

FORMALE SYSTEME

1. Vorlesung: Willkommen/Einleitung formale Sprachen

Sebastian Rudolph

Folien: © Markus Krötzsch, <https://iccl.inf.tu-dresden.de/web/FS2020>, CC BY 3.0 DE

TU Dresden, 14. Oktober 2024

Willkommen zur Vorlesung Formale Systeme

Raum, Zeit, URL

- **Vorlesungen:** in Präsenz
- **Vorlesungstermine:**
Montag, DS3 (11:10–12:40), BAR/SCHÖ/E
Donnerstag, DS4 (13:00–14:30), HSZ/0003/H
- **Keine Vorlesungen:**
Reformationstag: Do 31.10.2024
Dienstliche Abwesenheit: Mo 04.11., Do 07.11.2024
Jahreswechsel: Mo 23.12., Do 26.12., Mo 30.12.2024, Do 02.01.2025
- **Vorlesungswebseite:**
[https://iccl.inf.tu-dresden.de/web/Formale_Systeme_\(WS2024\)](https://iccl.inf.tu-dresden.de/web/Formale_Systeme_(WS2024))
(Folien, Termine, allgemeine Informationen)
- **OPAL-Kurs**
<https://tud.link/ke43jf>
(Übungsblätter; im Forum: Support bei allen Fragen zur Vorlesung)

Übungen

- **Anmeldung** zu den Übungen über OPAL („Einschreibung Übungsgruppen“)
Einschreibungsbeginn: Heute, 14. Oktober 2024, 15:00 Uhr
- **Übungsblätter** jeweils donnerstags „nach der Vorlesung“
(erstes Übungsblatt am 17. Oktober 2024)
- **Beginn der Übungen:** 21. Oktober 2024
- **Keine Übungen:**
Dienstliche Abwesenheit: Mo 04.11. bis Fr 08.11.2024
- **Übungsablauf**, vereinfacht, idealisiert:
 - Aufgaben werden zu Hause bearbeitet, so gut es geht;
 - in der Übung helfen Gruppenleiter:innen bei Fragen und Problemen und zeigen Beispiellösungen.

Prüfung und Prüfungsvorbereitung

- schriftliche Prüfung (90min) am Ende des Wintersemesters
- prüfungsrelevant:
 - kompletter Stoff, der in der Vorlesung behandelt wird
 - wiedergeben (definieren) **und** anwenden (rechnen)
- Modulnote ergibt sich je nach Studiengang
- zur zusätzlichen Vorbereitung wird es eine Probeklausur geben

Formale Systeme bestehen

Tipps:

- **Übungsaufgaben selbst lösen – vor der Übung**

Die Prüfung besteht im Lösen von Rechenaufgaben. Die Konzepte „verstanden“ zu haben hilft allein nicht weiter.

- **Schnell sein**

Prüfungszeit ist meistens knapp. Es reicht nicht, Aufgaben „im Prinzip“ lösen zu können. Man muss sie schnell lösen.

- **Während des Semesters lernen**

Die Zeit vor der Prüfung sollte der Wiederholung und Festigung dienen, nicht der erstmaligen Beschäftigung mit den Themen.

Übersicht und Motivation

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

So viele Computer, Programme, ... – das passt doch in kein Studium!

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

So viele Computer, Programme, ... – das passt doch in kein Studium!

Nein, man muss sich auf das Wesentliche konzentrieren.

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

So viele Computer, Programme, ... – das passt doch in kein Studium!

Nein, man muss sich auf das Wesentliche konzentrieren.

Was ist das Wesentliche?

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

So viele Computer, Programme, ... – das passt doch in kein Studium!

Nein, man muss sich auf das Wesentliche konzentrieren.

Was ist das Wesentliche?

Vereinfachte Modelle für Computer und Rechenverfahren.

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

So viele Computer, Programme, ... – das passt doch in kein Studium!

Nein, man muss sich auf das Wesentliche konzentrieren.

Was ist das Wesentliche?

Vereinfachte Modelle für Computer und Rechenverfahren.

Was sagen uns Modelle über echte Computer und Software?

Grundlegende Fragen der Informatik

Was ist ein Computer?

Eine Maschine, die rechnet.

Was ist „Rechnen“?

Die systematische Überführung von Eingaben in Ausgaben.

Was sind „Eingaben“ und „Ausgaben“?

Folgen von Zeichen, zum Beispiel Dateien oder Textausgaben.

So viele Computer, Programme, ... – das passt doch in kein Studium!

Nein, man muss sich auf das Wesentliche konzentrieren.

Was ist das Wesentliche?

Vereinfachte Modelle für Computer und Rechenverfahren.

Was sagen uns Modelle über echte Computer und Software?

Was man berechnen kann, wie aufwändig es ist,
wie man es implementieren kann, ob es „stimmt“, ...

Zielstellung, Kernthemen

Ziel dieser Vorlesung ist es, wichtige Grundlagen zur Modellierung von Berechnung in der Informatik einzuführen, konkrete Modelle vorzustellen und ihre Eigenschaften verständlich zu machen.

