

# FORMALE SYSTEME

## 21. Vorlesung: Aussagenlogik

Markus Krötzsch  
Professur für Wissensbasierte Systeme

TU Dresden, 8. Januar 2017

### Kommentare: Allgemeines

Danke für die vielen freundlichen Kommentare!

#### Konkrete Verbesserungswünsche:

- „Interaktive Lernmöglichkeiten bereitstellen“
- „Da viel Stoff in der Vorlesung durchgenommen wird und Algorithmen aus dem Skript allein schwieriger zu verstehen sind, wäre eine Vorlesungsaufzeichnung gut (wie bei Rechnernetze)“
- „Besser auf Vorwissen der Studenten abstimmen (z.B. Algorithmen und Datenstrukturen)“
- „Die Übungsserien sollten zu einer gewissen Prozentzahl verpflichtend für eine Prüfungszulassung sein (=> Motivation).“
- „Den Namen [würde ich verbessern]“
- „Mehr Katzenbilder in den Folien“ (mal sehen . . .)

# Besprechung Lehrevaluation

### Kommentare: Verständlichkeit und Motivation

#### ... besonders gut gefallen?

„Gute Erklärweise“

„Herr Krötzsch erklärt gut und verständlich“

„Prof. Krötzsch kann sehr gut erklären“

#### Verbesserungswünsche?

„nicht alles was Studenten nicht verstehen ist "trivial"“

„Etwas mehr Bezug zur Praxis“

„mehr Beispiele, selbst wenn nicht praktisch“

„Aufgaben durchrechnen -> Beispiele“

## Kommentare: Beweise und Tempo

### ... besonders gut gefallen?

„viele Beweise“

„gestaltet die VL im idealen Tempo und hat eine sehr gute Präsentationsart“

„Die Geschwindigkeit ist so hoch, das man nicht mitschreiben kann.“

### Verbesserungswünsche?

„Viele Beweise hindern das Verstehen“

„Weniger Algorithmen, mehr Beweise“

„langsamer sprechen“

## Kommentare: Folien vs. Tafel

### ... besonders gut gefallen?

„sehr gute Folien“

„anschauliche Folien“

„sehr schöne Folien“

„sehr gut erklärende Folien“

„Übersichtliche Folien“

„Visualisierungen sind on point.“

### Verbesserungswünsche?

„Mehr mit Tafel arbeiten“

„Schreiben Sie mehr an die Tafel, damit wir etwas zum Schreiben haben“

„Eine traditionelle Vorlesung an der Tafel oder mit Stift auf Polylux würde automatisch die optimale Stoffmenge geben und das Lernen vereinfachen.“

# Logik

# Warum?

## Logik für Informatiker: Darum (1)

$$\frac{\text{Logik}}{\text{Informatik}} = \frac{\text{Analysis}}{\text{Ingenieurwesen}}$$

„Wer rechnende Systeme verstehen und konstruieren will, der benötigt passende mathematische Modelle.  
Dieser Weg führt oftmals zur Logik.“

- Modellierung von Programmlogik und logischen Schaltungen
- Berechnung praktisch relevanter Eigenschaften durch logisches Schließen
- Hauptanwendung: **Verifikation von Systemen**

## Logik für Informatiker: Darum (2)

### Logik = Wissenschaft vom folgerichtigen Denken

„Wer intelligente Software entwickeln will, der muss logische Schlussfolgerungen algorithmisch umsetzen.  
Die Logik liefert die nötigen Methoden.“

- Kodierung von gültigen Zusammenhängen und Regeln
- Logisches Schließen als Simulation von intelligentem Denken
- Hauptanwendung: **Künstliche Intelligenz**

## Logik für Informatiker: Darum (3)

### Logisches Schließen = Problemlösen

„Bedeutende Klassen von (schweren) Problemen lassen sich durch logische Schlussfolgerung lösen.  
Algorithmen aus der Logik sind in vielen anderen Bereichen anwendbar.“

- Logik als Spezifikationssprache für komplexe Probleme
- Logisches Schließen als Suche nach zulässigen Lösungen
- Anwendungen: **Constraint-Satisfaction-Probleme** und verwandte Optimierungsaufgaben

## Logik für Informatiker: Darum (4)

### Logiken = Beschreibungssprachen

„Überall wo Informationen maschinell kodiert werden und wo exakt spezifiziert ist, was eine Anwendung aus dieser Kodierung ableiten darf, hat man es mit einer Art Logik zu tun.“

- Logik als Oberbegriff exakt spezifizierter Datenformate
- Schlussfolgerung zur Interpretation/Analyse/Optimierung
- Anwendungen: **Wissensrepräsentation** und **Datenbanken**

# Was ist Logik?

„Logik“ ist ein allgemeiner Oberbegriff für viele mathematische und technische Formalismen, gekennzeichnet durch:

- **Syntax:** Sprache einer Logik (normalerweise Formeln mit logischen Operatoren)
- **Semantik:** Definition der Bedeutung (Worauf beziehen sich die Formeln? Wann ist eine Formel wahr oder falsch?)

