

---

# **Künstliche Intelligenz für Ingenieure**

---

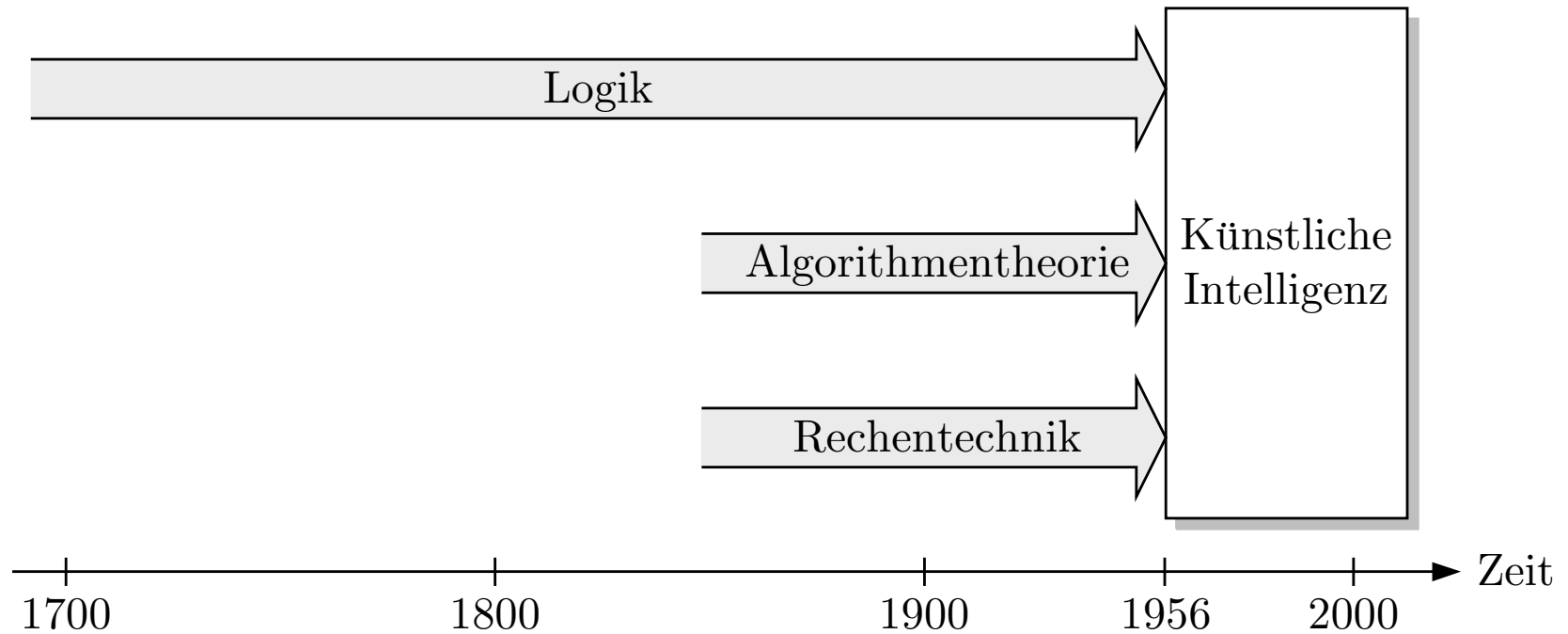
Methoden zur Lösung ingenieurtechnischer Probleme mit Hilfe von  
Regeln, logischen Formeln und Bayesnetzen

---

von  
Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze

---

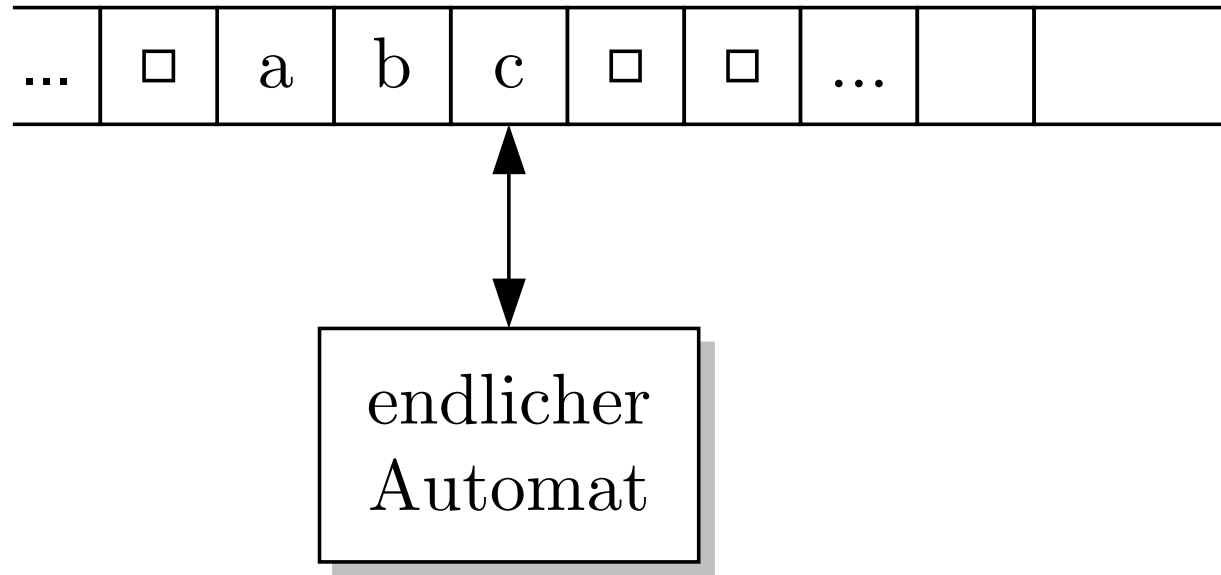
Alle Abbildungen in A4-Vergrößerung



**Abb. 1.1. Ausgangspunkte für die Entwicklung der Künstlichen Intelligenz**

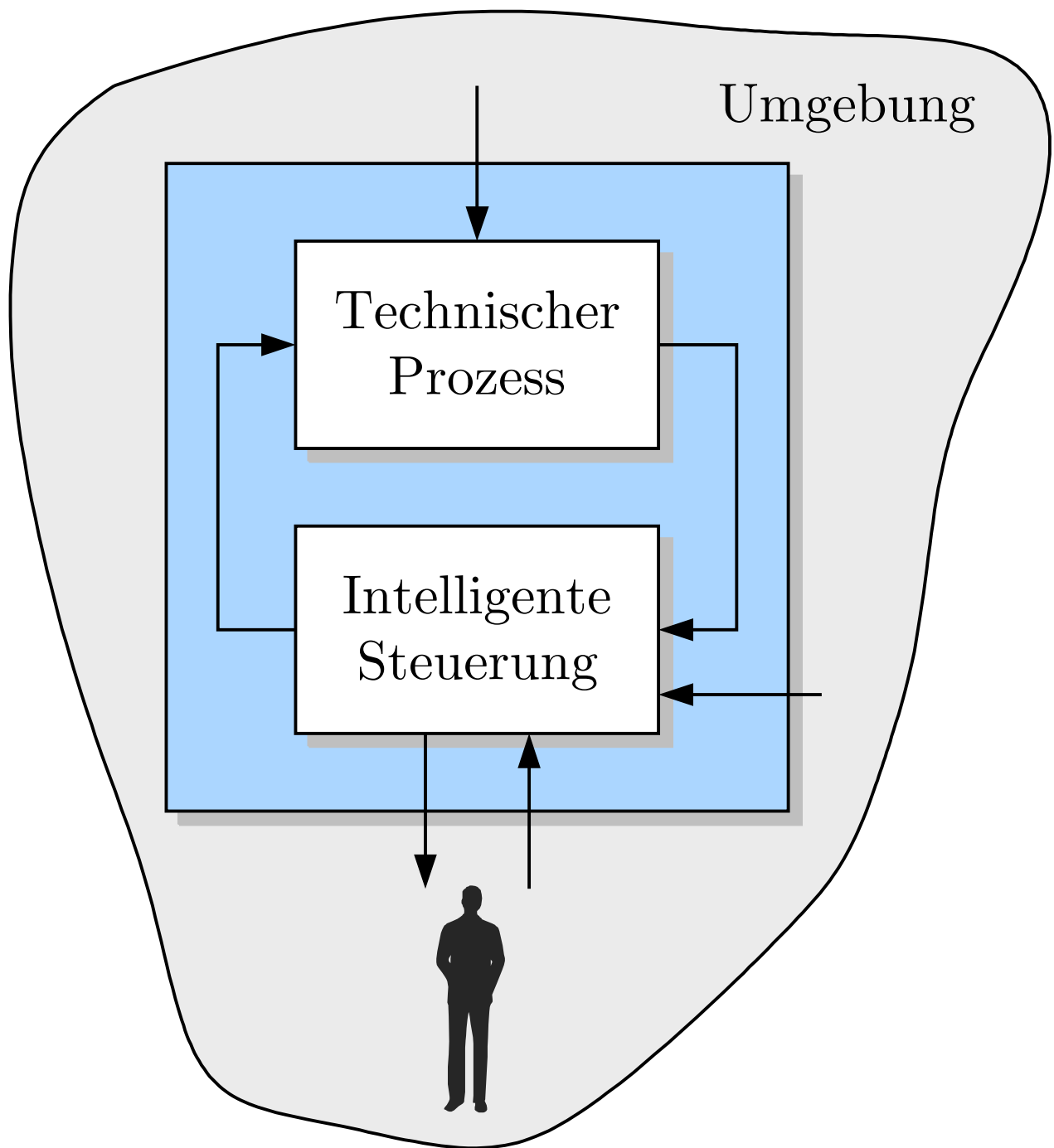
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

Unendliches  
Band



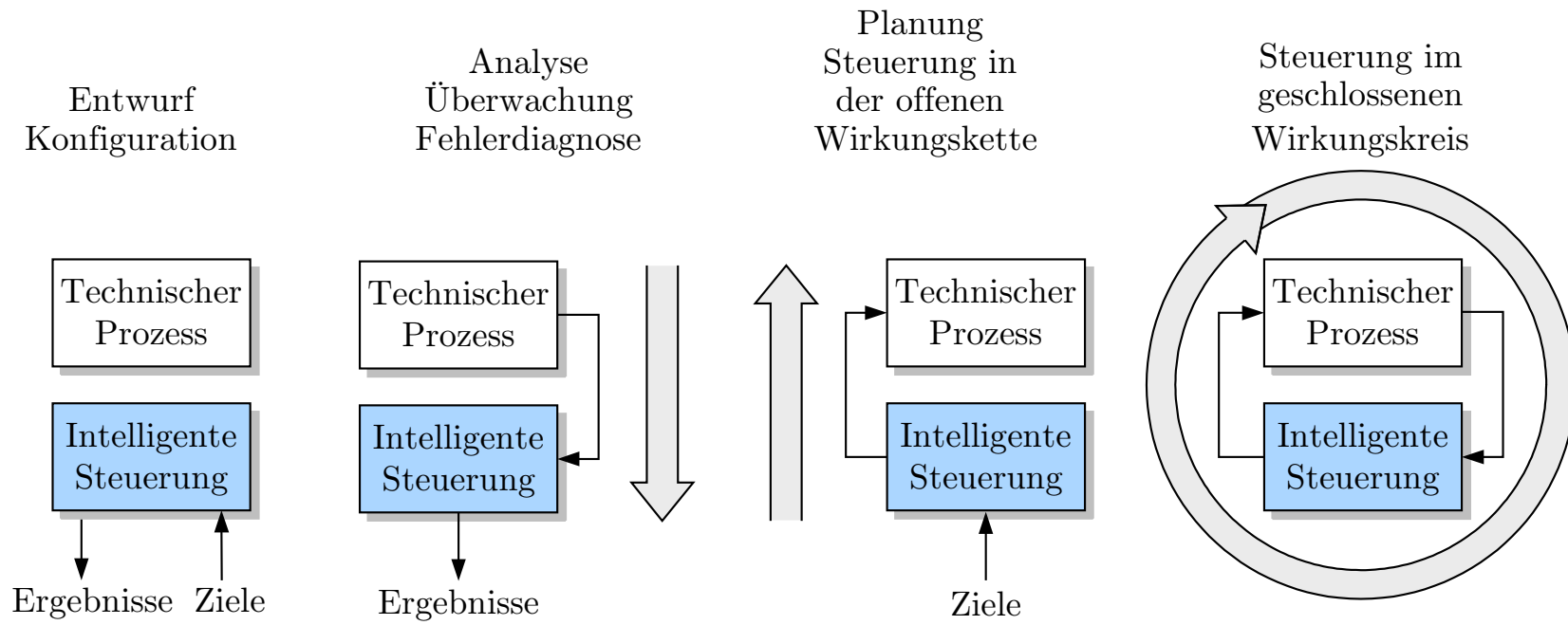
**Abb. 1.2. Turingmaschine**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



