Abbildungssammlung

Liebe Leser, mit diesem Dokument stellen wir Ihnen mit Zustimmung des Verlages die Abbildungen aus unserem Buch *Wissensverarbeitung - Eine Einführung in die Künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure* zur Verfügung.

Sie können die Abbildungen frei verwenden, bspw. für Folien und Präsentationen, wenn Sie bei der Verwendung auf das Buch hinweisen. Alle Grafiken sind Vektorgrafiken, so dass sie beliebig skaliert aus der PDF-Datei kopiert werden können.

Brandenburg an der Havel, im Februar 2011

Ingo Boersch

Jochen Heinsohn

Rolf Socher

Quellenverweis: I. **Boersch**, J. **Heinsohn**, R. **Socher**. *Wissensverarbeitung: Eine Einführung in die Künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure.* 2. ed., Spektrum Akademischer Verlag, 2007.

Abbildungsverzeichnis

1.1 Architektur von Expertensystemen 1

2.1 Das Wegeproblem: Suche nach einem Weg von A nach F 3
2.2 Transformation des Graphen aus Abbildung 2.1 in einen Baum 4
2.3 Teil des Suchbaums für das Weinkrügeproblem 4
2.4 Suchbaum mit Startknoten A und Zielknoten G 4
2.5 Verlauf der Tiefensuche 4
2.6 Verlauf der Breitensuche 5
2.7 Tiefensuche terminiert nicht 5
2.8 Agenda für Tiefensuche (links) und Breitensuche (rechts) 5
2.9 Die Luftlinienheuristik führt in die Irre 5
2.10 Das Schiebepuzzle 5
2.11 Vergleich der Bewertungen h_1 und h_2 für das Schiebepuzzle 6
2.12 Unfaire (links) und faire (rechts) heuristische Funktion 6
2.13 Landkarte mit Streckenangaben (links) und entsprechender Suchbaum mit Knotenmarkierungen (rechts) 6

3.1 Das Färbeproblem 7
3.2 Eine Lösung des Vier-Damen-Problems 8
3.3 Kantenmarkierungsproblem 8
3.4 Suchbaum für das Problem $x + z = 4, y + w = 4$ 8
3.5 Suchbaum für das Problem $x + z = 4, y + w = 4$ 8
3.6 Constraintnetze für das Färbeproblem und für das Problem aus Beispiel 3.3 9
3.7 Mögliche Nachfolgestellungen der Stellung s_0 9
3.8 Constraintnetz und zwei verschiedene Suchbäume für das Problem $x \neq y$, $x \neq z$ 9
3.9 Suchbaum für das Problem $x > y,\ y > z,\ z > w$ 10
3.10 Ablauf der Propagierung von Beschränkungen 10
3.11 Kombination von Tiefensuche und Constraintpropagierung 11

4.1 Schnellkäfer 13
4.2 Ablauf eines Evolutionären Algorithmus 14
4.3 Fitnessarten 14
4.4 Wachsende Tische 14
4.5 Selektionsvarianten 14
4.6 Fitnesslandschaften 15
4.7 Simpler Genetischer Algorithmus 15

4.8 Crossover-Varianten 15
4.9 Evolution künstlicher Gesichter 15
4.10 Repräsentationen von Programmen 15
4.11 Initialisierung von Baumstrukturen 16
4.12 Crossover symbolischer Ausdrücke 16

5.1 Die Klötzchenwelt 17
5.2 SLD-Resolution 18
5.3 SLD-Resolution mit Antwortsubstitution 18

6.1 Grafische Darstellung eines Regelsystems 19
6.2 Allgemeines Schema der Rückwärtsverkettung 20
6.3 Regelkonflikt bei der Rückwärtsverkettung 20
6.4 Regelsystem mit heuristischer Regel 20
6.5 Allgemeines Schema der Vorwärtsverkettung 20
6.6 Verschiedene Möglichkeiten beim Chipsspiel 21
6.7 Einfaches Schema der Vorwärtsverkettung 21
6.8 Verlauf der Constraintpropagierung bei der Bildung der Konfliktmenge . . . 22
6.9 Struktur eines Vorwärtsinterpreters mit Konfliktlösung 23

7.1 Revision von Schlussfolgerungen 25
7.2 Aufgabenverteilung zwischen Inferenzkomponente und Begründungsverwaltung 26
7.3 Regelsystem zu Beispiel 7.1 26
7.4 Regelsystem zu Beispiel 7.1 nach Zurückziehen des Faktums b 26
7.5 Regelsystem zu Beispiel 7.1 nach Zurückziehen des Faktums c 26
7.6 Rechtfertigungsnetz mit zirkulärer Rechtfertigung 27
7.7 Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.2 mit zwei konsistenten Markierungen . . . 27
7.8 Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.2 ohne konsistente Markierungen 27
7.9 Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.3 27
7.10 Transformiertes Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.3 27
7.11 Regelnetz zum Terminplanungsproblem 28

8.1 Die Regel der totalen Wahrscheinlichkeit 29
8.2 Grafische Darstellung der Regelbasis 30
8.3 Der sich aus der Regelbasis ergebende Und-Oder-Kombinationsgraph. 30
8.4 Das Bayessche Netz zu Beispiel 8.12 30
8.5 Divergierend (a), kaskadierend (b) und konvergierend (c) gerichtete Kanten 30
8.6 Lokale Daten (a) und Datenpartitionierung (b) in einem Bayesschen Netz . . 31
8.7 Datenfluss in einem Bayesschen Netz 31

8.8 Kleingärtner: Bewertung der Ereignisse nach der Initialisierung 32
8.9 Kleingärtner: Bewertung der Ereignisse nach einer konkreten Beobachtung . 32
8.10 Krankheitsbild von Apfelbäumen – Zustand nach Initialisierung 32
8.11 Krankheitsbild von Apfelbäumen – Endzustand 33
8.12 Sensor- und Ereignismenge in Dempsters Modell 33
8.13 Hierarchische Anordnung der interessanten Ereignisse 33

9.1 Die Zugehörigkeitsfunktion des Begriffs „groß“ 35
9.2 Das inverse Pendel 36
9.3 Architektur eines Fuzzy-Reglers 36
9.4 Die Fuzzy-Mengen für das Beispiel des inversen Pendels 36
9.5 Berechnungen des Fuzzy-Reglers für das Beispiel des inversen Pendels 37

10.1 Lernzyklus mit Feedback 39
10.2 Die drei gegebenen Bildklassen L, M und R 40
10.3 Agent und Umwelt beim bestärkenden Lernen 40
10.4 Unüberwachtes Lernen: Ähnliche Symbole sind zu gruppieren. 40
10.5 Unüberwachtes Lernen – eine Lösung für Beispiel 10.4 40
10.6 Aufbau einer Nervenzelle 41
10.7 Neuronen im Kontakt zur Umwelt 41
10.8 Neuronenmodell: Neuron j 41
10.9 Aktivierungsfunktionen 41
10.10 Netztopologien 42
10.11 Das Perzeptron, vereinfachte Darstellung 42
10.12 Äquivalente Darstellungen eines UND-Perzeptrons 42
10.13 UND-Perzeptron: Wahrheitstafel und Trenngerade im Eingaberaum 42
10.14 Paritätsprädikate, z. B. XOR, sind nicht linear separierbar. 43
10.15 XOR aus drei Perzeptrons und Menge der 1-Punkte 43
10.16 Logistische Funktion und Ableitung – Lernfreudigkeit der Neuronen 43
10.17 Backpropagation-Lernalgorithmus 44
10.18 Probleme des Gradientenabstiegs 44
10.19 Einfluss der Lernrate auf den Verlauf des Trainingsfehlers 44
10.20 Abhängigkeit des erreichbaren Fehlers von der Netzgröße 45
10.21 Transformation numerischer Attribute 45
10.22 Kodierung des ersten Bildes als Trainingsvektor 45
10.23 Overfitting 45
10.24 *letters* – ein trainiertes Beispiel-Netz aus SNNS 46
10.25 Eine auffällige Wichtungskonstellation im trainierten Netz 46
10.26 Penfield-Männchen 46
10.27 Dynamik der rezeptorischen Felder 47

10.28 Verteilung der Erregungszentren 47
10.29 Aufbau eines Kohonennetzes und Topologien 47
10.30 Lernvorgang in einer SOM 48
10.31 Nachbarschaftsfunktionen 48
10.32 Wirkung strategischer und numerischer Parameter – Kupferschmied 49
10.33 Musterunabhängige Visualisierungen 49
10.34 Karte im Eingaberaum für verschiedene Dimensionen 50
10.35 Musterabhängige Visualisierungen 50
10.36 Weitere SOM-Visualisierungen 50

11.1 Das temporale Constraintnetz für das Hausbau-Beispiel 11.2 51
11.2 Ein Beispiel zur Unvollständigkeit der Pfadkonsistenzmethode 52
11.3 Partielle Ordnung der Basisrelationen beim Nökel-Verband 52

12.1 Zwei mögliche Situationen in der Klötzchenwelt 53
12.2 Der vollständige Zustandsraum der aus drei Klötzchen bestehenden Klötzchenwelt 54
12.3 In diesen drei Situationen gilt $\mathsf{On}(B, A)$. 54
12.4 Die Gesamtmenge aller Aktionen in unserer Klötzchenwelt 55
12.5 Ausführen und Planen einer Aktionssequenz 55
12.6 Von S_0 nach G als Aufgabe für den STRIPS-Planer 55
12.7 Suchbaum für das Problem aus Abbildung 12.6 56
12.8 Dekomposition von Aktionssequenzen 56
12.9 Die Sussman-Anomalie 56

1 Einführung

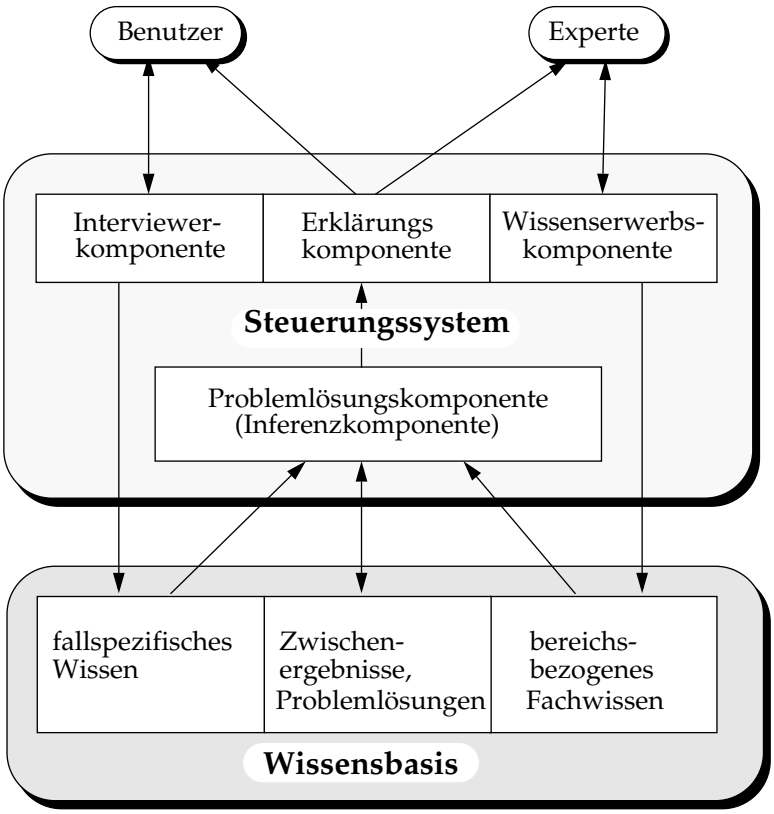


Abb. 1.1: Architektur von Expertensystemen

2 Suchverfahren

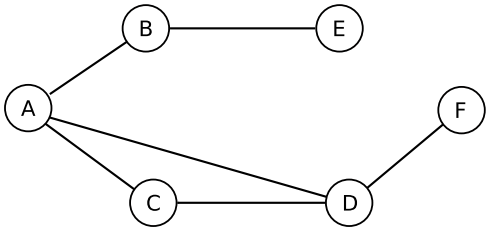


Abb. 2.1: Das Wegeproblem: Suche nach einem Weg von A nach F

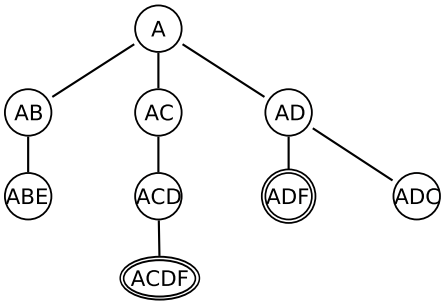


Abb. 2.2: Transformation des Graphen aus Abbildung 2.1 in einen Baum

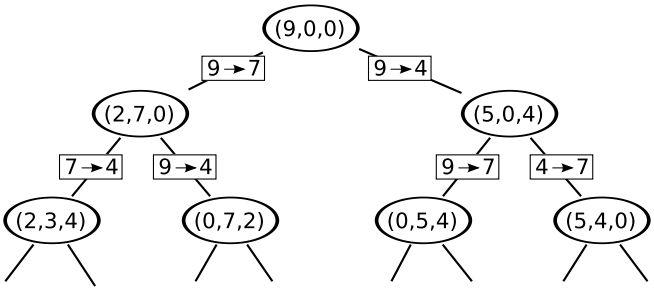


Abb. 2.3: Teil des Suchbaums für das Weinkrügeproblem

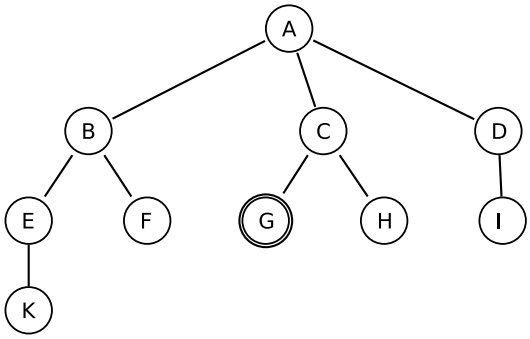


Abb. 2.4: Suchbaum mit Startknoten A und Zielknoten G

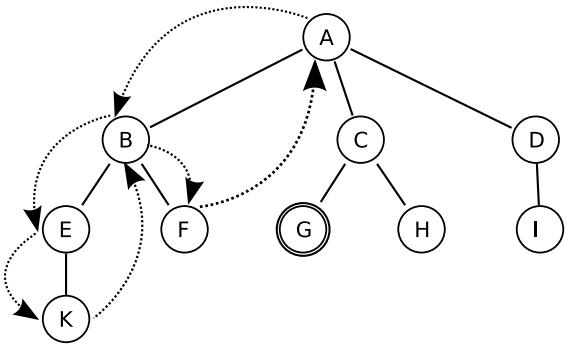


Abb. 2.5: Verlauf der Tiefensuche

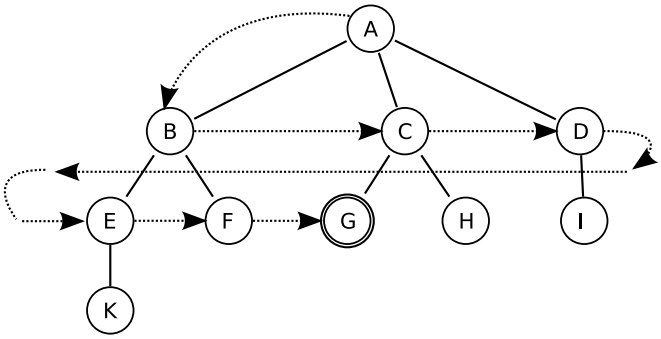


Abb. 2.6: Verlauf der Breitensuche

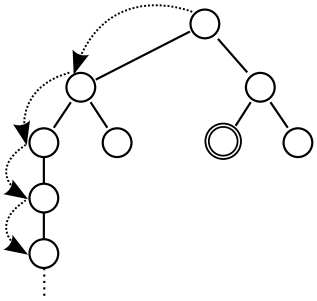


Abb. 2.7: Tiefensuche terminiert nicht

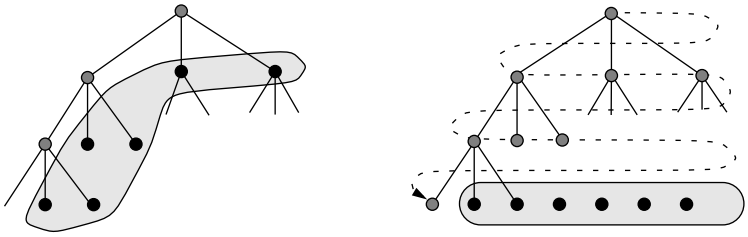


Abb. 2.8: Agenda für Tiefensuche (links) und Breitensuche (rechts)

