

DAI-Labor
TU Berlin

Grundlagen der Künstlichen Intelligenz

Logikbasierte Agenten

18.11.2005

Brijnesh J Jain
bjj@dai-labor.de

AIOIT
Agententechnologien in betrieblichen Anwendungen und der Telekommunikation

Gliederung

- ⇒ Einleitung
- ⇒ Die Wumpus Welt
- ⇒ Aussagenlogik
- ⇒ Inferenz
- ⇒ Zusammenfassung

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 2

Einleitung

Denken Menschen logisch?

- ⇒ **Selektionsaufgabe nach Watson (1966):**
 - Gegeben sind 4 Karten, von denen jede auf der einen Seite mit einem Buchstaben, auf der anderen Seite mit einer Zahl beschriftet ist.
- ⇒ **Beispiel:**

E	K	4	7
---	---	---	---
- ⇒ **Regel:**
 - Wenn auf der einen Seite der Karte ein Vokal steht, dann steht auf der anderen Seite eine gerade Zahl.
- ⇒ **Aufgabe:**
 - Welche Karten **müssen** für die Überprüfung der Regel umgedreht werden?

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 3

Einleitung

Denken Menschen logisch?

- ⇒ **Antwort:**
 - Menschen, so scheint es, wissen Dinge über die Umwelt und können daraus neues Wissen folgern und „intelligente“ Aktionen ableiten
- ⇒ **Ziel dieser VL:**
 - **Agenten, die Wissen repräsentieren und neues Wissen schlussfolgern können**
- ⇒ **Zentrale Konzepte:**
 - Maschinengerechte Repräsentation von Wissen
 - Formale Mechanismen für Schlussfolgern (*reasoning*)

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 4

Einleitung

Realisierung der Konzepte

- ⇒ **Logikbasierte Agenten**
 - Agenten, deren Wissensbasis und Mechanismen zum Schlussfolgern auf Formalismen der Logik beruhen
- ⇒ **Logik** ist eine formale Sprache, um **Wissen** zu repräsentieren, mit dem Ziel bestimmte **Schlussfolgerungen** ziehen zu können.
- ⇒ **Konzepte dieser Vorlesung**
 - Aussagenlogik als formale Sprache für die Wissensrepräsentation
 - Resolutionsmethode als Mechanismus zum logischen Schlussfolgern

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 5

Gliederung

- ⇒ Einleitung
- ⇒ Die Wumpus Welt
- ⇒ Aussagenlogik
- ⇒ Inferenz
- ⇒ Zusammenfassung

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 6

Die Wumpus Welt

- ⇒ Entwickelt von Gregory Yob (1975) als Computerspiel
- ⇒ Später adaptiert von Michael Genesereth als Testbettumgebung für logikbasierte Agenten
- ⇒ Diskutiert in Russell & Norvig als motivierendes Beispiel für Konzepte der Aussagenlogik und Inferenzmechanismen
- ⇒ Hier: Abgespeckte Version, um Konzepten der Aussagenlogik und Inferenzmechanismen zu illustrieren

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 7

Die Wumpus Welt

Ziel: Agent soll Feld mit Gold finden!

- Wumpus:**
 - Stinkt (stench)
- Gold:**
 - Glitzert (glitter)
- Agent:**
 - sucht Gold
- Fallgrube:**
 - Ist zugig (breeze)
- Wumpus Welt:**
 - 4x4 Brett ≙ Höhle
 - Felder (i, j) ≙ Räume

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 8

Wumpus Welt

⇒ **Umgebung:**

- 4x4 Gitter
- Nachbarfelder eines Feldes
 - oben, unten, links, rechts
- Agent und Wumpus im gleichen Feld
 - Wumpus verspeist Agenten
- Agent und Fallgrube im gleichen Feld
 - Agent fällt in Fallgrube
- Nachbarfelder von Wumpus stinken
- Nachbarfelder von Grube winden
- Feld von Gold glitzert

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 9

Wumpus Welt

⇒ **Wahrnehmung des Agenten:**

- Wind ('B', breeze)
- Gestank ('S', stench)
- Glitzern ('G', glitter)

⇒ **Aktionen:**

- Gehe zum Nachbarfeld
 - d.h. oben, unten, links, rechts
- **Bem.:**
 - Aktionen, die aus dem Brett herausführen würden sind wirkungslos

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 10

Die Wumpus Welt

⇒ **Ziel:**

- Agent soll das Feld mit Gold in jeder denkbaren Wumpus Welt finden.
- **Bem.:** Es gibt unlösbare Konfigurationen

⇒ **Gegeben:**

- Agent hat Wissensbasis (WB)
- Regeln der Wumpus Welt
- Wahrnehmung

⇒ **Frage:**

- Wie soll ein Agent in der Wumpus Welt folgern und handeln?