- Ein- und Ausgaben sind Zeichenfolgen
~> Wir beginnen mit Wörtern und formalen Sprachen
- Wir wollen Berechnungsaufgaben beschreiben
~> Spezifikation von Sprachen
(direkt, mit Grammatiken, mit regulären Ausdrücken, ...)
- Fokus auf einfache Berechnungsmodelle
~> Automaten (in vielen Versionen ...)
- Man kann Berechnungsaufgaben auch logisch spezifizieren
~> Aussagenlogik als einfacher Einstieg
- Lösung logischer Probleme
~> Berechnungsverfahren zum logischen Schließen

Gliederung „Formale Systeme“

Teil 1: Sprachen und Automaten

- Formale Sprachen und Grammatiken
- Reguläre Sprachen und endliche Automaten
- Kontextfreie Sprachen und Kellerautomaten
- Kontextsensitive Sprachen, Typ-0-Sprachen und Turingmaschinen

Teil 2: Aussagenlogik

- Syntax und Semantik
- logisches Schließen, Backtracking und andere Verfahren
- Horn-Logik als Vereinfachung

Literatur: Lehrbücher

Der Vorlesungsstoff gehört zu fast jeder Informatikausbildung. Es gibt viele Lehrmaterialien und eine weitgehend einheitliche Notation.

Lehrbücher zum ersten Teil der Vorlesung (formale Sprachen):

- Uwe Schöning: **Theoretische Informatik – kurz gefasst**. Spektrum Akademischer Verlag
deutschsprachiger Standardtext; in der Tat ziemlich kurz gefasst
- John E. Hopcroft, Rajeev Motwani, Jeffrey D. Ullman: **Einführung in Automatentheorie, Formale Sprachen und Berechenbarkeit**. Pearson Studium
aus dem Englischen übertragenes Standardwerk; Original evtl. besser
- Michael Sipser: **Introduction to the Theory of Computation**. Cengage Learning
Standardtext zu Sprachen und Berechnungskomplexität; Englisch

Literatur: Frei zugängliche Skripte

Es existieren mehrere Skripte zu dieser Vorlesung:

- Franz Baader: **Skript Formale Systeme, Teil 1 – Automaten und formale Sprachen.** TU Dresden.

Siehe https://lat.inf.tu-dresden.de/teaching/ws2013-2014/FS/script_2016-02.pdf.

- Christel Baier, Manuela Berg, Walter Nauber: **Formale Systeme WS 2011/2012: Skript zur Vorlesung.** TU Dresden.

Siehe https://www.researchgate.net/profile/Christel-Baier/publication/267409804_Formale_Systeme_WS_20112012_Skript_zur_Vorlesung/links/54e24b020cf2966637965e77/Formale-Systeme-WS-2011-2012-Skript-zur-Vorlesung.pdf

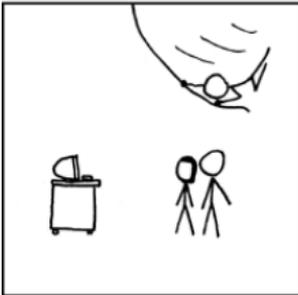
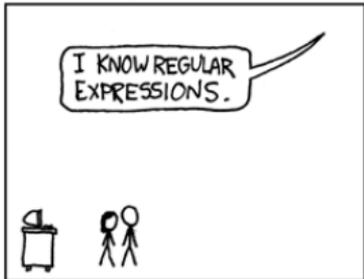
Die Vorlesungen haben kleine Abweichungen, stimmen aber in vielen wichtigen Punkten überein.

Fragen, Ideen, Anmerkungen

Sprachen in der Informatik

Wozu Sprachen?

WHENEVER I LEARN A NEW SKILL I CONCOCT ELABORATE FANTASY SCENARIOS WHERE IT LETS ME SAVE THE DAY.

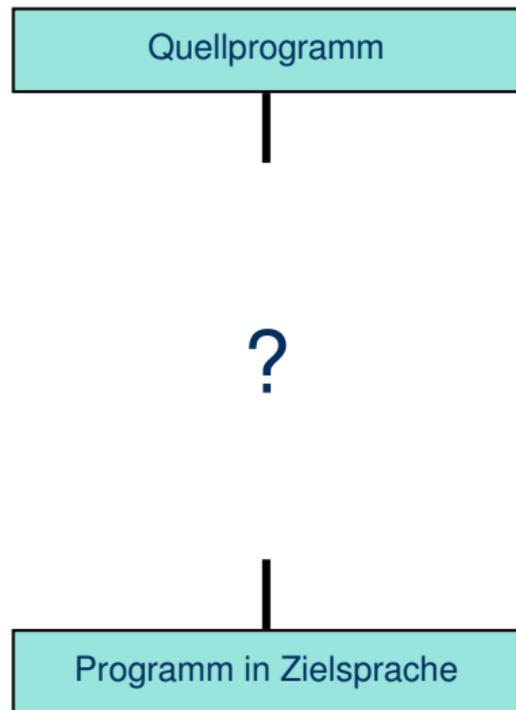


Wozu Sprachen?