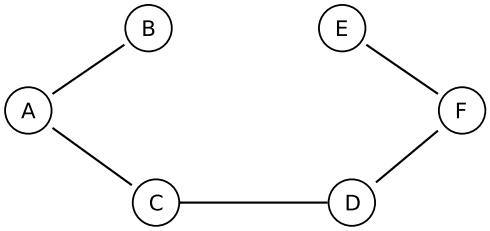


Abb. 2.9: Gesucht ist ein Weg von A nach E. Die Luftlinienheuristik führt in die Irre. Nur der Umweg über C führt zum Ziel.

5	4	
6	1	8
7	3	2

Startzustand

1	2	3
8		4
7	6	5

Zielzustand

Abb. 2.10: Das Schiebepuzzle

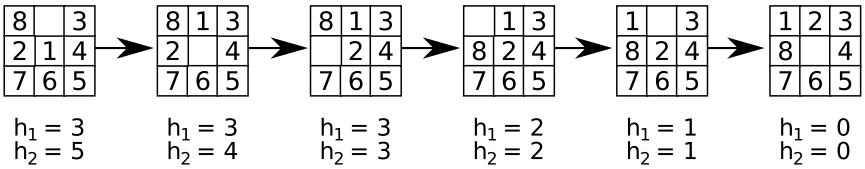


Abb. 2.11: Vergleich der Bewertungen h_1 und h_2 für das Schiebepuzzle

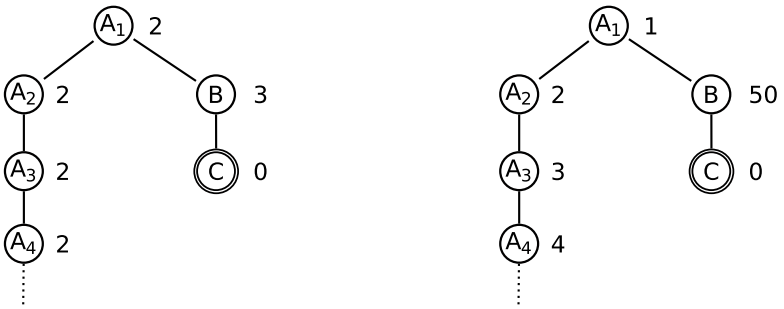


Abb. 2.12: Unfaire (links) und faire (rechts) heuristische Funktion

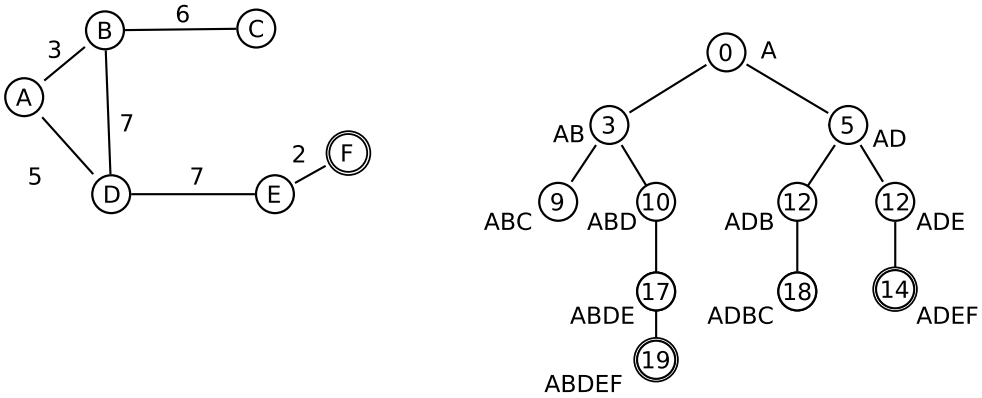


Abb. 2.13: Landkarte mit Streckenangaben (links) und entsprechender Suchbaum mit Knotenmarkierungen (rechts)

3 Constraints – Propagierung von Beschränkungen

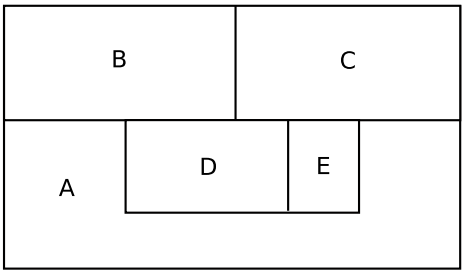


Abb. 3.1: Das Färbeproblem

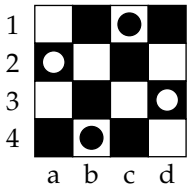


Abb. 3.2: Eine Lösung des Vier-Damen-Problems

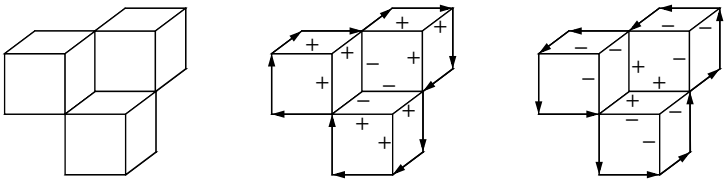


Abb. 3.3: Kantenmarkierungsproblem. Außenkanten sind mit $\rightarrow$, konvexe Innenkanten mit $+$, konkave Innenkanten mit $-$ markiert.

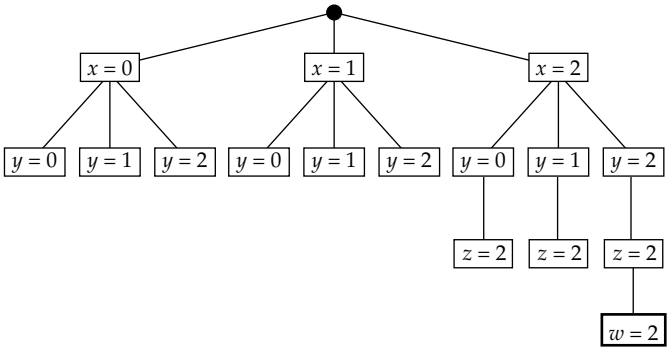


Abb. 3.4: Suchbaum für das Problem $x+z=4, y+w=4$. Variablen werden in der Reihenfolge x, y, z, w belegt.

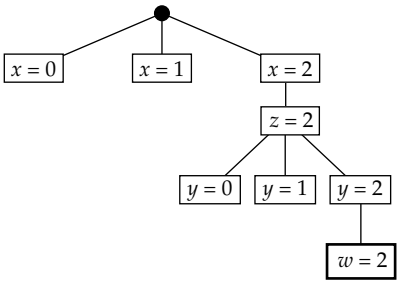


Abb. 3.5: Suchbaum für das Problem $x+z=4, y+w=4$. Variablen werden in der Reihenfolge x, z, y, w belegt.

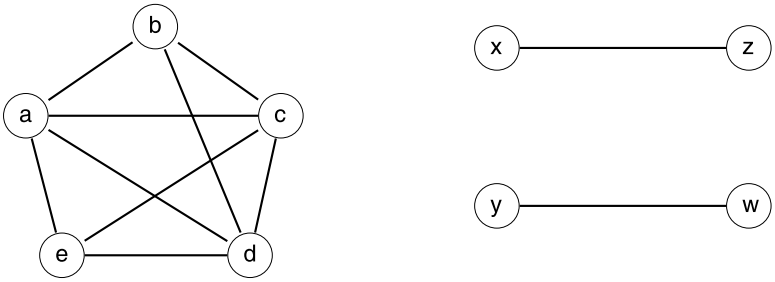


Abb. 3.6: Constraintnetze für das Färbeproblem und für das Problem aus Beispiel 3.3

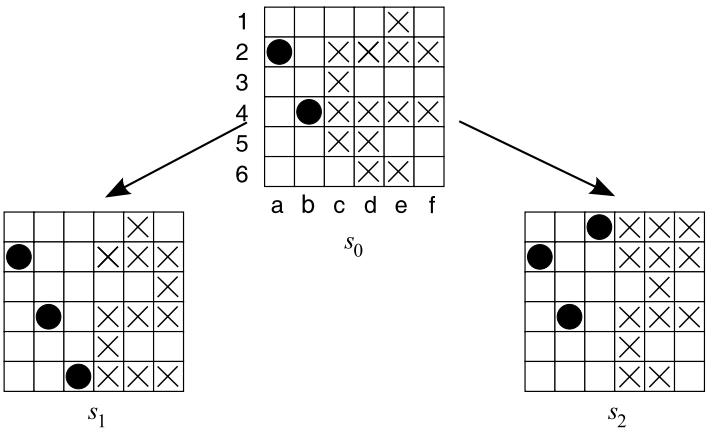


Abb. 3.7: Mögliche Nachfolgestellungen der Stellung s_0. Bedrohte Felder sind markiert.

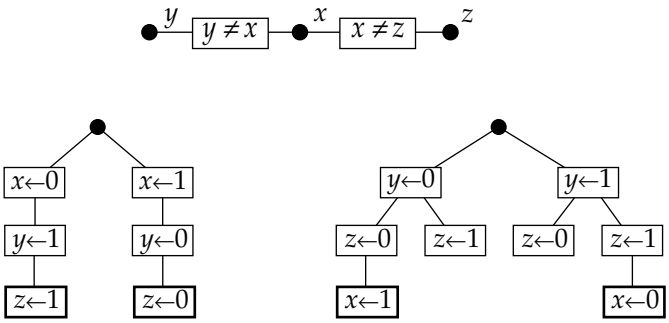


Abb. 3.8: Constraintnetz und zwei verschiedene Suchbäume für das Problem $x \neq y, x \neq z$ aus Beispiel 3.4, mit verschiedenen Variablenreihenfolgen

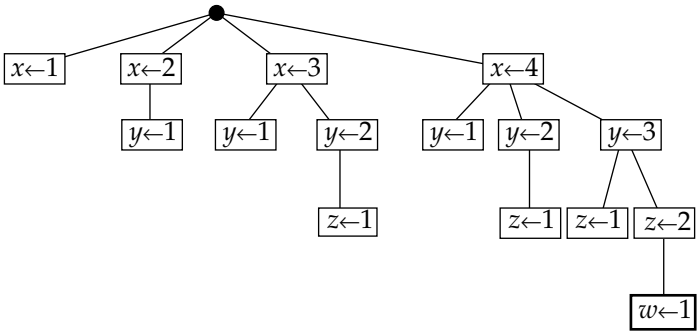


Abb. 3.9: Suchbaum für das Problem $x > y,\ y > z,\ z > w$

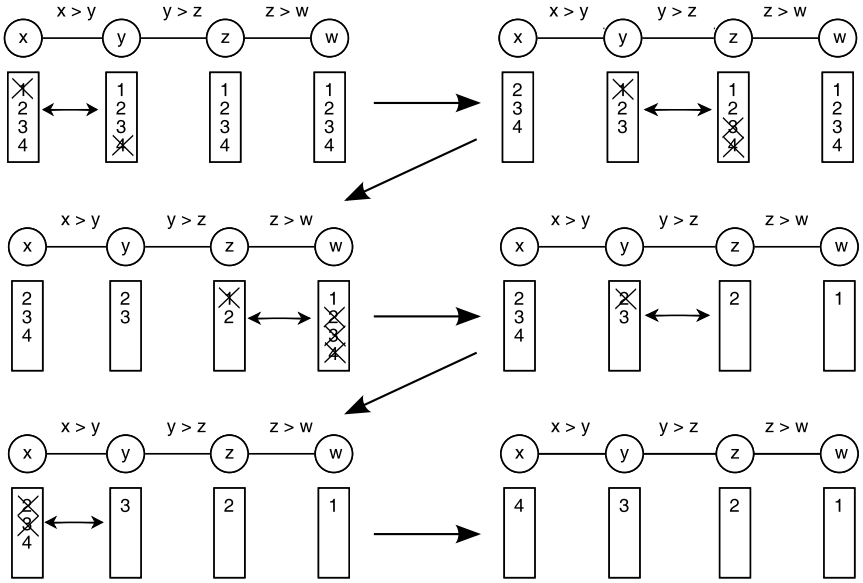


Abb. 3.10: Ablauf der Propagierung von Beschränkungen

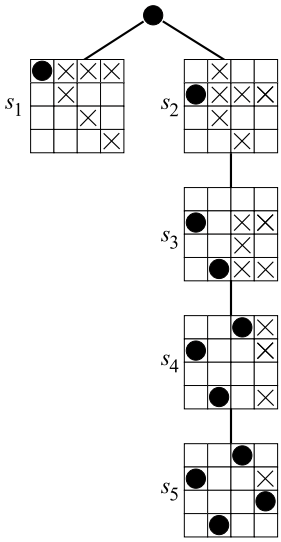


Abb. 3.11: Kombination von Tiefensuche und Constraintpropagierung beim Vier-Damen-Problem

