

Algorithmen & Datenstrukturen

Sebastian Wild
wild@cs.uni-kl.de



Fachbereich Informatik

05. Januar 2017

0

Organisatorisches

News

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)

News

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen

News

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT

News

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT
 - nachher mehr dazu!

News

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT
 - nachher mehr dazu!
- Programmierprojekt 

News

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT
 - nachher mehr dazu!
- Programmierprojekt 
 - Maze Competition **nächsten Mittwoch** (11.01.) in 46-260.

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT
 - nachher mehr dazu!
- Programmierprojekt 
 - Maze Competition **nächsten Mittwoch** (11.01.) in 46-260.
 - danach in diesem Slot: Übungsstunde

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT
 - nachher mehr dazu!
- Programmierprojekt 
 - Maze Competition **nächsten Mittwoch** (11.01.) in 46-260.
 - danach in diesem Slot: Übungsstunde
- voraussichtlich kein Donnerstagstermin für Vorlesungen (außer heute)

- Prüfungstermin: Dienstag, **28.02.2017** (08:30 in 01-160)
- Grundlagenfragebogen
 - Hinweise auf Prüfungsseite im OLAT
 - nachher mehr dazu!
- Programmierprojekt 
 - Maze Competition **nächsten Mittwoch** (11.01.) in 46-260.
 - danach in diesem Slot: Übungsstunde
- voraussichtlich kein Donnerstagstermin für Vorlesungen (außer heute)
- jetzt offiziell: 

Überblick über den Kurs

START

1 – Motivation

2 – Maschinen und Modelle

3 – Analyse von Algorithmen

4 – Elementare Datenstrukturen

5 – Sortieren

6 – Binäre Suchbäume

7 – Hashing

8 – Graph Basics

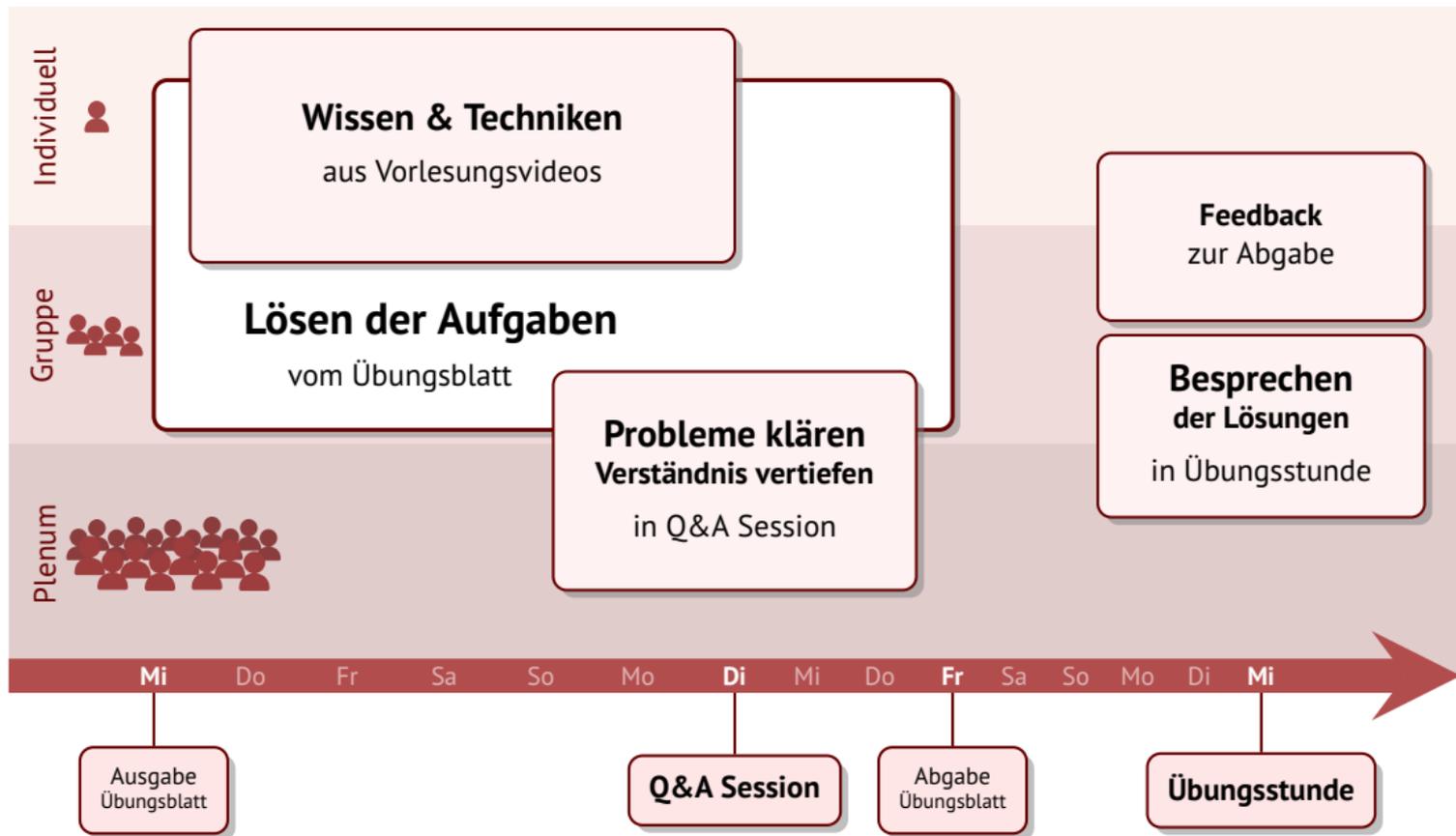
9 – Shortest Paths

10 – Dynamic Programming

11 – Computability & Intractability

Images from <https://www.flickr.com/photos/drywall/747943436/>, pixabay, http://www.palmpedia.net/wiki/Hyphaene_compressa

Ablaufplan



• Aufgaben auf Übungsblättern

Problem-zentriertes Arbeiten (→ deshalb Übungsblatt ganz am Anfang),
Erwerb von **Fähigkeiten** beim Lösen in Kleingruppe

- **Aufgaben auf Übungsblättern**

Problem-zentriertes Arbeiten (→ deshalb Übungsblatt ganz am Anfang),
Erwerb von **Fähigkeiten** beim Lösen in Kleingruppe

- **Videos** (Alternative: Kapitel aus Lehrbuch) ← gibts auf deutsch

Vermittlung von **Wissen**, *jeder in seinem Tempo* (innerhalb einer Lektion)

- **Aufgaben auf Übungsblättern**

Problem-zentriertes Arbeiten (→ deshalb Übungsblatt ganz am Anfang),
Erwerb von **Fähigkeiten** beim Lösen in Kleingruppe

- **Videos** (Alternative: Kapitel aus Lehrbuch) ← gibts auf deutsch

Vermittlung von **Wissen**, *jeder in seinem Tempo* (innerhalb einer Lektion)