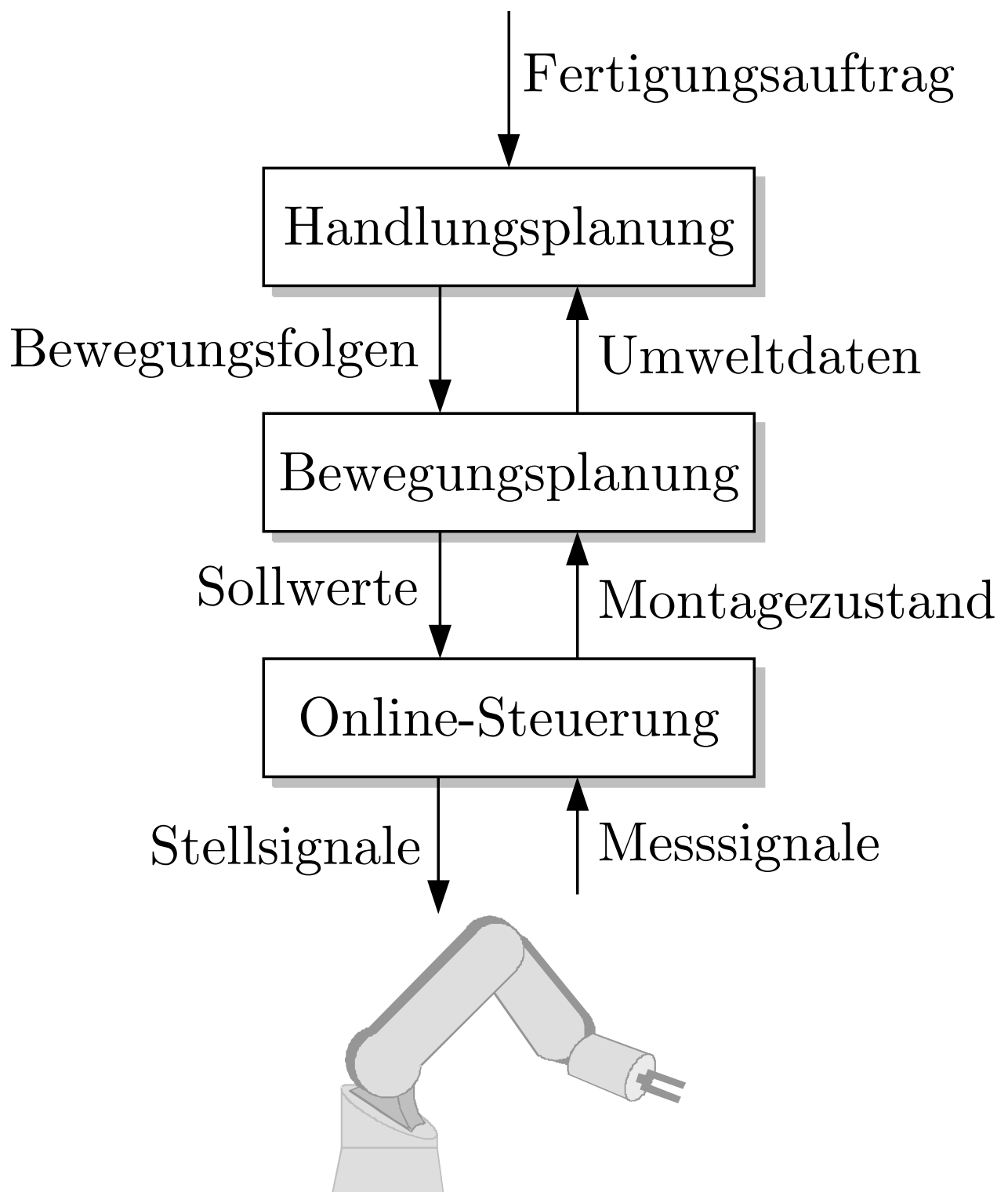
**Abb. 1.3: Grundstruktur intelligenter technischer Systeme**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



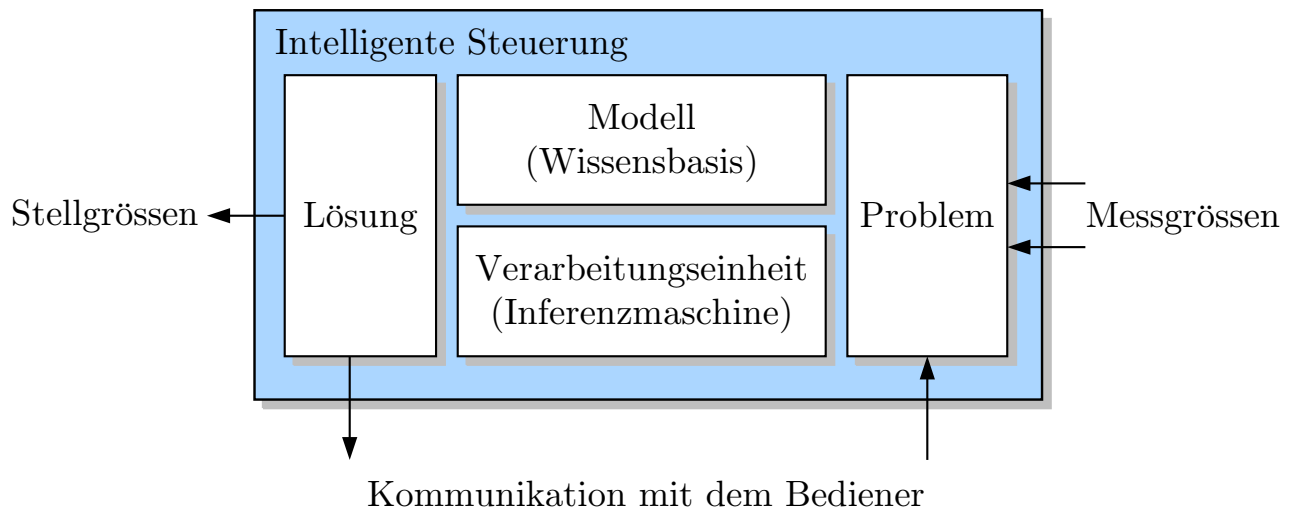
**Abb. 1.4. Aufgabenklassen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



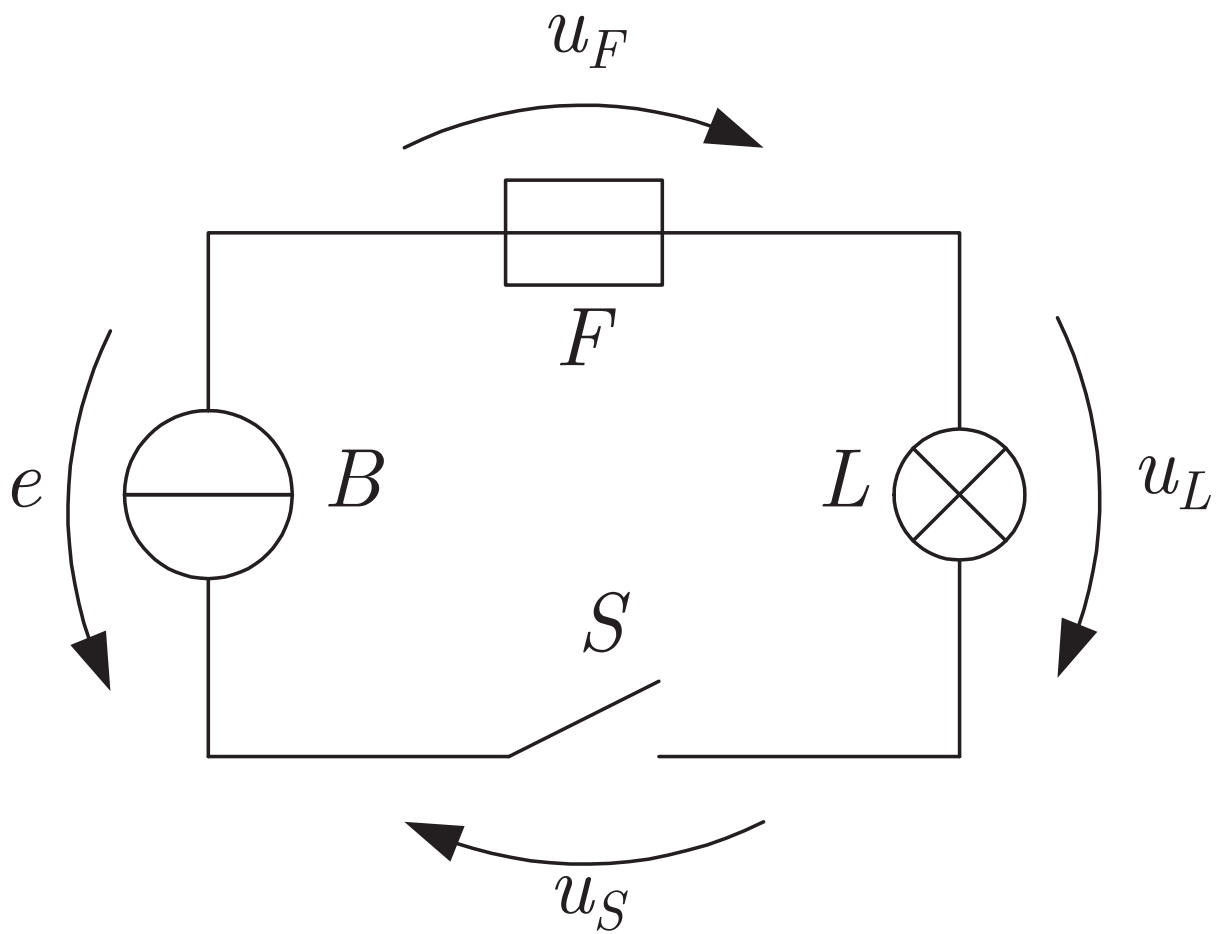
**Abb. 1.5: Hierarchische Struktur von Robotersteuerungen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 1.6: Intelligente Steuerung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