4 Evolutionäre Algorithmen

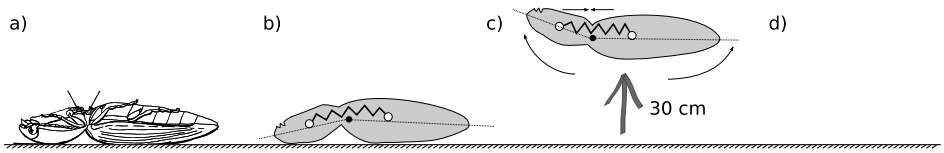


Abb. 4.1: Schnellkäfer a) Insekt b) auf dem Rücken: Katapultmuskel gespannt, Bewegung blockiert c) Spreizbolzen gibt Muskel frei, Käfer schnellt in die Luft d) Käfer sucht das Weite, nach (Greguss 76)

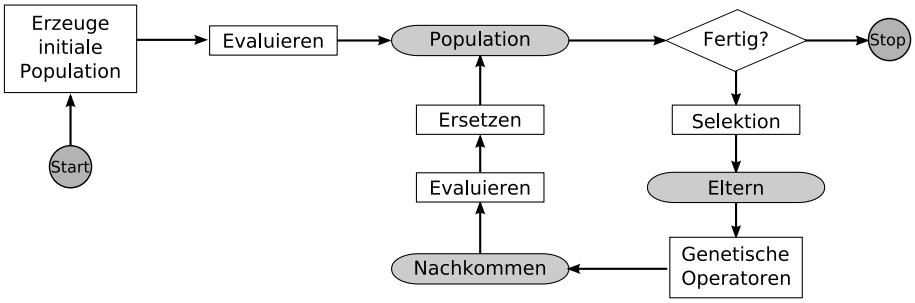


Abb. 4.2: Ablauf eines Evolutionären Algorithmus

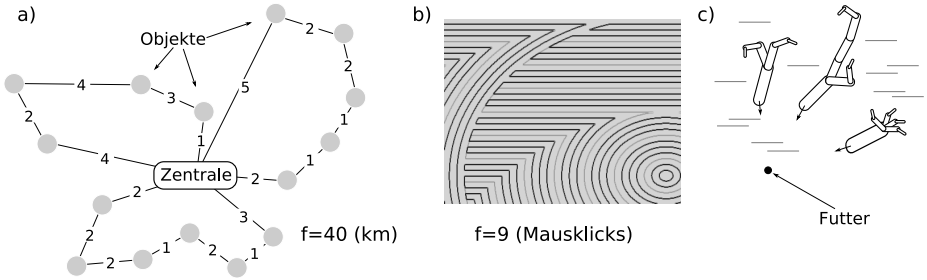


Abb. 4.3: Fitness aus Beispiel 4.1 a) berechenbar b) interaktiv c) implizit

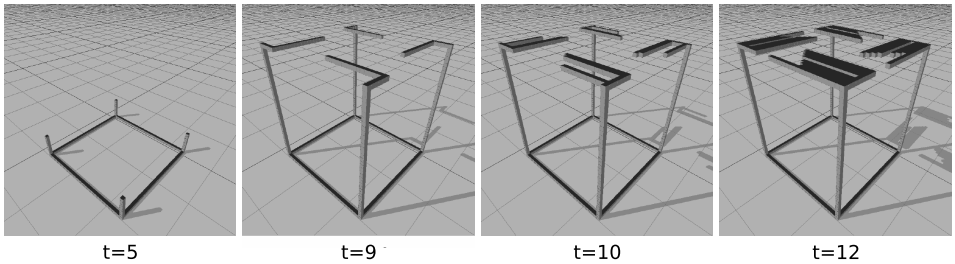


Abb. 4.4: Wachsende Tische aus (Hornby & Pollack 01)

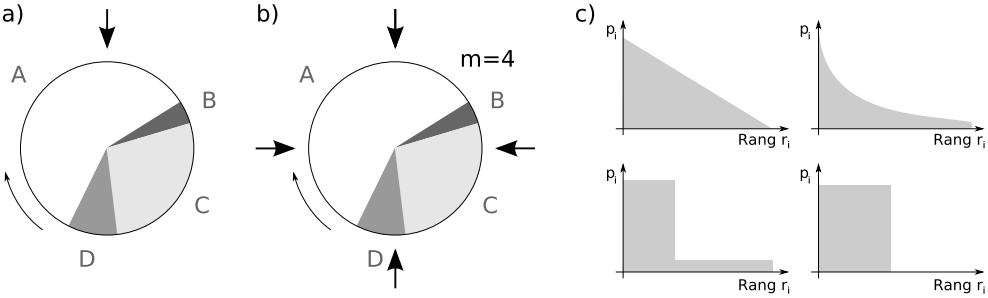


Abb. 4.5: Selektionsvarianten a) Roulette b) Stochastic Universal Sampling c) Rangbasiert

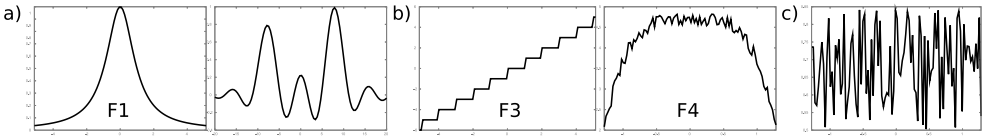


Abb. 4.6: Fitnesslandschaft a) einfach für EA und Bergsteigerverfahren b) wenig Rauschen, kleine Plateaus – noch geeignet für EA c) zufällig – EA-Annahme verletzt

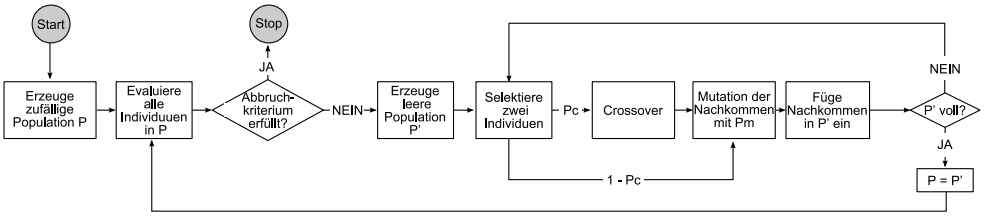


Abb. 4.7: Simpler Genetischer Algorithmus

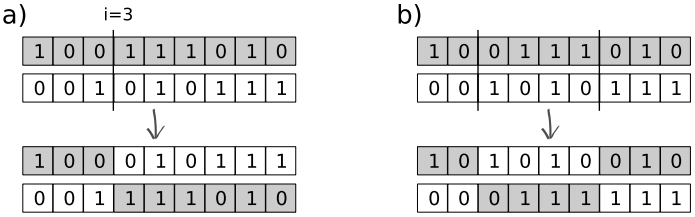


Abb. 4.8: Crossover-Varianten a) 1-Punkt-Crossover b) 2-Punkt-Crossover

Abb. 4.9: Evolution künstlicher Gesichter aus (Frowd & Hancock 07) a) Eltern b) Nachkommen nach Crossover c) Nachkommen nach Crossover und Mutation

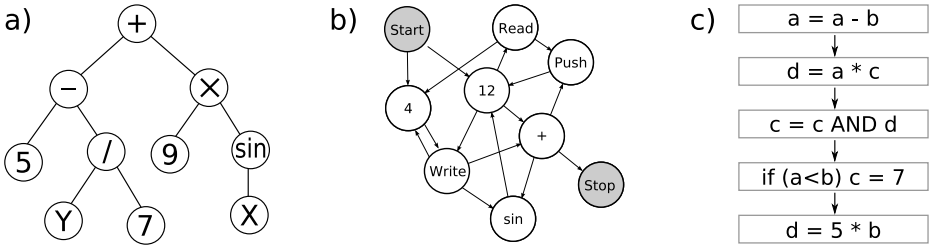


Abb. 4.10: Repräsentationen von Programmen a) Symbolischer Ausdruck b) Zustandsgraph c) Befehlssequenz

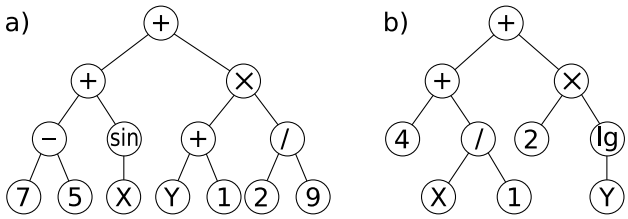


Abb. 4.11: Baumstrukturen der Tiefe 4 konstruiert mit a) FULL-Methode b) GROW-Methode

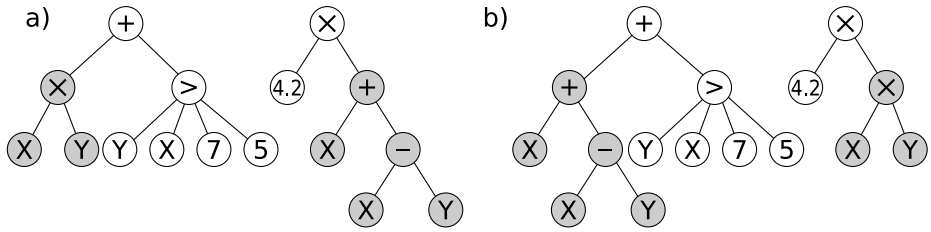


Abb. 4.12: Crossover symbolischer Ausdrücke a) Eltern b) Nachkommen

5 Wissensverarbeitung mit Logik

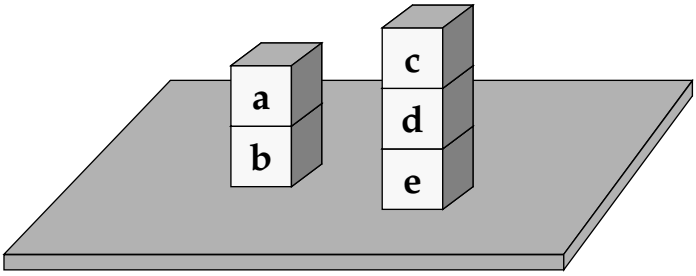


Abb. 5.1: Die Klötzchenwelt

$$
\begin{array}{ll}
:-P(a,e) & P(x,z):-K(x,y),P(y,z) \\
\vdots & \\
:-K(a,y),P(y,e) & K(a,b) \\
\vdots & \\
:-P(b,e) & P(x,y):-K(x,y) \\
\vdots & \\
:-K(b,e) & K(b,e) \\
\vdots & \\
\square &
\end{array}
$$

Abb. 5.2: SLD-Resolution

$$
\begin{array}{ll}
:-P(a,w) & P(x,z):-K(x,y),P(y,z) \\
\vdots & \sigma_1=\{x\leftarrow a, w\leftarrow z\} \\
:-K(a,y),P(y,z) & K(a,b) \\
\vdots & \sigma_2=\{y\leftarrow b\} \\
:-P(b,z) & P(x',y'):-K(x',y') \\
\vdots & \sigma_3=\{x'\leftarrow b, y'\leftarrow z\} \\
:-K(b,z) & K(b,e) \\
\vdots & \sigma_4=\{z\leftarrow e\} \\
\square &
\end{array}
$$

Abb. 5.3: SLD-Resolution mit Antwortsubstitution

6 Regelsysteme

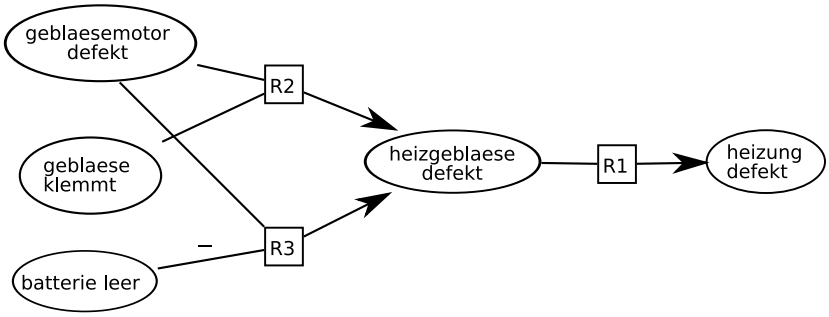


Abb. 6.1: Grafische Darstellung eines Regelsystems

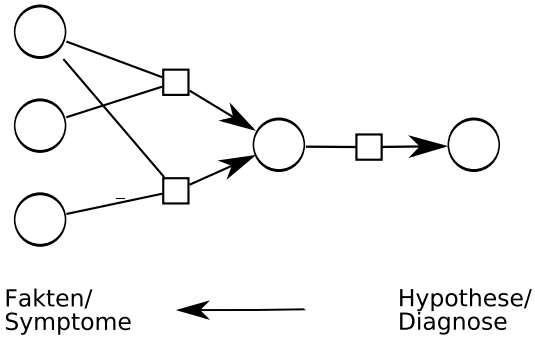


Abb. 6.2: Allgemeines Schema der Rückwärtsverkettung

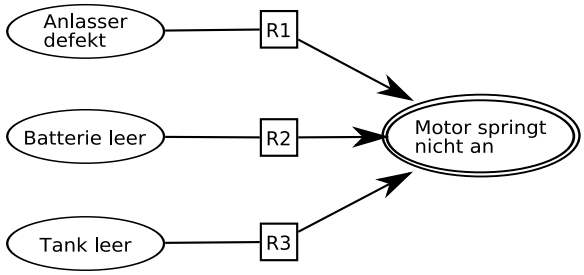


Abb. 6.3: Regelkonflikt bei der Rückwärtsverkettung. Hypothese: Der Motor springt nicht an.

