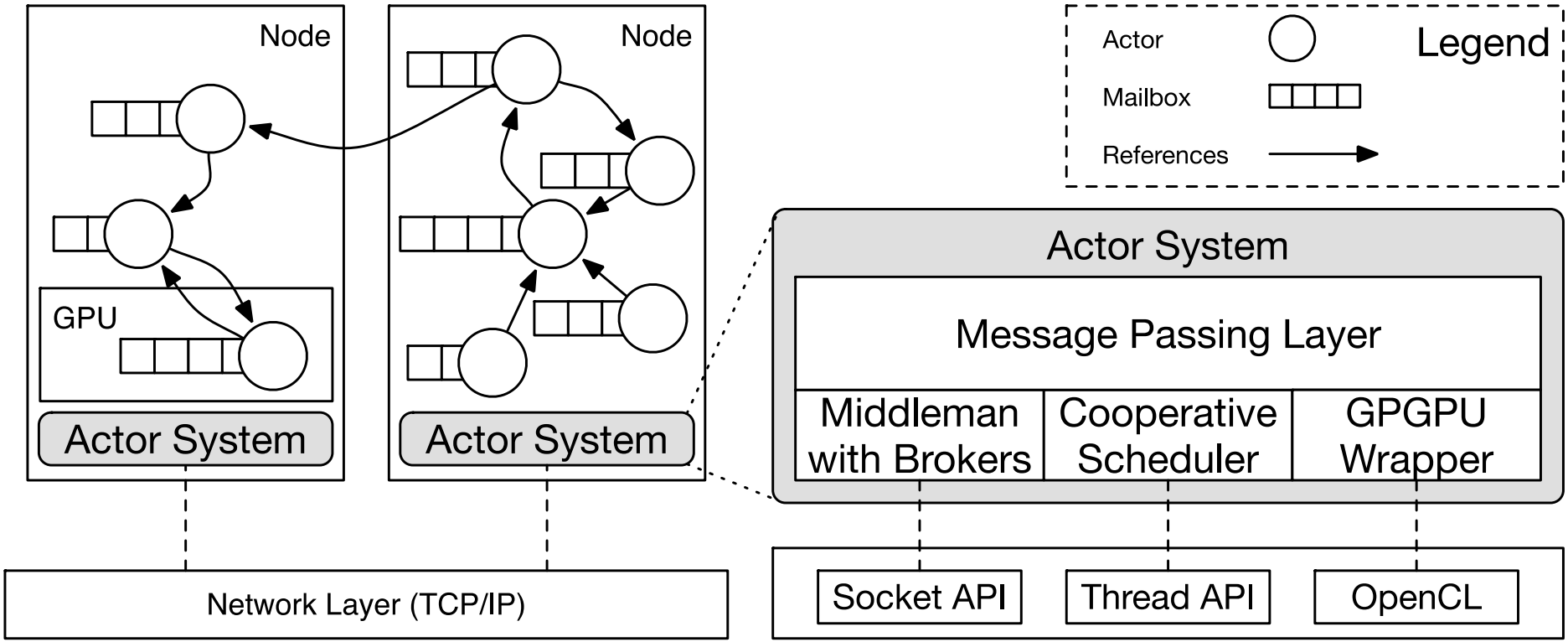
- Leichtgewichtige Implementierung des Aktormodells
- Aktiv entwickelt seit 2011 in der INET Arbeitsgruppe
- Open Source Software mit BSD Lizenz
- Aktive, internationale Community
- Verfügbar auf GitHub:

  https://github.com/actor-framework/actor-framework

CAF Zusammengefasst

- Liefert Bausteine für Infrastruktur-Software
  - Web-Services, Kommunikations- oder MMO-Backends
  - Hohe Anforderungen an Elastizität & Performance
- Legt den Fokus auf Robustheit & Effizienz
  - Robust gegenüber Ausfall einzelner Aktoren/Systemen
  - Effizient in Speicherverbrauch und Laufzeitverhalten
- Relevant für Anwender aus Industrie und Forschung
  - Hohe Abstraktionsschicht
  - Native Laufzeitumgebung (C++)

Architektur von CAF



Grundlagen C++

- C++ ist *nicht* „C mit Klassen“ und *nicht* „Java ohne GC“
  - Stärkeres Typsystem als C
  - Garbage Collection in Form von Smart Pointern
- Grundlegend überarbeitet mit dem 2011 Standard
  - Achtung: viele Bücher und Online-Quellen veraltet!
  - Großer Einfluss funktionaler Konzepte, z.B. Lambdas
- Alle Beispiele aus der Vorlesung sind online verfügbar:
  - https://github.com/inetrg/vs-cpp

Minimales C++ Programm

```
#include <iostream>

int main(int, char**) {
  std::cout << "Hello World"
            << std::endl;
}
```

Standard Header für I/O-Ströme

Hauptfunktion eines C++ Programms

`std` ist ein Namensraum, `cout` ist das Standardausgaben-Singleton, `<<` ist der Ausgabestrom-Operator

`std::endl` schreibt einen Zeilenumbruch und leert Schreibpuffer; alternativ: `"Hello World\n"`

Variante #2: Individueller Import

```
#include <iostream>

using std::cout;
using std::endl;

int main(int, char**) {
  cout << "Hello World" << endl;
}
```

Importiert *einzelne* Namen aus dem Namensraum `std` in den aktuellen Scope (hier: globaler Namensraum / ganze Datei)

Variante #3: Importieren von `std`

```
#include <iostream>

using namespace std;

int main(int, char**) {
  cout << "Hello World" << endl;
}
```