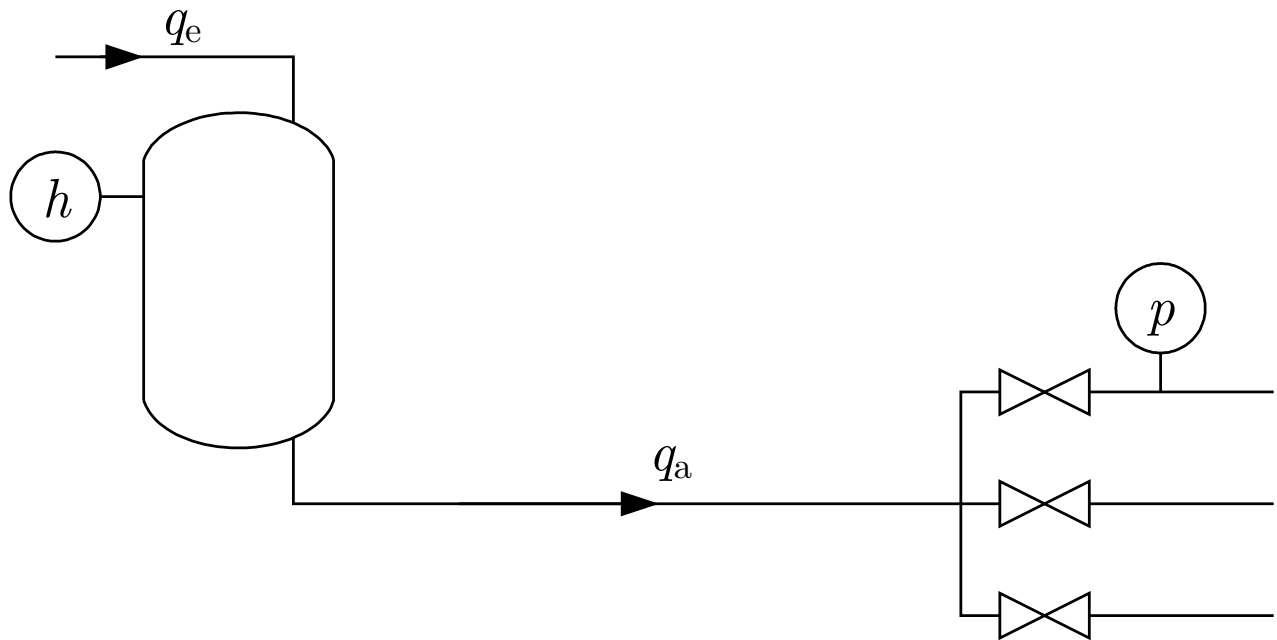


**Abb. 1.7: Schaltplan einer Heckleuchte**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

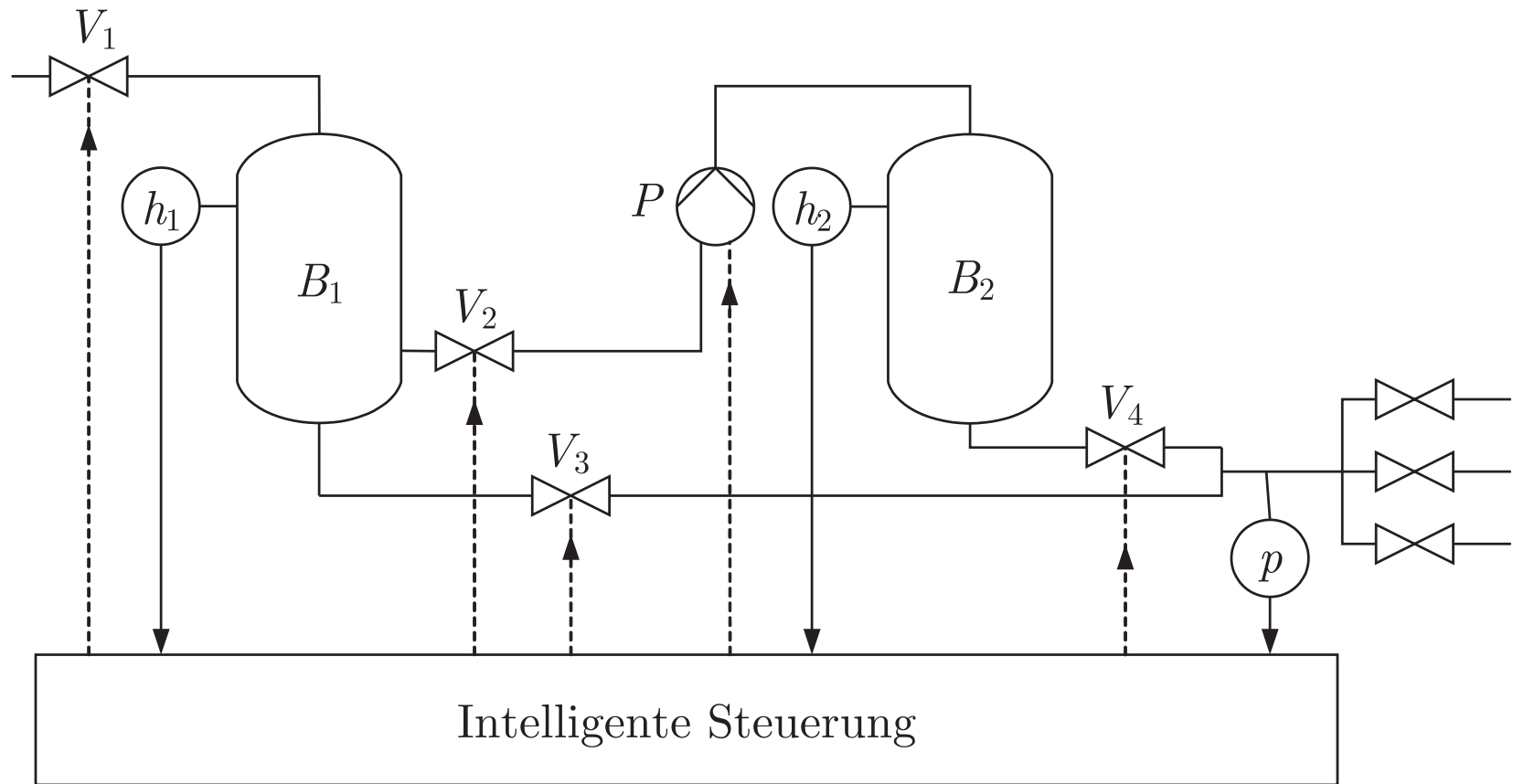


Vorratsbehälter    Versorgungsnetz    Verbraucher



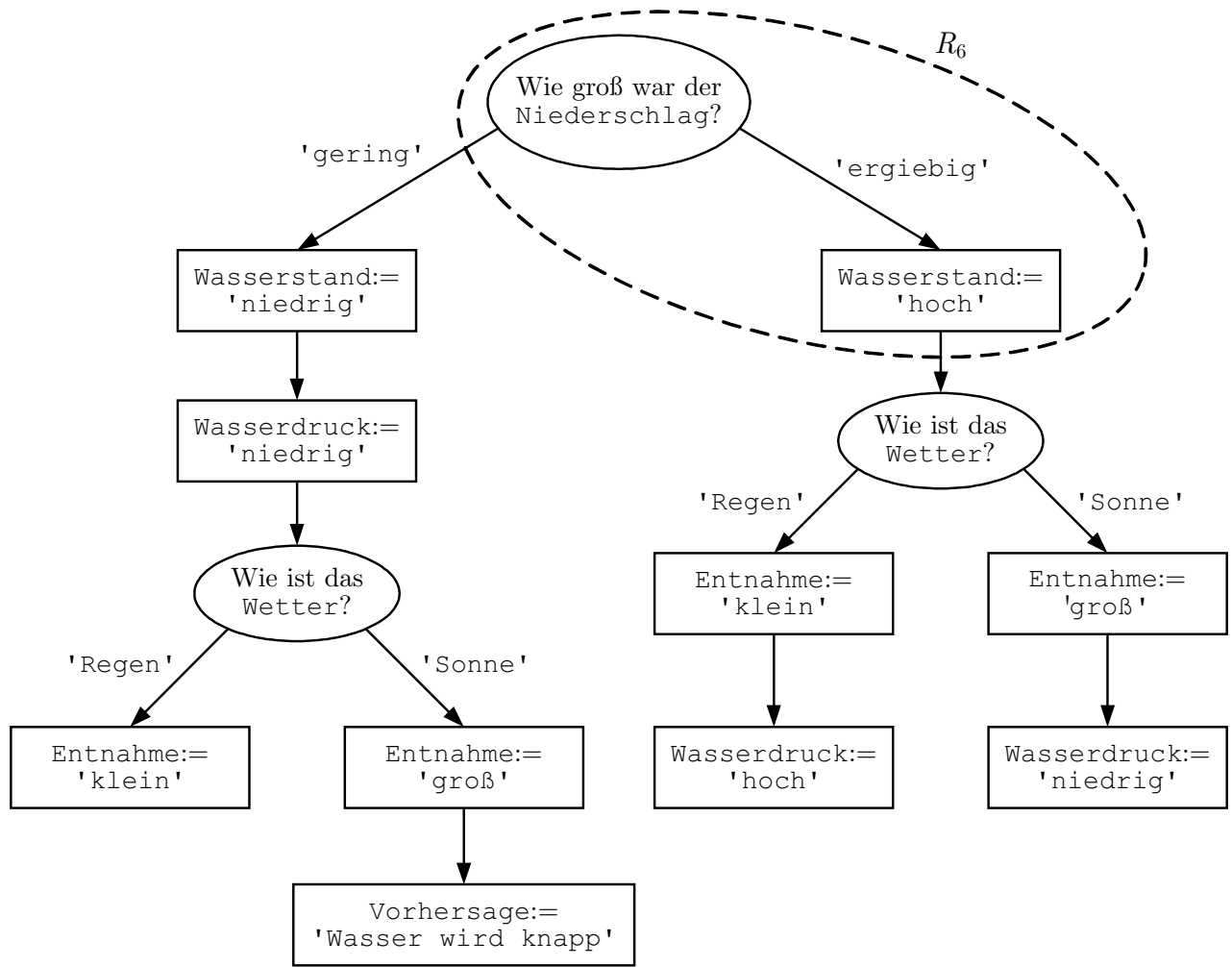
**Abb. 2.1: Wasserversorgungssystem**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



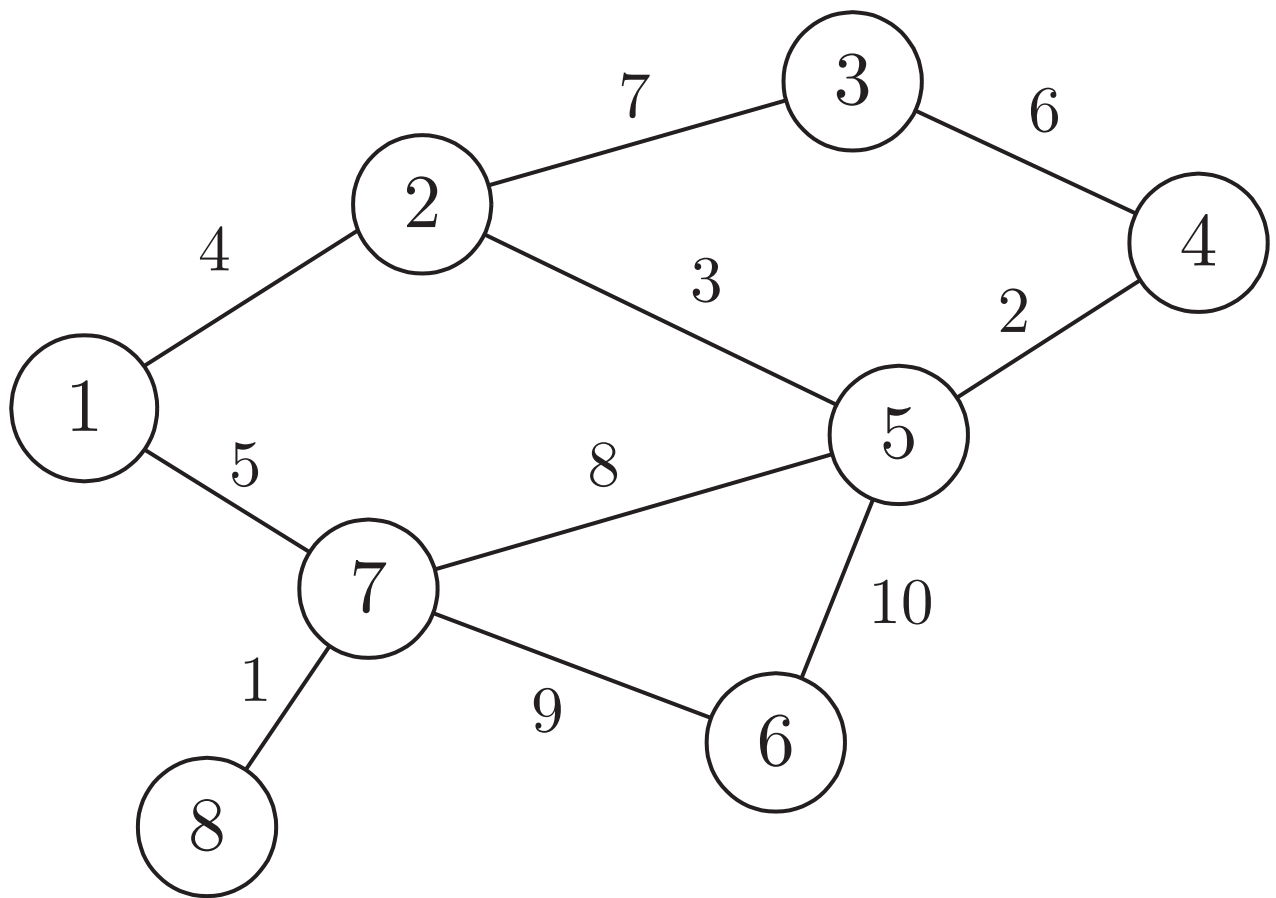
**Abb. 2.2. Überwachung und Steuerung eines Wasserversorgungssystems**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



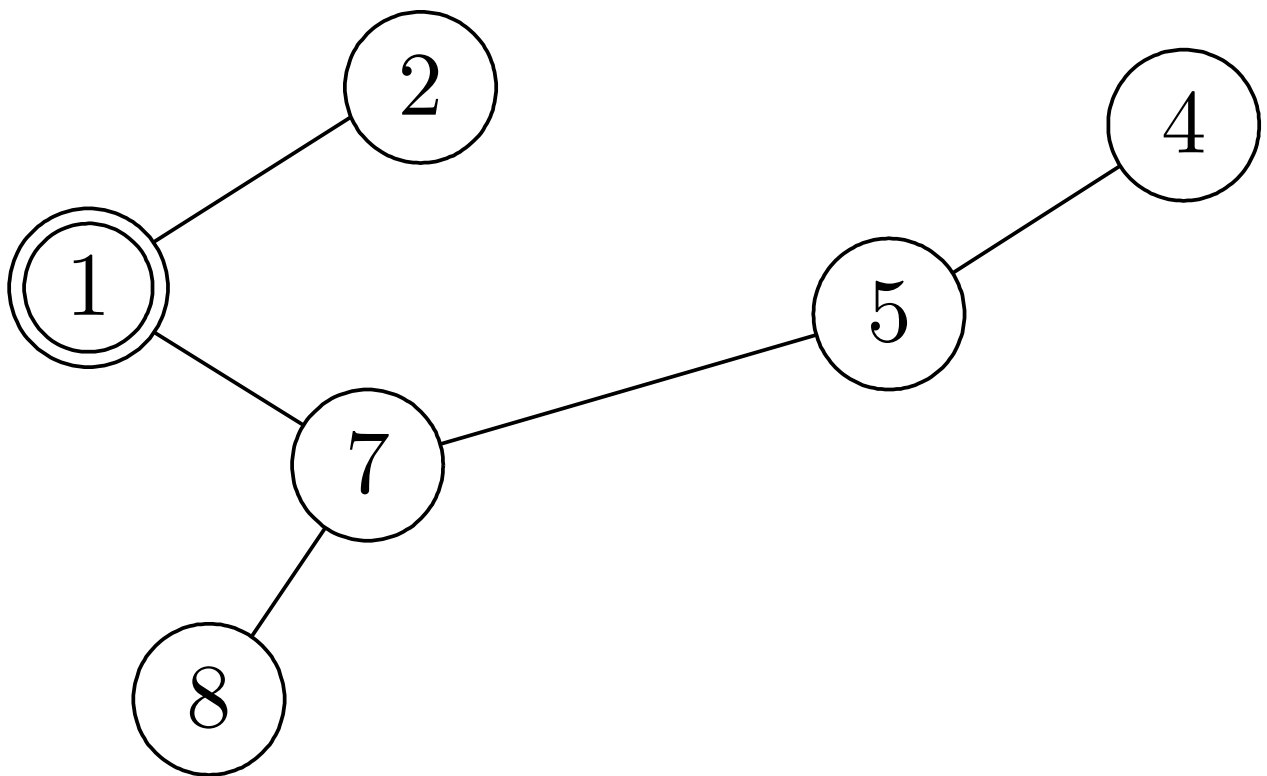
**Abb. 2.3: Entscheidungsbaum**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