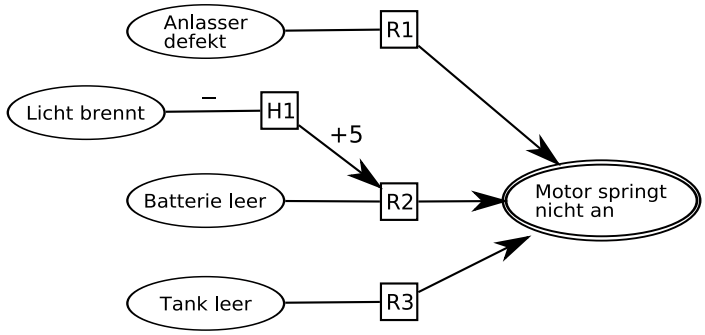


Abb. 6.4: Regelsystem mit heuristischer Regel

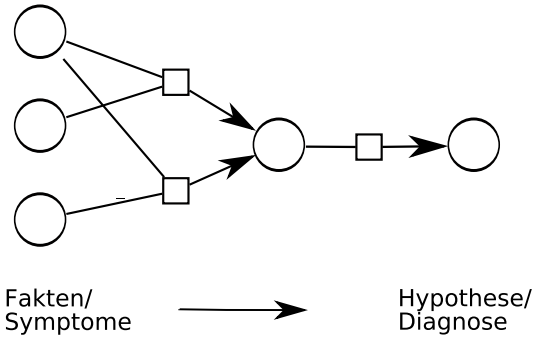


Abb. 6.5: Allgemeines Schema der Vorwärtsverkettung

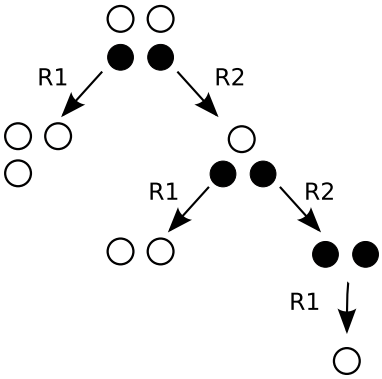


Abb. 6.6: Verschiedene Möglichkeiten beim Chipsspiel

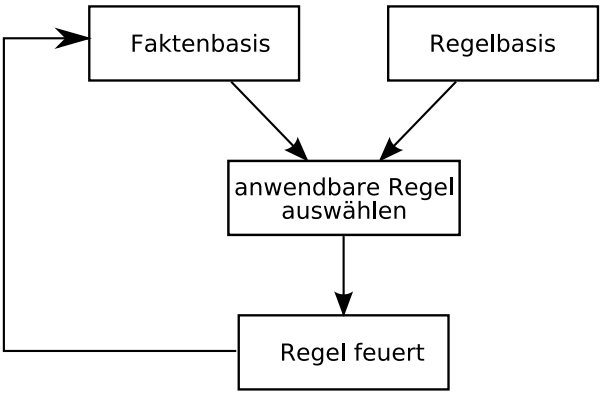


Abb. 6.7: Einfaches Schema der Vorwärtsverkettung

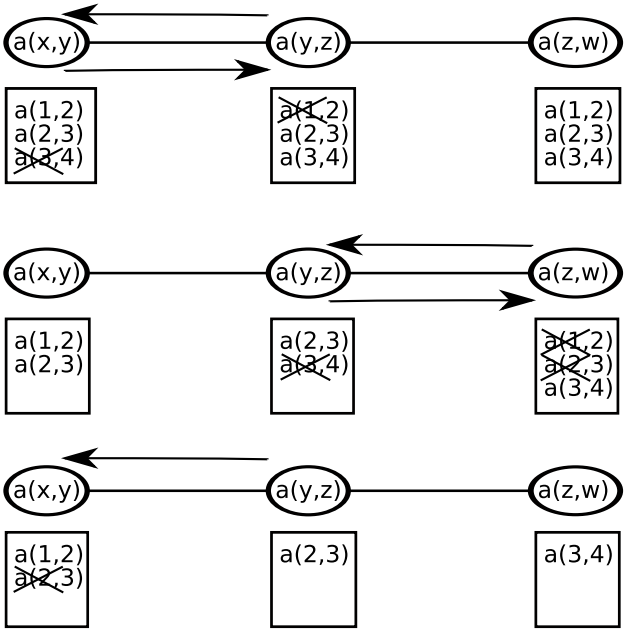


Abb. 6.8: Verlauf der Constraintpropagierung bei der Bildung der Konfliktmenge

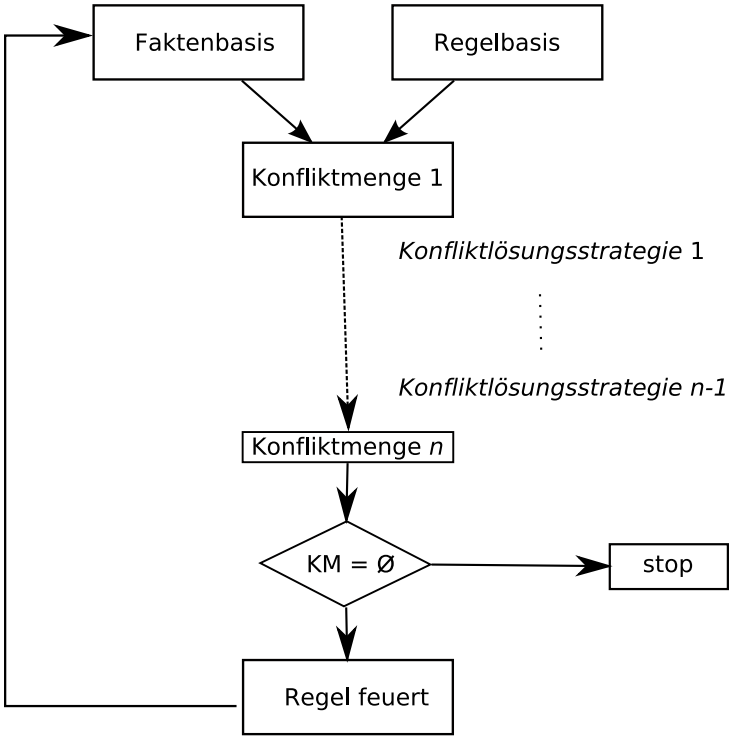


Abb. 6.9: Struktur eines Vorwärtsinterpreters mit Konfliktlösung

7 Unvollständiges Wissen

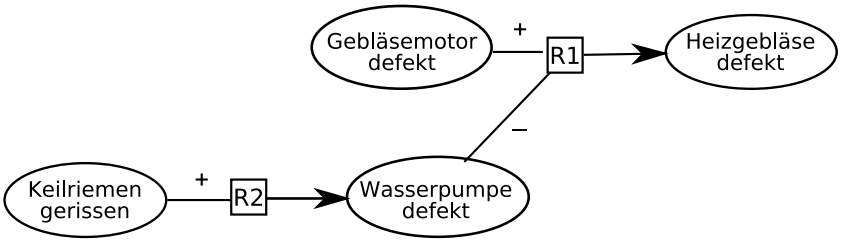


Abb. 7.1: Revision von Schlussfolgerungen

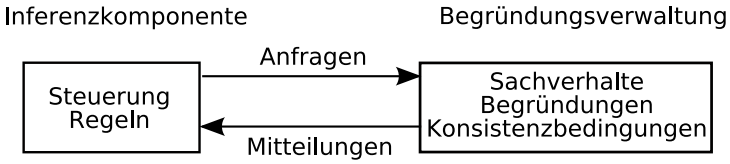


Abb. 7.2: Aufgabenverteilung zwischen Inferenzkomponente und Begründungsverwaltung

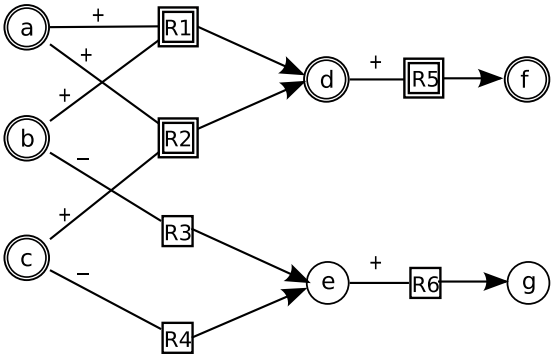


Abb. 7.3: Regelsystem zu Beispiel 7.1

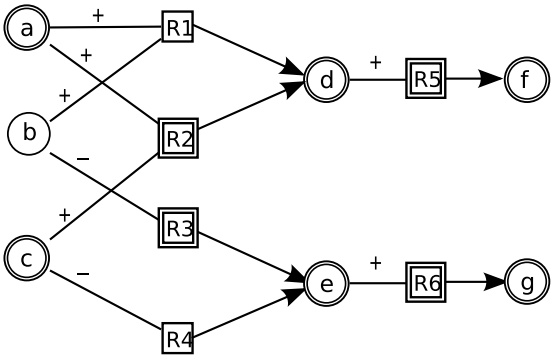


Abb. 7.4: Regelsystem zu Beispiel 7.1 nach Zurückziehen des Faktums b

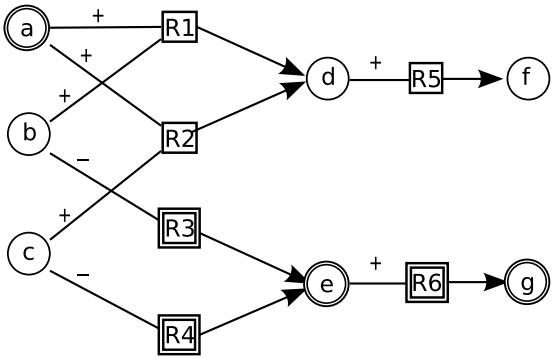


Abb. 7.5: Regelsystem zu Beispiel 7.1 nach Zurückziehen des Faktums c

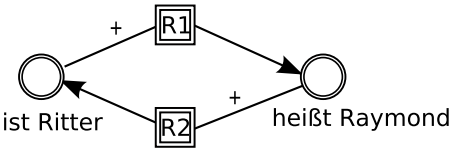
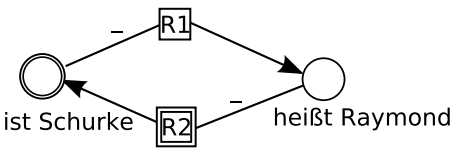


Abb. 7.6: Rechtfertigungsnetz mit zirkulärer Rechtfertigung



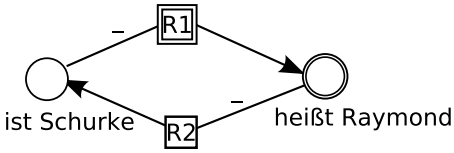


Abb. 7.7: Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.2 mit zwei konsistenten Markierungen (Gerader Zyklus)

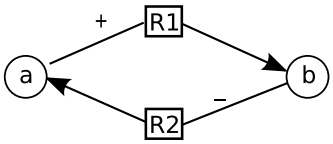


Abb. 7.8: Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.2 ohne konsistente Markierungen (Ungerader Zyklus)

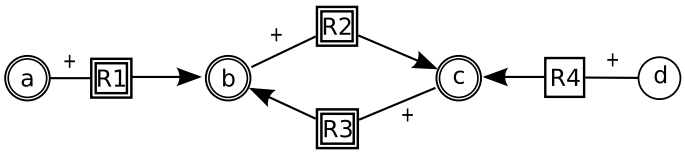


Abb. 7.9: Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.3

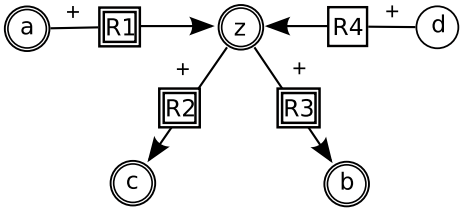


Abb. 7.10: Transformiertes Rechtfertigungsnetz zu Beispiel 7.3

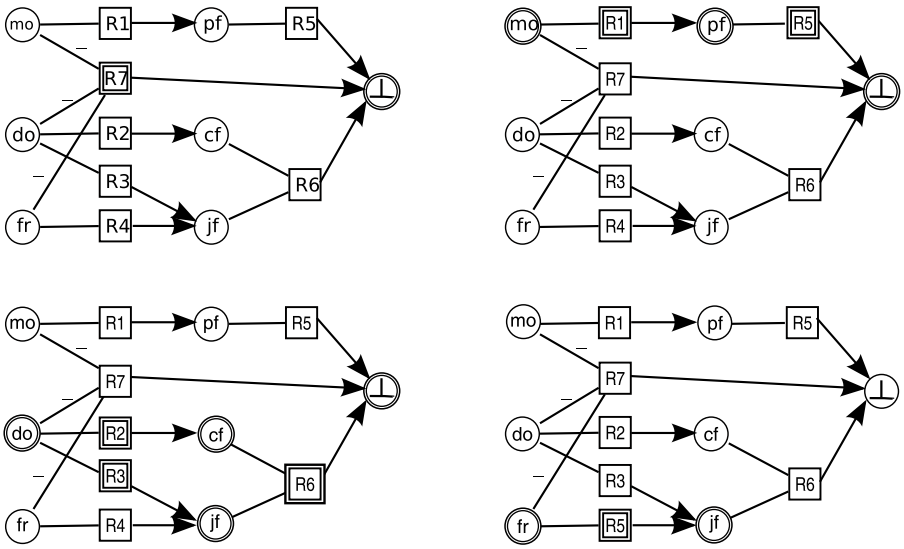


Abb. 7.11: Regelnetz zum Terminplanungsproblem

8 Unsicheres Wissen

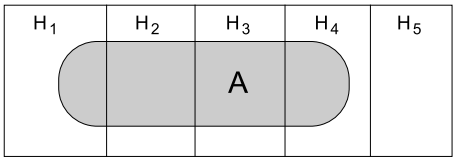


Abb. 8.1: Die Regel der totalen Wahrscheinlichkeit

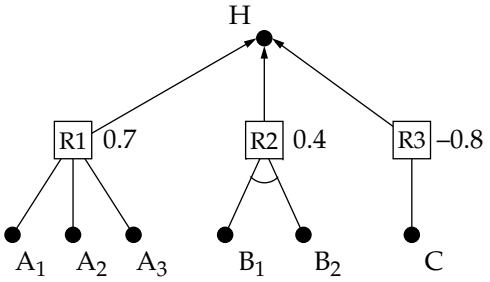


Abb. 8.2: Grafische Darstellung der Regelbasis

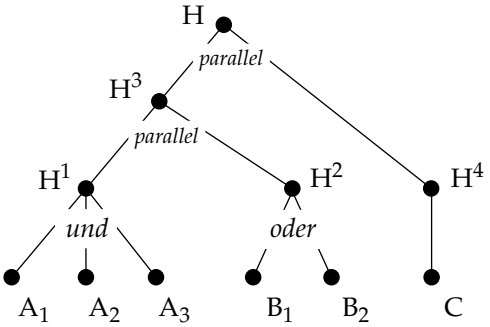


Abb. 8.3: Der sich aus der Regelbasis ergebende Und-Oder-Kombinationsgraph.