- **„Aufgaben zur Vorbereitung“** zu Videos

Mindestaktivierung während des Zuhörens

„das solltet ihr *mindestens* aus den Videos mitnehmen“; oft etwas oberflächlich

⚡ Antworten mitschreiben! Nicht passiv berieseln lassen („Hirn aus“)
(sonst ist die Zeit vertan)

- **Aufgaben auf Übungsblättern**

Problem-zentriertes Arbeiten (→ deshalb Übungsblatt ganz am Anfang),
Erwerb von **Fähigkeiten** beim Lösen in Kleingruppe

- **Videos** (Alternative: Kapitel aus Lehrbuch) ← gibts auf deutsch

Vermittlung von **Wissen**, *jeder in seinem Tempo* (innerhalb einer Lektion)

- **„Aufgaben zur Vorbereitung“** zu Videos

Mindestaktivierung während des Zuhörens

„das solltet ihr *mindestens* aus den Videos mitnehmen“; oft etwas oberflächlich

⚡ Antworten mitschreiben! Nicht passiv berieseln lassen („Hirn aus“)
(sonst ist die Zeit vertan)

- **Kollaborative Fragensammlung** (Piratenpad)

Unklarheiten und **weiterführende Fragen** sammeln, direkt beim Schauen

Feedback zu Fragen und Antworten **von Mitstudis** (geben und bekommen!)

Ranking der Fragen für Q&A Session

• **Aufgaben auf Übungsblättern**

Problem-zentriertes Arbeiten (→ deshalb Übungsblatt ganz am Anfang),
Erwerb von **Fähigkeiten** beim Lösen in Kleingruppe

• **Videos** (Alternative: Kapitel aus Lehrbuch) ← gibts auf deutsch

Vermittlung von **Wissen**, *jeder in seinem Tempo* (innerhalb einer Lektion)

• **„Aufgaben zur Vorbereitung“** zu Videos

Mindestaktivierung während des Zuhörens

„das solltet ihr *mindestens* aus den Videos mitnehmen“; oft etwas oberflächlich

⚡ Antworten mitschreiben! Nicht passiv berieseln lassen („Hirn aus“)
(sonst ist die Zeit vertan)

• **Kollaborative Fragensammlung** (Piratenpad)

Unklarheiten und **weiterführende Fragen** sammeln, direkt beim Schauen

Feedback zu Fragen und Antworten **von Mitstudis** (geben und bekommen!)

Ranking der Fragen für Q&A Session

Evtl. fortführen während Q&A Session als Gedächtnisstütze / grobes Protokoll?

• Aufgaben auf Übungsblättern

Problem-zentriertes Arbeiten (→ deshalb Übungsblatt ganz am Anfang),
Erwerb von **Fähigkeiten** beim Lösen in Kleingruppe

• Videos (Alternative: Kapitel aus Lehrbuch) ← gibts auf deutsch

Vermittlung von **Wissen**, *jeder in seinem Tempo* (innerhalb einer Lektion)

• „Aufgaben zur Vorbereitung“ zu Videos

Mindestaktivierung während des Zuhörens

„das solltet ihr *mindestens* aus den Videos mitnehmen“; oft etwas oberflächlich

🔗 Antworten mitschreiben! Nicht passiv berieseln lassen („Hirn aus“)
(sonst ist die Zeit vertan)

• Kollaborative Fragensammlung (Piratenpad)

Unklarheiten und **weiterführende Fragen** sammeln, direkt beim Schauen

Feedback zu Fragen und Antworten **von Mitstudis** (geben und bekommen!)

Ranking der Fragen für Q&A Session

Evtl. fortführen während Q&A Session als Gedächtnisstütze / grobes Protokoll?

• Q&A Sessions

Klären von schwierigen Fragen, **Vertiefen** des Verständnisses

nach den Videos, während Bearbeitung der Übungsaufgaben → ihr seid „im Stoff“

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \leadsto Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\leadsto hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \leadsto keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \leadsto keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.

\neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.
 \neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Vorlesungsmodus

Ziel: neuen Stoff lernen
 \rightsquigarrow konzentriertes **Mitdenken** ermöglichen

- keine Laptops, Tablets, Handys,
Smartphones, Phablets, Smartwatches, Mobilkonsolen, ...

Übungen

- ähnlich zu Q&A-Sessions
- **Zitieren statt Plagiiere!**
Ich habe (etwas) Verständnis für Faulheit,
aber keins für Ideenklau!

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.
 \neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Vorlesungsmodus

Ziel: neuen Stoff lernen
 \rightsquigarrow konzentriertes **Mitdenken** ermöglichen

- keine Laptops, Tablets, Handys,
Smartphones, Phablets, Smartwatches, Mobilkonsolen, ...

Übungen

- ähnlich zu Q&A-Sessions
- **Zitieren statt Plagiiere!**
Ich habe (etwas) Verständnis für Faulheit,
aber keins für Ideenklau!

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen \rightsquigarrow Ihr seid **aktiv**.
 \neq alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

\rightsquigarrow hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet \rightsquigarrow keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
 \rightsquigarrow keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Vorlesungsmodus

Ziel: neuen Stoff lernen
 \rightsquigarrow konzentriertes **Mitdenken** ermöglichen

- keine Laptops, Tablets, Handys,
Smartphones, Phablets, Smartwatches, Mobilkonsolen, ...



Übungen

- ähnlich zu Q&A-Sessions
- **Zitieren statt Plagiiere!**
Ich habe (etwas) Verständnis für Faulheit,
aber keins für Ideenklau!

Q&A-Modus

Ziel: Verständnis vertiefen ~> Ihr seid **aktiv**.
≠ alles verstanden

- Ich setze voraus, dass ihr Videos / Lesestoff kennt.
inklusive „Aufgaben zur Vorbereitung“!

~> hier: Verständnisfragen klären

- Wechsel zwischen Gruppendiskussion und Plenum
- Beiträge werden nicht bewertet ~> keine Scheu!
- Wir sind alle erwachsen
~> keine Anwesenheitspflicht
(auch keine Bestehensgarantie ohne Anstrengung)
- Wir fangen pünktlich an.

Vorlesungsmodus

Ziel: neuen Stoff lernen
~> konzentriertes **Mitdenken** ermöglichen

- keine Laptops, Tablets, Handys,
Smartphones, Phablets, Smartwatches, Mobilkonsolen, ...



Übungen

- ähnlich zu Q&A-Sessions
- **Zitieren statt Plagiiere!**
Ich habe (etwas) Verständnis für Faulheit,
aber keins für Ideenklau!

1

START



Wozu Algorithmik?

Why study algorithms?

Their impact is broad and far-reaching.

Internet. Web search, packet routing, distributed file sharing, ...

Biology. Human genome project, protein folding, ...

Computers. Circuit layout, file system, compilers, ...

Computer graphics. Movies, video games, virtual reality, ...

Security. Cell phones, e-commerce, voting machines, ...

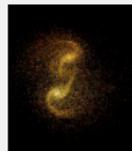
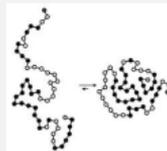
Multimedia. MP3, JPG, DivX, HDTV, face recognition, ...