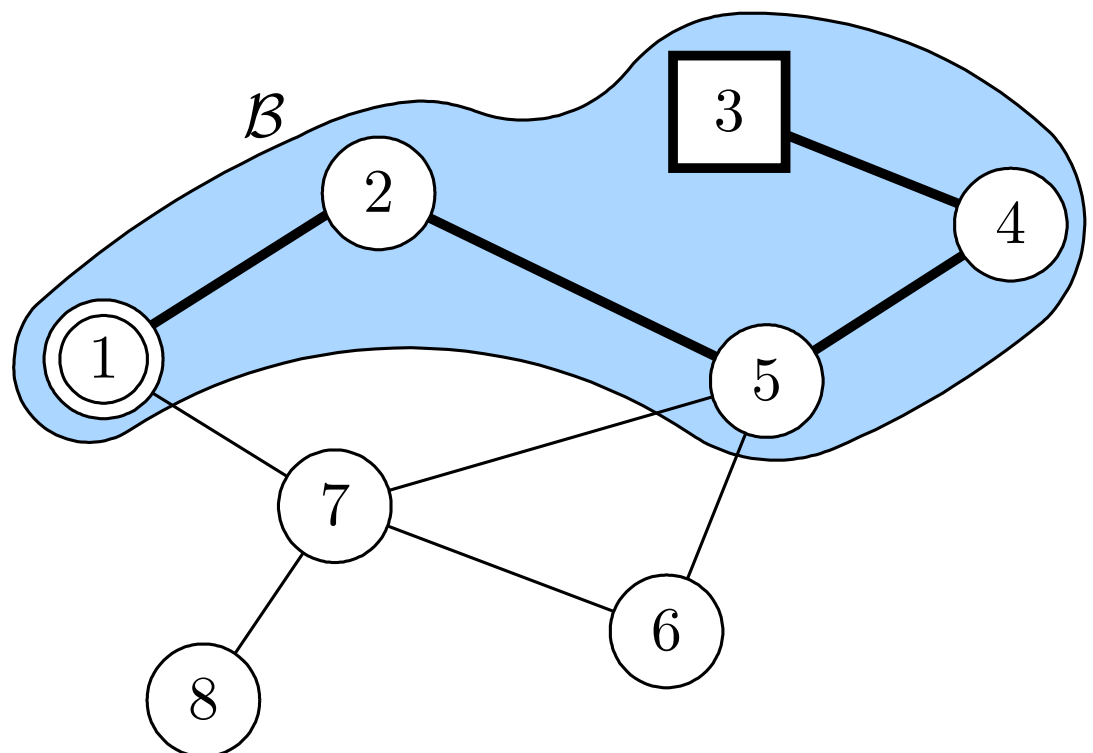
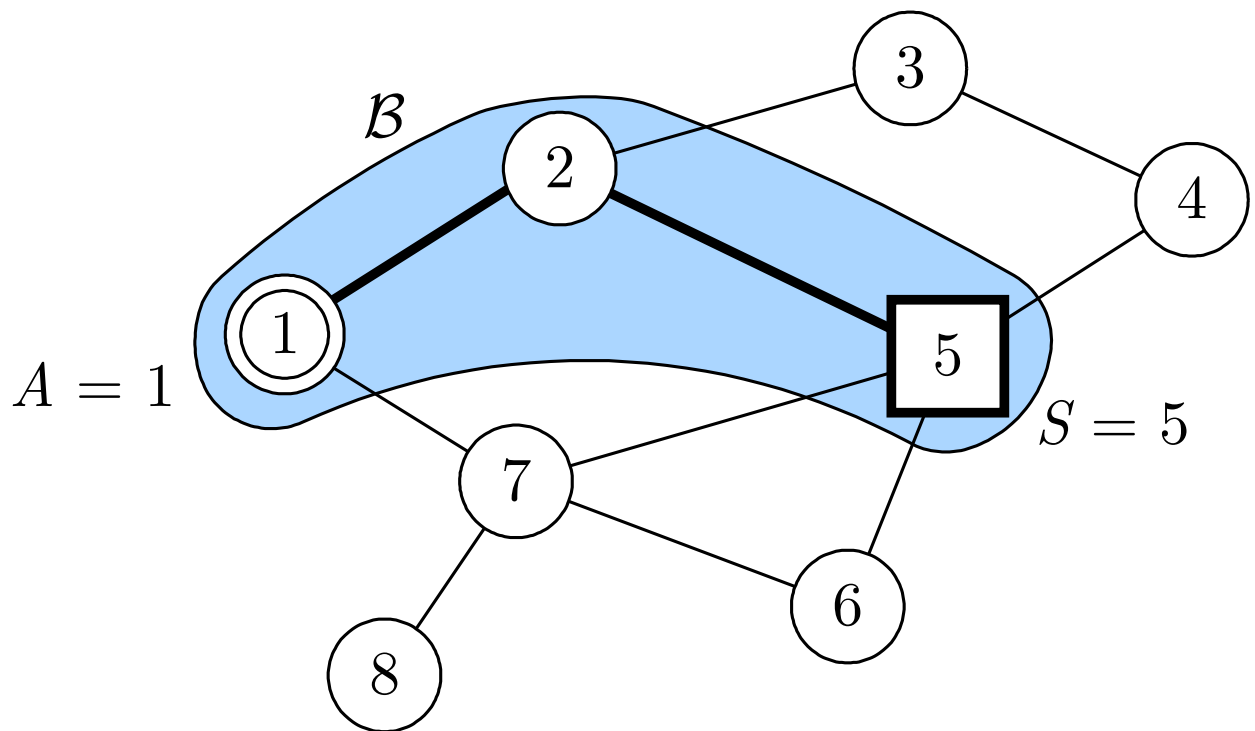
**Abb. 3.1: Graph**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



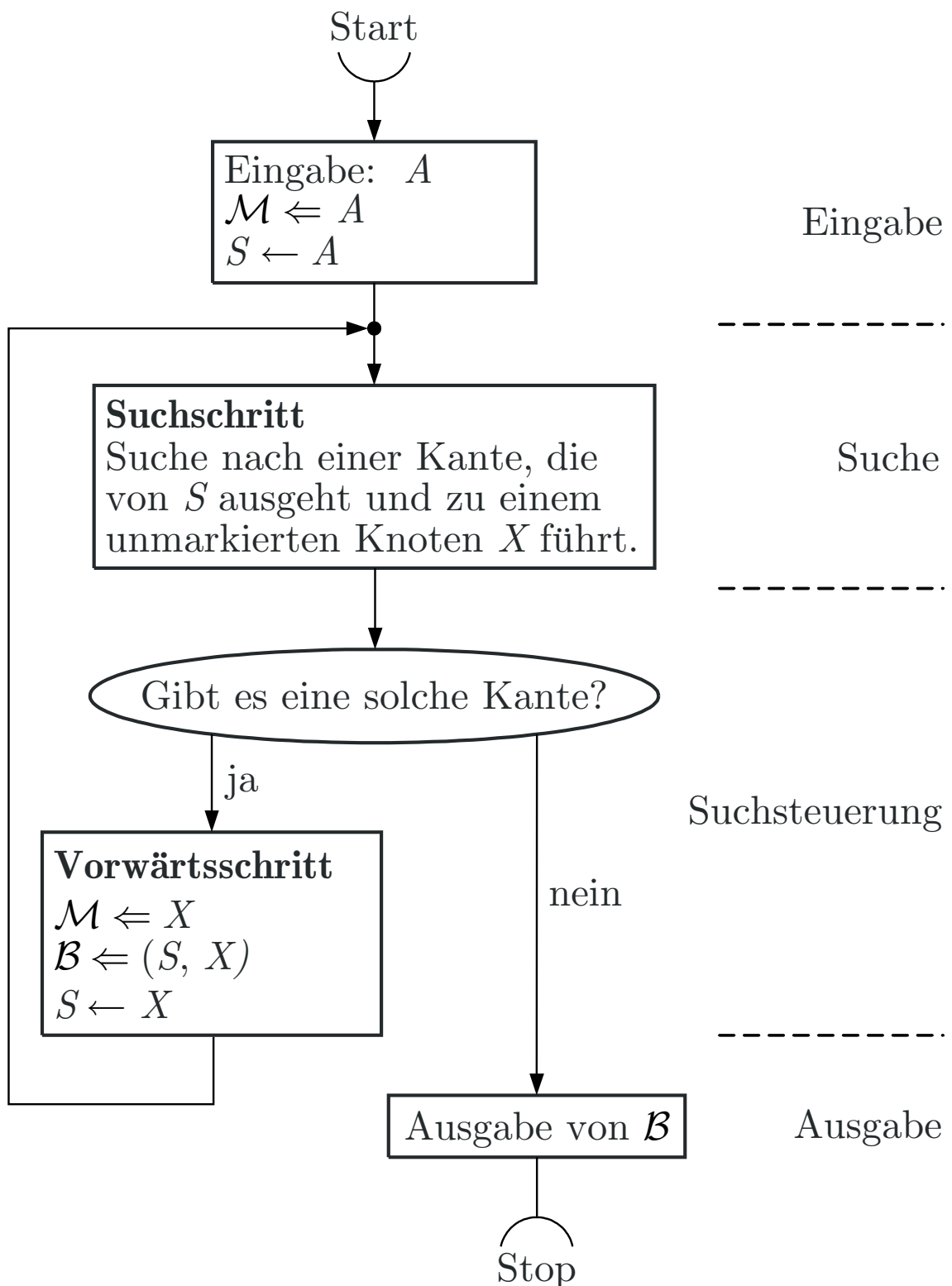
**Abb. 3.2: Baum mit Wurzelknoten 1**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



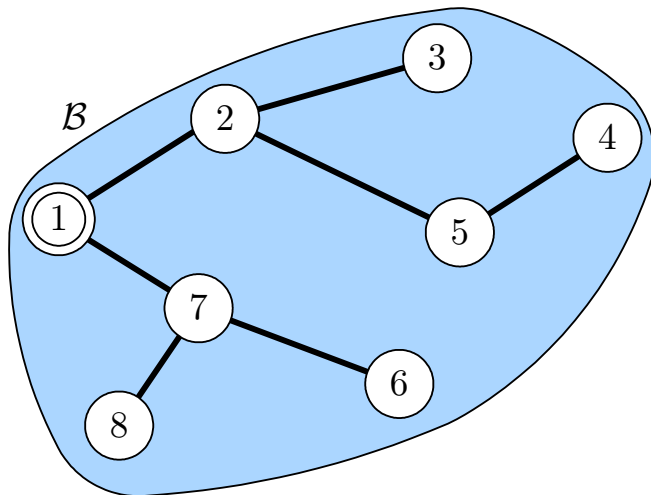
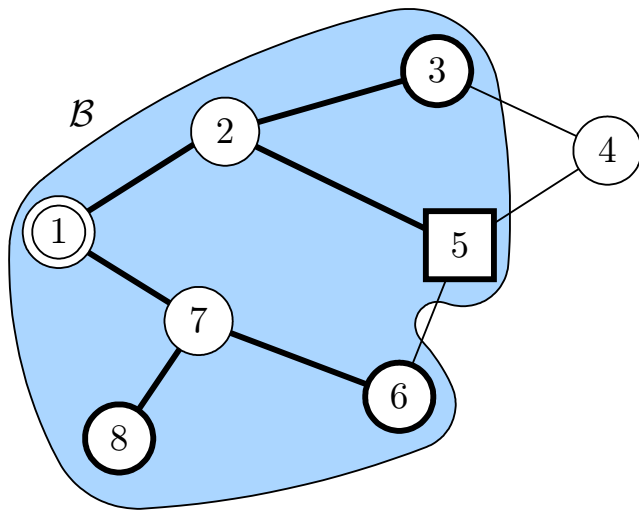
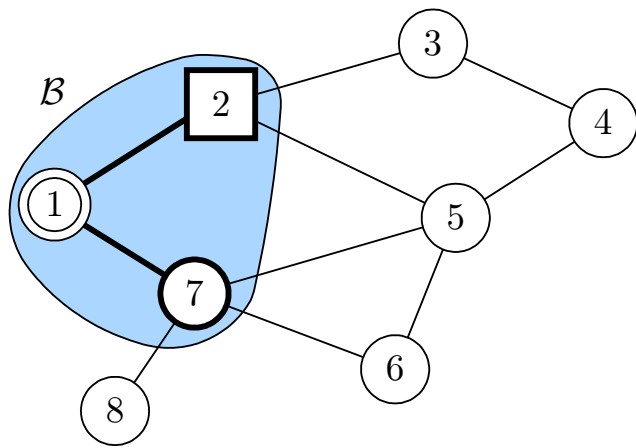
**Abb. 3.3: Zwischenergebnis (oben) und Ergebnis (unten) der Geradeaussuche**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.4. Algorithmus der Geradeausuche**