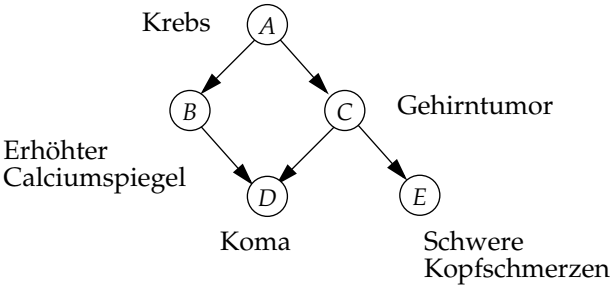


Abb. 8.4: Das Bayessche Netz zu Beispiel 8.12

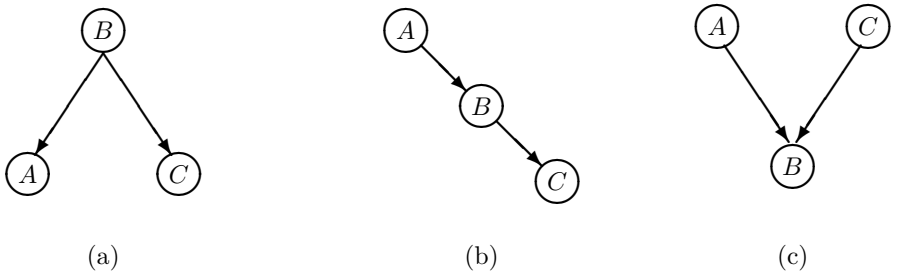


Abb. 8.5: Divergierend (a), kaskadierend (b) und konvergierend (c) gerichtete Kanten

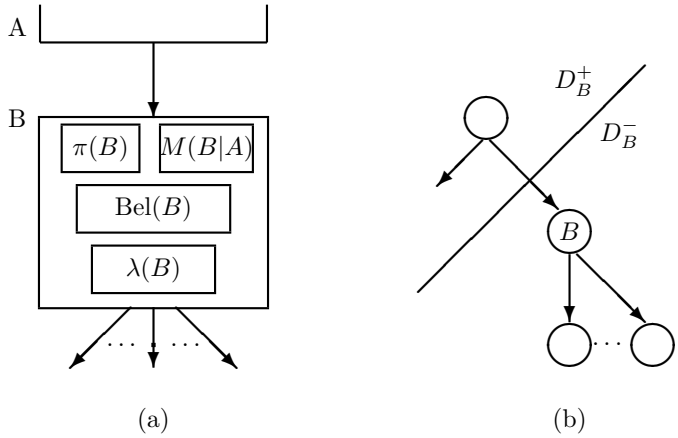


Abb. 8.6: Lokale Daten (a) und Datenpartitionierung (b) in einem Bayesschen Netz

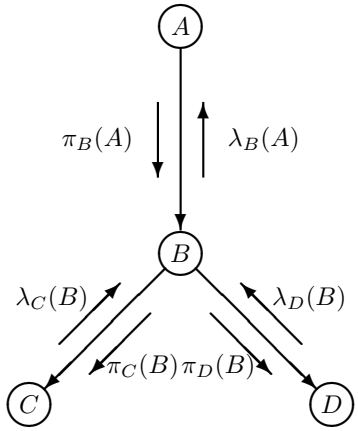


Abb. 8.7: Datenfluss in einem Bayesschen Netz

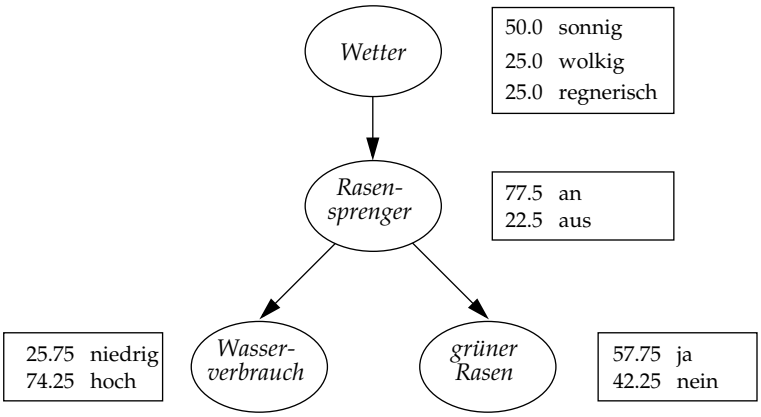


Abb. 8.8: Kleingärtner: Bewertung der Ereignisse nach der Initialisierung

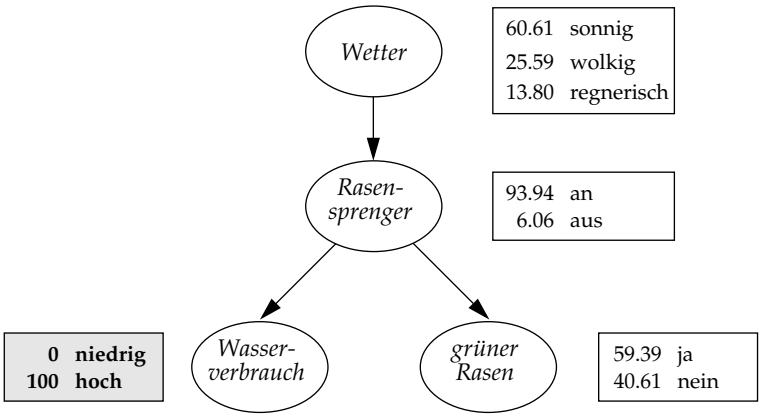


Abb. 8.9: Kleingärtner: Bewertung der Ereignisse nach einer konkreten Beobachtung

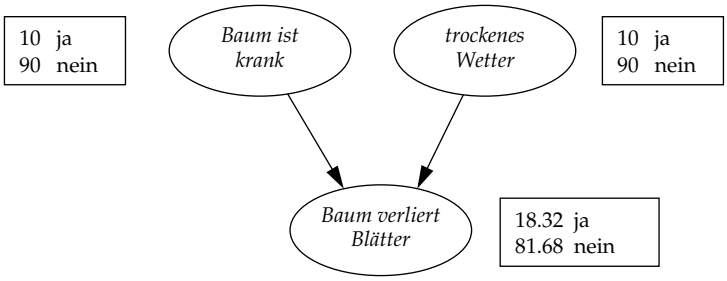


Abb. 8.10: Krankheitsbild von Apfelbäumen – Zustand nach Initialisierung

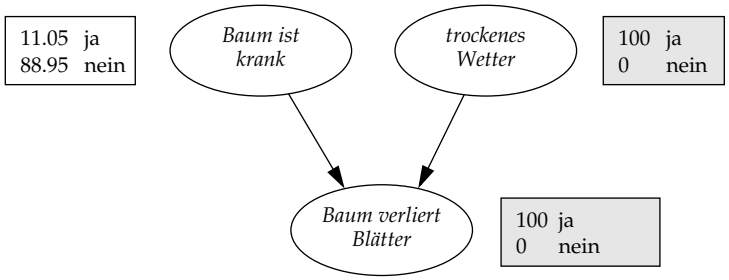


Abb. 8.11: Krankheitsbild von Apfelbäumen – Endzustand

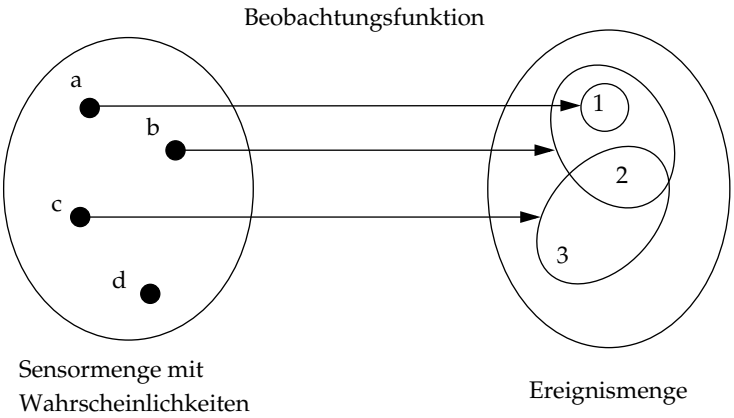


Abb. 8.12: Sensor- und Ereignismenge in Dempsters Modell

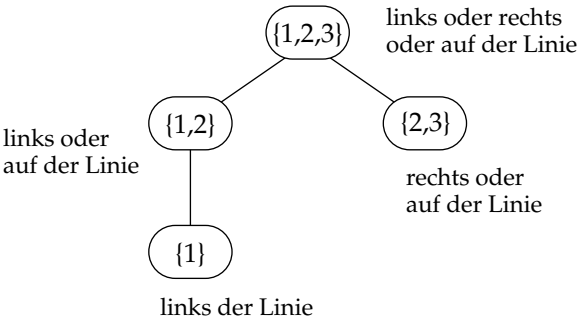


Abb. 8.13: Hierarchische Anordnung der interessanten Ereignisse

9 Vages Wissen

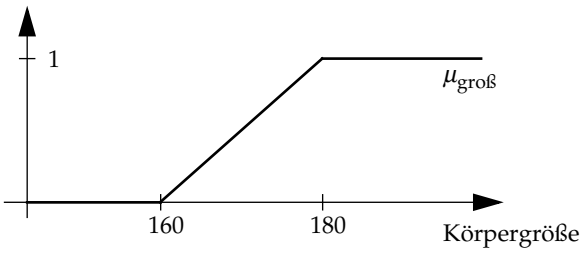


Abb. 9.1: Die Zugehörigkeitsfunktion des Begriffs „groß“

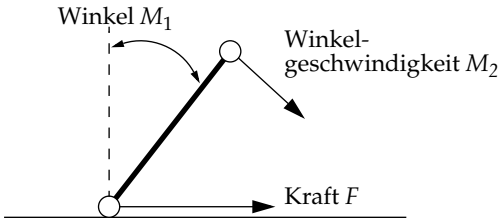


Abb. 9.2: Das inverse Pendel

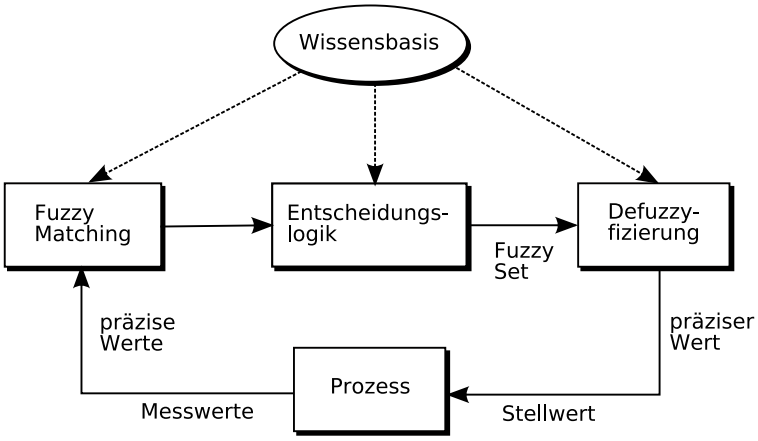


Abb. 9.3: Architektur eines Fuzzy-Reglers

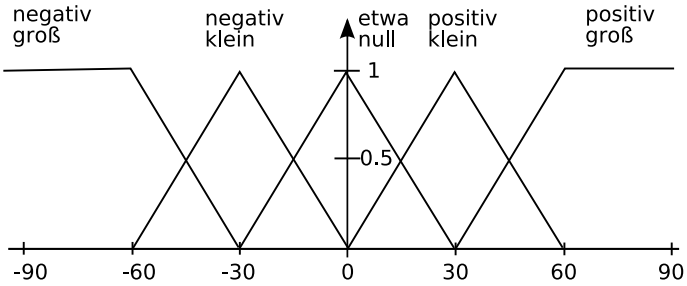


Abb. 9.4: Die Fuzzy-Mengen für das Beispiel des inversen Pendels

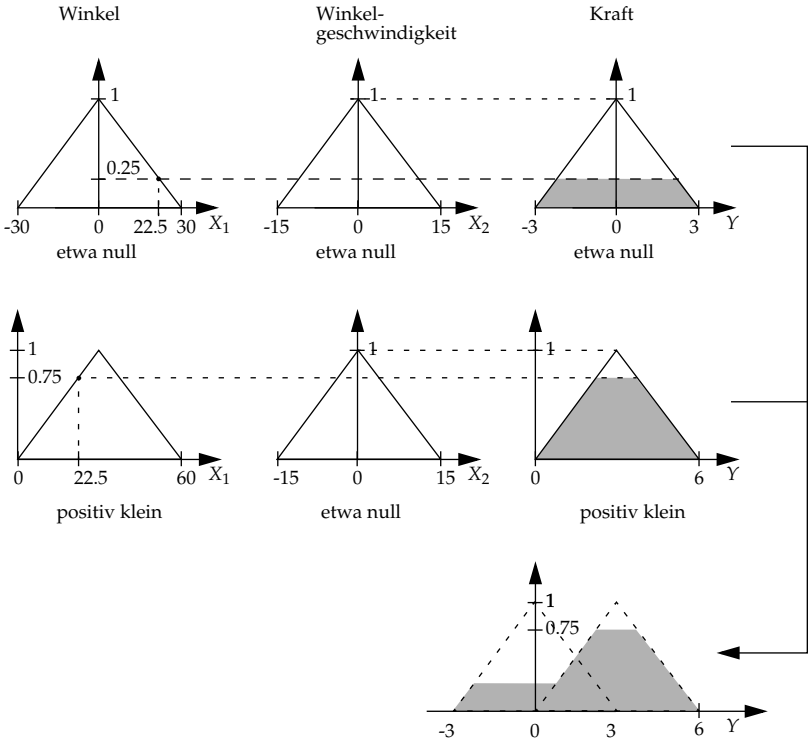


Abb. 9.5: Berechnungen des Fuzzy-Reglers für das Beispiel des inversen Pendels

10 Künstliche neuronale Netze

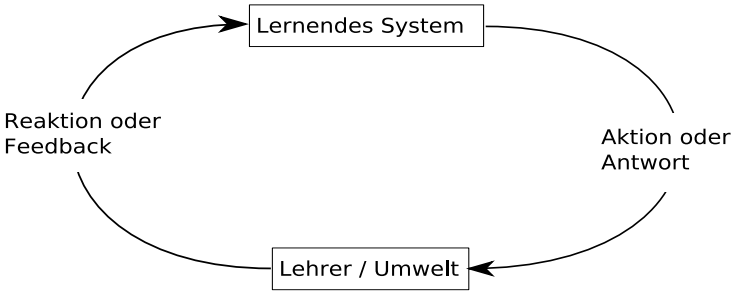


Abb. 10.1: Lernzyklus mit Feedback

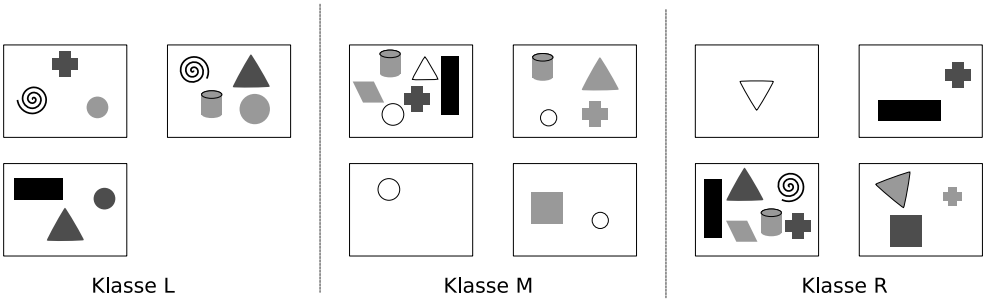


Abb. 10.2: Die drei gegebenen Bildklassen L, M und R

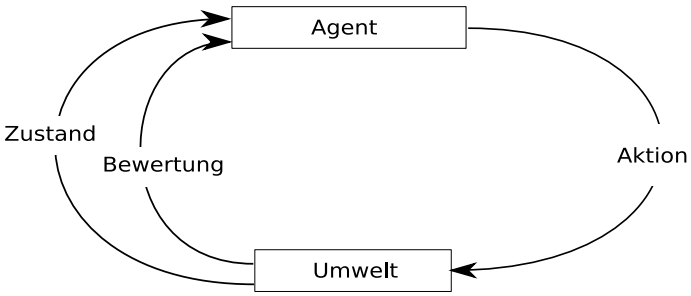


Abb. 10.3: Agent und Umwelt beim bestärkenden Lernen, nach (Sutton & Barto 98)

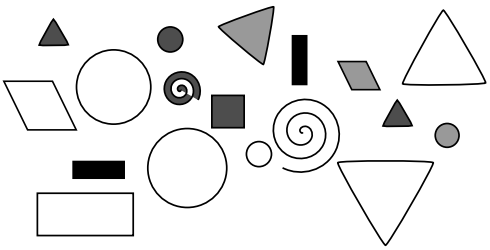


Abb. 10.4: Unüberwachtes Lernen: Ähnliche Symbole sind zu gruppieren.