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 11

Die Wumpus Welt

Exploration

- A** = Agent
- G** = Safe
- B** = Breeze
- G** = Glitter
- S** = Stench
- P** = Pit
- W** = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 12

Wumpus Welt Exploration

S		B	P!
W!	G!	P!	B
S		B	
	B	P!	B

4
 3
 2
 1

1 2 3 4

- A = Agent
- Safe = Safe
- B = Breeze
- G = Glitter
- S = Stench
- P = Pit
- W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 13

Wumpus Welt Exploration

S		B	P!
W!	G!	P!	B
S		B	
	B	P!	B

4
 3
 2
 1

1 2 3 4

- A = Agent
- Safe = Safe
- B = Breeze
- G = Glitter
- S = Stench
- P = Pit
- W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 14

Wumpus Welt Exploration

S		B	P!
W!	G!	P!	B
S		B	
	B	P!	B

4
 3
 2
 1

1 2 3 4

- A = Agent
- Safe = Safe
- B = Breeze
- G = Glitter
- S = Stench
- P = Pit
- W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 15

Wumpus Welt Exploration

S		B	P!
W!	G!	P!	B
S		B	
	B	P!	B

4
 3
 2
 1

1 2 3 4

- A = Agent
- Safe = Safe
- B = Breeze
- G = Glitter
- S = Stench
- P = Pit
- W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 16

Wumpus Welt Exploration

S		B	P!
W!	G!	P!	B
S		B	
	B	P!	B

4
 3
 2
 1

1 2 3 4

- A = Agent
- Safe = Safe
- B = Breeze
- G = Glitter
- S = Stench
- P = Pit
- W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 17

Wumpus Welt Exploration

S		B	P!
W!	G!	P!	B
S		B	
	B	P!	B

4
 3
 2
 1

1 2 3 4

- A = Agent
- Safe = Safe
- B = Breeze
- G = Glitter
- S = Stench
- P = Pit
- W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 18

Wumpus Welt

Exploration

A = Agent
 Safe
 B = Breeze
 G = Glitter
 S = Stench
 P = Pit
 W = Wumpus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 19

Die Wumpus Welt

Was und die Wumpus Welt zeigt

- ⇒ Intelligente Agenten benötigen
 - Wissensbasis (WB)
 - Inferenzmechanismus um rationale Entscheidungen zu treffen
- ⇒ Wissensbasis
 - Regeln der Wumpus Welt
 - Wahrnehmungen
- ⇒ Inferenzmechanismus
 - Logisches Schließen: Wann immer der Agent aus der WB eine Schlussfolgerung zieht, so ist die Schlussfolgerung korrekt, wenn die WB korrekt ist
- ⇒ **Logikbasierte Agenten = Wissensbasis + Inferenzmechanismus**

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 20

Die Wumpus Welt

⇒ **Problem:**

- Wie können wir
 - die Wissensbasis
 - den Inferenzmechanismus von Agenten (maschinengerecht) formalisieren?

⇒ **Idee:**

- Mit Formalismus der Logik
 - **Aussagenlogik** zur Repräsentation von Wissen
 - **Resolutionsmethode** als Inferenzmechanismus

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 21

Gliederung

- ⇒ Einleitung
- ⇒ Die Wumpus Welt
- ⇒ **Aussagenlogik**
- ⇒ Inferenz
- ⇒ Zusammenfassung

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 22

Aussagenlogik

⇒ **Aussagenlogik** befasst sich mit der ...