Importiert *alle* Namen aus dem Namensraum `std` in den aktuellen Scope (hier: globaler Namensraum / ganze Datei); kann Mehrdeutigkeiten erzeugen, insbesondere in Header-Dateien

Variante #3b: Importieren von `std`

```
#include <iostream>

int main(int, char**) {
  using namespace std;
  cout << "Hello World" << endl;
}
```

Import gilt nur innerhalb der `main` Funktion

Dynamische Arrays: `vector<T>`

```
std::vector<int> xs{10, 20, 30};
xs.emplace_back(40);
for (int x : xs)
  std::cout << x << ' ';
std::cout << std::endl;
```

Dynamisches Array initialisiert als Intervall [10, 20, 30]

Fügt 40 am Ende des Arrays ein

Schreibt für jedes `x` in `xs` den Wert auf die Standardausgabe (Konsole)

Scoping: Beispiel #1

```
class scoped {
public:
  scoped() { std::cout << "scoped()\n"; }
  ~scoped() { std::cout << "~scoped()\n"; }
};
int main(int, char**) {
  std::cout << "enter main\n";
  scoped x;
  std::cout << "leave main\n";
}
```

Standard-Konstruktor (keine Argumente)

Destruktor (aufgerufen sobald das Objekt zerstört wird)

Programmausgabe (`x` wird beim Verlassen von `main` zerstört):

```
enter main
scoped()
leave main()
~scoped()
```

Scoping: Beispiel #2

```
class scoped {
public:
  scoped() { std::cout << "scoped()\n"; }
  ~scoped() { std::cout << "~scoped()\n"; }
};
int main(int, char**) {
  std::cout << "enter main\n";
  { scoped x; }
  std::cout << "leave main\n";
}
```

Programmausgabe (`x` lebt nicht mehr im Scope von `main` sondern in Teil-Scope):

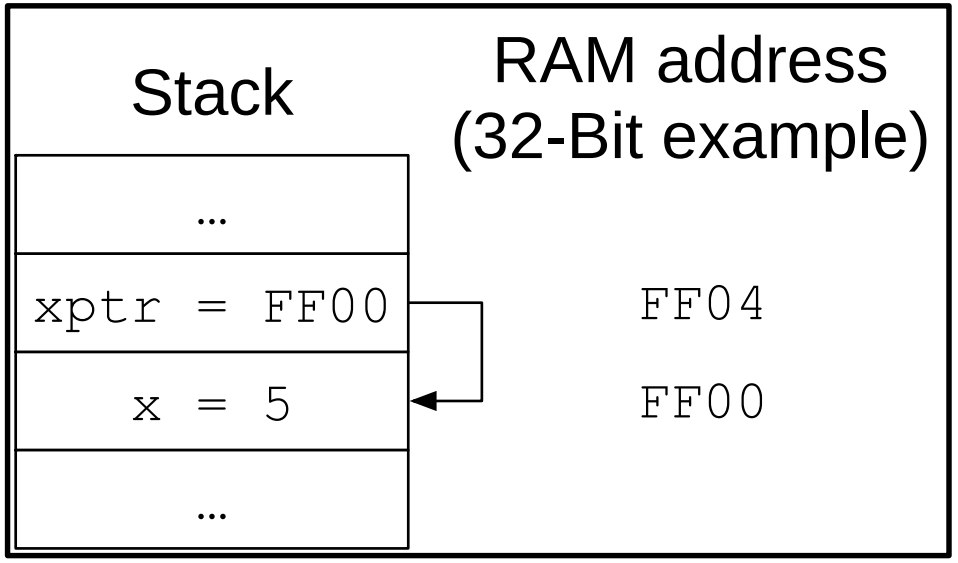
```
enter main
scoped()
~scoped()
leave main()
```

Zeiger auf Stack-Objekte

```
int x = 5;
int* xptr = &x;
*xptr = 10;
cout << "x = "
     << x << endl;
```

`int*` ist ein Zeiger auf einen `int`, `&x` gibt die Adresse von `x` zurück

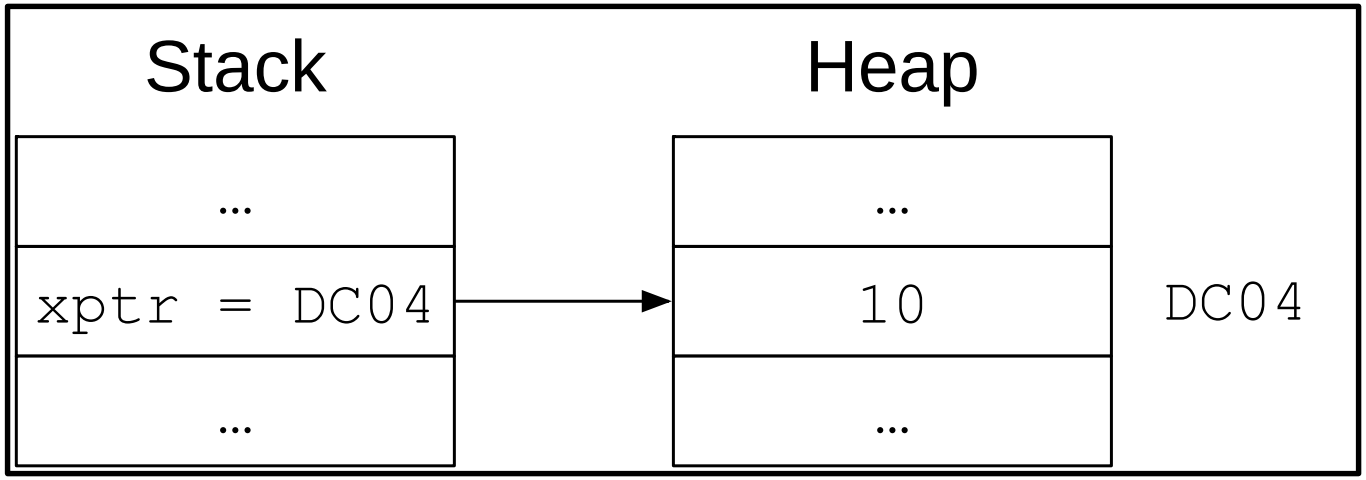
`*xptr` *dereferenziert* den Zeiger, d.h. greift auf den Inhalt der gespeicherten Adresse zu und modifiziert somit indirekt den Wert von `x`