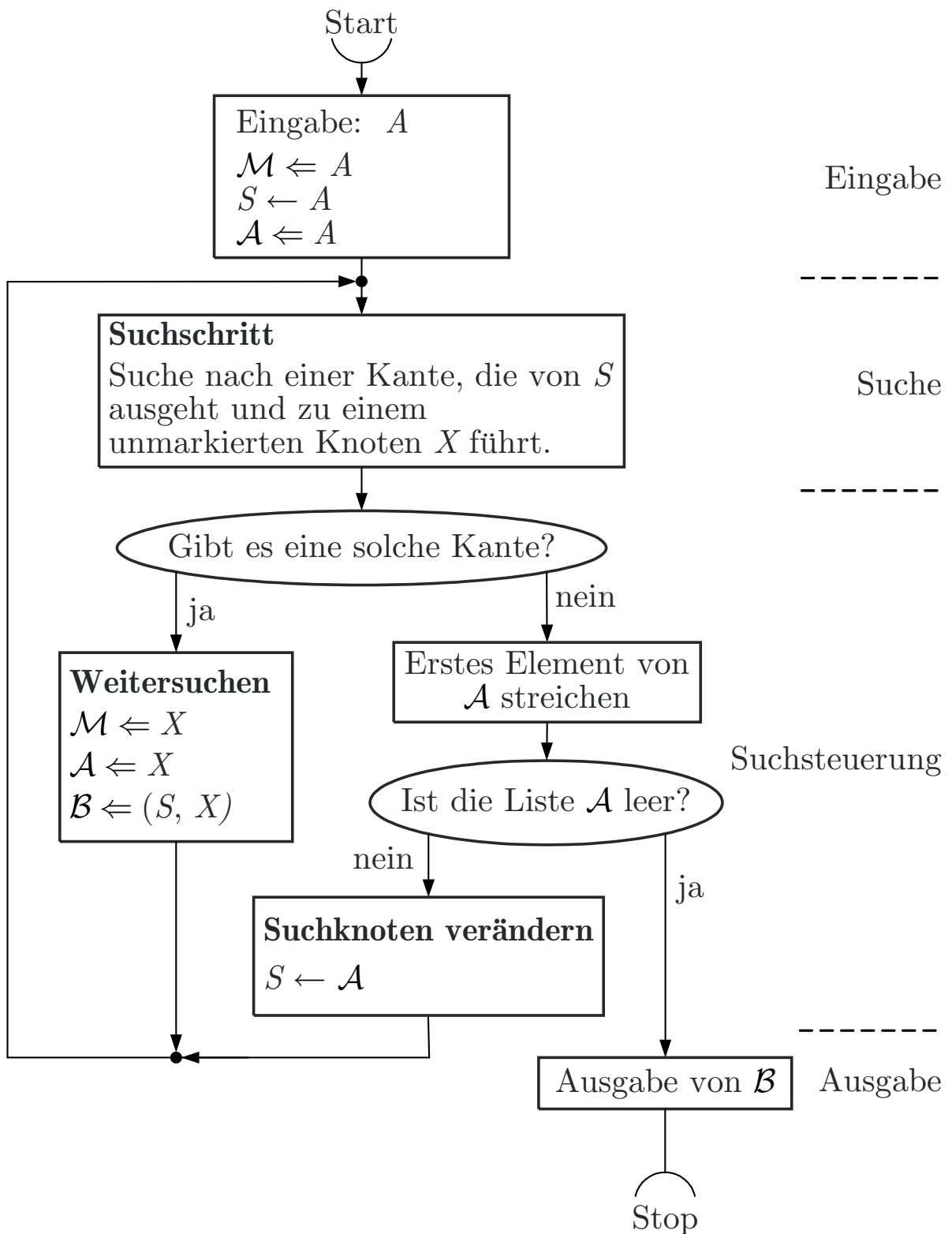
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.5. Zwischenergebnisse (oben und Mitte) und Ergebnis (unten) der Breite-zuerst-Suche**

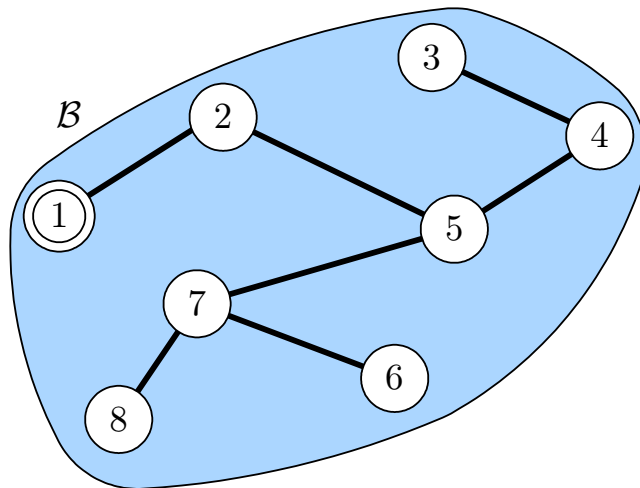
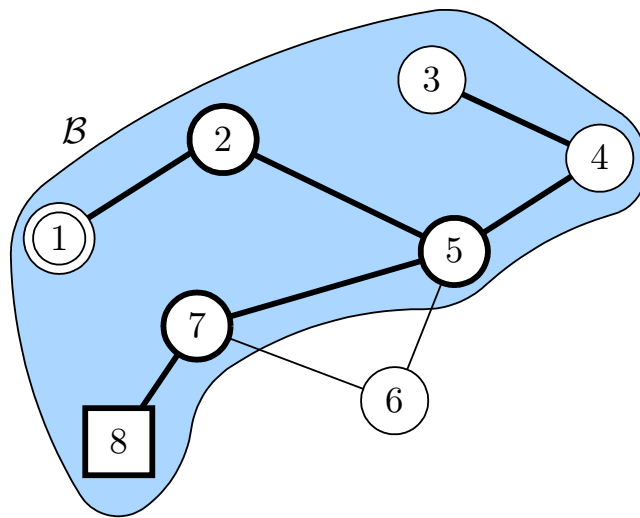
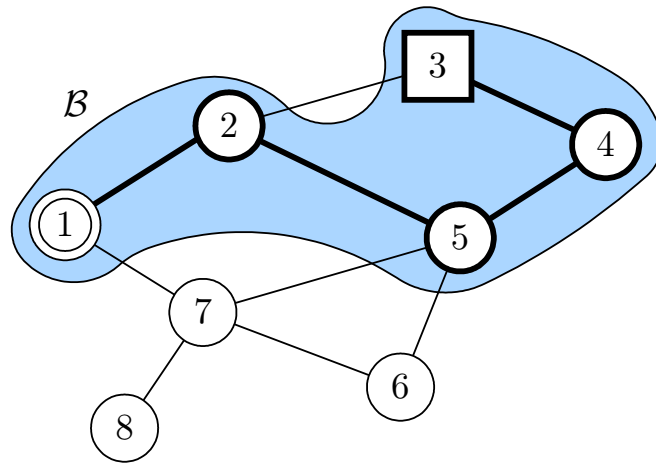
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





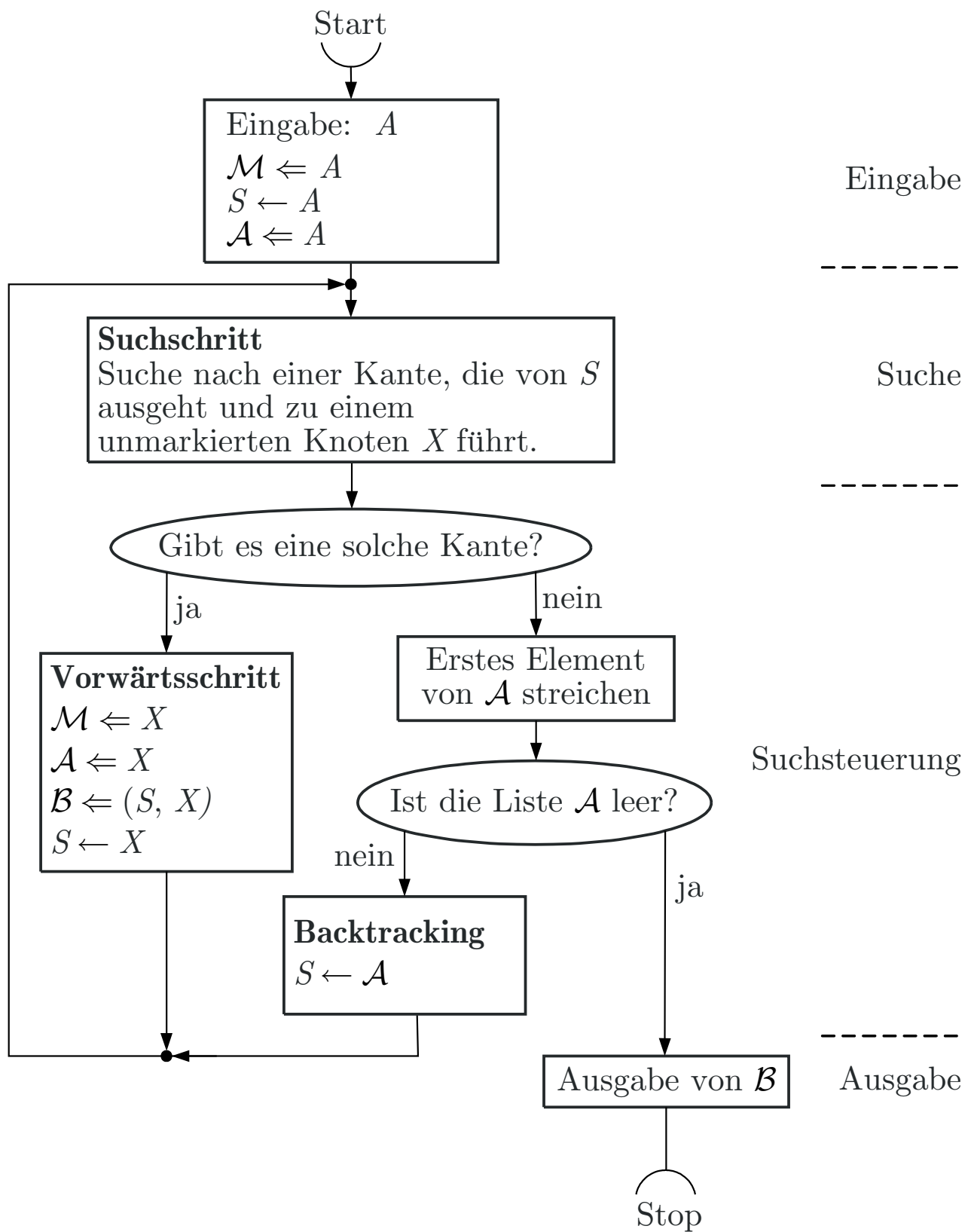
**Abb. 3.6. Algorithmus der Breite-zuerst-Suche**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



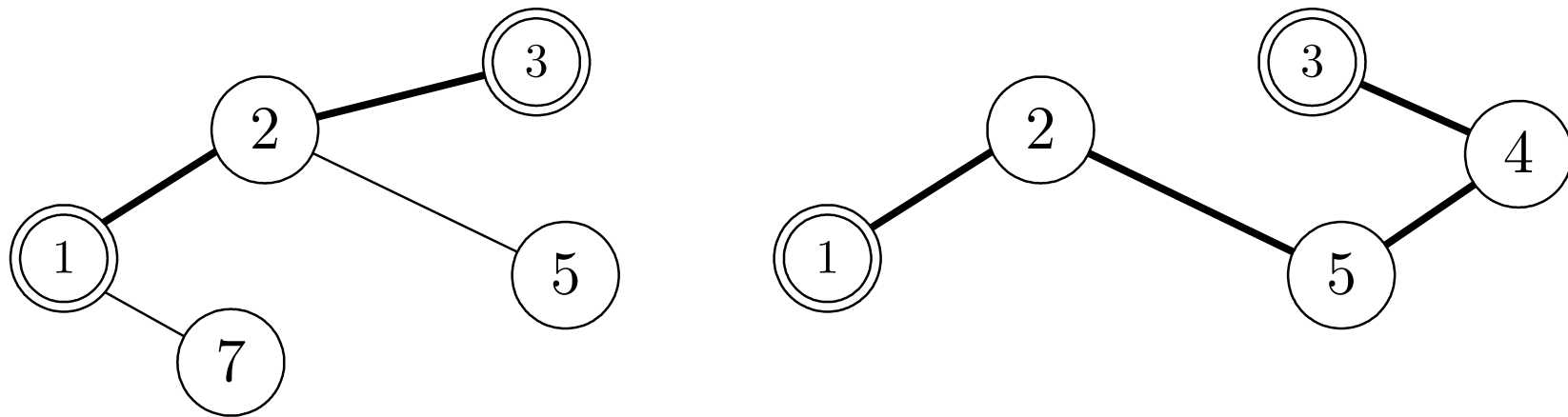
**Abb. 3.7. Zwischenergebnisse (oben und Mitte) und Ergebnis (unten) der Tiefe-zuerst-Suche**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