- logischen Bewertung von Aussagen.
- Verknüpfung von Aussagen

⇒ **Beispiel:**

- Aussage 1 ist **wahr**:
 - Wumpus ist in Feld (3,1)
- Aussage 2 ist **falsch**:
 - Gold glitzert in Feld (3,3) [false]
- Verknüpfung ist **falsch**:
 - Wumpus ist in Feld (3,1) und Gold glitzert in Feld (3,3)

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 23

Aussagenlogik

⇒ **Komponenten**

- **Syntax**
 - definiert die wohlgeformten (zulässigen) Formeln der Sprache
 - bedeutungsleere Zeichenfolge
- **Semantik**
 - definiert Bedeutung wohlgeformter Formeln in einer gegebenen „Welt“
 - Bedeutung einer Formel ist ihr Wahrheitsgehalt (true, false)
 - Eine „Welt“ kann als reale Umgebung des Agenten aufgefasst werden

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 24

Aussagenlogik Syntax

⇒ **Vokabular**

- **Konstantensymbole:** \top (wahr) und \perp (falsch)
- **Aussagensymbole:** $p, q, r, s, \dots \in \mathcal{A}$
- **Junktoren:**

Junktor	Name	Intuitive Bedeutung
\neg	Negation	„nicht“
\wedge	Konjunktion	„und“
\vee	Disjunktion	„oder“
\Rightarrow	Implikation	„wenn - dann“
\Leftrightarrow	Äquivalenz	„genau dann, wenn“

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 25

Aussagenlogik Syntax

⇒ **Aussagenlogische Formeln (wohlgeformt)**

1. Konstanten \top und \perp sind Formeln
2. Aussagesymbole sind Formeln
3. Mit ϕ und ψ sind folgende Ausdrücke auch Formeln:
 - $\neg \phi$
 - $\phi \wedge \psi$
 - $\phi \vee \psi$
 - $\phi \Rightarrow \psi$
 - $\phi \Leftrightarrow \psi$
4. Alle Formeln werden nach 1.-3. gebildet.

⇒ **Präzedenzen:**

- Präzedenzen (hier) in Reihenfolge $\neg, \wedge, \vee, \Rightarrow, \Leftrightarrow$
- Zusätzliche Klammerungen machen Formeln trotzdem lesbarer

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 26

Aussagenlogik Semantik

⇒ **Semantik**

- Legt fest wie man einer Formel ϕ eine Bedeutung zuweisen kann
- Bedeutung von ϕ ist ein Wahrheitswert 1 (true) oder 0 (false)

⇒ **Semantik von Symbolen**

- Interpretation $I: \mathcal{A} \cup \{\top, \perp\} \rightarrow \{0, 1\}$
- Weist jedem Aussagesymbol aus \mathcal{A} einen Wahrheitswert zu
- Weist \top den Wahrheitswert 1 und \perp den Wert 0 zu

⇒ **Semantik der Aussagenlogik**

- Erweiterung der Interpretation I auf die Menge \mathcal{F} aller wohlgeformten Formeln
- z.B. induktiv in Form von Wahrheitstabellen (siehe nächste Folie)

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 27

Aussagenlogik Semantik

Wahrheitstabelle

→ Seien ϕ und ψ Formeln. Dann gilt:

ϕ	ψ	$\neg \phi$	$\phi \wedge \psi$	$\phi \vee \psi$	$\phi \Rightarrow \psi$	$\phi \Leftrightarrow \psi$
1	1	0	1	1	1	1
1	0	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1	0
0	0	1	0	0	1	1

→ Eine Interpretation kann man als abstrakte Beschreibung der „möglichen Welt“ sehen

→ Sie gibt an, welche Aussagen in dieser „Welt“ erfüllt sind und welche nicht erfüllt sind

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 28

Aussagenlogik Beispiel: Wissensbasis

⇒ **Ziel:**

- Konstruktion einer Wissensbasis für reduzierte Wumpus Welt

⇒ **Einschränkung:**

- Betrachte nur Fallgrube und Zugluft
- Ignoriere Wumpus, Gestank, Gold und Geglitzter

⇒ **Vokabular (Aussagensymbole):** Für alle i, j gelte

- $p[i,j]$ ist wahr, wenn im Raum (i,j) eine Fallgrube ist; sonst falsch
- $b[i,j]$ ist wahr, wenn im Raum (i,j) Zugluft ist; sonst falsch.