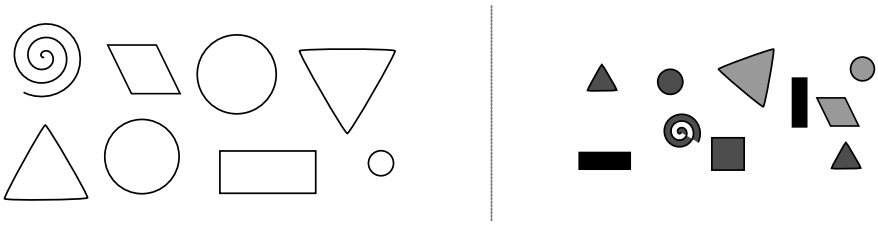


Abb. 10.5: Unüberwachtes Lernen – eine Lösung für Beispiel 10.4

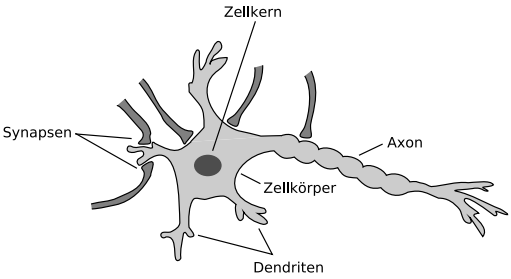


Abb. 10.6: Aufbau einer Nervenzelle

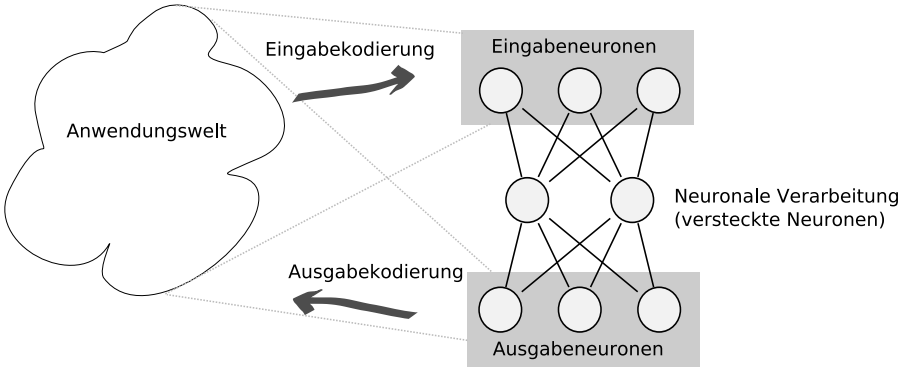


Abb. 10.7: Neuronen im Kontakt zur Umwelt, nach (Kratzer 90)

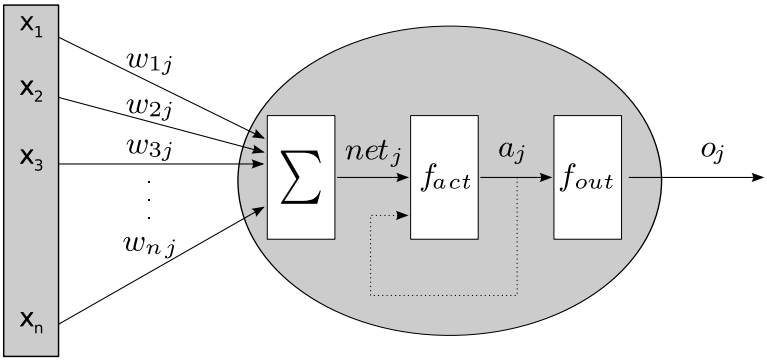


Abb. 10.8: Neuronenmodell: Neuron j

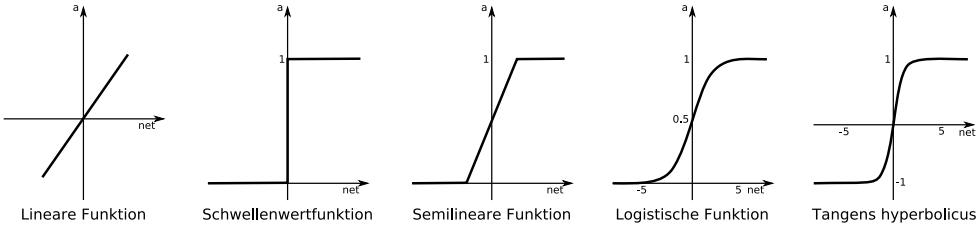


Abb. 10.9: Aktivierungsfunktionen

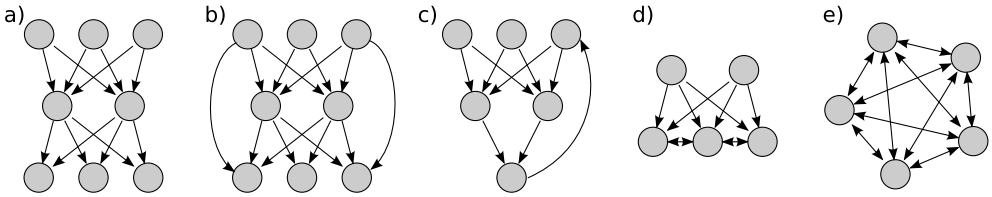


Abb. 10.10: Netztopologien: a) vorwärts verkettet b) mit Abkürzungen c) mit Rückkopplungen d) mit lateralen Verbindungen e) voll vernetzt

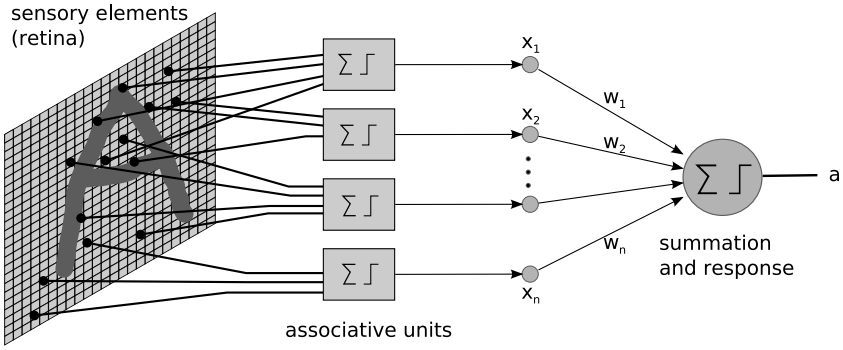


Abb. 10.11: Das Perzeptron, vereinfachte Darstellung

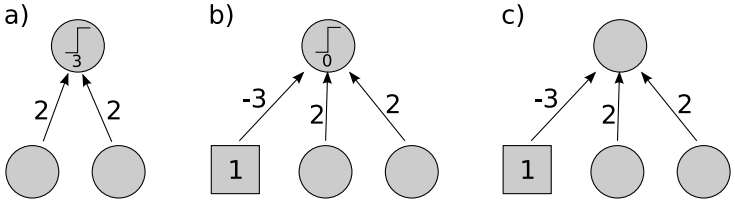


Abb. 10.12: Äquivalente Darstellungen eines UND-Perzeptrons

a)

x_1	x_2	net	a
0	0	0	0
0	1	2	0
1	0	2	0
1	1	4	1

b)

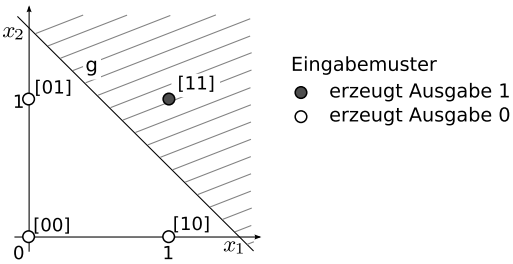


Abb. 10.13: UND-Perzeptron aus Abb. 10.12 a) Wahrheitstabelle b) Trenngerade im Eingaberaum

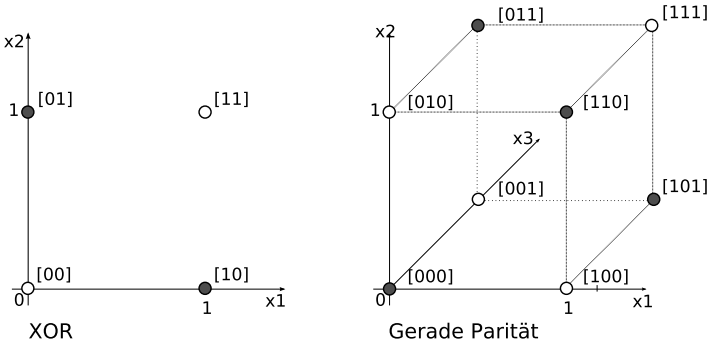


Abb. 10.14: Paritätsprädikate, z. B. XOR, sind nicht linear separierbar.

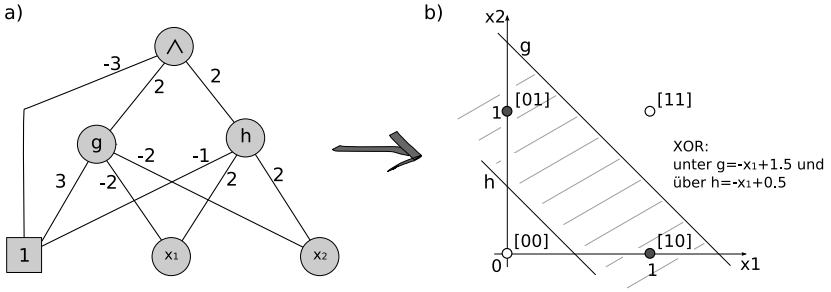


Abb. 10.15: a) XOR aus drei Perzeptrons b) Zugehörige Menge der 1-Punkte

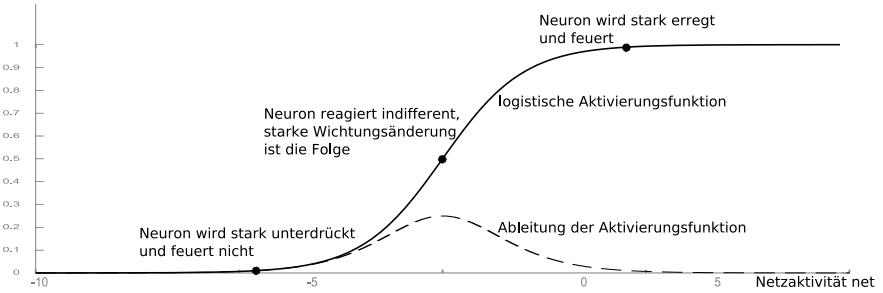


Abb. 10.16: Logistische Funktion und Ableitung – Lernfreudigkeit der Neuronen

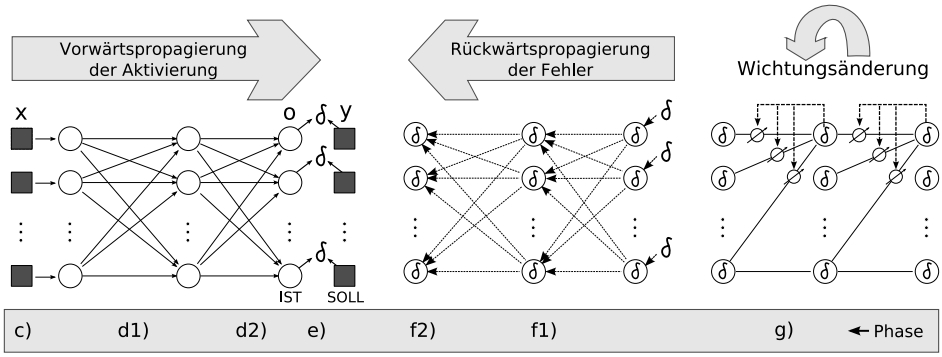


Abb. 10.17: Backpropagation-Lernalgorithmus, Phasen entsprechend Algorithmus im Kasten

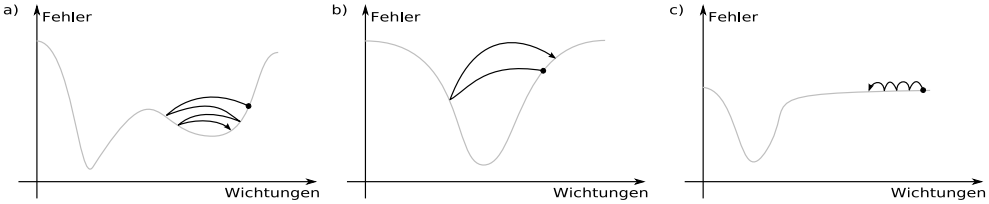


Abb. 10.18: Probleme des Gradientenabstiegs: a) gefangen im lokalen Minimum b) zu hohe Lernrate c) flaches Plateau