Sichere Zeiger auf Heap-Objekte

```
std::unique_ptr<int> xptr;
assert(xptr == nullptr);
xptr.reset(new int(10));
assert(xptr != nullptr);
cout << "x = " << *xptr << endl;
```

`unique_ptr` ist ein intelligenter Zeiger (Smart Pointer), der Speicher „besitzt“ und wieder freigibt wenn der Scope verlassen oder `reset` aufgerufen wird



Referenzen

```
int x = 5;
int& xref = x;
int* xptr = &xref;
xref = 10;
int& xref2 = *xptr;
xref2 = 20;
cout << "x = " << x << endl;
```

Vollwertiges Alias für `x`

Die Adresse einer Referenz ist die Adresse des referenzierten Objektes

Zeiger geben eine Referenz zurück wenn sie dereferenziert werden

Typinferenz

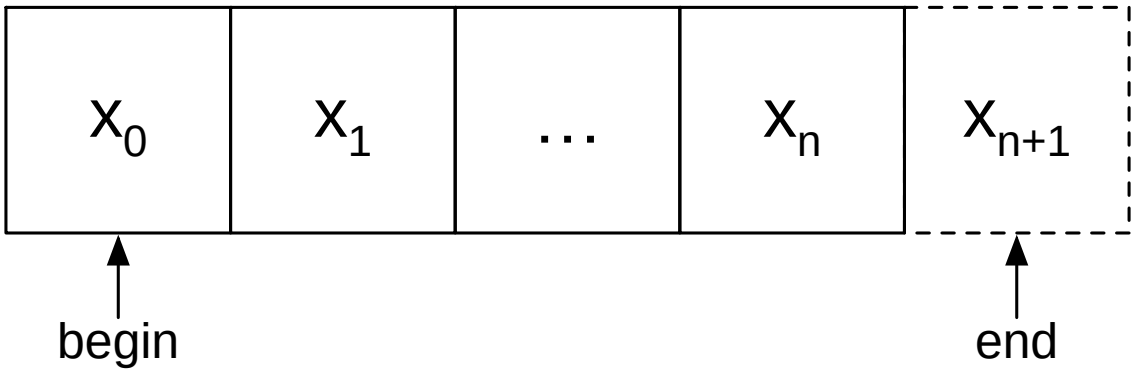
- Typinferenz leitet den Typen von der Initialisierung ab
  - Manuelle Typzuweisung redundant
  - Typen sind in vielen Fällen lang oder schlicht unbekannt
- Syntax: `auto <var> = <expr>;`
  - `auto`: Platzhalter für den tatsächlichen Typen
  - `<var>`: Name der Variablen
  - `<expr>`: Initialisierung der Variable
- Beispiel:
  - `auto x = make_object();`

Typinferenz mit Referenzen

- `auto` kann mit Typmodifikatoren ergänzt werden
  - `auto&` ist eine Referenz auf den abgeleiteten Typen
  - `const auto&` ist eine unveränderliche Referenz
  - `const auto` ist ein unveränderlicher Wert
- Referenzen auf abgeleitete Typen insb. beim Iterieren sinnvoll
  - Vermeidet überflüssige Kopien durch Referenzen
  - Hält Quelltext kurz und prägnant durch Typinferenz

Iteratoren

- Positionszeiger für Datenstrukturen:
  - `*i`: Zugriff auf das Element an Position `i`
  - `++i`: Bewegt den Iterator zur nächsten Position
- Jede Datenstruktur `T` ist modelliert als Intervall $[x_0, \ldots, x_{n+1})$
  - `T::begin()`: Iterator **auf** das erste Element
  - `T::end()`: Iterator **hinter** das letzte Element



`for` Schleife

- Klassische Schleife: `for (<init>; <guard>; <step>)`
  - `<init>` deklariert und initiiert die Schleifen-Variable
  - `<guard>` spezifiziert Abbruchkriterium
  - `<step>` weist Schleifen-Variable nächsten Wert zu
- Beispiele:
  - `for (int x = 0; x < 5; ++x)`: Iteriert [0, 1, 2, 3, 4]
  - `for (int x = 0; x < 5; x += 2)`: Iteriert [0, 2, 4]
  - `for (auto i=xs.begin(); i!=xs.end(); ++i)`: Itertiert `xs`
  - `for (;;)`: Endlosschleife (alle drei Teile sind optional)

`for-each` Schleife

- Kompakte Schleife: `for (<var> : <xs>)`
  - `<var>` deklariert die Schleifen-Variable
  - `<xs>` Datentyp mit `begin()` und `end()`
  - Iteriert immer über alle Element in `<xs>`, äquivalent zu:

```
for (auto i = <xs>.begin(); i != <xs>.end(); ++i) {
<var> = *i; ... }
```