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 29

Aussagenlogik Beispiel: Wissensbasis

Wissensbasis für reduzierte Wumpus Welt (Startzustand)

⇒ **Ein Raum windet gdw. im Nachbarfeld eine Grube ist**

- $\phi_1: b[1,1] \Leftrightarrow (p[1,2] \vee p[2,1])$
- $\phi_2: b[1,2] \Leftrightarrow (p[1,1] \vee p[1,3] \vee p[2,2])$
- ...
- $\phi_{16}: b[4,4] \Leftrightarrow (p[4,3] \vee p[3,4])$

⇒ **Keine Fallgrube im Raum (1,1)**

- $\phi_{17}: \neg p[1,1]$

⇒ **Keine Zugluft im Raum (1,1)**

- $\phi_{18}: \neg b[1,1]$

⇒ **$WB_0 = \phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_{18} = \{\phi_1, \dots, \phi_{18}\}$**

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 30

Aussagenlogik Beispiel: Wissensbasis

Wissensbasis für reduzierte Wumpus Welt (Agent in (1,2))

- ⇒ Wissensbasis aus Startzustand
 - $WB_0 = \phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_{18}$
- ⇒ Zugluft im Raum (1,2)
 - $\phi_{19}: b[1,2]$
- ⇒ $WB_1 = \phi_1 \wedge \dots \wedge \phi_{18} \wedge \phi_{19}$
 $= \{\phi_1, \dots, \phi_{19}\}$

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 31

Gliederung

- ⇒ Einleitung
- ⇒ Die Wumpus Welt
- ⇒ Aussagenlogik
- ⇒ Inferenz
- ⇒ Zusammenfassung

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 32

Inferenz

- ⇒ Ausgangssituation:
 - Agent repräsentiert Wissen in logischen Formeln. Um festzulegen, wie man neues Wissen folgern kann, muss formal ein Folgerungsbegriff definiert werden.
- ⇒ Beispiel:
 - Wie kann man aus WB_0 formal folgern, dass Feld (1,2) sicher ist?
- ⇒ Eigenschaft des Folgerungsbegriffs:
 - Wann immer WB wahr ist, dann sollte jede aus WB gefolgte Formel ebenfalls wahr sein

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 33

Inferenz

- ⇒ Modell
 - Def.: Sei WB eine Menge von Formeln. Eine Interpretation I heißt **Modell** von WB , wenn I jeder Formel ϕ aus WB den Wahrheitswert 1 zuweist.
- ⇒ Notationen:
 - Ist I Modell von WB , dann sagen wir I erfüllt WB und schreiben $I \models WB$
 - Gilt $WB = \{\phi\}$, dann schreiben wir $I \models \phi$ statt $I \models \{\phi\}$
- ⇒ Semantische Folgerung
 - Def.: ϕ folgt semantisch ($WB \models \phi$) aus WB , wenn jedes Modell von WB auch Modell von ϕ ist.
 - Erfüllt die gewünschte Eigenschaft eines formalen Folgerungsbegriffs

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 34

Inferenz Beispiel

- ⇒ Ausgangssituation
 - Wissensbasis WB_1
- ⇒ Prüfe semantische Folgerungen
 - $WB_1 \models \neg p[2,1]$?
 - Feld (2,1) ist sicher?
 - $WB_1 \models \neg p[2,2]$?
 - Feld (2,2) ist sicher?
- ⇒ Inferenzmethode
 - Model-Checking

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 35

Inferenz Beispiel

- ⇒ Model-Checking zur Verifikation der Folgerbarkeit ϕ von aus WB_1
 - Betrachte alle Interpretationen I von $b[i,j], p[i,j]$
 - Werte alle Formeln ϕ_k von WB_1 bzgl. Interpretationen I aus (Wahrheitstafel)
 - Werte Formel ϕ bzgl. Interpretationen I aus (Wahrheitstafel)
 - Identifiziere Menge $M(WB_1)$ und $M(\phi)$ der Modelle von WB_1 und ϕ
 - $WB_1 \models \phi$, wenn $M(WB_1) \subseteq M(\phi)$
- ⇒ Ergebnis:
 - 3 Interpretationen sind Modelle von WB_1
 - $WB_1 \models \neg p[2,1]$, d.h. $\neg p[2,1]$ ist wahr für jedes Modell von WB_1
 - Keine Fallgrube in Feld (2,1)
 - $\neg p[2,2]$ ist wahr für zwei und falsch für ein Modell von WB_1
 - $\neg p[2,2]$ folgt nicht aus WB_1
 - Feld (2,2) ist ein unsicheres Feld