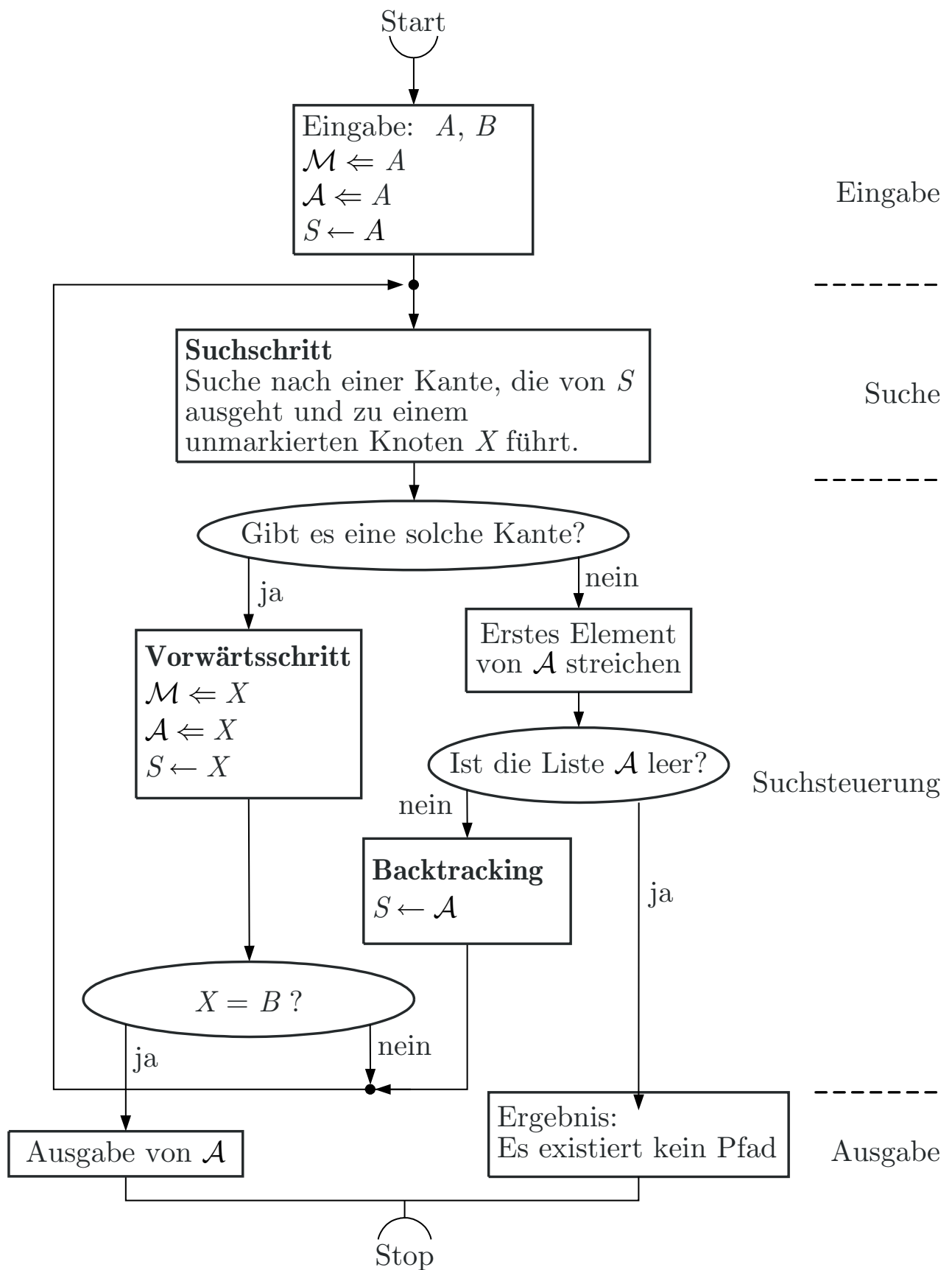
**Abb. 3.8: Algorithmus der Tiefe-zuerst-Suche**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

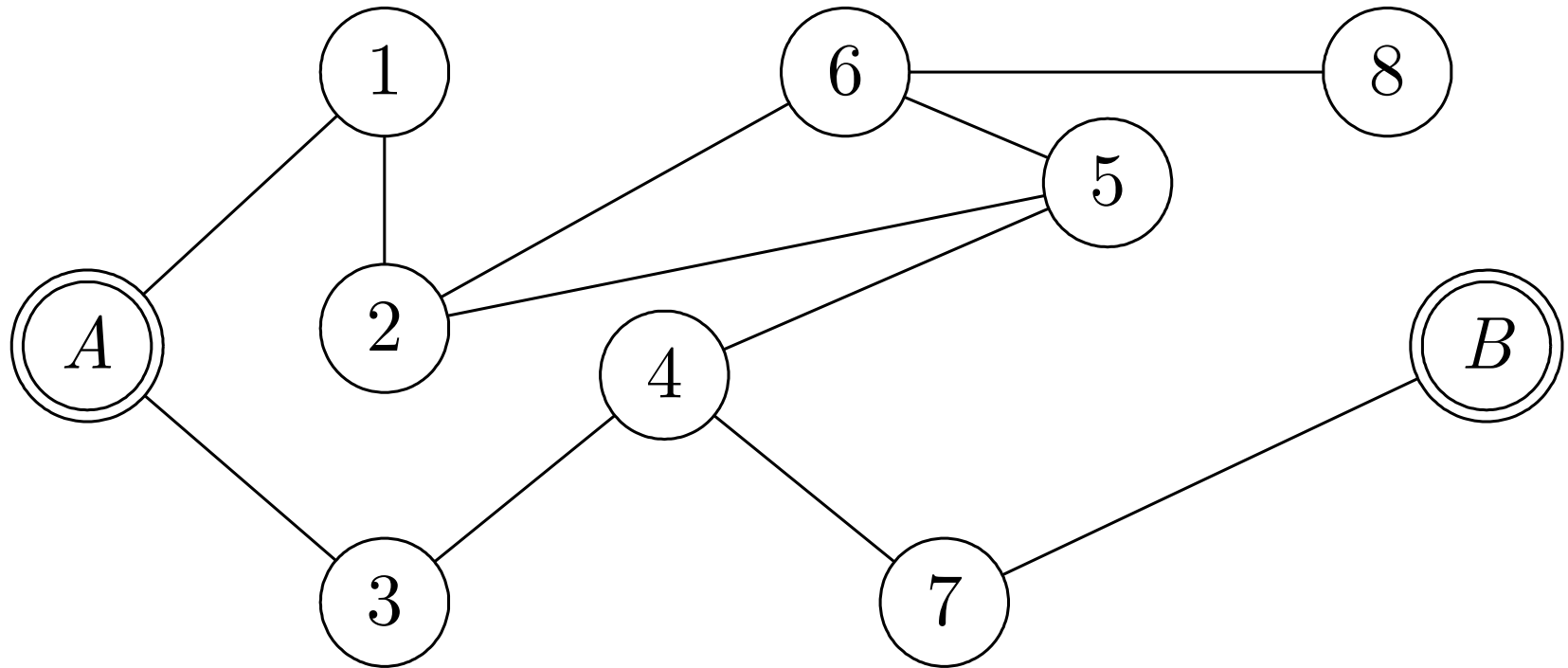


**Abb. 3.9. Pfade vom Knoten 1 zum Knoten 3, die bei der Breite-zuerst-Suche (links) und bei der Tiefe-zuerst-Suche (rechts) entstehen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

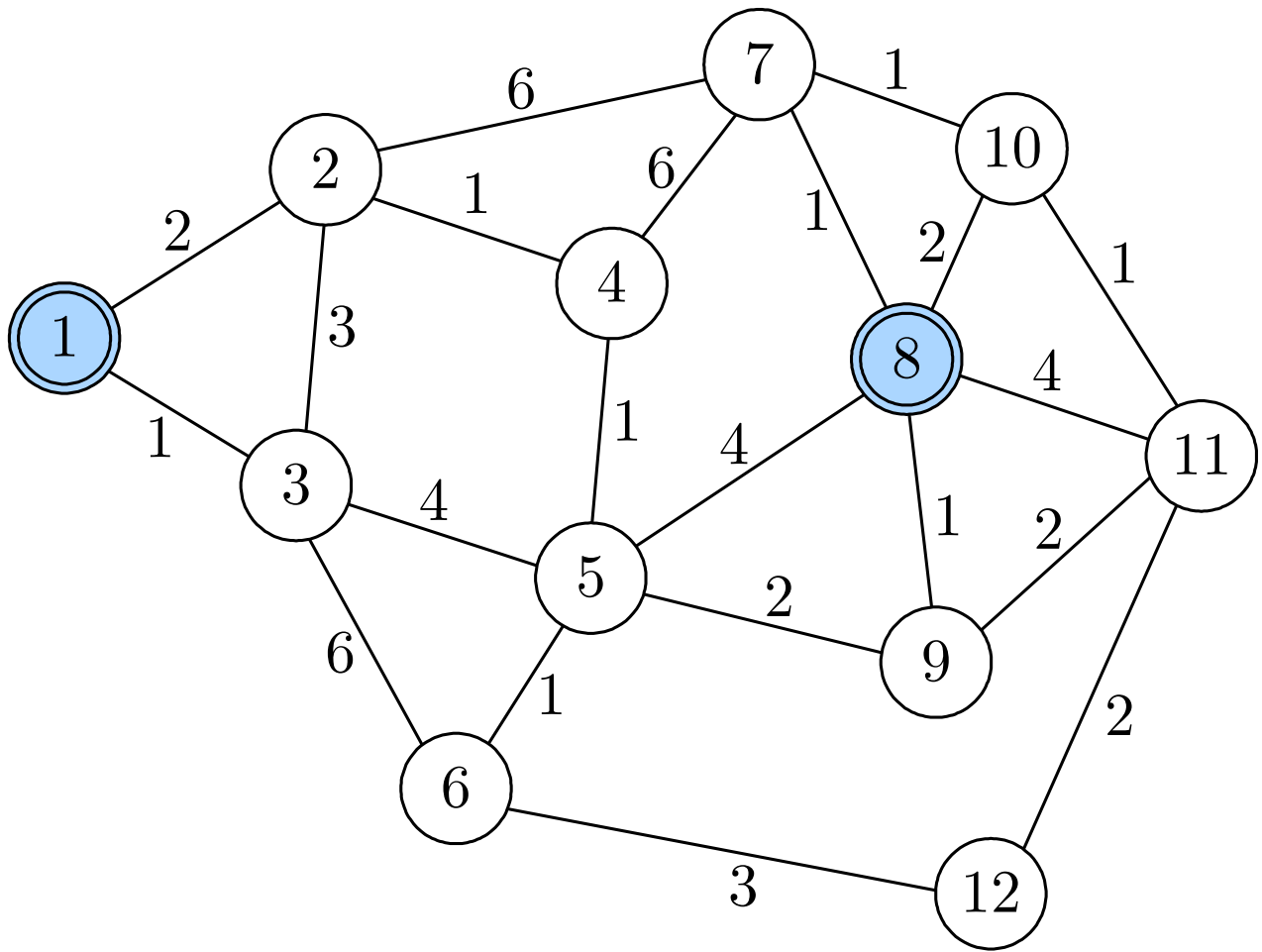


**Abb. 3.10: Tiefe-zuerst-Suche eines Pfades**



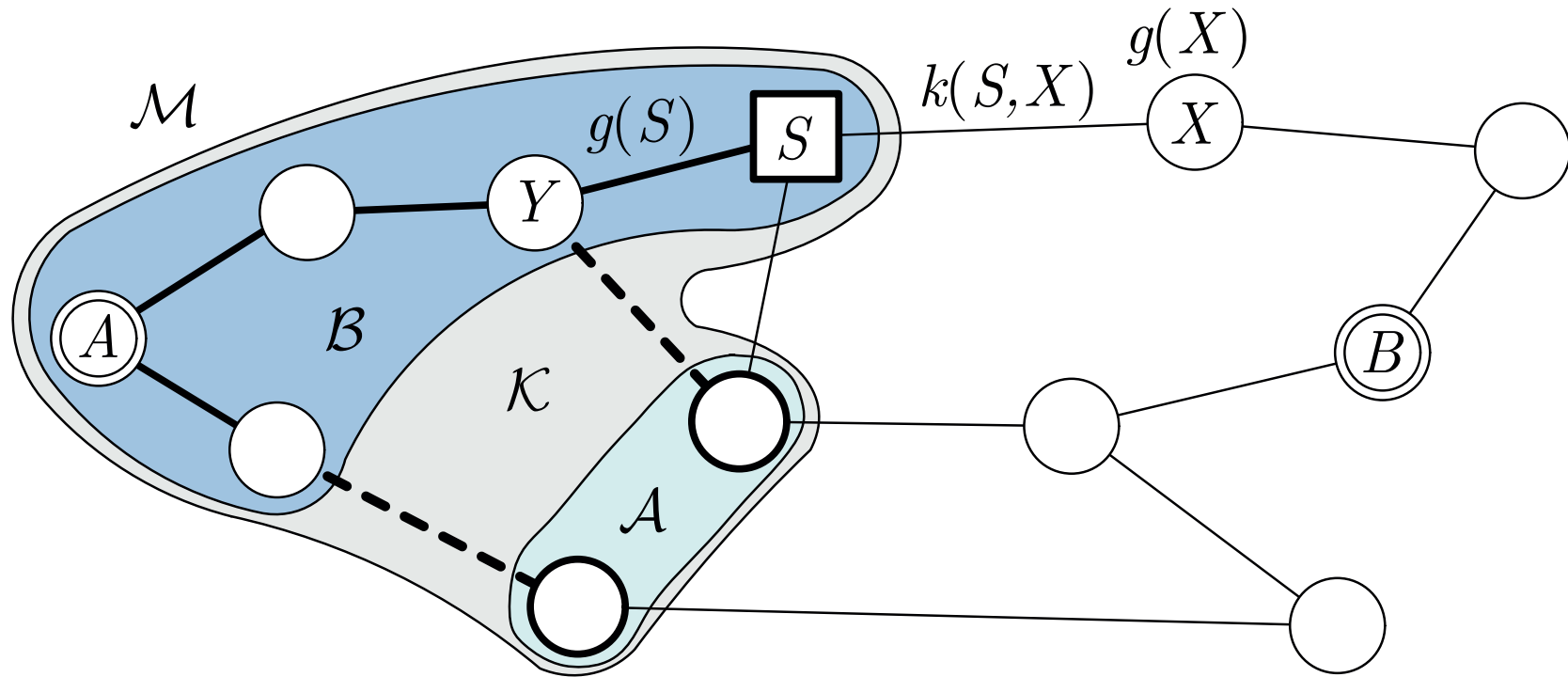
**Abb. 3.11. Ungerichteter Graph mit Startknoten  $A$  und Zielknoten  $B$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.12: Gewichteter Graph**