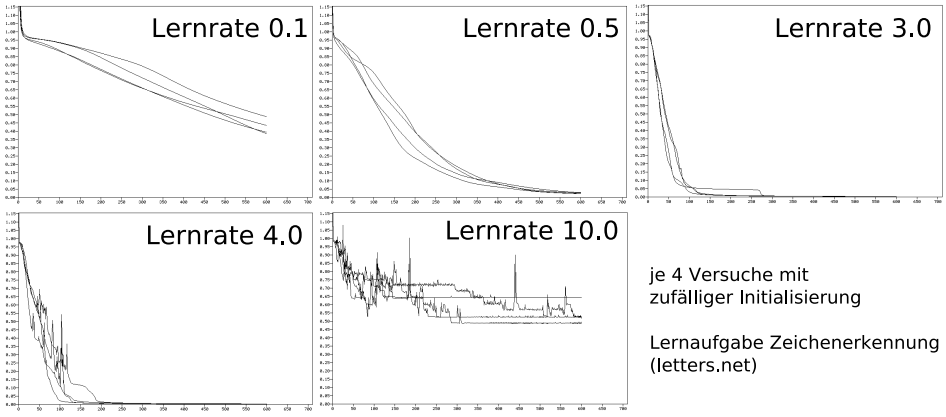


Abb. 10.19: Einfluss der Lernrate auf den Verlauf des Trainingsfehlers

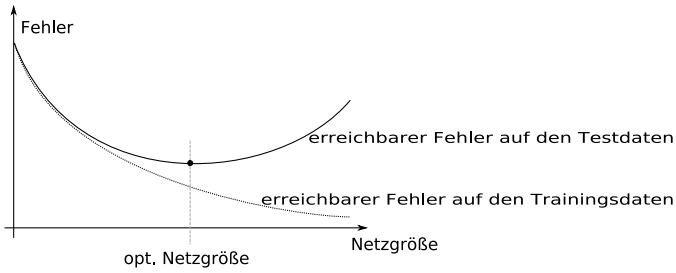


Abb. 10.20: Abhängigkeit des erreichbaren Fehlers von der Netzgröße

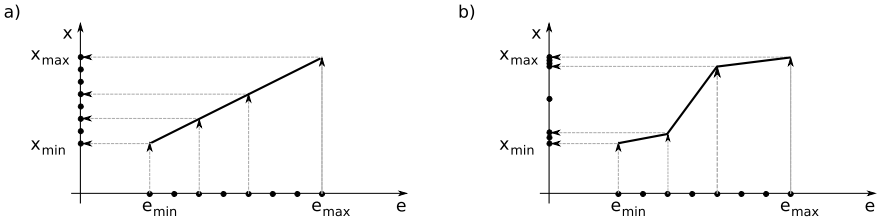


Abb. 10.21: Transformation numerischer Attribute a) linear b) stückweise linear

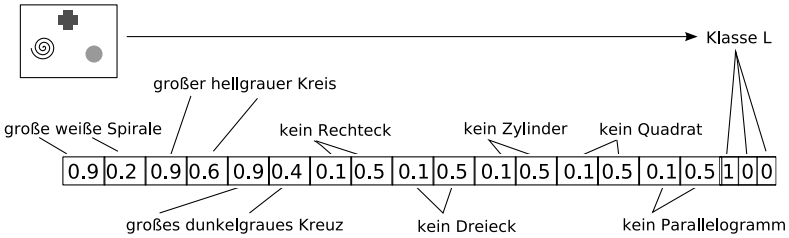


Abb. 10.22: Kodierung des ersten Bildes aus Abb. 10.2 als Trainingsvektor

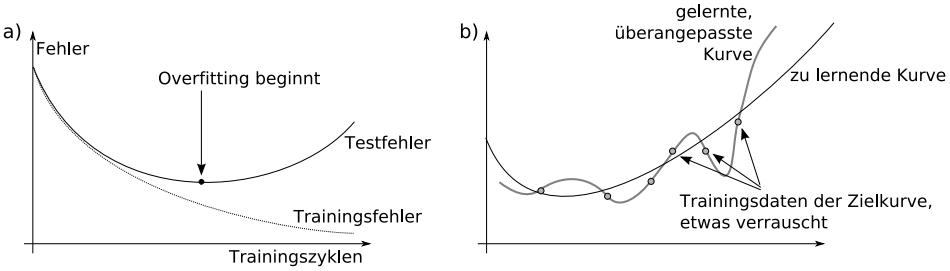
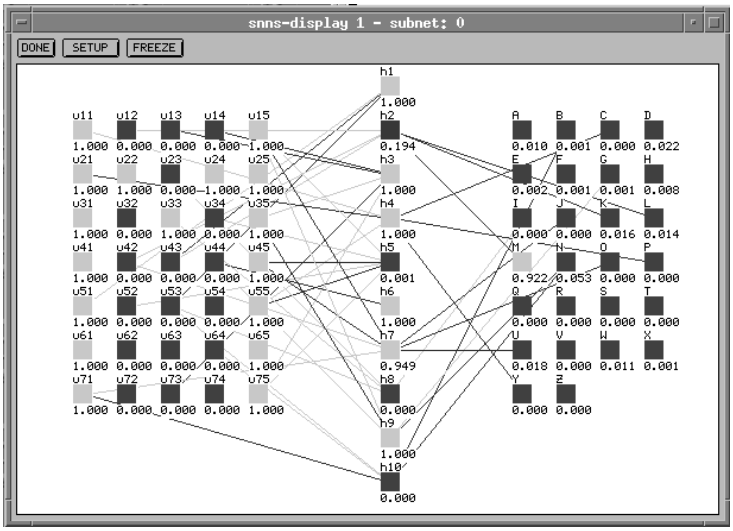


Abb. 10.23: Overfitting a) Zeitpunkt des Auftretens b) überangepasstes Lernergebnis



Legende Wichtungen:
> 5 : hellgrau
< -5 : dunkelgrau
andere : nicht dargestellt

Abb. 10.24: *letters* – ein trainiertes Beispiel-Netz aus SNNS

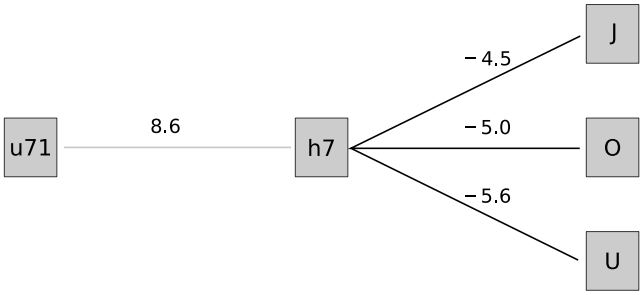


Abb. 10.25: Eine auffällige Wichtungskonstellation im trainierten Netz

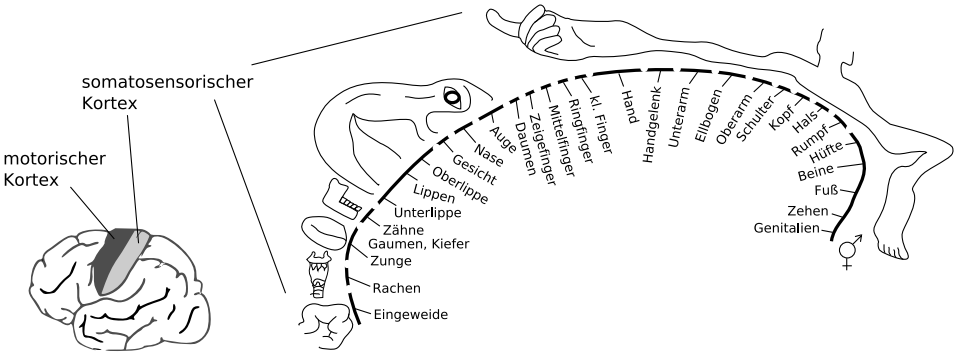


Abb. 10.26: Penfield-Männchen: Kartografische Repräsentation der somatosensorischen Felder im Kortex des Menschen, (Penfield & Rasmussen 50) nach (Reichert 00)

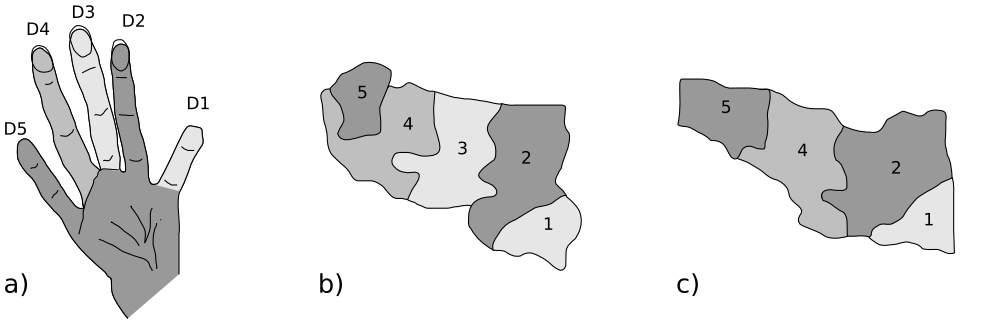


Abb. 10.27: Dynamik der rezeptorischen Felder a) Schema einer Affenhand b) Repräsentation der Hand im Kortex c) 2 Monate nach Amputation von Finger D3, (Merzenich et al. 84) nach (Reichert 00)

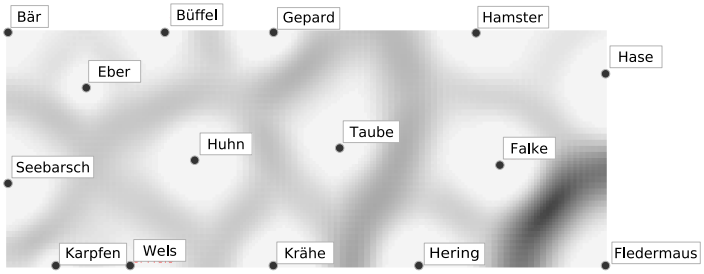


Abb. 10.28: Verteilung der Erregungszentren in einer mit Tierarten trainierten selbstorganisierenden Karte

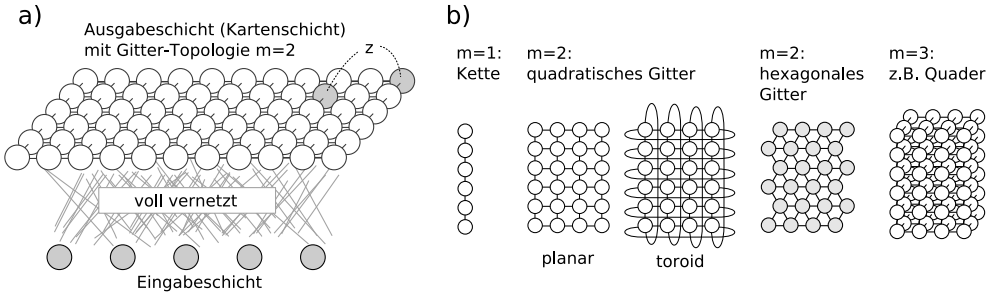


Abb. 10.29: Aufbau eines Kohonennetzes a) Struktur aus zwei Schichten b) Beispiele für Topologien der Ausgabeschicht

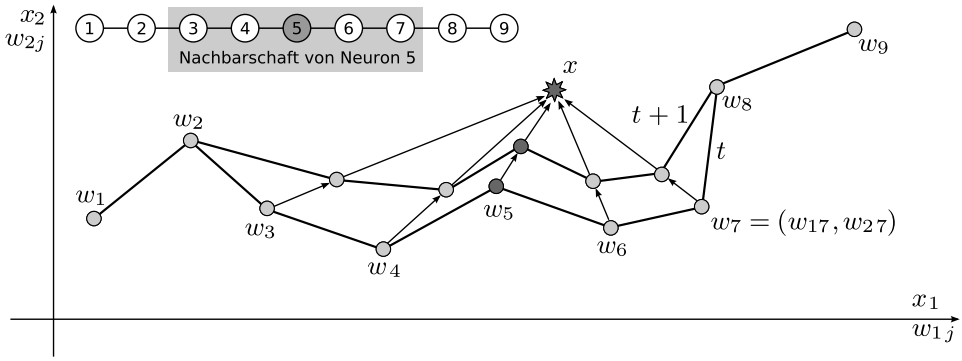


Abb. 10.30: Lernvorgang in einer SOM mit $n = 2$ und $m = 1$, Visualisierungsart *Karte im Eingaberaum*, nach (Zell 03)

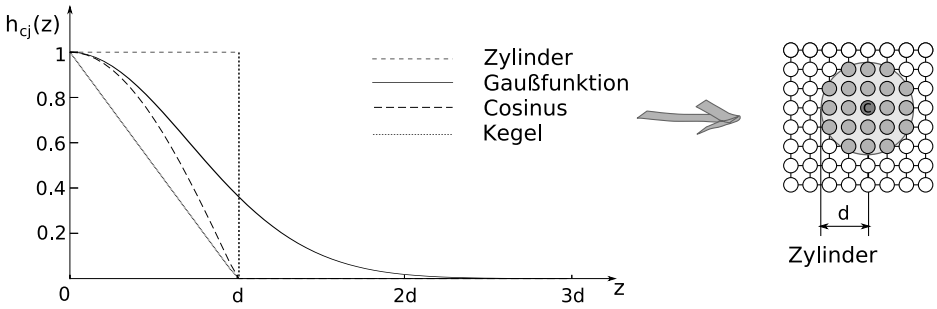


Abb. 10.31: Nachbarschaftsfunktionen

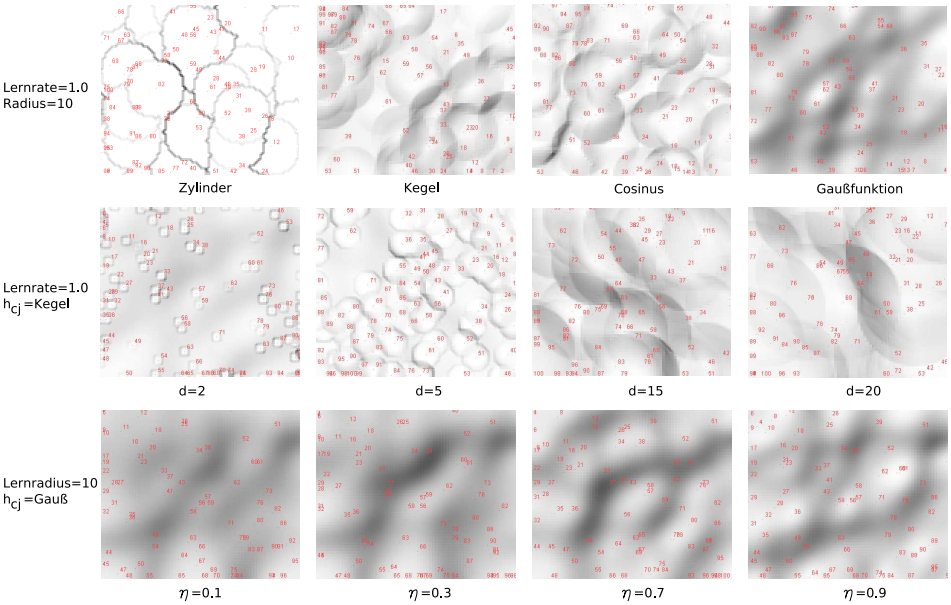


Abb. 10.32: Wirkung strategischer und numerischer Parameter, Visualisierungsart U-Matrix, Programm SOMARFF

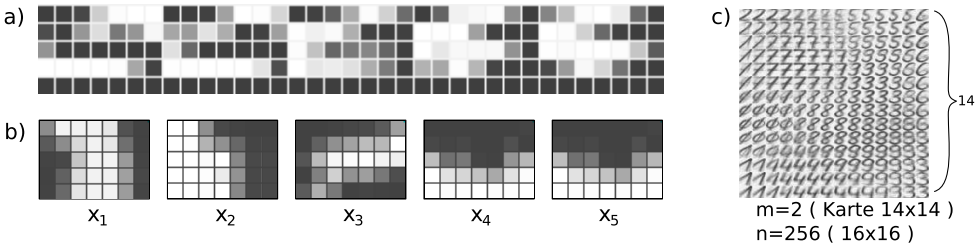


Abb. 10.33: Musterunabhängige Visualisierungen einer 5x7-Karte mit 5 Eingabeneuronen
a) Wichtungsmatrix b) Komponentenmatrizen der einzelnen Eingabeneuronen c) Wichtungsvektormatrix einer SOM zur Zeichenerkennung