- Beispiele:
  - `for (auto& x : xs)`: Iteriert alle Element als Referenz
  - `for (auto x : {1, 2, 4})`: Iteriert Intervall [1, 2, 4]

`while` Schleife

- Schleife mit Laufbedingung: `while ( <condition> )`
  - `<condition>` boolesche Ausführungsbedingung
  - Schleife bricht ab sobald `<condition> == false`
- Beispiele:
  - `int i = 4; while (--i > 0) {}`: Iteriert [3, 2, 1]
  - `int i = 4; while (i-- > 0) {}`: Iteriert [3, 2, 1, 0]
  - `while (true)`: Endlosschleife

Funktionen

- **Freie Funktionen:** an Namensräume gebunden
  - `int f();`
  - `namespace foo { void bar(int); }`
- **Member-Funktionen** (Methoden): an Klassen gebunden
  - `struct s1 { void f(int); };`
  - `struct s2 { static void g(int); };`
- **Anonyme Funktionen (Lambdas)**: an Variablen gebunden
  - `auto f = [](int x) { return x * 2; };`
  - `auto g = [y](int x) { return x * y; };`

Lambda Ausdrücke

- Stuktur: `[<captures>](<args>) -> <res> {...}`
  - `<captures>`: Kopien/Referenzen auf Scope-Variablen
    - `[]`: Kein Zugriff auf äußeren Scope (stateless lambda)
    - `[=]`: Zugriff auf alle Variablen als Kopie
    - `[&]`: Zugriff auf alle Variablen als Referenz
    - `[&, x]`: Zugriff auf x als Kopie, sonst Referenz
    - `[=, &x]`: Zugriff auf x als Referenz, sonst Kopie
  - `<args>`: Argumente der anonymen Funktion
  - `<res>`: Rückgabewert (idR nicht explizit erforderlich)

Lambdas als Prädikate

```
vector<string> names
{"Tom", "Tim", "Bart", "Harry"};
auto end = names.end();
auto i = find_if(names.begin(), end,
                 [](const string& name) {
                   return name.size() > 3;
                 });
  if (i == end)
    cout << ”Only short names.\n";
  else
    cout << "First long name: " << *i << ".\n";
```

`find_if` gibt den ersten Iterator zurück für den das Prädikat gilt, sonst `end`

Lambdas mit State als Prädikate

```
vector<string> names
{"Tom", "Tim", "Bart", "Harry"};
set<string> blacklist{"Bart"};
if (any_of(names.begin(), names.end(),
           [&](const string& name) {
             return blacklist.count(name) > 0;
           }))
  cout << "Blacklisted name found!\n";
else
  cout << "All names are good to go!\n";
```

`any_of` gibt `true` zurück wenn das Prädikat für mind. eines der Elemente gilt

Prototyp und Definition

```
struct foo {
  // prototype (foo.hpp file)
  void bar();
};
// definition (foo.cpp file)
void foo::bar() {
  cout << "foo::bar()\n";
}
// usage
foo x;
x.bar();
```

Der Prototyp deklariert Name und Signatur einer Funktion in einem Header und erlaubt Import durch andere Komponenten

Die Definition befindet sich in einer separaten Datei und wird vom Compiler nur ein Mal übersetzt

Überladen von Operatoren

- Nur vordefinierte Operatoren können überladen werden
- Operatoren existieren als freie und Member-Funktionen
- Beispiele für unäre (Member-) Operatoren:

  `=`, `+=`, `-=`, `%=`, `*=`, `^=`, `&=`, `|=`, `!`, `++`, `--`, `^`, `~`, `&`, `*`
- Beispiele für (i.d.R. freie) binäre Operatoren:

  `==`, `!=`, `<`, `>`, `<=`, `>=`, `+`, `-`, `*`, `/`, `<<`, `>>`, `||`, `&&`, `,`
- Member-Operatoren mit variabler Anzahl an Argumenten:

  `[]`, `()`

Eigene Typen ausgeben mit <<

```
struct point2d { int x; int y; };

std::ostream& operator<<(std::ostream& out,
                         const point2d& x) {
  return out << "point2d{" << x.x << ", "
             << x.y << "}";
}
int main(int, char**) {
  point2d p1{10, 20};
  cout << p1 << endl;
}
```

Basistyp für alle I/O Ströme (z.B. `cout`)

Ownership-Transfer

- Klassen wie `vector` und `unique_ptr` „besitzen“ Speicher
  - Intern verwaltet während der Lebenszeit des Objekts
  - Freigegeben beim zerstören des Objekts
- Speicher kann „übertragen“ werden mit `std::move(x)`
  - Ursprünglich besitzendes Objekt anschließen uninitialisiert
  - Besitzübertragende Referenzen haben die Form `T&&`
- Typen wie `unique_ptr` sind *move-only*-Typen
  - Können nicht kopiert werden
  - Modellieren Lebenszeit für Heap-allokierte Objekte

std::move

```
unique_ptr<int> x;
unique_ptr<int> y{new int(42)};
auto print = [&] {
   cout << "x = " << x << ", "
        << "y = " << y << "\n";
};
print();
// x = y => compiler error
x = std::move(y); // ownership transfer
print();
```

y besitzt den Speicher, der durch `new int` allokiert wurde

Nach dem Ownership-Transfer ist y uninitialisiert und x besitzt den allokierten Speicher