Typische Zielstellung: **Logische Schlussfolgerung**

- Welche Schlüsse kann man aus einer gegebenen (Menge von) Formel(n) ziehen?
- Spezifikation der korrekten Schlussfolgerungen sollte sich aus Semantik ergeben
- Praktische Berechnung von Schlussfolgerungen ist oft kompliziert

# Viele Logiken

Es gibt sehr viele Logiken, z.B.

- Aussagenlogik
- Prädikatenlogik (erster Stufe)
- Prädikatenlogik zweiter Stufe
- Beschreibungslogiken (Wissensrepräsentation und KI)
- Temporallogiken (z.B. Verifikation zeitlicher Abläufe)
- Logikprogramme (Answer Set Programming, Prolog, ...)
- Nicht-klassische Logiken (z.B. intuitionistische Logik)
- Mehrwertige Logiken (z.B. probabilistische Logik)
- ... und viele andere mehr

~> In dieser Vorlesung lernen wir zunächst **Aussagenlogik** kennen

(Mehr gibt es in der Vorlesung „Theoretische Informatik und Logik“)

# Aussagenlogik

## Aussagenlogik

Die Aussagenlogik untersucht **logische Verknüpfungen von atomaren Aussagen**.

**Atomare Aussagen** sind Behauptungen, die wahr oder falsch sein können, z.B.:

- A1 „Morgen schneit es.“
- A2 „Wir werden einen Schneemann bauen.“
- B1 „Die Vorstellung von der globalen Erderwärmung wurde von den Chinesen erfunden.“
- B2 „Die Temperatur der Ozeane ist seit 1998 in unverminderter Geschwindigkeit angestiegen.“
- C1 „Typ-2-Sprachen sind unter Schnitt abgeschlossen.“
- C2 „Typ-2-Sprachen sind unter Komplement abgeschlossen.“
- C3 „Typ-2-Sprachen sind unter Vereinigung abgeschlossen.“

## Aussagen verknüpfen

Atomare Aussagen können mithilfe logischer **Junktoren** verknüpft werden:

- $A1 \rightarrow A2$ : „Wenn es morgen schneit, dann werden wir einen Schneemann bauen.“
- $A1 \vee \neg A1$ : „Entweder schneit es morgen oder nicht.“
- $B1 \rightarrow \neg B2$ : „Falls die Chinesen die globale Erwärmung erfunden haben, dann steigt die Temperatur der Ozeane nicht unvermindert an.“
- $(C1 \wedge C2) \rightarrow C3$ : „Sind Typ-2-Sprachen unter Schnitt und Komplement abgeschlossen, dann sind sie auch unter Vereinigung abgeschlossen.“

## Beispiel: Logelei

Anna behauptet: „Barbara lügt!“

Barbara behauptet: „Chris lügt!“

Chris behauptet: „Anna und Barbara lügen!“

**Wer lügt?**

(Und wie kann man das beweisen?)

## Logisches Schließen

Wenn einige Formeln als wahr angenommen werden, dann kann die Wahrheit anderer Formeln daraus abgeleitet werden.

Beispiele:

- Aus  $B2$  und  $B1 \rightarrow \neg B2$  folgt  $\neg B1$
- Aus  $C1$ ,  $\neg C3$  und  $(C1 \wedge C2) \rightarrow C3$  folgt  $\neg C2$
- Aus  $A1 \rightarrow A2$  und  $\neg A1$  folgt **nicht**  $\neg A2$

Die Gültigkeit bestimmter Schlussfolgerungen hat nichts mit Schneemännern, Erderwärmung oder Typ-2-Sprachen zu tun!  
Sie ist eine rein logische Konsequenz.