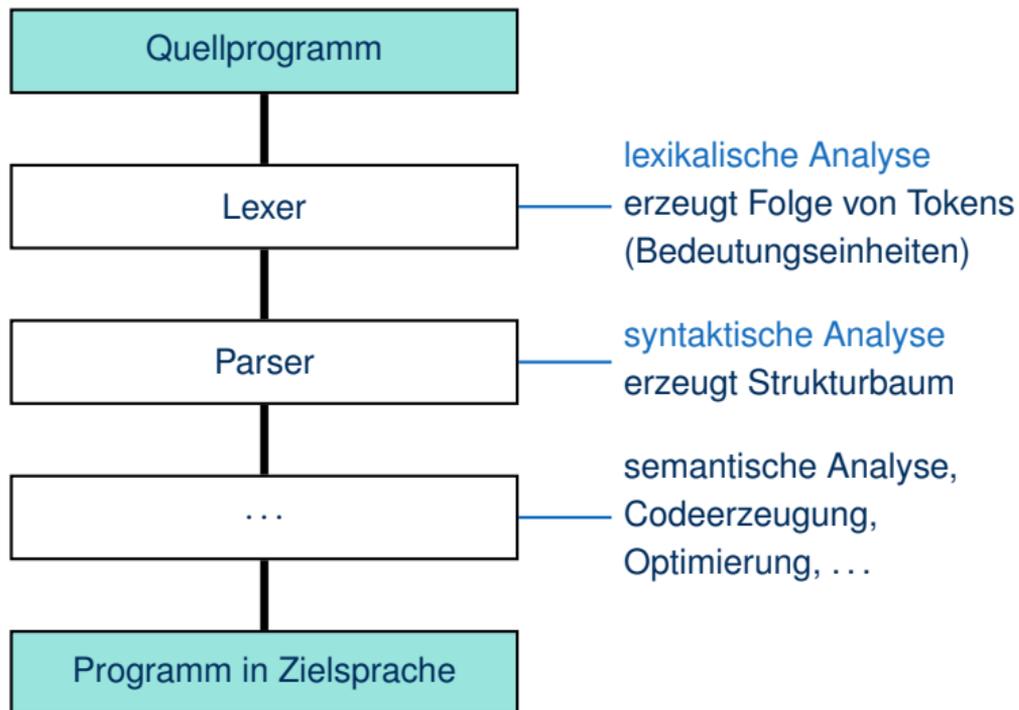
Formale Sprachen und die zugehörigen Automaten und Grammatiken haben sehr viele Anwendungen:

- **Compilerbau**
Programmiersprachen sind typische formale Sprachen
- **Interpretation natürlicher Sprachen**
viele Anwendungen des Sprachverstehens nutzen Grammatiken
- **Datenaustausch**
Textformate (HTML, CSV, JSON, XML, . . .) bilden formale Sprachen
- **Formatierung/Validierung/Spezifikation**
z.B. um die Gültigkeit von Formulareingaben zu prüfen
- **Berechenbarkeit und Komplexität**
mächtigere Sprachdefinitionen verlangen teurere Algorithmen
- **Informationsextraktion**
Formale Sprachen helfen bei der Mustersuche in Textdokumenten
- **Datenbanken**
Datenbankanfragen können Muster suchen, z.B. in Graphdatenbanken

Beispiel Compiler



Beispiel Compiler



Lexikalische Analyse

Eingabe: Zeichenkette eines Programms

Bsp.: lengthCm = lengthInch * 2.54;
Kette von 29 Zeichen

Ausgabe: Kette von Grundsymbolen (Tokens)

Bsp.: IDENTIFIER EQUALS IDENTIFIER STAR NUMBER SEMICOLON
Kette von 6 Tokens

- Zur Weiterverarbeitung wird Tokens oft weitere Information mitgegeben, z.B. IDENTIFIER("lengthCm") und IDENTIFIER("lengthInch").
- Manche Zeichen werden nicht zu Tokens (z.B. Leerzeichen, Kommentare).

Lexikalische Analyse (2)

Verschiedene Arten von Grundsymbolen:

- Schlüsselwörter (`if`, `while`, `class`, ...)
- Operatoren (`=`, `+`, `>>`, ...)
- Bezeichner (`lengthCm`, `getLength`, `InventoryItem`, ...)
- Literale (`2.54`, `true`, `"HelloWorld!"`, ...)

Für einige Grundsymbole gibt es unendlich viele Möglichkeiten:

Bsp.: „Ein Bezeichner ist ein String, der mit einem Buchstaben beginnt und danach nur Buchstaben oder Ziffern enthält.“

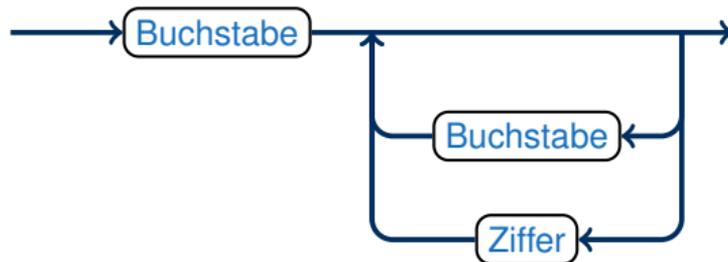
Wie soll ein Lexer das korrekt erkennen?

Bezeichner erkennen

Bsp.: „Ein Bezeichner ist ein String, der mit einem Buchstaben beginnt und danach nur Buchstaben oder Ziffern enthält.“

Schematische Darstellung als Syntaxdiagramm:

Bezeichner:



Hierbei stehen **Buchstabe** und **Ziffer** jeweils für ein beliebiges Zeichen dieses Typs.

Bezeichner erkennen (2)

Wie setzt man das praktisch um?