Eigene Klassen

- `struct` und `class` sind austauschbar, einziger Unterschied:
  - Member einer `struct` sind standardmäßig `public`
  - Member einer `class` sind standardmäßig `private`

    (Achtung bei Vererbung mit `private` Basisklassen! ➔ keine *is-a* Beziehung)
- Es gibt fünf Standardoperationen die ein Typ `T` anbieten *kann*
  1. `T()`: Standard-Konstruktor
  2. `T(T&&)`: Move-Konstruktor
  3. `T(const T&)`: Copy-Konstruktor
  4. `T& operator=(T&&)`: Move-Zuweisung
  5. `T& operator=(const T&)`: Copy-Zuweisung

Virtuelle Methoden

- Methoden sind *nicht* überschreibbar per Default
  - `virtual` markiert Methoden als überschreibbar
  - Abstrakte Methoden werden mit `= 0` deklariert
- Basistypen müssen ihren Destruktor als `virtual` deklarieren
  - Nur virtuelle Destruktoren delegieren zum richtigen Typ
- Beispiel für einen abstrakten Basistypen:

```
struct base { virtual ~base();
              virtual void f() = 0; };
struct derived : base { void f() override; };
```

Richtlinien für modernes C++

- Kein `new` ohne Ownership-transfer in einen Smart Pointer
- Kein `delete` in Anwendungscode
- Klare Zuweisung von Ownership: Scoping und Smart Pointer
- Code soll *Intentionen* ausdrücken
- Bevorzuge Werte-Semantik wenn möglich
- Bevorzuge „pure“ Funktionen (ohne Seiteneffekte)
- Nutze Algorithmen aus `<algorithm>` statt Schleifen
- Online-Übersicht zu C++ und zur Standardbibliothek: http://cppreference.com

Minimale CAF Anwendung

```
#include "caf/all.hpp"
#include "caf/io/all.hpp"

using namespace caf;

void caf_main(actor_system& sys){
  // ...
}

CAF_MAIN(io::middleman)
```

Importiert alle Klassen und Funktionen aus CAF

Ersetzt die reguläre Hauptfunktion in CAF Anwendungen

`actor_system` ist die Laufzeitumgebung für Aktoren

Anwendungs-Grundgerüst; lädt die Netzwerk-Komponente (`io::middleman`) und ruft `caf_main` auf

Konfigurierbare CAF Anwendung

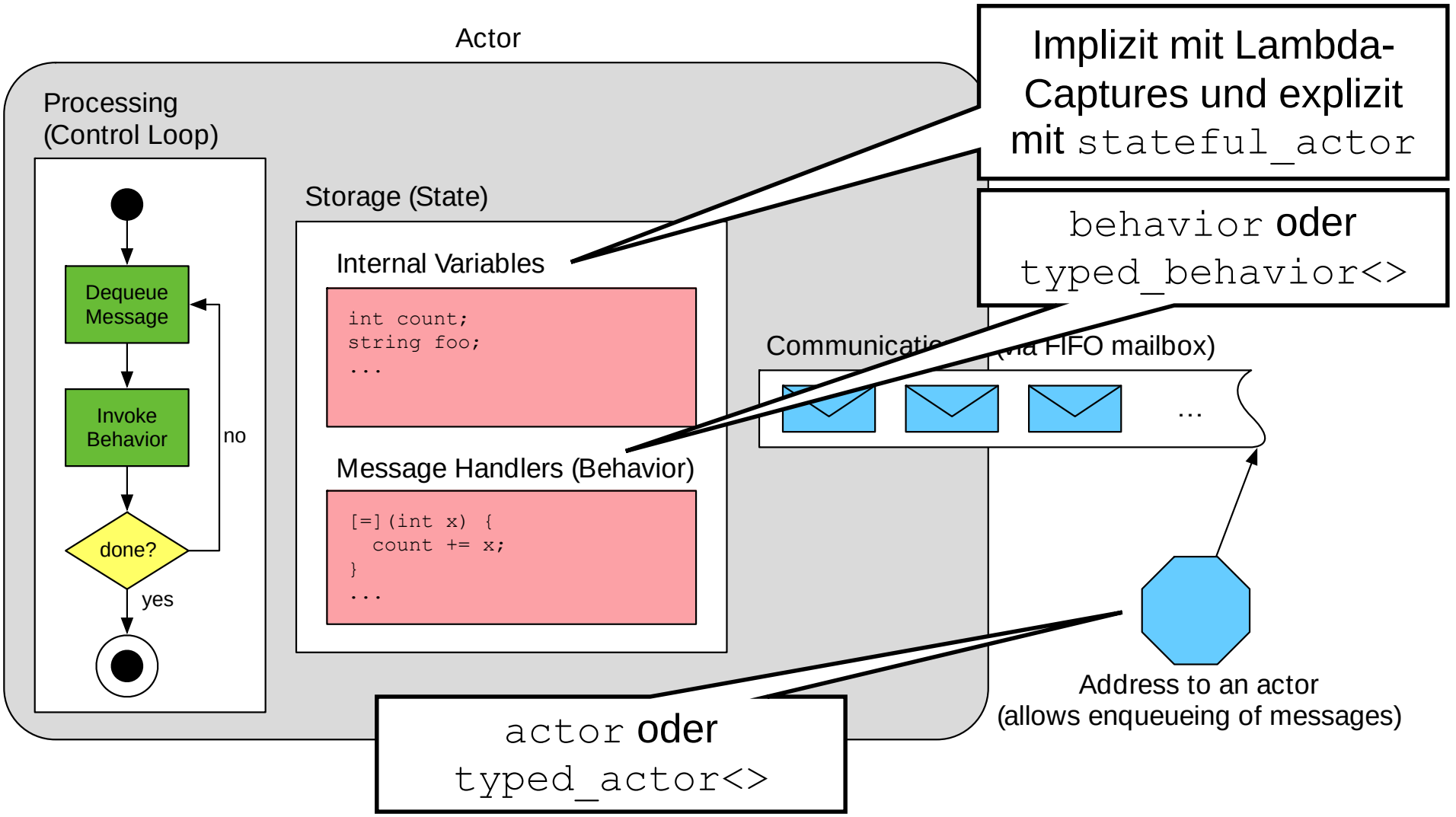
```
struct config
    : actor_system_config {
  std::string msg = "Hello";
  config() {
    opt_group{custom_options_,
              "global"}
    .add(msg, "message,m",
              "set output");
  }
};
void caf_main(actor_system&, const config& c);
```