## Aussagenlogik: Syntax

Wir betrachten eine abzählbar unendliche Menge **P** von **atomaren Aussagen** (auch bekannt als: **aussagenlogische Variablen**, **Propositionen** oder schlicht **Atome**)

Die Menge der **aussagenlogischen Formeln** ist induktiv<sup>a</sup> definiert:

- Jedes Atom  $p \in \mathbf{P}$  ist eine aussagenlogische Formel
- Wenn  $F$  und  $G$  aussagenlogische Formeln sind, so auch:
  - $\neg F$ : **Negation**, „nicht  $F$ “
  - $(F \wedge G)$ : **Konjunktion**, „ $F$  und  $G$ “
  - $(F \vee G)$ : **Disjunktion**, „ $F$  oder  $G$ “
  - $(F \rightarrow G)$ : **Implikation**, „ $F$  impliziert  $G$ “
  - $(F \leftrightarrow G)$ : **Äquivalenz**, „ $F$  ist äquivalent zu  $G$ “

<sup>a</sup>Das bedeutet: Die Definition ist selbstbezüglich und soll die kleinste Menge an Formeln beschreiben, die alle Bedingungen erfüllen.

Wir verzichten hier oft auf „aussagenlogisch“ und sprechen z.B. einfach von „Formeln“.

## Beispiele

Die folgenden Ausdrücke sind aussagenlogische Formeln:

- $p$
- $((p \rightarrow q) \rightarrow p) \rightarrow p$
- $\neg\neg p$

Die folgenden Ausdrücke sind **keine** aussagenlogischen Formeln:

- $p \wedge q \vee r$  (fehlende Klammern)

**Vereinfachung:** Äußere Klammern dürfen wegfallen, d.h. wir erlauben z.B.  $p \rightarrow q$  anstatt auf  $(p \rightarrow q)$  zu bestehen.

- $(p \leftarrow q)$  (Operator  $\leftarrow$  undefiniert)
- $\overline{p \wedge q}$  (wir verwenden  $\neg$  nicht als Negation)

## Semantik

Was bedeutet eine aussagenlogische Formel?

- Atome an sich bedeuten zunächst nichts  
 $\leadsto$  sie können einfach wahr oder falsch sein
- Je nachdem, welche Atome wahr sind und welche falsch, ergeben sich verschiedene „Interpretationen“  
 $\leadsto$  dargestellt durch **Wertzweisungen**  
 (Funktionen von  $\mathbf{P}$  nach  $\{1, 0\}$ ; 1=„wahr“ und 0=„falsch“)
- Die Wahrheit (oder Falschheit) einer Formel ergibt sich aus dem Wahrheitswert der in ihr vorkommenden Atome  
 $\leadsto$  Wertzweisungen machen Formeln wahr oder falsch

Die Bedeutung einer Formel besteht darin, dass sie uns Informationen darüber liefert, welche Wertzweisungen möglich sind, falls die Formel wahr sein soll.

## Teilformeln

Wir können Formeln als Wörter über (endlichen Teilmengen aus) dem unendlichen Alphabet  $\mathbf{P} \cup \{\neg, \wedge, \vee, \rightarrow, \leftrightarrow, (, )\}$  sehen:

$$F \rightarrow \mathbf{P} \mid \neg F \mid (F \wedge F) \mid (F \vee F) \mid (F \rightarrow F) \mid (F \leftrightarrow F)$$

Eine **Teilformel** ist ein Teilwort (Infix) einer Formel, welches selbst eine Formel ist. Teilformeln werden auch **Unterformeln** genannt.

Alternativ kann man Teilformeln auch rekursiv definieren:

Die Menge  $\text{Sub}(F)$  der Teilformeln einer Formel  $F$  ist definiert als:

$$\text{Sub}(F) = \begin{cases} \{F\} & \text{falls } F \in \mathbf{P} \\ \{\neg G\} \cup \text{Sub}(G) & \text{falls } F = \neg G \\ \{(G_1 \wedge G_2)\} \cup \text{Sub}(G_1) \cup \text{Sub}(G_2) & \text{falls } F = (G_1 \wedge G_2) \\ \{(G_1 \vee G_2)\} \cup \text{Sub}(G_1) \cup \text{Sub}(G_2) & \text{falls } F = (G_1 \vee G_2) \\ \{(G_1 \rightarrow G_2)\} \cup \text{Sub}(G_1) \cup \text{Sub}(G_2) & \text{falls } F = (G_1 \rightarrow G_2) \\ \{(G_1 \leftrightarrow G_2)\} \cup \text{Sub}(G_1) \cup \text{Sub}(G_2) & \text{falls } F = (G_1 \leftrightarrow G_2) \end{cases}$$