Code eines unerfahrenen Programmierers:

```
function isIdentifier(input) {
  let state = "start", symbol;
  while input.hasNextSymbol() {
    symbol = input.getNextSymbol();
    if ( state == "start" && isLetter(symbol) ) { state = "inner"; }
    else if ( state == "start" && !isLetter(symbol) ) { return false; }
    else if ( state == "inner" && isLetter(symbol) ) {
      /* ok, wir lesen einfach weiter */ }
    else if ( state == "inner" && isNumber(symbol) ) {
      /* ok, wir lesen einfach weiter */ }
    else if ( state == "inner" &&
      !isLetter(symbol) && !isNumber(symbol) ) { return false; }
  }
  if (state == "inner") return true;
  return false;
}
```

Bezeichner erkennen (3)

Der (schlechte) Programmcode zeigt eine wichtige Eigenschaft:

Der Lexer muss nur einen „Zustand“ speichern.

(Im Beispiel ist dies der Wert der Variablen state.)

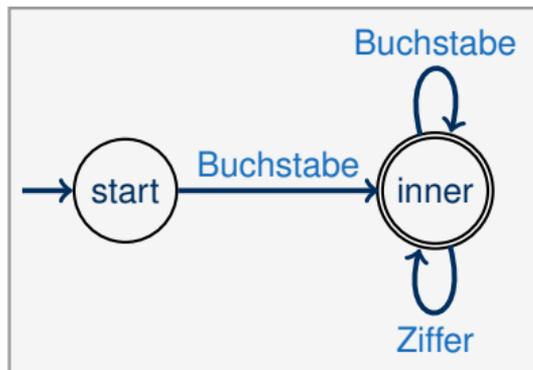
Bezeichner erkennen (3)

Der (schlechte) Programmcode zeigt eine wichtige Eigenschaft:

Der Lexer muss nur einen „Zustand“ speichern.

(Im Beispiel ist dies der Wert der Variablen state.)

Darstellung als endlicher Automat:



- Automat beginnt im Startzustand → 
- Zustandswechsel gemäß Pfeilen
- Kein passender Pfeil für Symbol?
„**return false**“
- Keine weiteren Symbole?
„**return true**“ in Endzustand 
„**return false**“ falls in Zustand 

Bezeichner erkennen (4)

Wie kann man jemandem am besten erklären, was ein „Bezeichner“ ist?

- **Sprachliche Umschreibung:** ungenau und mehrdeutig
- **Syntaxdiagramm, endlicher Automat:** graphische Darstellung anschaulich, aber schnell unübersichtlich
- **Programmcode:** Kernidee geht in Implementierungsdetails verloren

Bezeichner erkennen (4)

Wie kann man jemandem am besten erklären, was ein „Bezeichner“ ist?

- Sprachliche Umschreibung: ungenau und mehrdeutig
- Syntaxdiagramm, endlicher Automat: graphische Darstellung anschaulich, aber schnell unübersichtlich
- Programmcode: Kernidee geht in Implementierungsdetails verloren

→ Spezifikationen verwenden meist **Grammatiken**:

```
Bezeichner ::= Buchstabe | Buchstabe InBezeichner
```

```
InBezeichner ::= BuchOderZiff | BuchOderZiff InBezeichner
```

```
BuchOderZiff ::= Buchstabe | Ziffer
```

```
Buchstabe ::= "a" | "b" | ... | "z"
```

```
Ziffer ::= "0" | "1" | ... | "9"
```

Formale Sprachen

Wir haben gesehen:

- In der Praxis interessieren wir uns für (oftmals unendliche) Mengen von Strings, z.B. **Bezeichner** oder **Java-Programme**.
→ Solche Mengen nennt man **formale Sprachen**.
- Man kann formale Sprachen auf viele Arten beschreiben, z.B. mit Automaten, Grammatiken oder Syntaxdiagrammen.
→ Beschreibungsmethoden haben unterschiedliche Stärken und Schwächen.
- Kein Ansatz kann alle Sprachen beschreiben, z.B. gibt es keinen Automaten, der Java-Programme parsen kann.
→ Man unterscheidet **Typen von Sprachen**.

Erster Teil der Vorlesung:

Formale Sprachen und ihre Darstellungsarten

Formale Sprachen

Grundbegriffe: Alphabete und Wörter

Ein **Alphabet** ist eine endliche, nichtleere Menge.
Elemente des Alphabets heißen **Symbole**.

Meistens verwendet man die Buchstaben Σ (Sigma) oder Γ (Gamma) für Alphabete.

Ein endliches **Wort** über einem Alphabet Σ ist eine endliche Folge von Symbolen aus Σ . Wenn w ein endliches Wort ist, dann ist $|w|$ seine **Länge** (die Anzahl seiner Symbole).

Alle Wörter in dieser Vorlesung sind endlich. Wir sagen das ab jetzt nicht immer dazu.

Grundbegriffe: Alphabete und Wörter

Ein **Alphabet** ist eine endliche, nichtleere Menge.
Elemente des Alphabets heißen **Symbole**.

Meistens verwendet man die Buchstaben Σ (Sigma) oder Γ (Gamma) für Alphabete.

Ein endliches **Wort** über einem Alphabet Σ ist eine endliche Folge von Symbolen aus Σ . Wenn w ein endliches Wort ist, dann ist $|w|$ seine **Länge** (die Anzahl seiner Symbole).

Alle Wörter in dieser Vorlesung sind endlich. Wir sagen das ab jetzt nicht immer dazu.