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 36

Inferenz

⇒ **Model-Checking ist**

- **korrekt**
- d.h. es werden nur Formeln abgeleitet, die semantisch aus WB folgen
- **vollständig**
- d.h. es kann jede Formel abgeleitet werden, die semantisch aus WB folgt
- exponentiell
- $O(2^n)$ Interpretationen für n Symbole

⇒ **Alternative:**

- Resolutionsmethode

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 37

Inferenz **Resolution**

Grundlagen

⇒ **Erfüllbarkeit:**

- ϕ heißt **erfüllbar**, wenn es ein Modell I von ϕ gibt
- ϕ heißt **unerfüllbar**, wenn ϕ nicht erfüllbar ist

⇒ **Gültigkeit:**

- ϕ heißt **gültig**, wenn ϕ für alle Interpretationen I wahr ist

⇒ **Äquivalenz:**

- ϕ und ψ heißen **logisch äquivalent** ($\phi \equiv \psi$), wenn für alle I gilt

$$I \models \phi \text{ gdw. } I \models \psi$$

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 38

Inferenz **Resolution**

⇒ **Ziel:**

- Prüfe ob $WB \models \phi$ gilt

⇒ **Beispiel:**

- $WB = (p \vee r) \wedge (q \vee \neg r)$ und $\phi = p \vee q$
- $WB_1 \models \neg p[2,1]$

⇒ **Resolution**

- Methode zur Bestimmung der Unerfüllbarkeit einer Formel
- Zeige $WB \models \phi$ durch Widerspruch: $WB \wedge \neg \phi$ ist unerfüllbar
- Macht Sinn, weil $(WB \models \phi)$ gdw. $(WB \wedge \neg \phi)$ unerfüllbar (Beweis?)

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 39

Inferenz **Resolution**

Informelle Beschreibung der Resolutionsmethode

- Eingabe: Wissensbasis als Menge von Formeln
- Wiederholte Anwendung einer syntaktische Umformungsregel
 - Generiert in jedem Schritt aus zwei Formeln eine dritte Formel
 - Fügt neu generierte Formel, sofern sie nicht in der Wissensbasis enthalten ist, als Eingabe für den nächsten Schritt hinzu
- Terminiert, wenn ein **Widerspruch** oder keine neue Formel generiert werden kann, die nicht in der (erweiterten) Wissensbasis ist

⇒ **Resolutionsregel**

- wird in Schritt 2a) als syntaktische Umformungsregel angewendet

⇒ **Widerspruch**

- tritt auf, wenn eine unerfüllbare Formel generiert wird

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 40

Inferenz **Resolution**

⇒ **Resolutionsregel I:**

$$(p \vee r) \wedge (q \vee \neg r) \models p \vee q$$

⇒ **Beobachtung:**

- Modell für $(p \vee r) \wedge (q \vee \neg r)$ ist auch Modell für $p \vee q$
- $(p \vee r) \wedge (q \vee \neg r)$ ist eine Konjunktion von Disjunktionen
- r ist in beiden Disjunktionen komplementär
- **Problem:** In der Form nur selten anwendbar
- **Ziel:** Verallgemeinerung der Resolutionsregel I

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 41

Inferenz **Resolution**

Grundlagen

⇒ **Literale:**

- Symbole oder negierte Symbole
- Beispiel: $p, \neg p, q, \neg q, r, \neg r, \dots$

⇒ **Klausel:**

- Disjunktion von Literalen
- Beispiel: $(p \vee q \vee \neg r), (\neg p \vee \neg q), (p \vee q)$

⇒ **Konjunktive Normalform (KNF):**

- Konjunktion von Klauseln
- Beispiel: $(p \vee r) \wedge (q \vee \neg r)$

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 42

Inferenz Resolution

- ⇒ **Ergebnis der Resolutionsmethode**
 - **Fall 1:** Die leere Klausel • taucht als Resolvente auf. Folglich gilt:
 - $WB \wedge \neg\phi$ unerfüllbar und damit $WB \models \phi$
 - **Fall 2:** Die leere Klausel • taucht nicht als Resolvente auf. Dann gilt:
 - $WB \wedge \neg\phi$ erfüllbar und damit $WB \not\models \phi$
- ⇒ **Eigenschaften der Resolutionsmethode**
 - **korrekt**
 - d.h. es werden nur Formeln abgeleitet, die semantisch aus WB folgen
 - **vollständig**
 - d.h. es kann jede Formel abgeleitet werden, die semantisch aus WB folgt
 - Findet Beweise,
 - d.h. Sequenz von Inferenzregeln, die aus WB eine Formel ableiten