Social networks. Recommendations, news feeds, advertisements, ...

Physics. N-body simulation, particle collision simulation, ...

⋮

Google
YAHOO!
bing



3

<http://algs4.cs.princeton.edu/lectures/00Intro.pdf>, page 3

Why study algorithms?

Their impact is broad and far-reaching.

Mysterious algorithm was 4% of trading activity last week

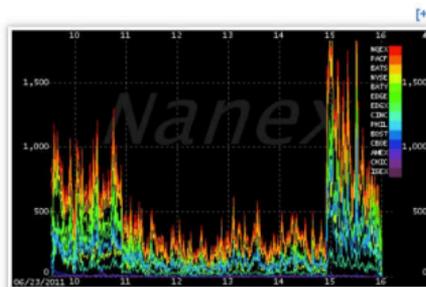
October 11, 2012

A single mysterious computer program that placed orders — and then subsequently canceled them — made up 4 percent of all quote traffic in the U.S. stock market last week, according to the top tracker of [high-frequency trading](#) activity.

The motive of the algorithm is still unclear, [CNBC](#) reports.

The program placed orders in 25-millisecond bursts involving about 500 stocks, according to Nanex, a market data firm. The algorithm never executed a single trade, and it abruptly ended at about 10:30 a.m. ET Friday.

"My guess is that the algo was testing the market, as high-frequency frequently does," says Jon Najarian, co-founder of TradeMonster.com. "As soon as they add bandwidth, the HFT crowd sees how quickly they can top out to create latency." ([Read More: Unclear What Caused Kraft Spike: Nanex Founder.](#))



Generic high frequency trading chart (credit: Nanex)

Why study algorithms?

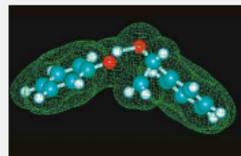
They may unlock the secrets of life and of the universe.

“ Computer models mirroring real life have become crucial for most advances made in chemistry today.... Today the computer is just as important a tool for chemists as the test tube. ”

— *Royal Swedish Academy of Sciences*
(Nobel Prize in Chemistry 2013)



Martin Karplus, Michael Levitt, and Arieh Warshel



Why study algorithms?

For fun and profit.



Why study algorithms?

- Their impact is broad and far-reaching.
- Old roots, new opportunities.
- For intellectual stimulation.
- To become a proficient programmer.
- They may unlock the secrets of life and of the universe.
- To solve problems that could not otherwise be addressed.
- Everybody else is doing it.
- For fun and profit.

Why study anything else?



Ziele dieser Vorlesung:

- 1 **Baukasten** aus Algorithmen und Datenstrukturen aufbauen
 - **best practices**: Liste von A. & DS. für Standardprobleme
 - intellektuelle Errungenschaften der Informatik
- 2 Algorithmen **bewerten** können
- 3 mit anderen Experten über Algorithmen **reden**
 - Computational Thinking prägt unsere Welt.
 - Vokabular aufbauen (→ Baukasten)
 - präzise Beschreibungen verstehen und erstellen, z. B. Javadoc der Java API (siehe nächste Folie)
 - erkennen, wenn jemand „Mist“ erzählt

Ziele dieser Vorlesung:

- 1 **Baukasten** aus Algorithmen und Datenstrukturen aufbauen
 - **best practices**: Liste von A. & DS. für Standardprobleme
 - intellektuelle Errungenschaften der Informatik
- 2 Algorithmen **bewerten** können
- 3 mit anderen Experten über Algorithmen **reden**
 - Computational Thinking prägt unsere Welt.
 - Vokabular aufbauen (→ Baukasten)
 - präzise Beschreibungen verstehen und erstellen, z.B. Javadoc der Java API (siehe nächste Folie)
 - erkennen, wenn jemand „Mist“ erzählt

Ziele dieser Vorlesung:

- 1 **Baukasten** aus Algorithmen und Datenstrukturen aufbauen
 - **best practices**: Liste von A. & DS. für Standardprobleme
 - intellektuelle Errungenschaften der Informatik
- 2 Algorithmen **bewerten** können
- 3 mit anderen Experten über Algorithmen **reden**
 - Computational Thinking prägt unsere Welt.
 - Vokabular aufbauen (→ Baukasten)
 - präzise Beschreibungen verstehen und erstellen, z.B. Javadoc der Java API (siehe nächste Folie)
 - erkennen, wenn jemand „Mist“ erzählt

Ziele dieser Vorlesung:

- 1 **Baukasten** aus Algorithmen und Datenstrukturen aufbauen
 - **best practices**: Liste von A. & DS. für Standardprobleme
 - intellektuelle Errungenschaften der Informatik
- 2 Algorithmen **bewerten** können
- 3 mit anderen Experten über Algorithmen **reden**
 - Computational Thinking prägt unsere Welt.
 - Vokabular aufbauen (↔ Baukasten)
 - präzise Beschreibungen verstehen und erstellen, z. B. Javadoc der Java API (siehe nächste Folie)
 - erkennen, wenn jemand „Mist“ erzählt

Ziele dieser Vorlesung:

- 1 **Baukasten** aus Algorithmen und Datenstrukturen aufbauen
 - **best practices:** Liste von A. & DS. für Standardprobleme
 - intellektuelle Errungenschaften der Informatik
- 2 Algorithmen **bewerten** können
- 3 mit anderen Experten über Algorithmen **reden**
 - Computational Thinking prägt unsere Welt.
 - Vokabular aufbauen (↪ Baukasten)
 - präzise Beschreibungen verstehen und erstellen, z. B. Javadoc der Java API (siehe nächste Folie)
 - erkennen, wenn jemand „Mist“ erzählt

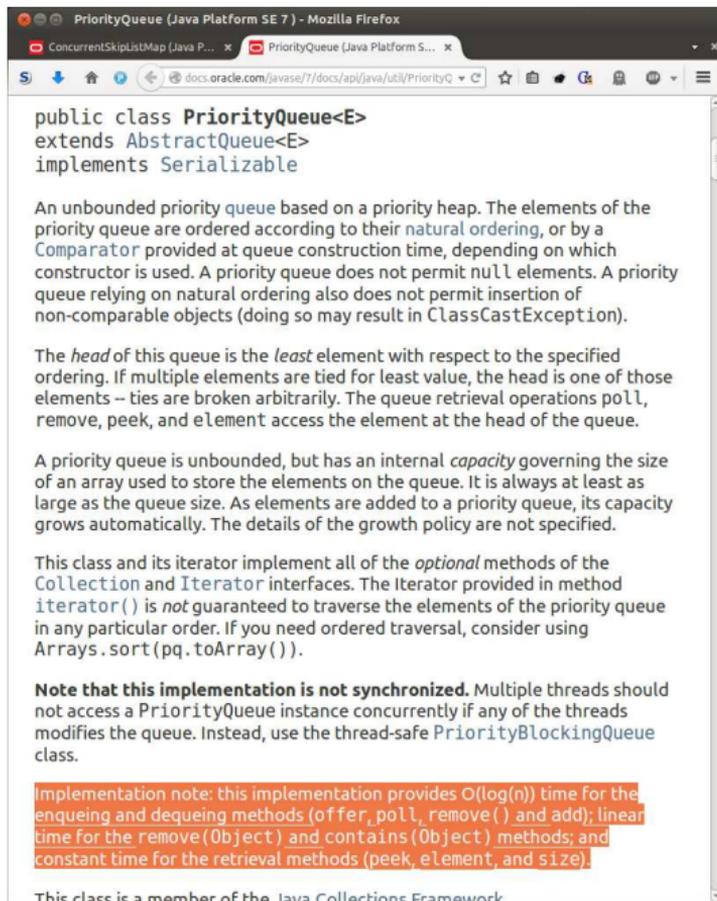


Ziele dieser Vorlesung:

- 1 **Baukasten** aus Algorithmen und Datenstrukturen aufbauen
 - **best practices:** Liste von A. & DS. für Standardprobleme
 - intellektuelle Errungenschaften der Informatik
- 2 Algorithmen **bewerten** können
- 3 mit anderen Experten über Algorithmen **reden**
 - Computational Thinking prägt unsere Welt.
 - Vokabular aufbauen (↪ Baukasten)
 - präzise Beschreibungen verstehen und erstellen, z. B. Javadoc der Java API (siehe nächste Folie)
 - erkennen, wenn jemand „Mist“ erzählt



Beispiele aus der Java API



PriorityQueue (Java Platform SE 7) - Mozilla Firefox

```
public class PriorityQueue<E>
extends AbstractQueue<E>
implements Serializable
```

An unbounded priority queue based on a priority heap. The elements of the priority queue are ordered according to their natural ordering, or by a `Comparator` provided at queue construction time, depending on which constructor is used. A priority queue does not permit null elements. A priority queue relying on natural ordering also does not permit insertion of non-comparable objects (doing so may result in `ClassCastException`).

The *head* of this queue is the *least* element with respect to the specified ordering. If multiple elements are tied for least value, the head is one of those elements – ties are broken arbitrarily. The queue retrieval operations `poll`, `remove`, `peek`, and `element` access the element at the head of the queue.

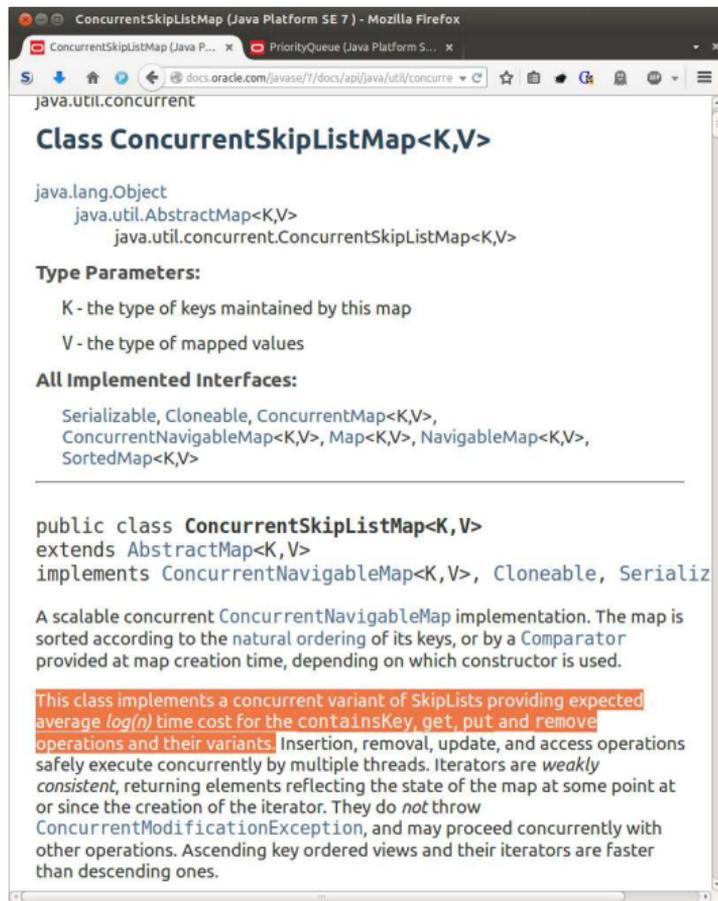
A priority queue is unbounded, but has an internal *capacity* governing the size of an array used to store the elements on the queue. It is always at least as large as the queue size. As elements are added to a priority queue, its capacity grows automatically. The details of the growth policy are not specified.

This class and its iterator implement all of the *optional* methods of the `Collection` and `Iterator` interfaces. The Iterator provided in method `iterator()` is *not* guaranteed to traverse the elements of the priority queue in any particular order. If you need ordered traversal, consider using `Arrays.sort(pq.toArray())`.

Note that this implementation is not synchronized. Multiple threads should not access a `PriorityQueue` instance concurrently if any of the threads modifies the queue. Instead, use the thread-safe `PriorityBlockingQueue` class.

Implementation note: this implementation provides $O(\log(n))$ time for the enqueueing and dequeuing methods (`offer`, `poll`, `remove()` and `add`); linear time for the `remove(Object)` and `contains(Object)` methods; and constant time for the retrieval methods (`peek`, `element`, and `size`).

This class is a member of the Java Collections Framework



ConcurrentSkipListMap (Java Platform SE 7) - Mozilla Firefox

```
java.util.concurrent
Class ConcurrentSkipListMap<K,V>
java.lang.Object
  java.util.AbstractMap<K,V>
    java.util.concurrent.ConcurrentSkipListMap<K,V>
```

Type Parameters:

- K - the type of keys maintained by this map
- V - the type of mapped values

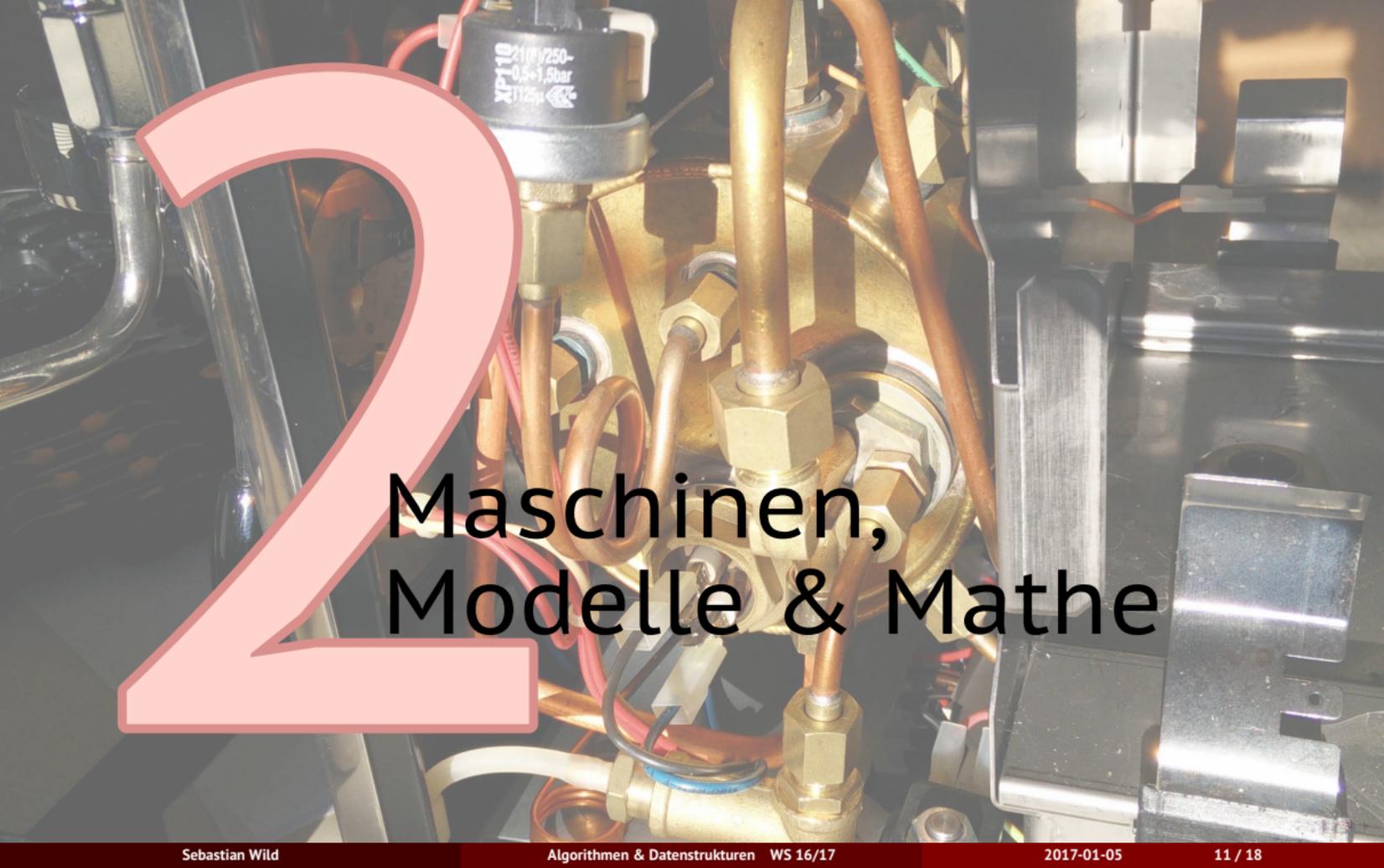
All Implemented Interfaces:

`Serializable`, `Cloneable`, `ConcurrentMap<K,V>`, `ConcurrentNavigableMap<K,V>`, `Map<K,V>`, `NavigableMap<K,V>`, `SortedMap<K,V>`

```
public class ConcurrentSkipListMap<K,V>
extends AbstractMap<K,V>
implements ConcurrentNavigableMap<K,V>, Cloneable, Serializ
```

A scalable concurrent `ConcurrentNavigableMap` implementation. The map is sorted according to the natural ordering of its keys, or by a `Comparator` provided at map creation time, depending on which constructor is used.

This class implements a concurrent variant of `SkipLists` providing expected average $\log(n)$ time cost for the `containsKey`, `get`, `put` and `remove` operations and their variants. Insertion, removal, update, and access operations safely execute concurrently by multiple threads. Iterators are *weakly consistent*, returning elements reflecting the state of the map at some point at or since the creation of the iterator. They do *not* throw `ConcurrentModificationException`, and may proceed concurrently with other operations. Ascending key ordered views and their iterators are faster than descending ones.



Maschinen, Modelle & Mathe

A&DS ist Teil eines **wissenschaftlichen** Studiengangs

A&DS ist Teil eines **wissenschaftlichen** Studiengangs

Weniger ...

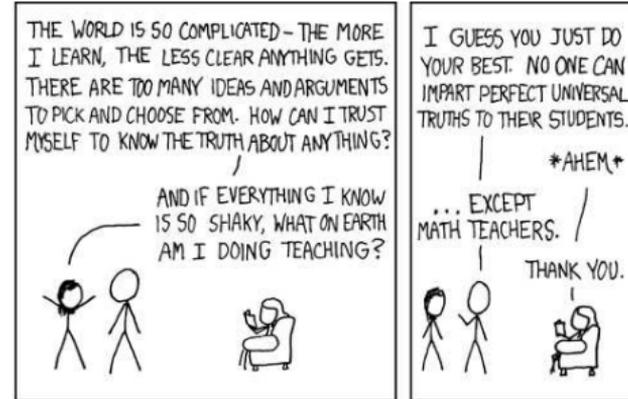


A&DS ist Teil eines **wissenschaftlichen** Studiengangs

Weniger ...



...und mehr

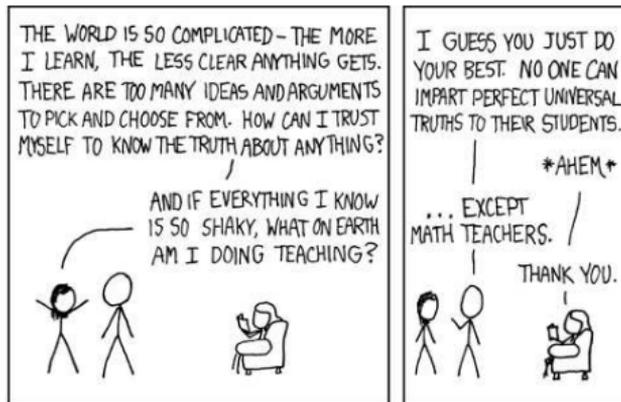


A&DS ist Teil eines **wissenschaftlichen** Studiengangs

Weniger ...



...und mehr



↪ Fokus auf “universal truths” der Algorithmik

- Model der Realität
- quantitative Vorhersagen
- Validierung der Modelle in Experimenten

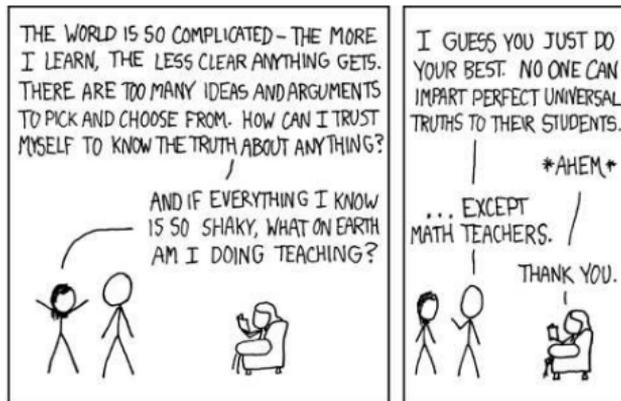
↪ Wir brauchen ein paar mathematische / theoretische Grundlagen.

A&DS ist Teil eines **wissenschaftlichen** Studiengangs

Weniger ...