## Wertzweisungen können Formeln erfüllen

Eine **Wertzweisung** ist eine Funktion  $w : \mathbf{P} \rightarrow \{1, 0\}$

Eine Wertzweisung  $w$  erfüllt eine Formel  $F$ , in Symbolen  $w \models F$ , wenn eine der folgenden rekursiven Bedingungen gilt:

Form von $F$	$w \models F$ wenn:	$w \not\models F$ wenn:
$F \in \mathbf{P}$ :	$w(F) = 1$	$w(F) = 0$
$F = \neg G$	$w \not\models G$	$w \models G$
$F = (G_1 \wedge G_2)$	$w \models G_1$ und $w \models G_2$	$w \not\models G_1$ oder $w \not\models G_2$
$F = (G_1 \vee G_2)$	$w \models G_1$ oder $w \models G_2$	$w \not\models G_1$ und $w \not\models G_2$
$F = (G_1 \rightarrow G_2)$	$w \not\models G_1$ oder $w \models G_2$	$w \models G_1$ und $w \not\models G_2$
$F = (G_1 \leftrightarrow G_2)$	$w \models G_1$ und $w \models G_2$ oder $w \not\models G_1$ und $w \not\models G_2$	$w \models G_1$ und $w \not\models G_2$ oder $w \not\models G_1$ und $w \models G_2$

Dabei bedeutet „A oder B“ immer „A oder B oder beides“.

## Formeln Wahrheitswerte zuweisen

Wir können Wertzuweisungen von Atomen auf Formeln erweitern:

$$w(F) = \begin{cases} 1 & \text{falls } w \models F \\ 0 & \text{falls } w \not\models F \end{cases}$$

Wahrheitstabelle illustrieren die Semantik der Junktoren:

$w(F)$	$w(\neg F)$
0	1
1	0

$w(F)$	$w(G)$	$w(F \wedge G)$	$w(F \vee G)$	$w(F \rightarrow G)$	$w(F \leftrightarrow G)$
0	0	0	0	1	1
1	0	0	1	0	0
0	1	0	1	1	0
1	1	1	1	1	1

## Wahrheitswerte von Formeln bestimmen

- Der Wahrheitswert einer Formel hängt nur vom Wahrheitswert der (endlich vielen) Atome ab, die in ihr vorkommen.  
 $\leadsto$  Wir geben oft nur diese an.
- Der Wahrheitswert einer Formel ergibt sich rekursiv aus dem Wahrheitswert ihrer Teilformeln.  
 $\leadsto$  Darstellung in Wahrheitstabelle

Beispiel: Für die Formel  $F = ((p \rightarrow q) \leftrightarrow (\neg q \rightarrow \neg p))$  und Wertzuweisung  $w$  mit  $w(p) = 0$  und  $w(q) = 1$  ergibt sich die folgende Tabelle:

$w(p)$	$w(q)$	$w(p \rightarrow q)$	$w(\neg p)$	$w(\neg q)$	$w(\neg q \rightarrow \neg p)$	$w(F)$
0	1	1	1	0	1	1

## Beispiel: Logelei

Anna behauptet: „Barbara lügt!“

$$A \leftrightarrow \neg B$$

Barbara behauptet: „Chris lügt!“

$$B \leftrightarrow \neg C$$

Chris behauptet: „Anna und Barbara lügen!“

$$C \leftrightarrow (\neg A \wedge \neg B)$$

### Wer lügt?

(Und wie kann man das beweisen?)

## Logische Konsequenzen

Eine Wertzuweisung  $w$  ist **Modell einer Formel  $F$**  wenn  $w \models F$  (also wenn  $w(F) = 1$ ). Ist  $\mathcal{F}$  eine (möglicherweise unendliche) Menge von Formeln, dann ist  $w$  ein **Modell der Menge  $\mathcal{F}$**  wenn  $w \models F$  für alle  $F \in \mathcal{F}$  gilt. In diesem Fall schreiben wir  $w \models \mathcal{F}$ .

Die logischen Schlussfolgerungen aus einer Formel(menge) ergeben sich aus ihren Modellen:

Sei  $\mathcal{F}$  eine Menge von Formeln. Eine Formel  $G$  ist eine **logische Konsequenz aus  $\mathcal{F}$**  wenn jedes Modell von  $\mathcal{F}$  auch ein Modell von  $G$  ist. In diesem Fall schreiben wir  $\mathcal{F} \models G$ .