Eigene Konfigurations-Klasse mit Parametern als Member-Variablen

Legt neue Parameter-Gruppe „global“; fügt `msg` unter dem Namen „message“ hinzu mit `-m` als Kurzform für Kommandozeilen

`caf_main` erlaub benutzerdefinierte Konfiguration als zweites Argument

Anatomie eines CAF Aktors



Arten von Aktoren in CAF

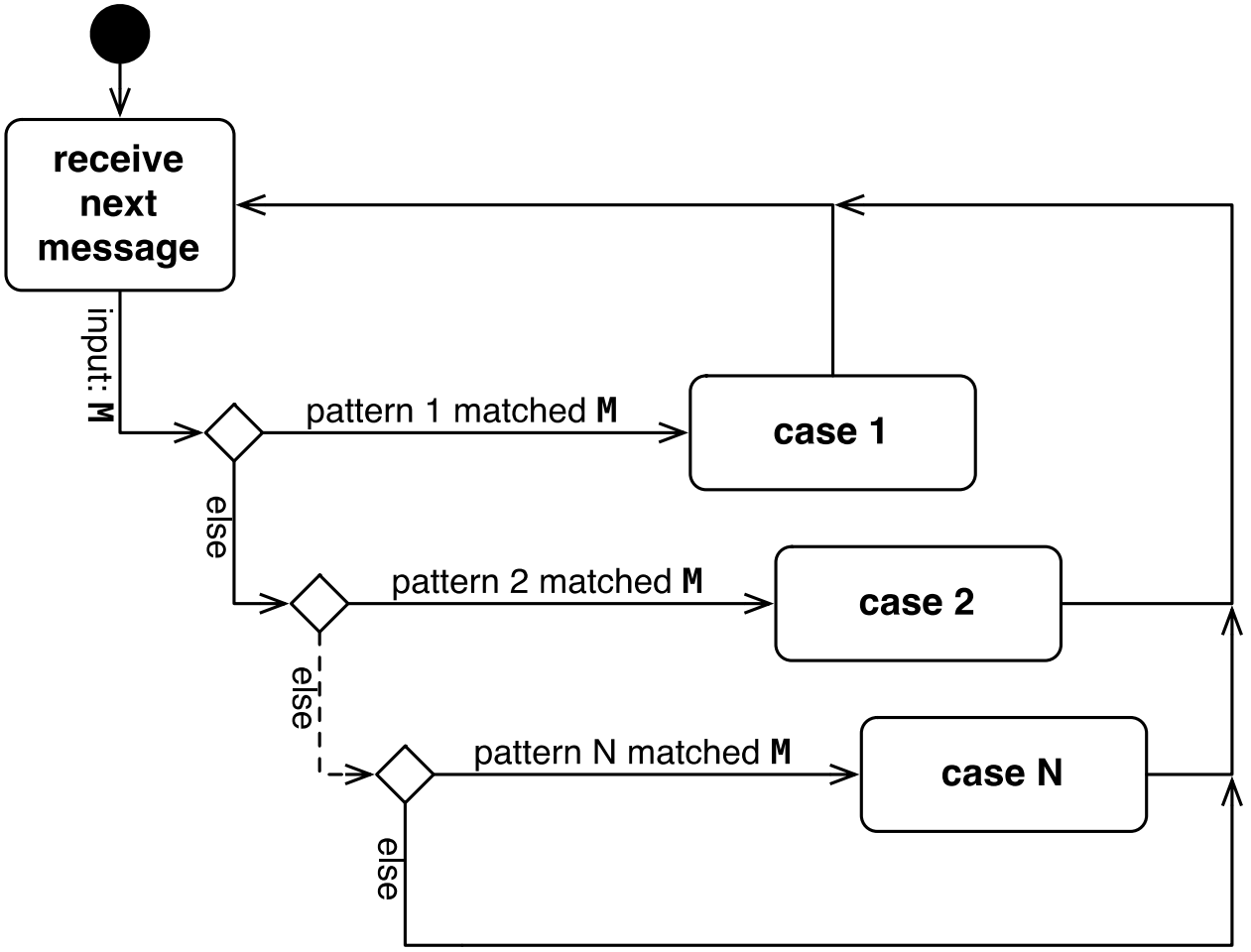
- CAF unterscheidet dynamisch und statisch typisierte Aktoren
- Dynamisch typisierte Aktoren akzeptieren alle Nachrichten
  - `actor` identifiziert dynamisch typisierte Aktoren
  - Keine Typprüfung beim Sender, potentiell Laufzeitfehler
- Statisch typisierte Aktoren definieren ein *Messaging Interface*
  - `typed_actor<>` identifiziert statisch typisierte Aktoren
  - Compiler prüft Ein- und Ausgabenachrichten