...und mehr

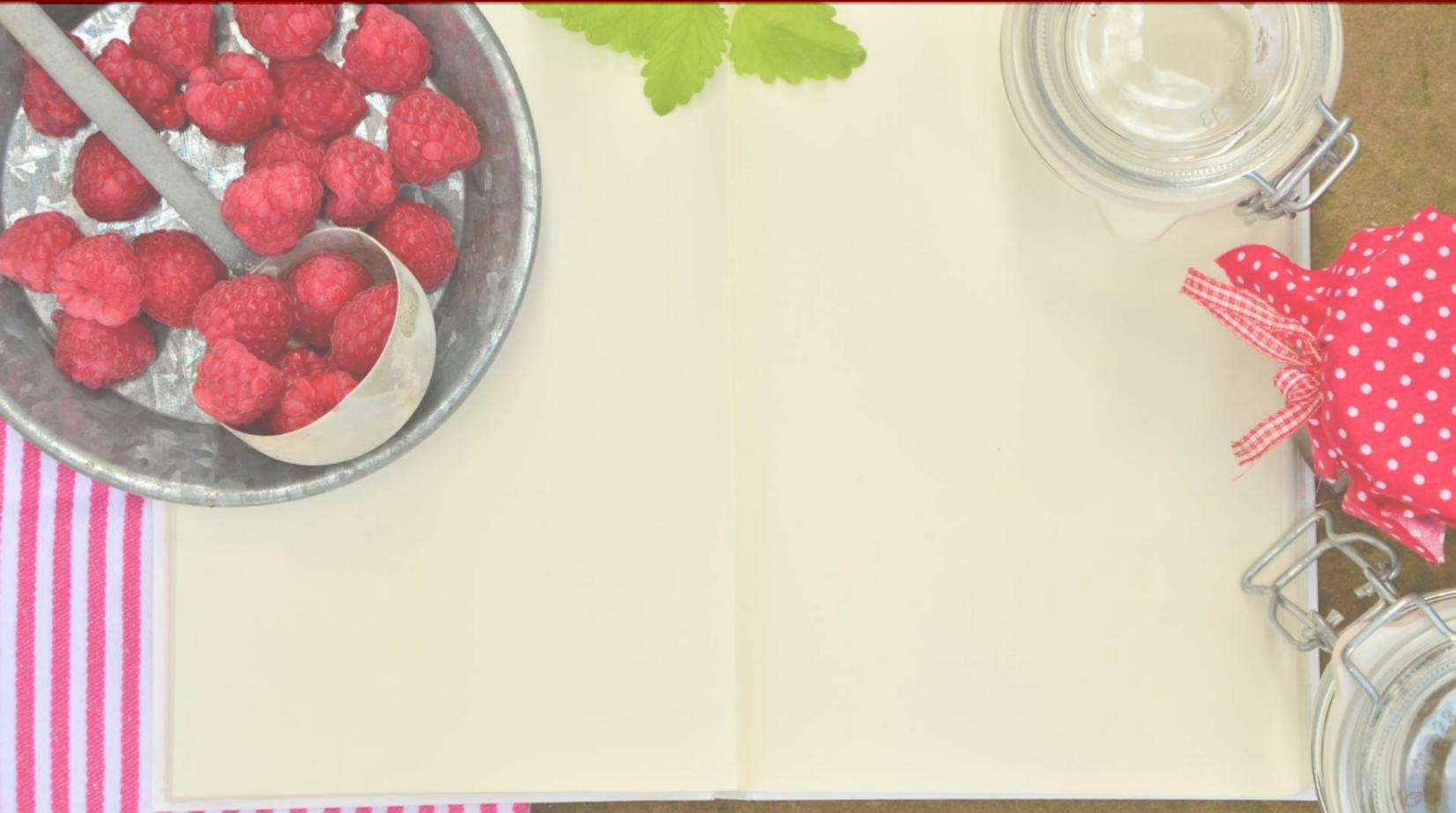


↪ Fokus auf “universal truths” der Algorithmik

- Model der Realität
- quantitative Vorhersagen
- Validierung der Modelle in Experimenten

↪ Wir brauchen ein paar mathematische / theoretische Grundlagen.

Was ist ein Algorithmus?





Welche Definitionen für „Algorithmus“ gaben die Videos?

Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:
Folge von Anweisungen \approx Kochrezept



Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

- 1 mechanisch nachvollziehbar
~ kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung
- 3 löst eine Klasse von Problemen





Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung
- 3 löst eine Klasse von Problemen

Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung
- 3 löst eine Klasse von Problemen



Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

z.B. Java Programm

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

Was ist ein Algorithmus?

Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

z.B. Java Programm

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

$x + y$, nicht nur $17 + 4$

Was ist ein Algorithmus?



Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

z.B. Java Programm

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

$x + y$, nicht nur $17 + 4$

typisches Beispiel: *Bubblesort*

nicht ein spezielles Programm,
sondern die zugrundeliegende Idee

Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept



Welche Algorithmen wurden in den Videos vorgestellt?

Genauer:

z.B. Java Programm

- 1 mechanisch nachvollziehbar
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

$x + y$, nicht nur $17 + 4$

typisches Beispiel: *Bubblesort*

nicht ein spezielles Programm,
sondern die zugrundeliegende Idee

Was ist ein Algorithmus?



al-Chwarizmi
Namensgeber für Algorithmus

Anschaulich:

Folge von Anweisungen \approx Kochrezept

Genauer:

z.B. Java Programm

- 1 mechanisch nachvollziehbar
 \rightsquigarrow kein „gesunder Menschenverstand“ nötig
- 2 endliche Beschreibung \neq endliche Berechnung!
- 3 löst eine Klasse von Problemen

$x + y$, nicht nur $17 + 4$

typisches Beispiel: *Bubblesort*

nicht ein spezielles Programm,
sondern die zugrundeliegende Idee

Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“

Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“

↪ sehr schwammiger Begriff!

Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“

→ sehr schwammiger Begriff!



Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“

→ sehr schwammiger Begriff!

Für uns:



Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“
→ sehr schwammiger Begriff!

Für uns:

- **Interface:** Spezifikation von Operationen API
= *abstract data type (ADT)*

application programming interface



Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“

→ sehr schwammiger Begriff!

Für uns:

- **Interface:** Spezifikation von Operationen API
= *abstract data type (ADT)*

Beispiel: *Union-Find*

application programming interface



Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“
→ sehr schwammiger Begriff!

Für uns:

application programming interface

- **Interface:** Spezifikation von Operationen API
= *abstract data type (ADT)*
Beispiel: *Union-Find*
- **Implementierung** eines Interface:
pro Operation ein Algorithmus, der die Spezifikation erfüllt



Was ist eine Datenstruktur?

„organisierte Art Daten zu speichern und nutzbar zu machen“
→ sehr schwammiger Begriff!

Für uns:

application programming interface

- **Interface:** Spezifikation von Operationen API
= *abstract data type (ADT)*
Beispiel: *Union-Find*
- **Implementierung** eines Interface:
pro Operation ein Algorithmus, der die Spezifikation erfüllt
Beispiel: *Quick Union*



Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?



Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)



Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Mensch (zu Fuß) oder Zug: Wer ist schneller?