Beispiel: $\Sigma = \{a, b\}$ ist ein Alphabet.
Wörter über diesem Alphabet sind z.B. **abba** oder **bbb**.
Die Längen dieser Wörter sind $|abba| = 4$ und $|bbb| = 3$.

Grundbegriffe: Konkatenation, Leeres Wort

Die wichtigste Operation auf Wörtern ist Konkatenation („Hintereinanderhängung“):

Die **Konkatenation** von zwei Wörtern $w = a_1 \dots a_n$ und $v = b_1 \dots b_m$ ist das Wort $wv = a_1 \dots a_n b_1 \dots b_m$.

Wir schreiben also konkatenierte Wörter einfach nebeneinander.

Das **leere Wort** ϵ (epsilon) ist das Wort der Länge 0, also $|\epsilon| = 0$.

Es gibt genau ein leeres Wort und man kann es über jedem Alphabet bilden.

Grundbegriffe: Konkatenation, Leeres Wort

Die wichtigste Operation auf Wörtern ist Konkatenation („Hintereinanderhängung“):

Die **Konkatenation** von zwei Wörtern $w = a_1 \dots a_n$ und $v = b_1 \dots b_m$ ist das Wort $wv = a_1 \dots a_n b_1 \dots b_m$.

Wir schreiben also konkatenierte Wörter einfach nebeneinander.

Das **leere Wort** ϵ (epsilon) ist das Wort der Länge 0, also $|\epsilon| = 0$.

Es gibt genau ein leeres Wort und man kann es über jedem Alphabet bilden.

Beispiel: Für die Wörter $w = \text{tuben}$ und $v = \text{wachs}$ gilt $wv = \text{tubenwachs}$ und $vw = \text{wachstuben}$.

Beispiel: Für jedes Wort w gilt: $w\epsilon = \epsilon w = w$.

Grundbegriffe: *-fixe

Manchmal ist es praktisch, Teile von Wörtern zu bezeichnen:

Sei $w = a_1 \dots a_n$ ein Wort der Länge n .

- Ein **Präfix** von w ist ein Wort $a_1 \dots a_i$ mit $0 \leq i \leq n$.
- Ein **Suffix** von w ist ein Wort $a_j \dots a_n$ mit $1 \leq j \leq n + 1$.
- Ein **Infix** von w ist ein Wort $a_i \dots a_j$ mit $1 \leq i \leq j \leq n$ **oder** ϵ .

Grundbegriffe: *-fixe

Manchmal ist es praktisch, Teile von Wörtern zu bezeichnen:

Sei $w = a_1 \dots a_n$ ein Wort der Länge n .

- Ein **Präfix** von w ist ein Wort $a_1 \dots a_i$ mit $0 \leq i \leq n$.
- Ein **Suffix** von w ist ein Wort $a_j \dots a_n$ mit $1 \leq j \leq n + 1$.
- Ein **Infix** von w ist ein Wort $a_i \dots a_j$ mit $1 \leq i \leq j \leq n$ **oder** ϵ .

Beispiel: Das Wort **Staub****ecken** hat ein Präfix **Staub**, ein Suffix **ecken** und ein Infix **taube** (und viele andere mehr).

Grundbegriffe: *-fixe

Manchmal ist es praktisch, Teile von Wörtern zu bezeichnen:

Sei $w = a_1 \dots a_n$ ein Wort der Länge n .

- Ein **Präfix** von w ist ein Wort $a_1 \dots a_i$ mit $0 \leq i \leq n$.
- Ein **Suffix** von w ist ein Wort $a_j \dots a_n$ mit $1 \leq j \leq n + 1$.
- Ein **Infix** von w ist ein Wort $a_i \dots a_j$ mit $1 \leq i \leq j \leq n$ **oder** ϵ .

Beispiel: Das Wort **Staub****ecken** hat ein Präfix **Staub**, ein Suffix **ecken** und ein Infix **taube** (und viele andere mehr).

Beispiel: Das leere Wort ϵ ist Präfix, Suffix und Infix von jedem Wort (sogar von ϵ selbst).

Grundbegriffe: *-fixe

Manchmal ist es praktisch, Teile von Wörtern zu bezeichnen:

Sei $w = a_1 \dots a_n$ ein Wort der Länge n .

- Ein **Präfix** von w ist ein Wort $a_1 \dots a_i$ mit $1 \leq i \leq n$ **oder** ϵ .
- Ein **Suffix** von w ist ein Wort $a_j \dots a_n$ mit $1 \leq j \leq n$ **oder** ϵ .
- Ein **Infix** von w ist ein Wort $a_i \dots a_j$ mit $1 \leq i \leq j \leq n$ **oder** ϵ .

Beispiel: Das Wort **Staub****ecken** hat ein Präfix **Staub**, ein Suffix **ecken** und ein Infix **taube** (und viele andere mehr).

Beispiel: Das leere Wort ϵ ist Präfix, Suffix und Infix von jedem Wort (sogar von ϵ selbst).

Grundbegriffe: formale Sprache

Sei Σ ein Alphabet. Eine Menge von Wörtern über Σ wird **formale Sprache** über Σ genannt.

Die Zusätze „formal“ und „über Σ “ werden meist weggelassen, wenn dadurch keine Missverständnisse auftreten können.

Sprachen werden typischerweise mit dem Buchstaben **L** bezeichnet.