Im Folgenden verwenden wir ausschließlich dyn. typisierte Aktoren

Event-basierte Aktoren

- Kein expliziter Empfang von Nachrichten
  - Kontrollfluss ist der Laufzeit überlassen
  - Aktoren arbeiten ihre Mailbox ab bis sie terminieren
- Aktoren definieren ein `behavior` mit Nachrichten-Handlern
  - Signatur der Nachrichtenhandler fungiert als *Pattern*
  - Rückgabewert der Handler generiert Antwortnachrichten

Event-basierter Kontrollfluss



Simpler Additions-Aktor

```
behavior
adder(event_based_actor* self) {
  return {
    [](int x, int y) {
      return x + y;
    }
  };
}
```

Ein Aktor in CAF ist typischerweise implementiert als Funktion, die `behavior` zurück gibt und optional einen `self`-Pointer als erstes Argument nimmt

Rückgabewert des Nachrichten-Handlers ist die Antwortnachricht

Kommunikation in CAF

- Asynchroner Nachrichtenversand: `send`
  - Eventuelle Antworten im `behavior` verarbeitet
  - Syntax: `self->send(other, ...);`
- Request/Response: `request`
  - Antwort mit dediziertem „one-shot Handler“ verarbeitet
  - Syntax: `self->request(other, ...).then(...);`
- Weiterreichen erhaltener Aufgaben: `delegate`
  - Transparentes Forwarding
  - Syntax: `self->delegate(other, ...);`

Ad hoc Kommunikation mit Aktoren

- `scoped_actor` erlaubt Komm. mit Aktoren von „außerhalb“
- Ad hoc Aktor um z.B. aus `main` heraus zu kommunizieren
- Expliziter, blockierender Empfang von Nachrichten
- Erfordert ein actor_system zur Erschaffung:

```
void caf_main(actor_system& sys) {
  scoped_actor self{sys};
}
```

- Alternativ: CAF kann Aktoren als Funktionsobjekte darstellen

```
actor a =...; auto f = make_function_view(a);
```

Starten von und reden mit Aktoren

```
actor a = sys.spawn(adder);
scoped_actor self{sys};
self->request(a, infinite, 1, 2)
      .receive(
  [&](int z) {
    cout << "1+2=" << z << "\n";
  },
  [&](error& err) {
    cout << "Error: "
         << sys.render(err)
         << "\n"; });
```

Startet eine Instanz des simplen Additions-Aktors

Schickt Tupel (1, 2) als Request an `a` über den ad hoc Aktor `self` ohne timeout (`infinite`); anschließend warten auf Antwort mit `.receive`

Handler wird aufgerufen bei Fehlern im Empfänger oder wenn ein Timeout auftritt

Aktoren als Funktionsobjekte

```
actor a = sys.spawn(adder);
auto f = make_function_view(a);
cout << "f(1, 2) = "
     << to_string(f(1, 2))
     << "\n";
```

`f(1, 2)` gibt `expected<message>` zurück (beinhaltet entweder einen `error` oder das Ergebnis als Nachricht)

Diskussion des Additions-Aktors

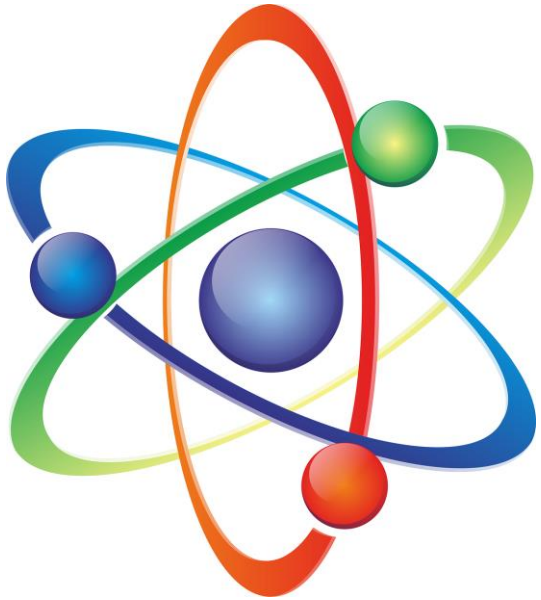
- Zwei `int` als Eingabe geben keinen Hinweis auf die Semantik
- Erweitern mit neuen Operationen nicht möglich (z.B. Division)
- Idee: Annotieren/Typisieren der Daten
  - Möglichkeit #1: Eine Klasse pro Operation
    - \+ kein Laufzeit-Overhead
    - – viel Boilerplate-Code erforderlich
  - Möglichkeit #2: Eineindeutig typisierte Metadaten
    - \+ wenig/kein Laufzeit-Overhead
    - \+ wenig Boilerplate-Code erforderlich

Atoms

- Erlauben das leichtgewichtige Annotieren von Daten
- Ermöglichen Definition von Compilezeit Konstanten
- Mit `atom_constant` eineindeutig typisierte Konstanten:

```
using add_atom = atom_constant<atom("add")>;
```

- Instanz: `add_atom::value`



Metadaten für Math. Operationen

- Eineindeutig typisierte Konstanten für alle Grundrechenarten:

```
using add_atom = atom_constant<atom("add")>;
using sub_atom = atom_constant<atom("sub")>;
using mul_atom = atom_constant<atom("mul")>;
using div_atom = atom_constant<atom("div")>;
```