(beide stehen zu Beginn)

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**

Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Mensch (zu Fuß) oder Zug: Wer ist schneller?

(beide stehen zu Beginn)

- Kommt darauf an! Am Anfang sicher der Mensch ...

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**

Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Mensch (zu Fuß) oder Zug: Wer ist schneller am Horizont?

(beide stehen zu Beginn)

- Kommt darauf an! Am Anfang sicher der Mensch ...
- aber auf lange Sicht der Zug

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**

Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

↖
als Funktion in n

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**

Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**

Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden
 - **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
 - Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↪ Halten Wortbreite variabel.

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↪ Halten Wortbreite variabel. ← kann sogar mit n mitwachsen

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↪ Halten Wortbreite variabel. ← kann sogar mit n mitwachsen
← „Überlebt Pentium 4.“

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ← damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↪ Halten Wortbreite variabel. ← kann sogar mit n mitwachsen
← „Überlebt Pentium 4.“

Dinge, die wir **nicht** erlauben

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ↗ damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↗ Halten Wortbreite variabel. ↗ kann sogar mit n mitwachsen
↗ „Überlebt Pentium 4.“

Dinge, die wir **nicht** erlauben

- selbst-modifizierender Code

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ↗ damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↗ Halten Wortbreite variabel. ↗ kann sogar mit n mitwachsen
↗ „Überlebt Pentium 4.“

Dinge, die wir **nicht** erlauben

- selbst-modifizierender Code
- Rechnen mit reellen Zahlen
(≠ floating-point) ↗

Warum nicht einfach: Algorithmus = Java Programm?

- („Java ist doof, ich mag lieber C/C++/Scala/Python/Delphi/Groovy/Fortran/Ruby/Cobol/...“)
- Algorithmen sollen für **Menschen** gut verständlich sein insbesondere unmissverständliche und einfache Sprache
- **konkrete Programmiersprachen spiegeln zu sehr das Design aktueller Hardware wider**
Sind am Verhalten für große Eingaben interessiert! ↗

Beispiel: Wie viel Speicher brauchen n natürliche Zahlen?

- **Java:** $32n$ bit, da int eine 32 Bit Zahl ist.
= typische Wortgröße aktueller Hardware ↗ damit kann in einem Schritt gerechnet werden
- **Theorie:** Zahl im Bereich $0..M$ braucht $\lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
also $n \cdot \lceil \lg(M + 1) \rceil$ bits
- Wenn M klein ist, würde Programmierer aus Effizienzgründen trotzdem 32-bit ints wählen.
- ↪ Halten Wortbreite variabel. ↗ kann sogar mit n mitwachsen
↗ „Überlebt Pentium 4.“

Dinge, die wir **nicht** erlauben

- selbst-modifizierender Code
- Rechnen mit reellen Zahlen
(≠ floating-point) ↗
- Magie

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ~ erst über Algorithmen nachdenken

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↷ erst über Algorithmen nachdenken

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren

↪ erst über Algorithmen nachdenken

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↳ erst über Algorithmen nachdenken

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↳ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↳ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können,
dass und wie Schritte implementiert werden können!

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↳ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↳ "look into the box"

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können,
dass und wie Schritte implementiert werden können!

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↪ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↪ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können,
dass und wie Schritte implementiert werden können!

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↪ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↪ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können, dass und wie Schritte implementiert werden können!

Pseudocode

- für Informatiker lesbar und mit etwas Aufwand in (Java/...)-Code übersetzbar
- keine strenge Syntax, aber eindeutig
- ↪ nicht direkt verwendbar für Computer, also *pseudo code*

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↪ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↪ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können, dass und wie Schritte implementiert werden können!

Pseudocode

- für Informatiker lesbar und mit etwas Aufwand in (Java/...)-Code übersetzbar
- keine strenge Syntax, aber eindeutig
- ↪ nicht direkt verwendbar für Computer, also *pseudo code*

- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↪ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↪ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können, dass und wie Schritte implementiert werden können!

Pseudocode

- für Informatiker lesbar und mit etwas Aufwand in (Java/...)-Code übersetzbar
- keine strenge Syntax, aber eindeutig
- ↪ nicht direkt verwendbar für Computer, also *pseudo code*

“Überlebt Java.”



- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↪ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↪ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können, dass und wie Schritte implementiert werden können!

Pseudocode

- für Informatiker lesbar und mit etwas Aufwand in (Java/...)-Code übersetzbar
- keine strenge Syntax, aber eindeutig

↪ nicht direkt verwendbar für Computer, also *pseudo code*

“Überlebt Java.”



- Algorithmen und Datenstrukturen sind Abstraktionen von Programmen.
- typische Vorgehensweise beim Programmieren: **top down**
 - erst grobe Schritte, dann diese präzisieren
 - ↪ erst über Algorithmen nachdenken



Gefahren der Abstraktion

Wie bekommt man eine Giraffe in einen Kühlschrank?

Antwort

↪ “look into the box”

top down funktioniert nur, wenn wir überblicken können, dass und wie Schritte implementiert werden können!