Grundbegriffe: formale Sprache

Sei Σ ein Alphabet. Eine Menge von Wörtern über Σ wird **formale Sprache** über Σ genannt.

Die Zusätze „formal“ und „über Σ “ werden meist weggelassen, wenn dadurch keine Missverständnisse auftreten können.

Sprachen werden typischerweise mit dem Buchstaben **L** bezeichnet.

Beispiel: Die Sprache **Ziffer** = $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ist eine endliche Sprache (über jedem Alphabet, das zumindest die Symbole $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ enthält).

Grundbegriffe: formale Sprache

Sei Σ ein Alphabet. Eine Menge von Wörtern über Σ wird **formale Sprache** über Σ genannt.

Die Zusätze „formal“ und „über Σ “ werden meist weggelassen, wenn dadurch keine Missverständnisse auftreten können.

Sprachen werden typischerweise mit dem Buchstaben **L** bezeichnet.

Beispiel: Die Sprache **Ziffer** = $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ist eine endliche Sprache (über jedem Alphabet, das zumindest die Symbole $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ enthält).

Beispiel: Die zuvor genannte Sprache **Bezeichner** ist unendlich.

Grundbegriffe: formale Sprache

Sei Σ ein Alphabet. Eine Menge von Wörtern über Σ wird **formale Sprache** über Σ genannt.

Die Zusätze „formal“ und „über Σ “ werden meist weggelassen, wenn dadurch keine Missverständnisse auftreten können.

Sprachen werden typischerweise mit dem Buchstaben **L** bezeichnet.

Beispiel: Die Sprache **Ziffer** = $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ist eine endliche Sprache (über jedem Alphabet, das zumindest die Symbole $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ enthält).

Beispiel: Die zuvor genannte Sprache **Bezeichner** ist unendlich.

Beispiel: Die Menge aller Tweets ist eine endliche Sprache.

Grundbegriffe: formale Sprache

Sei Σ ein Alphabet. Eine Menge von Wörtern über Σ wird **formale Sprache** über Σ genannt.

Die Zusätze „formal“ und „über Σ “ werden meist weggelassen, wenn dadurch keine Missverständnisse auftreten können.

Sprachen werden typischerweise mit dem Buchstaben **L** bezeichnet.

Beispiel: Die Sprache **Ziffer** = $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$ ist eine endliche Sprache (über jedem Alphabet, das zumindest die Symbole $0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ enthält).

Beispiel: Die zuvor genannte Sprache **Bezeichner** ist unendlich.

Beispiel: Die Menge aller Tweets ist eine endliche Sprache.

Beispiel: Die Menge aller gültigen HTML-5-Dokumente ist eine unendliche Sprache über dem Alphabet aller Unicode Code Points.

Die kleinste und die größte Sprache

Die kleinste Sprache über dem Alphabet Σ ist die **leere Sprache** \emptyset .

Beispiel: Die Sprache $\{\epsilon\}$, welche nur das leere Wort enthält, ist nicht leer!

Die leere Sprache ist also Teilmenge jeder anderen Sprache.

Die kleinste und die größte Sprache

Die kleinste Sprache über dem Alphabet Σ ist die **leere Sprache** \emptyset .

Beispiel: Die Sprache $\{\epsilon\}$, welche nur das leere Wort enthält, ist nicht leer!

Die leere Sprache ist also Teilmenge jeder anderen Sprache.

Die größte Sprache über einem Alphabet Σ ist die **Sprache aller Wörter** über Σ .
Man bezeichnet sie mit Σ^* .

Beispiel: $\{a, b\}^* = \{\epsilon, a, b, aa, ab, ba, bb, aaa, aab, \dots\}$.

Jede Sprache über Σ ist also eine Teilmenge von Σ^* .

Operationen auf Sprachen

Man kann mit Sprachen „rechnen“, um neue Sprachen zu bilden:

- Vereinigung: $\mathbf{L}_1 \cup \mathbf{L}_2$
- Schnitt: $\mathbf{L}_1 \cap \mathbf{L}_2$
- Komplement: $\bar{\mathbf{L}} = \Sigma^* \setminus \mathbf{L}$ (nur sinnvoll, wenn das Alphabet Σ klar festgelegt ist!)
- Produkt: $\mathbf{L}_1 \circ \mathbf{L}_2 = \{w_1 w_2 \mid w_1 \in \mathbf{L}_1, w_2 \in \mathbf{L}_2\}$
- Potenz: $\mathbf{L}^0 = \{\epsilon\}$ und $\mathbf{L}^{n+1} = \mathbf{L} \circ \mathbf{L}^n$
- Kleene-Abschluss: $\mathbf{L}^* = \mathbf{L}^0 \cup \mathbf{L}^1 \cup \mathbf{L}^2 \cup \dots = \bigcup_{i \geq 0} \mathbf{L}^i$

Operationen auf Sprachen

Man kann mit Sprachen „rechnen“, um neue Sprachen zu bilden:

- **Vereinigung:** $L_1 \cup L_2$
- **Schnitt:** $L_1 \cap L_2$
- **Komplement:** $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$ (nur sinnvoll, wenn das Alphabet Σ klar festgelegt ist!)
- **Produkt:** $L_1 \circ L_2 = \{w_1 w_2 \mid w_1 \in L_1, w_2 \in L_2\}$
- **Potenz:** $L^0 = \{\epsilon\}$ und $L^{n+1} = L \circ L^n$
- **Kleene-Abschluss:** $L^* = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup \dots = \bigcup_{i \geq 0} L^i$