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 49

Inferenz Beispiel

- ⇒ **Ausgangssituation**
 - Wissensbasis WB_1
- ⇒ **Prüfe semantische Folgerungen**
 - $WB_1 \models \neg p[2,1]$?
 - Feld (2,1) ist sicher?
- ⇒ **Inferenzmethode**
 - Resolution
- ⇒ **Relevante Wissensbasis**
 - $\phi_1: b[1,1] \Leftrightarrow (p[1,2] \vee p[2,1])$
 - $\phi_{18}: \neg b[1,1]$
 - $WB_1 = \phi_1 \wedge \phi_{18}$

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 50

Resolution Beispiel

- ⇒ **Ziel:**
 - Prüfe: $WB_1 \models \neg p[2,1]$ mit Resolution
- ⇒ **Lösung**
 1. Transformiere $WB_1 \wedge p[2,1]$ in KNF
 - Ergebnis: (Klauselmenge: Konjunktionen als Kommata)
 - $M = \{$
 - $(\neg b[1,1] \vee p[1,2] \vee p[2,1]),$
 - $(\neg p[1,2] \vee b[1,1]),$
 - $(\neg p[2,1] \vee b[1,1]),$
 - $\neg b[1,1],$
 - $p[2,1]$
 - $\}$
 - Siehe auch Folie #46

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 51

Resolution Beispiel

1. Resolution:

Ergebnis:

- $WB_1 \wedge p[2,1]$ ist unerfüllbar
- Es folgt $\neg p[2,1]$ aus WB_1
- Feld (2,1) ist sicher

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 52

Gliederung

- ⇒ Einleitung
- ⇒ Die Wumpus Welt
- ⇒ Aussagenlogik
- ⇒ Inferenz
- ⇒ **Zusammenfassung**

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 53

Zusammenfassung & Ausblick

- ⇒ **Zusammenfassung**
 - Intelligente Agenten benötigen eine Wissensbasis und einen Inferenzmechanismus um rationale Entscheidungen treffen zu können
 - Repräsentation der Wissensbasis durch Formeln der Aussagenlogik
 - Resolutionsmethode basierend auf KNF als Inferenzmechanismus
- ⇒ **Ausblick**
 - Aussagenlogik sehr ausdruckschwach
 - Nächste Vorlesung: Prädikatenlogik der ersten Stufe

AIOIT Grundlagen der Künstlichen Intelligenz © B.J. Jain 54

$(\alpha \wedge \beta) \equiv (\beta \wedge \alpha)$ commutativity of \wedge
 $(\alpha \vee \beta) \equiv (\beta \vee \alpha)$ commutativity of \vee
 $((\alpha \wedge \beta) \wedge \gamma) \equiv (\alpha \wedge (\beta \wedge \gamma))$ associativity of \wedge
 $((\alpha \vee \beta) \vee \gamma) \equiv (\alpha \vee (\beta \vee \gamma))$ associativity of \vee
 $\neg(\neg\alpha) \equiv \alpha$ double-negation elimination
 $(\alpha \Rightarrow \beta) \equiv (\neg\beta \Rightarrow \neg\alpha)$ contraposition
 $(\alpha \Rightarrow \beta) \equiv (\neg\alpha \vee \beta)$ implication elimination
 $(\alpha \Leftrightarrow \beta) \equiv ((\alpha \Rightarrow \beta) \wedge (\beta \Rightarrow \alpha))$ biconditional elimination
 $\neg(\alpha \wedge \beta) \equiv (\neg\alpha \vee \neg\beta)$ de Morgan
 $\neg(\alpha \vee \beta) \equiv (\neg\alpha \wedge \neg\beta)$ de Morgan
 $(\alpha \wedge (\beta \vee \gamma)) \equiv ((\alpha \wedge \beta) \vee (\alpha \wedge \gamma))$ distributivity of \wedge over \vee
 $(\alpha \vee (\beta \wedge \gamma)) \equiv ((\alpha \vee \beta) \wedge (\alpha \vee \gamma))$ distributivity of \vee over \wedge