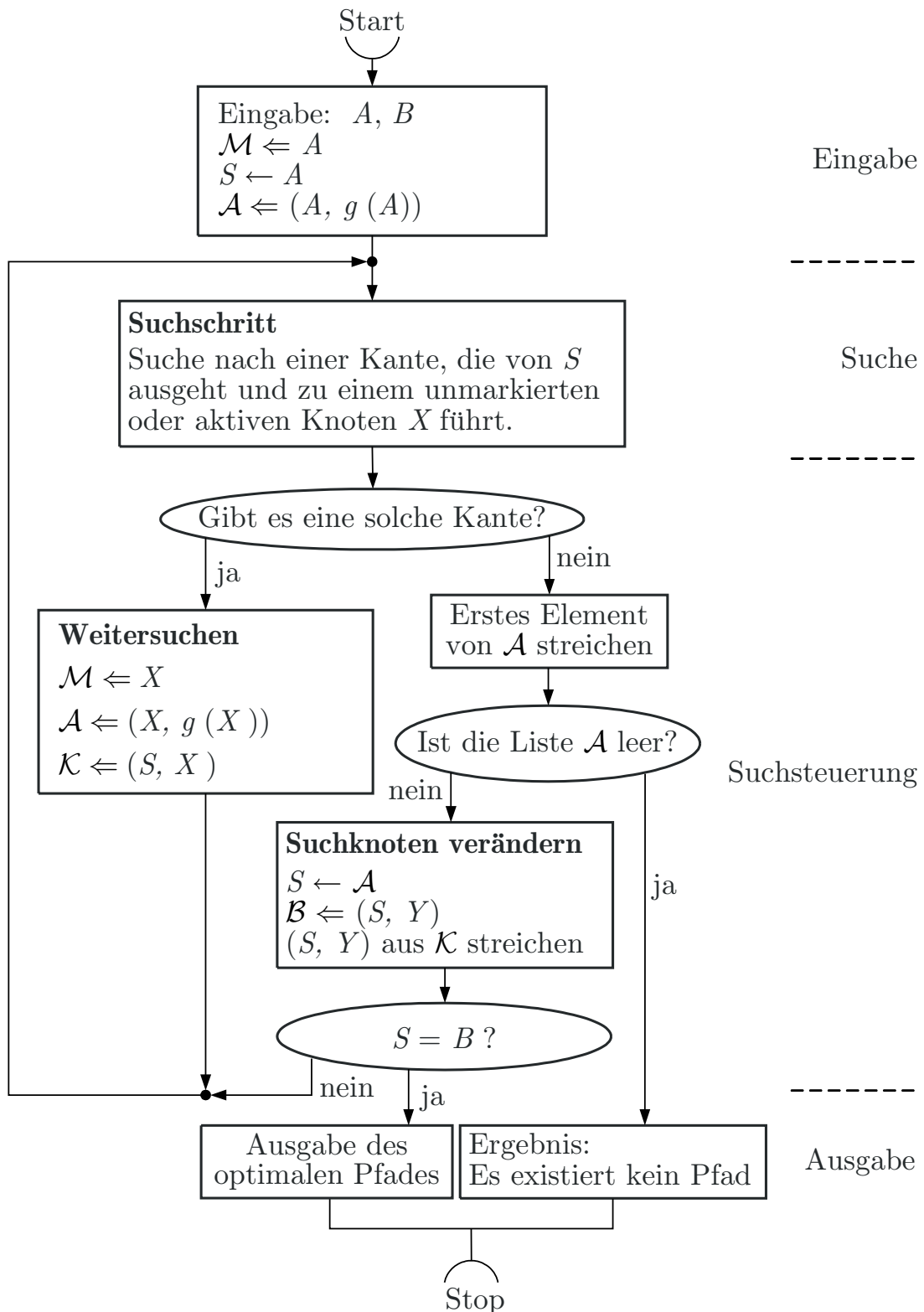
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.13. Prinzip des Dijkstra-Algorithmus**

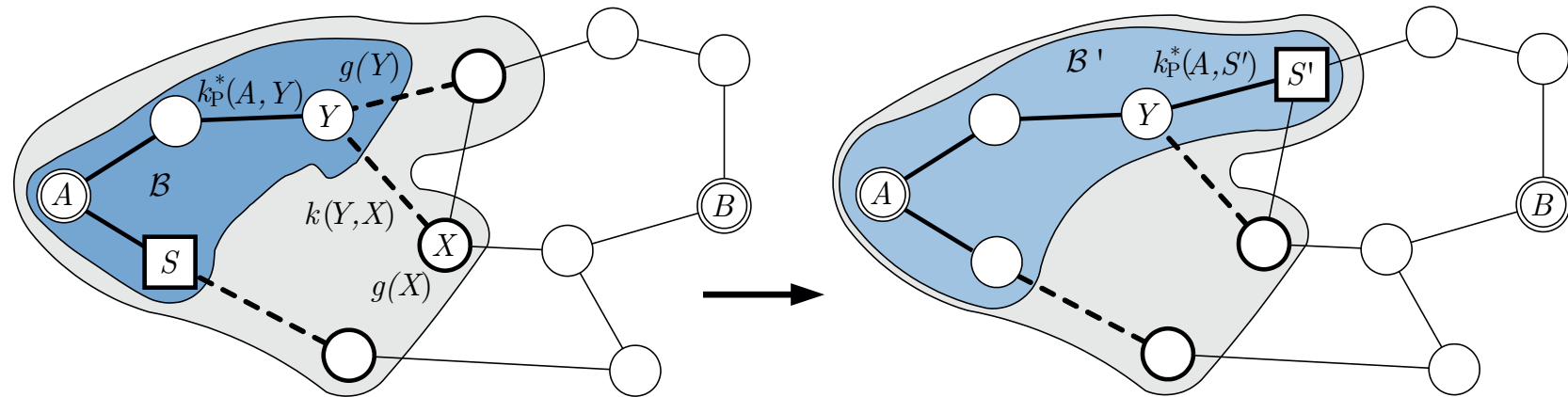
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





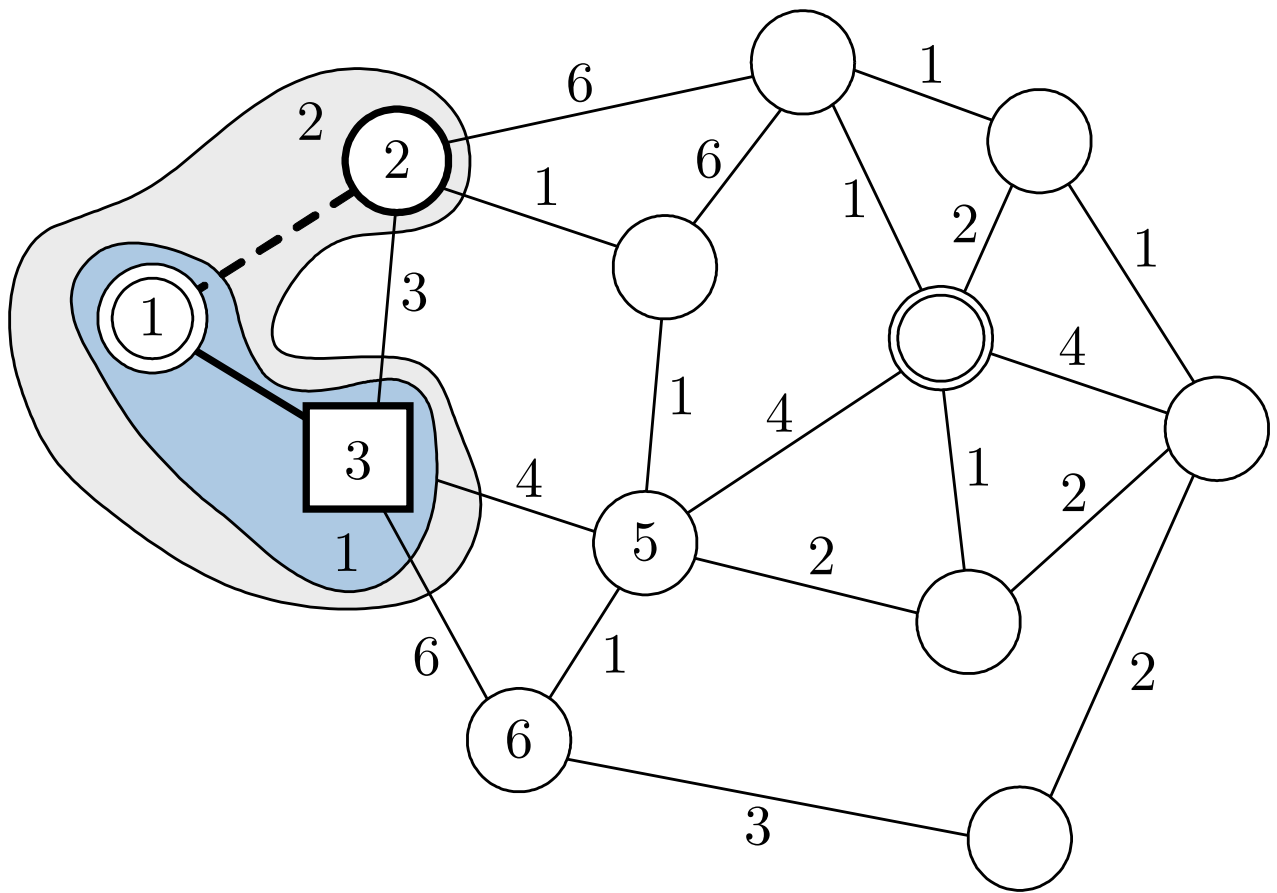
**Abb. 3.14. Dijkstra-Algorithmus**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



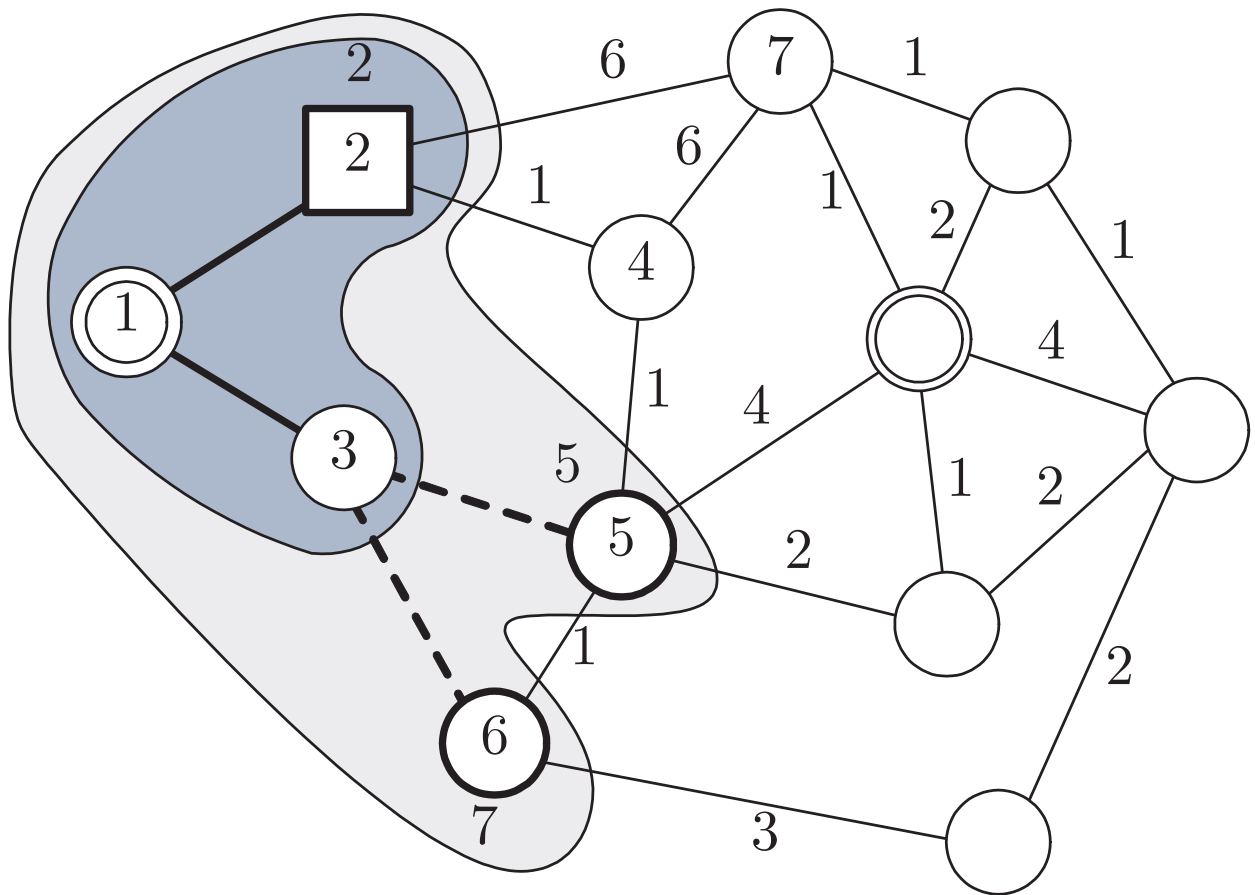
**Abb. 3.15. Beweis der Korrektheit des Dijkstra-Algorithmus**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