Beispiel: Die Sprache **Bezeichner** kann aus den Sprachen **Buchstabe** und **Ziffer** konstruiert werden:

$$\text{Bezeichner} = \text{Buchstabe} \circ (\text{Buchstabe} \cup \text{Ziffer})^*$$

Operationen auf Sprachen

Man kann mit Sprachen „rechnen“, um neue Sprachen zu bilden:

- **Vereinigung:** $L_1 \cup L_2$
- **Schnitt:** $L_1 \cap L_2$
- **Komplement:** $\bar{L} = \Sigma^* \setminus L$ (nur sinnvoll, wenn das Alphabet Σ klar festgelegt ist!)
- **Produkt:** $L_1 \circ L_2 = \{w_1 w_2 \mid w_1 \in L_1, w_2 \in L_2\}$
- **Potenz:** $L^0 = \{\epsilon\}$ und $L^{n+1} = L \circ L^n$
- **Kleene-Abschluss:** $L^* = L^0 \cup L^1 \cup L^2 \cup \dots = \bigcup_{i \geq 0} L^i$

Beispiel: Die Sprache **Bezeichner** kann aus den Sprachen **Buchstabe** und **Ziffer** konstruiert werden:

$$\text{Bezeichner} = \text{Buchstabe} \circ (\text{Buchstabe} \cup \text{Ziffer})^*$$

Beispiel: Tweets sind Ketten aus bis zu 140 Zeichen:¹

$$\text{Tweet} = \bigcup_{1 \leq i \leq 140} \text{Buchstabe}^i$$

¹⁾ korrekt bis etwa Mai 2016

Operationen auf Sprachen: Kurzschreibweisen

- Der Produktoperator wird oft eingespart:
Statt $L_1 \circ L_2$ schreiben wir $L_1 L_2$.

Hinweis: Manche Autor:innen verwenden \cdot statt \circ .

- Ein **Plus-Operator** ist manchmal praktisch: $L^+ = \bigcup_{i \geq 1} L^i$
- Die **Differenz** ist indirekt ausdrückbar: $L_1 \setminus L_2 = L_1 \cap \overline{L_2}$
- Klammern einsparen: Kleene-Stern $*$ und Plus $+$ binden immer am stärksten, gefolgt **in Reihenfolge absteigender Bindung** von \circ , \cap , \cup und \setminus .

Manchmal sind Klammern und \circ aber zur Lesbarkeit trotzdem hilfreich.

Operationen auf Sprachen: Kurzschreibweisen

- Der Produktoperator wird oft eingespart:
Statt $L_1 \circ L_2$ schreiben wir $L_1 L_2$.

Hinweis: Manche Autor:innen verwenden \cdot statt \circ .

- Ein **Plus-Operator** ist manchmal praktisch: $L^+ = \bigcup_{i \geq 1} L^i$
- Die **Differenz** ist indirekt ausdrückbar: $L_1 \setminus L_2 = L_1 \cap \overline{L_2}$
- Klammern einsparen: Kleene-Stern $*$ und Plus $^+$ binden immer am stärksten, gefolgt in **Reihenfolge absteigender Bindung** von \circ , \cap , \cup und \setminus .

Manchmal sind Klammern und \circ aber zur Lesbarkeit trotzdem hilfreich.

Beispiel: Die Menge aller gültigen Schreibweisen für Dezimalzahlen kann wie folgt definiert werden:

$$\text{Dezimalzahl} = (\{\epsilon\} \cup \{+, -\}) \circ (\{0\} \cup (\mathbf{Z} \setminus \{0\}) \circ \mathbf{Z}^*) \circ (\{\epsilon\} \cup \{.\} \mathbf{Z}^+)$$

mit $\mathbf{Z} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}$.

Ausdrücke der Form $(\{\epsilon\} \cup L)$ beschreiben optionale Bestandteile.

Rechenregeln (1)

Es gelten viele Rechenregeln für Operationen auf Sprachen.

Sprachen sind Mengen – es gelten die Gesetze der Mengenlehre.

Für Sprachen L_1 , L_2 , K über einem gemeinsamen Alphabet Σ gilt:

- $L_1 \cap L_2 = L_2 \cap L_1$ (Kommutativgesetz \cap)
- $L_1 \cup L_2 = L_2 \cup L_1$ (Kommutativgesetz \cup)
- $K \cup (L_1 \cap L_2) = (K \cup L_1) \cap (K \cup L_2)$ (Distributivgesetz \cup über \cap)
- $K \cap (L_1 \cup L_2) = (K \cap L_1) \cup (K \cap L_2)$ (Distributivgesetz \cap über \cup)
- $L_1 \cup L_2 = \overline{\overline{L_1} \cap \overline{L_2}}$ (De Morgansches Gesetz 1)
- $L_1 \cap L_2 = \overline{\overline{L_1} \cup \overline{L_2}}$ (De Morgansches Gesetz 2)

Rechenregeln (2)

Es gelten weitere Gesetze für die zusätzlichen Sprachoperationen.