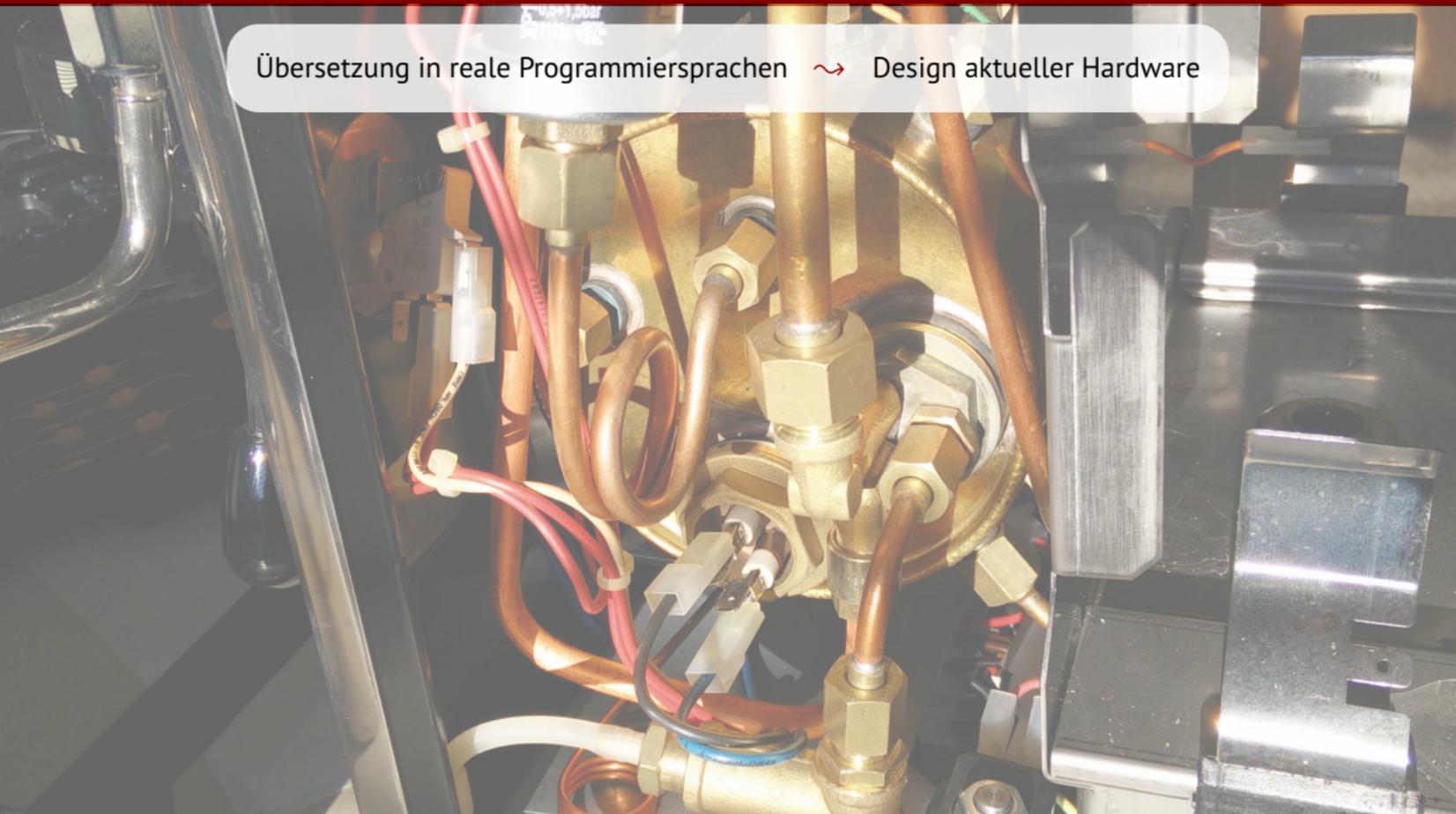
Pseudocode

- für Informatiker lesbar und mit etwas Aufwand in (Java/...)-Code übersetzbar
- keine strenge Syntax, aber eindeutig
- ↪ nicht direkt verwendbar für Computer, also *pseudo code*

“Überlebt Java.”



Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware



Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM \leftarrow random access machine

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: **RAM** ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: **RAM** ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:
 - Operationen auf 2 Zahlen, z.B. $MEM[2] := MEM[0] + MEM[1]$

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: **RAM** ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
 - jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
 - Befehle der Maschine sind:
 - Operationen auf 2 Zahlen, z.B. $MEM[2] := MEM[0] + MEM[1]$
 - statt $x + y$ auch $x - y, x \cdot y, x \text{ div } y, x \text{ mod } y$ sowie bitweise logische Operationen
- ← Achtung! Alle Operationen modulo 2^w

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:
 - Operationen auf 2 Zahlen, z.B. $MEM[2] := MEM[0] + MEM[1]$
 - statt $x + y$ auch $x - y, x \cdot y, x \text{ div } y, x \text{ mod } y$ sowie bitweise logische Operationen
- bedingte und unbedingte Sprünge

← Achtung! Alle Operationen modulo 2^w

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: **RAM** ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:
 - Operationen auf 2 Zahlen, z.B. $MEM[2] := MEM[0] + MEM[1]$
 - statt $x + y$ auch $x - y, x \cdot y, x \text{ div } y, x \text{ mod } y$ sowie bitweise logische Operationen
- bedingte und unbedingte Sprünge

← Achtung! Alle Operationen modulo 2^w

oben: vereinfachte Version ohne Register

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

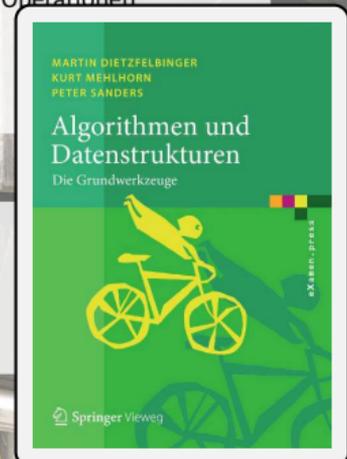
Abstraktes Maschinenmodell: **RAM** ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:
 - Operationen auf 2 Zahlen, z.B. $MEM[2] := MEM[0] + MEM[1]$
 - statt $x + y$ auch $x - y, x \cdot y, x \text{ div } y, x \text{ mod } y$ sowie bitweise logische Operationen
- bedingte und unbedingte Sprünge

← Achtung! Alle Operationen modulo 2^w

oben: vereinfachte Version ohne Register

alle Details: Kapitel 2.2 aus
Dietzfelbinger, Mehlhorn, Sanders: *Algorithmen und Datenstrukturen*



Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:

- RAM = voller Detailgrad ...
So will man nicht programmieren müssen!
 - Meistens reicht uns eine abstraktere Sichtweise.
 - **Aber:** Wenn nötig, können wir Details im präzisen Modell klären!
- \rightsquigarrow große Errungenschaft der theoretischen Informatik,
da wir mathematische Beweise führen können.

eternal truths

oben: V
alle De

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:

- RAM = voller Detailgrad ...

So will man nicht programmieren müssen!

- Meistens reicht uns eine abstraktere Sichtweise.

- **Aber:** Wenn nötig, können wir Details im präzisen Modell klären!

\rightsquigarrow große Errungenschaft der theoretischen Informatik,
da wir mathematische Beweise führen können.

eternal truths

oben: V
alle De

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:

- RAM = voller Detailgrad ...
So will man nicht programmieren müssen!
 - Meistens reicht uns eine abstraktere Sichtweise.
 - **Aber:** Wenn nötig, können wir Details im präzisen Modell klären!
- \rightsquigarrow große Errungenschaft der theoretischen Informatik,
da wir mathematische Beweise führen können.

eternal truths

oben: V
alle De

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:

- RAM = voller Detailgrad ...
So will man nicht programmieren müssen!
- Meistens reicht uns eine abstraktere Sichtweise.
- **Aber:** Wenn nötig, können wir Details im präzisen Modell klären!

\rightsquigarrow große Errungenschaft der theoretischen Informatik,
da wir mathematische Beweise führen können.

↑
eternal truths

oben: V
alle De

Übersetzung in reale Programmiersprachen \rightsquigarrow Design aktueller Hardware

Abstraktes Maschinenmodell: RAM ← random access machine

- unbeschränkt großer Speicher $MEM[0], MEM[1], MEM[2], \dots$
- jede Zelle $MEM[i]$ speichert eine w -Bit Zahl, also ganze Zahl aus $[0..2^w - 1]$
 w ist die Wortbreite; typischerweise $2^w \approx n$, die Eingabegröße
- Befehle der Maschine sind:

- RAM = voller Detailgrad ...
So will man nicht programmieren müssen!
 - Meistens reicht uns eine abstraktere Sichtweise.
 - **Aber:** Wenn nötig, können wir Details im präzisen Modell klären!
- \rightsquigarrow große Errungenschaft der theoretischen Informatik,
da wir mathematische Beweise führen können.

←
eternal truths

oben: V
alle De