Aktor für Grundrechenarten

```
behavior math() {
  return {
    [](add_atom, int x, int y) {
      return x + y;
    },
    [](sub_atom, int x, int y) {
      return x - y;
    },
    [](mul_atom, int x, int y) {
      return x * y;
    },
```

Konvention: Metadaten, vor Daten

Aktor für Grundrechenarten (Forts.)

```
    [](div_atom, int x, int y)
    -> result<int> {
      if (y == 0)
        return sec::invalid_argument;
      return x / y;
    }
  };
}
```

Repräsentiert einen `int` oder einen Fehler

SEC steht für „System Error Code“

Verteilte Aktoren

- Lernen verteilter Aktoren durch Rendezvous-Prozess:
  - „Server“ wird mit `publish` an einen Port gebunden
  - „Client“ lernt Server-Handel mit `remote_actor`
  - Client/Server-Rollen nur für Rendezvous erforderlich
- Aktor-Handles können im Netzwerk versendet werden
- C++ hat *keine* Reflections: Benutzerdefinierte Datentypen müssen CAF explizit bekannt gemacht werden
  - Dies beinhaltet insb. auch Instanziierungen für `vector<T>`
  - Datentypen werden per Konfiguration hinzugefügt

Konfiguration verteilter Aktoren

```
struct config : actor_system_config {
  std::string host = "localhost";
  uint16_t port = 0;
  bool server = false;
  config() {
    opt_group{custom_options_, "global"}
    .add(host, "host,H", "hostname of server")
    .add(port, "port,p", "IP port")
    .add(server, "server,s", "run as server");
  }
};
```

Entfernter `math`-Aktor

```
auto& mm = sys.middleman();
if (cfg.server) {
  auto a = sys.spawn(math);
  auto p = mm.publish(a,
                      cfg.port);
  ...
} else {
  auto x = mm.remote_actor(cfg.host,
                           cfg.port);
  if (x) {
    auto f = make_function_view(*x); ...
```

Referenz auf die Netzwerk-Komponente

Macht `a` ansprechbar über konfigurierten Port; gibt gebundenen Port zurück bei Erfolg

Gibt ein `expected` zurück: bei Erfolg ein Handle, sonst Fehler

Eigene Datentypen (Compilezeit)

```
struct point2d {
  int x;
  int y;
};

template <class Inspector>
typename Inspector::result_type
inspect(Inspector& f,point2d& p){
  return f(meta::type_name("point2d"),
           p.x, p.y);
}
```

`inspect` erlaubt CAF Serialisierung und String-Konvertierung

Der Inspector wird aufgerufen mit allen Datenfeldern und optionalen Metadaten

Eigene Datentypen (Laufzeit)

```
struct config : actor_system_config {
  // ... data members ...
  config() {
    add_message_type<point2d>("point2d");
    // ... custom options ...
  }
};
```

Expliziter State in Aktoren

- CAF erlaubt klare Trennung von State und Verhalten
- Modellierung im Code ist explizit:
  - Datenfelder in separater Klasse `T` zusammengefasst
  - Der `self`-Pointer ist vom Typ `stateful_actor<T>`
  - Zugriff auf den State geschieht mit `self->state`
- State wird erzeugt beim starten und zerstört beim beenden
  - Wichtiger Unterschied: der Aktor selbst wird erst zerstört sobald keine Referenzen auf ihn mehr vorhanden sind, der State wird zerstört sobald `self->quit` aufgerufen wird

Aktor mit State: Datenzelle

```
struct cell_state {
  int value = 0;
};
behavior cell(stateful_actor<cell_state>* self){
  return {
    [=](get_atom) {
      return self->state.value;
    },
    [=](put_atom, int x) {
      self->state.value = x;
    }
  };
}
```

CAF startet Aktoren abhängig von der Funktionssignatur

Kopiert den `self`-Pointer in die anonyme Funktion

Monitoring

- Aktoren werden überwacht mit `self->monitor(x)`
- Wenn x beendet wird: Zustellung einer `down_msg`
- Mehrfaches Monitoring führt zu multiplen `down_msg`
- Kurznotation um Aktoren für starten und überwachen:
  `self->spawn<monitored>(...)`
- Unidirektional: keine Signalisierung an überwachte Aktoren
- Eine `down_msg` wird in separatem Handler verarbeitet:
  `self->set_down_handler(...);`

Linking

- Aktoren werden verlinkt mit `self->link_to(x)`
- Wenn x beendet wird: Zustellung einer `exit_msg`
- Mehrfaches Linken hat keinen Effekt
- Kurznotation um Aktoren für starten und überwachen:
  `self->spawn<linked>(...)`
- Bidirektional: beide Aktoren erhalten jeweils `exit_msg`
- Eine `exit_msg` wird in separatem Handler verarbeitet:
  `self->set_exit_handler(...);`

Wichtige Online-Quellen zu CAF

- HTML Handbuch: http://actor-framework.readthedocs.io
  - Nach Komponente/Thema sortiertes Referenzbuch
  - Beinhaltet Anforderungen, Installationsguide, etc.
- Repository: https://github.com/actor-framework/actor-framework
  - Quellcode und CMake-Setup für die Hauptkomponenten
  - Beispielprogramme (im Verzeichnis *examples*)
- PDF Handbuch: http://www.actor-framework.org/pdf/manual.pdf
  - Druckerfreundliche Version des Handbuchs
  - ~80 Seiten + Index