Für Sprachen L_1, L_2, K über einem gemeinsamen Alphabet Σ gilt:

- $K \circ (L_1 \cup L_2) = (K \circ L_1) \cup (K \circ L_2)$
 $(L_1 \cup L_2) \circ K = (L_1 \circ K) \cup (L_2 \circ K)$ } Distributivgesetze \circ/\cup
- **Achtung: Distributivgesetze \circ/\cap gelten nicht!**
- $K = K \circ \{\epsilon\} = \{\epsilon\} \circ K$ ($\{\epsilon\}$ neutrales Element zu \circ)
- $K \circ \emptyset = \emptyset \circ K = \emptyset$ (\emptyset absorbierendes Element zu \circ)
- $K^+ = K^* \circ K = K \circ K^*$
- $K^* = K^+ \cup \{\epsilon\} = (K \setminus \{\epsilon\})^*$

Rechenregeln (2)

Es gelten weitere Gesetze für die zusätzlichen Sprachoperationen.

Für Sprachen L_1 , L_2 , K über einem gemeinsamen Alphabet Σ gilt:

- $K \circ (L_1 \cup L_2) = (K \circ L_1) \cup (K \circ L_2)$
 $(L_1 \cup L_2) \circ K = (L_1 \circ K) \cup (L_2 \circ K)$ } Distributivgesetze \circ/\cup
- **Achtung: Distributivgesetze \circ/\cap gelten nicht!**
- $K = K \circ \{\epsilon\} = \{\epsilon\} \circ K$ ($\{\epsilon\}$ neutrales Element zu \circ)
- $K \circ \emptyset = \emptyset \circ K = \emptyset$ (\emptyset absorbierendes Element zu \circ)
- $K^+ = K^* \circ K = K \circ K^*$
- $K^* = K^+ \cup \{\epsilon\} = (K \setminus \{\epsilon\})^*$

Für $K = \{\epsilon, a\}$, $L_1 = \{a\}$, $L_2 = \{aa\}$ über $\Sigma = \{a\}$ gilt:

$$K \circ (L_1 \cap L_2) = \{a, \epsilon\} \circ (\{a\} \cap \{aa\}) = \{a, \epsilon\} \circ \emptyset = \emptyset$$

$$(K \circ L_1) \cap (K \circ L_2) = (\{a, \epsilon\} \circ \{a\}) \cap (\{a, \epsilon\} \circ \{aa\}) = \{aa, a\} \cap \{aaa, aa\} = \{aa\}$$

Quiz: Rechnen mit Sprachen

- Vereinigung: $\mathbf{L}_1 \cup \mathbf{L}_2$
- Schnitt: $\mathbf{L}_1 \cap \mathbf{L}_2$
- Komplement: $\bar{\mathbf{L}} = \Sigma^* \setminus \mathbf{L}$ (nur sinnvoll, wenn das Alphabet Σ klar festgelegt ist!)
- Produkt: $\mathbf{L}_1 \circ \mathbf{L}_2 = \{w_1 w_2 \mid w_1 \in \mathbf{L}_1, w_2 \in \mathbf{L}_2\}$
- Potenz: $\mathbf{L}^0 = \{\epsilon\}$ und $\mathbf{L}^{n+1} = \mathbf{L} \circ \mathbf{L}^n$
- Kleene-Abschluss: $\mathbf{L}^* = \mathbf{L}^0 \cup \mathbf{L}^1 \cup \mathbf{L}^2 \cup \dots = \bigcup_{i \geq 0} \mathbf{L}^i$

Quiz: Seien $\mathbf{K} = \{\epsilon, a\}$, $\mathbf{L}_1 = \{a\}$, $\mathbf{L}_2 = \{aa\}$ über $\Sigma = \{a\}$.

...

Rechenregeln beweisen?

Behauptung: $\mathbf{K} \circ (\mathbf{L}_1 \cup \mathbf{L}_2) = (\mathbf{K} \circ \mathbf{L}_1) \cup (\mathbf{K} \circ \mathbf{L}_2)$

Beweis: Wir schauen uns einfach die Definitionen der jeweiligen Operationen an.

$$\begin{aligned}\mathbf{K} \circ (\mathbf{L}_1 \cup \mathbf{L}_2) &= \{wv \mid w \in \mathbf{K}; v \in (\mathbf{L}_1 \cup \mathbf{L}_2)\} \\ &= \{wv \mid w \in \mathbf{K}; v \in \mathbf{L}_1 \text{ oder } v \in \mathbf{L}_2\} \\ &= \{wv \mid w \in \mathbf{K}; v \in \mathbf{L}_1\} \cup \{wv \mid w \in \mathbf{K}; v \in \mathbf{L}_2\} \\ &= (\mathbf{K} \circ \mathbf{L}_1) \cup (\mathbf{K} \circ \mathbf{L}_2)\end{aligned}$$

(Allgemein gilt: Jede Operation, die „punktweise“ auf einer Menge arbeitet, distribuiert über \cup .) □

Zusammenfassung und Ausblick

Formale Sprachen sind für die Informatik sehr wichtig.

Grundbegriffe: Alphabet, Wort, Sprache, Konkatenation, Präfix/Suffix/Infix, ϵ , Σ^* .

Es gibt eine Reihe von Operationen auf Sprachen, mit denen man rechnen kann.

Offene Fragen:

- Wie viele Wörter und wie viele Sprachen gibt es eigentlich?
- Wie kann man Sprachen beschreiben oder implementieren?
- Wie kommt Berechnung ins Spiel?