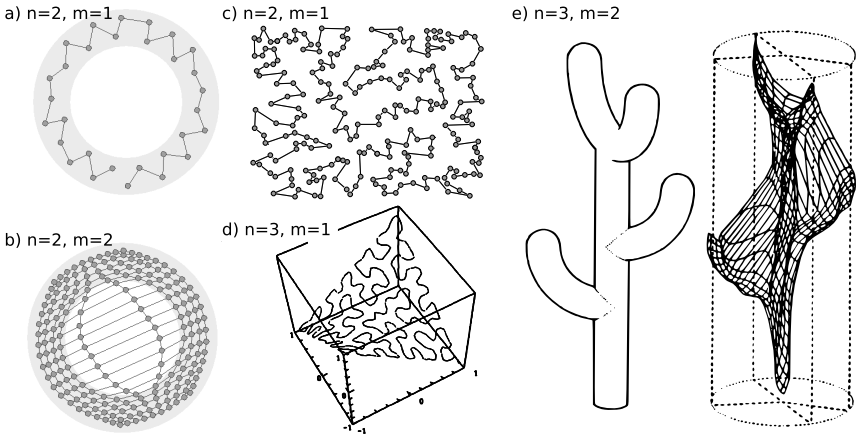


Abb. 10.34: Karte im Eingaberaum für verschiedene Dimensionen a) und b) Eingabemuster nur in grauen Bereichen, Applet DemoGNG c) Lösung eines TSPs mit 230 Städten d) Kette mit drei Eingabeneuronen (Ritter 03) e) Kaktus aus (Kohonen 01): links die 3-D-Verteilung der Eingabemuster, rechts die erzeugte 2-D-Karte

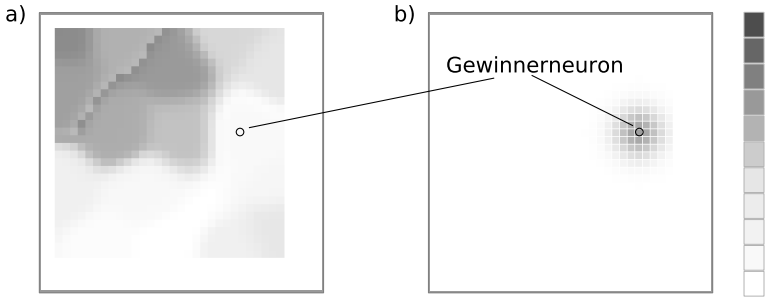


Abb. 10.35: Musterabhängige Visualisierungen a) Distanzmatrix b) Gewinnermatrix

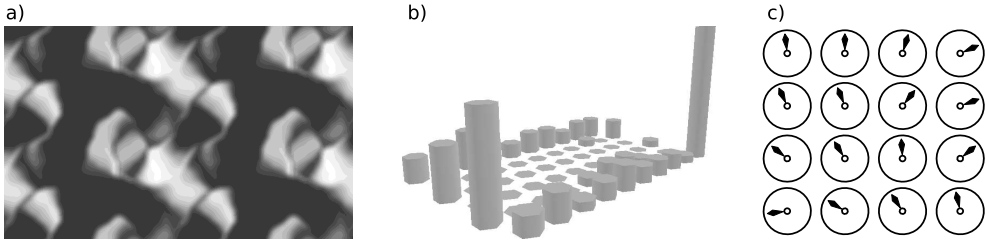


Abb. 10.36: Weitere SOM-Visualisierungen a) P-Matrix, Programm ESOM Analyzer b) Gewinnhistogramm, Programm NENET c) Wichtungsvektormatrix, nach (Kohonen 01)

11 Zeitliches Wissen

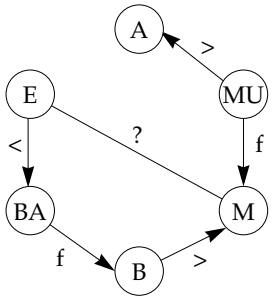


Abb. 11.1: Das temporale Constraintnetz für das Hausbau-Beispiel 11.2

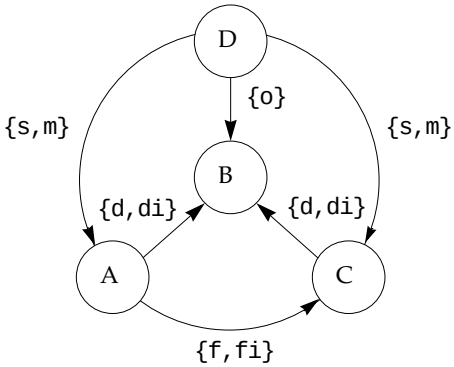


Abb. 11.2: Ein Beispiel zur Unvollständigkeit der Pfadkonsistenzmethode

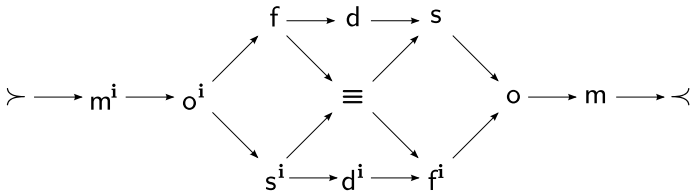


Abb. 11.3: Partielle Ordnung der Basisrelationen beim Nökel-Verband

12 Wissen über Situationen, Aktionen und Pläne

Abb. 12.1: Zwei mögliche Situationen in der Klötzchenwelt

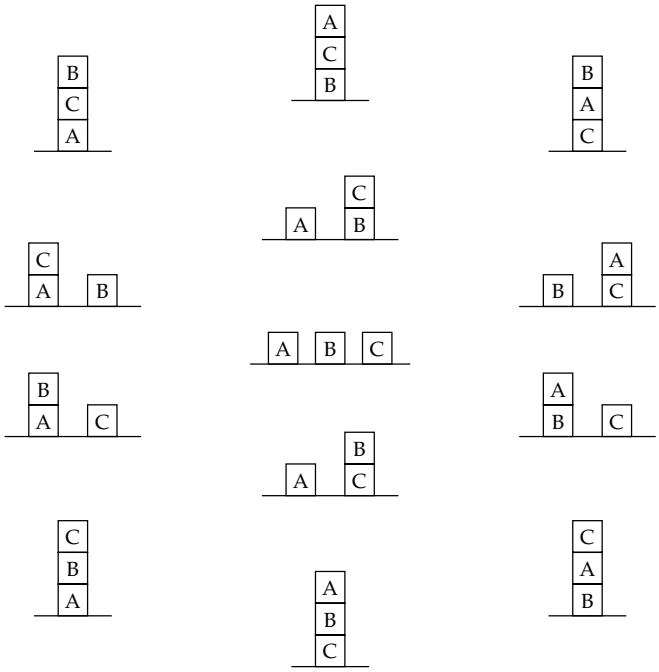


Abb. 12.2: Der vollständige Zustandsraum der aus drei Klötzchen bestehenden Klötzchenwelt

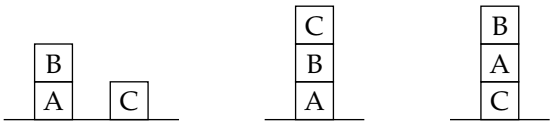


Abb. 12.3: In diesen drei Situationen gilt On(B, A).

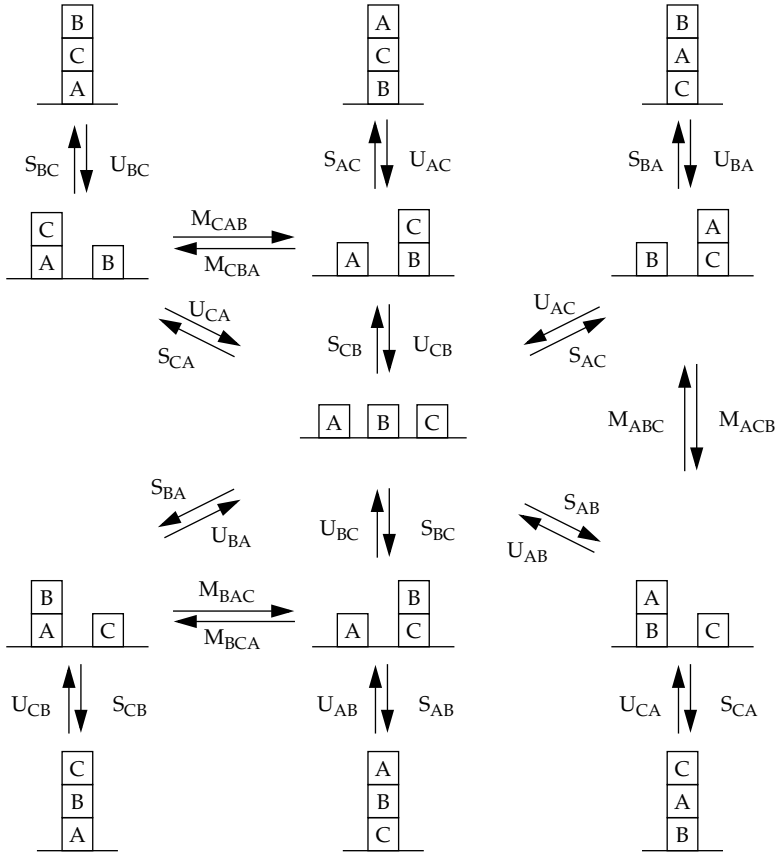


Abb. 12.4: Die Gesamtmenge aller Aktionen in unserer Klötzchenwelt

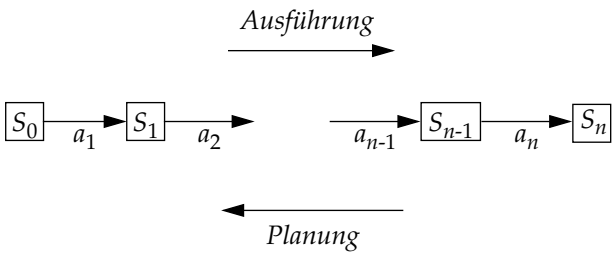


Abb. 12.5: Ausführen und Planen einer Aktionssequenz

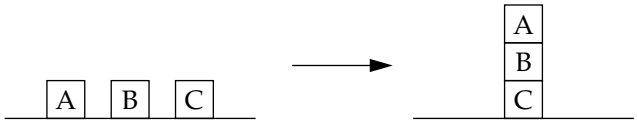


Abb. 12.6: Von S_0 nach G als Aufgabe für den STRIPS-Planer

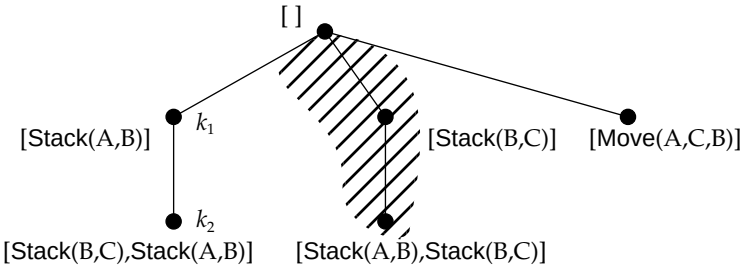


Abb. 12.7: Suchbaum für das Problem aus Abbildung 12.6

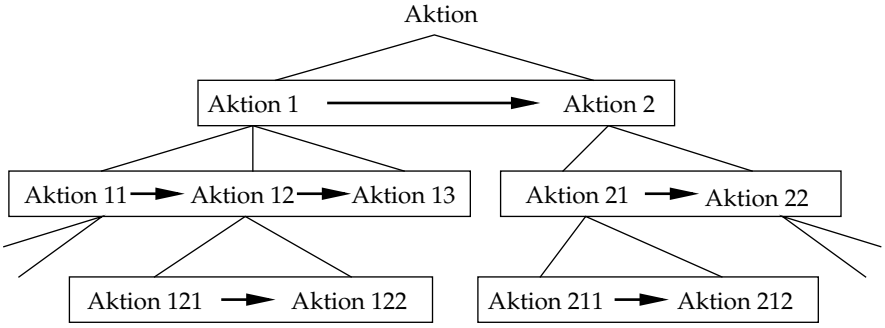


Abb. 12.8: Dekomposition von Aktionssequenzen

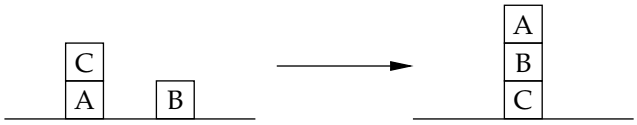


Abb. 12.9: Die Sussman-Anomalie

Quellenverzeichnis

[Frowd & Hancock 07] C. **Frowd** und P. **Hancock**. *Evolving human faces.* In: P. Machado und J. Romero (Hrsg.), Art and Artificial Evolution. 2007. to appear.

[Greguss 76] F. **Greguss**. *Patente der Natur. Unterhaltsames aus der Bionik.* Verlag Neues Leben Berlin, 1976.

[Hornby & Pollack 01] G. S. **Hornby** und J. B. **Pollack**. *The Advantages of Generative Grammatical Encodings for Physical Design.* In: Proceedings of the 2001 Congress on Evolutionary Computation CEC2001, pp. 600–607. IEEE Press, 2001.

[Kohonen 01] T. **Kohonen**. *Self-Organizing Maps.* Springer, 3. Auflage, 2001.

[Kratzer 90] K. P. **Kratzer**. *Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen.* Hanser Fachbuch, 2. Auflage, 1990.

[Merzenich et al. 84] M. M. **Merzenich**, R. J. **Nelson**, M. P. **Stryker**, M. S. **Cynader**, A. **Schoppmann** und J. M. **Zook**. *Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys.* The Journal of Comparative Neurology, 224(4):591–605, 1984.

[Penfield & Rasmussen 50] W. **Penfield** und T. **Rasmussen**. *The Cerebral Cortex of Man. A Clinical Study of Localization of Function.* New York: Macmillan, 1950.

[Reichert 00] H. **Reichert**. *Neurobiologie.* Stuttgart: Thieme, 2. Auflage, 2000.

[Ritter 03] H. **Ritter**. *Self-Organizing Feature Maps.* In: M. A. Arbib (Hrsg.), The Handbook of Brain Theory and Neural Networks, pp. 1005–1010. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2. Auflage, 2003.

[Sutton & Barto 98] R. S. **Sutton** und A. G. **Barto**. *Reinforcement Learning I: An Introduction.* Cambridge: MIT Press, 1998. `http://www.cs.ualberta.ca/~sutton/book/the-book.html`, Stand 02/2007.

[Zell 03] A. **Zell**. *Simulation neuronaler Netze.* Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 4. Auflage, 2003.