- $\leadsto$  Die Formeln in  $\mathcal{F}$  schränken die möglichen Interpretationen ein:  
 Je mehr Formeln wahr sein sollen,  
 desto weniger Freiheiten gibt es bei der Wahl der Modelle
- $\leadsto$   $G$  ist eine logische Konsequenz wenn gilt:  
 Falls  $\mathcal{F}$  wahr ist, dann ist auch  $G$  garantiert wahr

## Beispiel: Logelei

Anna behauptet: „Barbara lügt!“

Barbara behauptet: „Chris lügt!“

Chris behauptet: „Anna und Barbara lügen!“

$$A \leftrightarrow \neg B$$

$$B \leftrightarrow \neg C$$

$$C \leftrightarrow (\neg A \wedge \neg B)$$

$w(A)$	$w(B)$	$w(C)$	$w(A \leftrightarrow \neg B)$	$w(B \leftrightarrow \neg C)$	$w(C \leftrightarrow (\neg A \wedge \neg B))$
0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	1	1
1	1	0	0	1	1
0	0	1	0	1	1
1	0	1	1	1	0
0	1	1	1	0	0
1	1	1	0	0	0

## Beispiel: Logelei (2)

Anna behauptet: „Barbara lügt!“

Barbara behauptet: „Chris lügt!“

Chris behauptet: „Anna und Barbara lügen!“

$$A \leftrightarrow \neg B$$

$$B \leftrightarrow \neg C$$

$$C \leftrightarrow (\neg A \wedge \neg B)$$

$w(A)$	$w(B)$	$w(C)$	$w(A \leftrightarrow \neg B)$	$w(B \leftrightarrow \neg C)$	$w(C \leftrightarrow (\neg A \wedge \neg B))$
0	1	0	1	1	1

↪ Genau ein Modell (bezüglich der relevanten Atome)

**Logische Konsequenzen:** Alle Formeln, die unter einer Wertzuweisung mit  $w(A) = 0$ ,  $w(B) = 1$  und  $w(C) = 0$  wahr sind, z.B.:

- $\neg A$  („Anna lügt“)
- $\neg C$  („Chris lügt“)
- $\neg A \wedge \neg C$  („Anna und Chris lügen“)
- $B$  („Barbara sagt die Wahrheit“)
- Aber auch:  $D \vee \neg D$

## Allgemeingültigkeit und Co.

Eine Formel  $F$  ist:

- **unerfüllbar** (oder **inkonsistent**), wenn sie keine Modelle hat
- **erfüllbar** (oder **konsistent**), wenn sie Modelle hat
- **allgemeingültig** (oder eine **Tautologie**), wenn alle Wertzuweisungen Modelle für die Formel sind
- **widerlegbar**, wenn sie nicht allgemeingültig ist

Diese Begriffe kann man für Mengen von Formeln genauso definieren.

Beispiel:

- $p \wedge \neg p$  ist unerfüllbar (und widerlegbar)
- $p \vee \neg p$  ist allgemeingültig (und erfüllbar)
- $p \wedge q$  ist erfüllbar und widerlegbar

## Allgemeingültigkeit und Unerfüllbarkeit

Satz:

- (1) Eine allgemeingültige Formel ist logische Konsequenz jeder anderen Formel(menge).
- (2) Eine unerfüllbare Formel(menge) hat jede andere Formel als logische Konsequenz.

**Beweis:** Folgt direkt aus Definition von logischer Konsequenz. Für (2) ist es wichtig, dass eine Eigenschaft „für alle Modelle“ gilt, wenn es keine Modelle gibt (sie gilt dann für „alle null Modelle“). □

Der unerwartete(?) Effekt (2) ist im Deutschen sprichwörtlich:

„Wenn das stimmt, dann bin ich der Kaiser von China!“

drückt aus, dass aus einer mutmaßlich falschen Annahme alles folgt, selbst wenn es offensichtlich unwahr ist.



## Zusammenfassung und Ausblick

Mithilfe der **Aussagenlogik** kann man logische Beziehungen atomarer Aussagen spezifizieren

**Wertzuweisungen** können eine aussagenlogische Formel erfüllen – dann nennt man sie **Modell** – oder widerlegen

Die Modelle einer Formel(menge) definieren ihre **logischen Konsequenzen** (=„alles, was in diesen Fällen noch gilt“)

Offene Fragen:

- Geht logisches Schließen auch ohne Wahrheitwertetabellen?
- Wie (in)effizient ist logisches Schließen?
- Was hat das mit Sprachen, Berechnung und TMs zu tun?