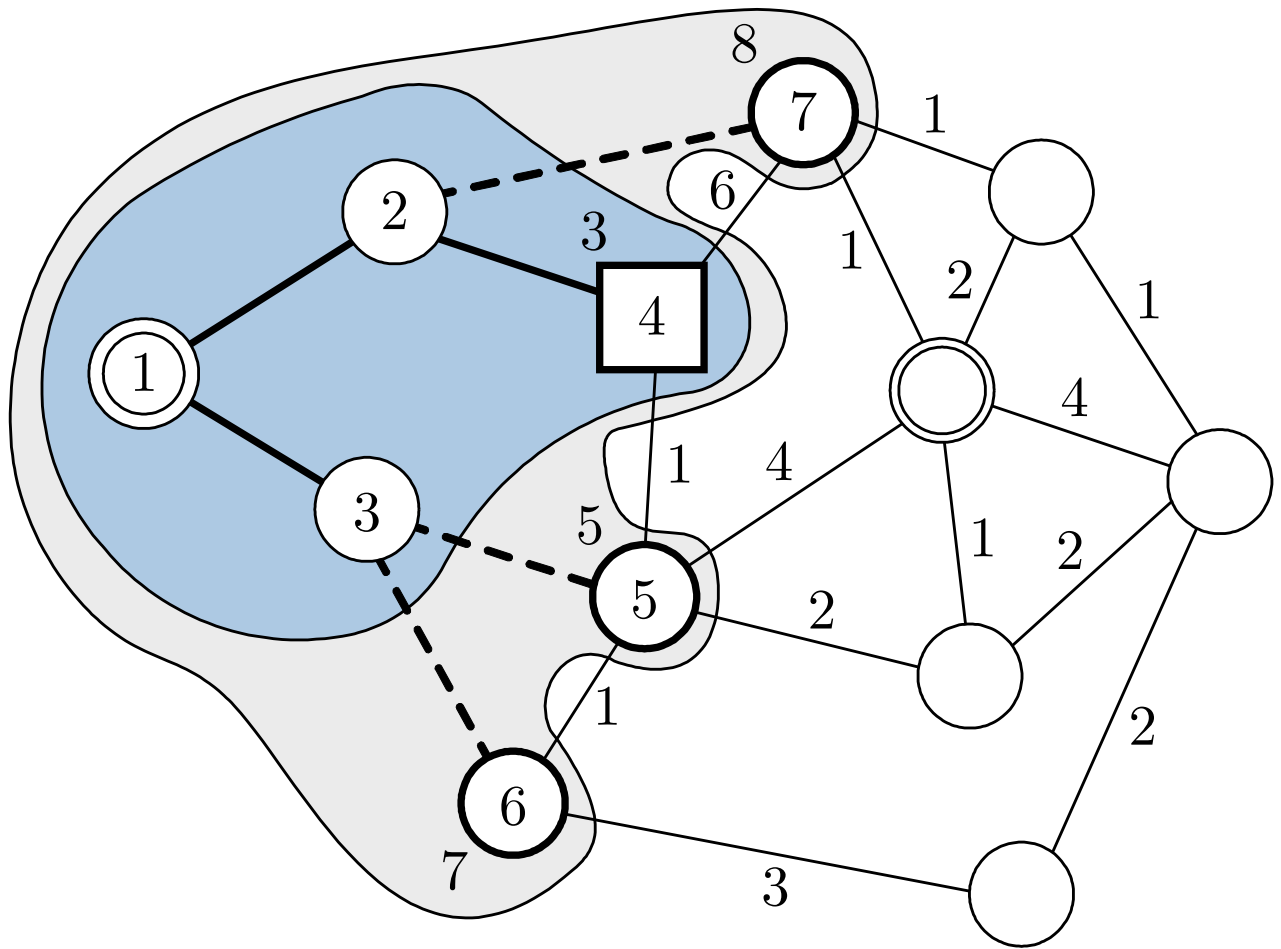
**Abb. 3.16: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach einem Schritt**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



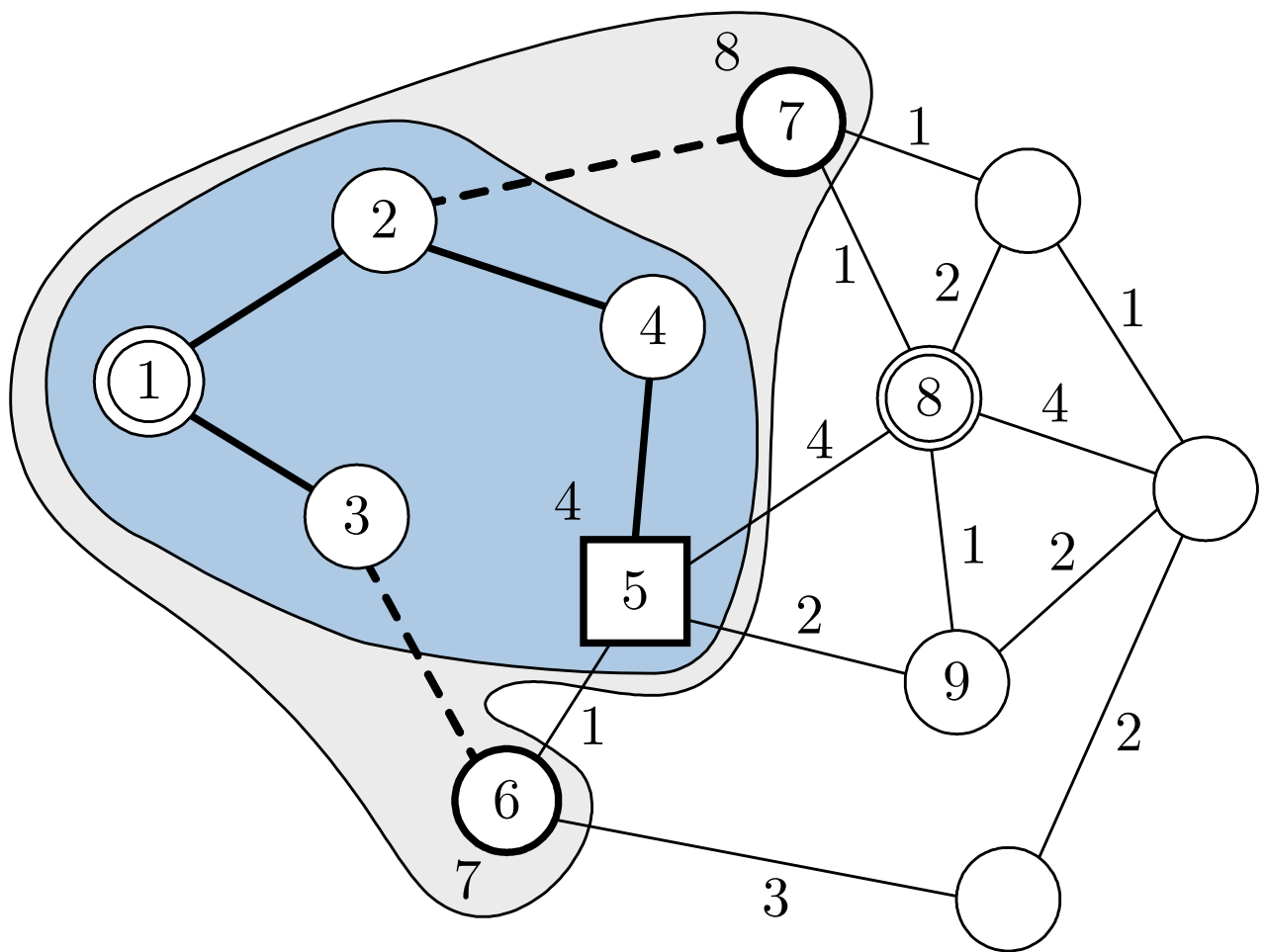
**Abb. 3.16: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach zwei Schritten**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



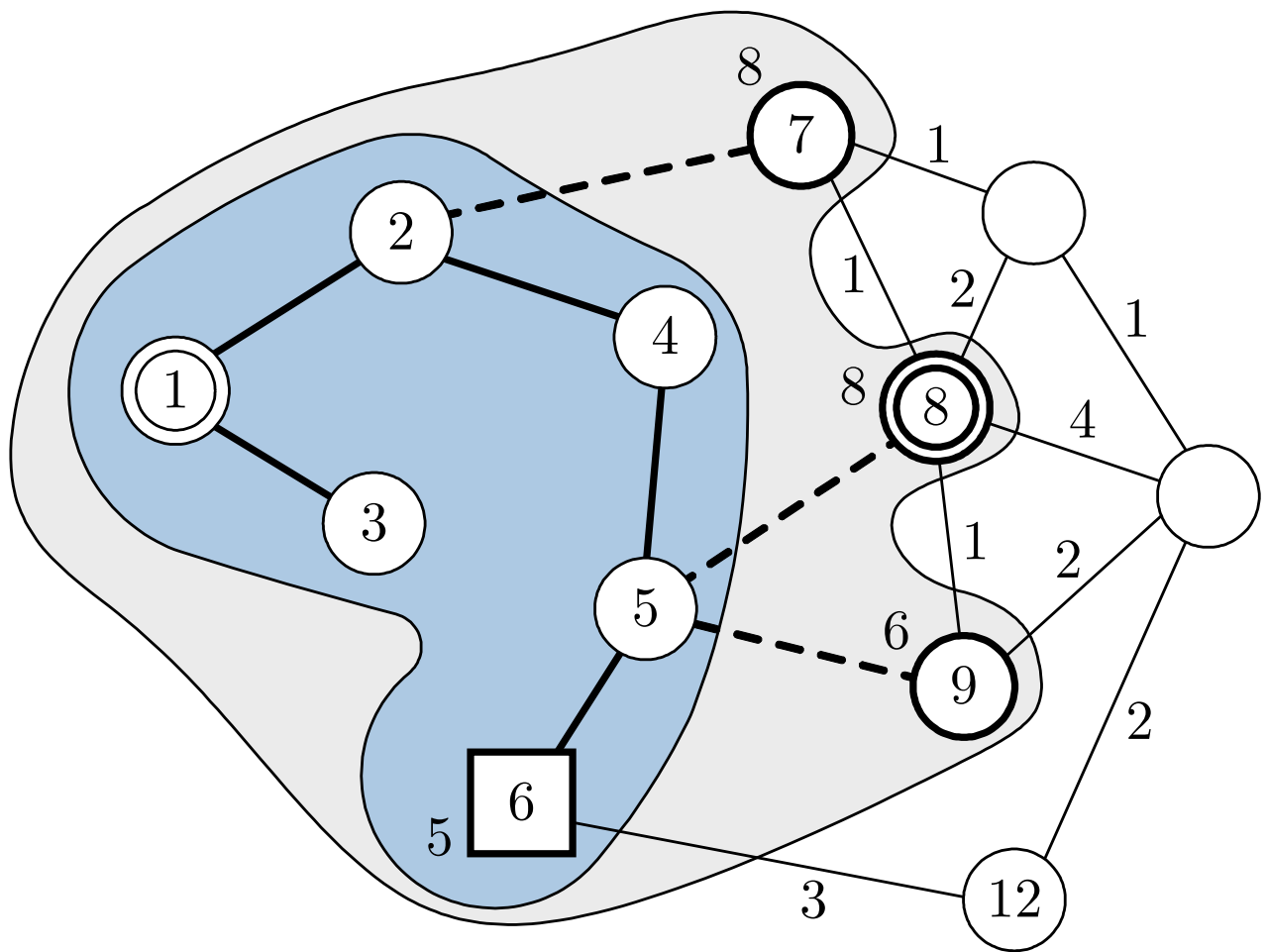
**Abb. 3.17: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach drei Schritten**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



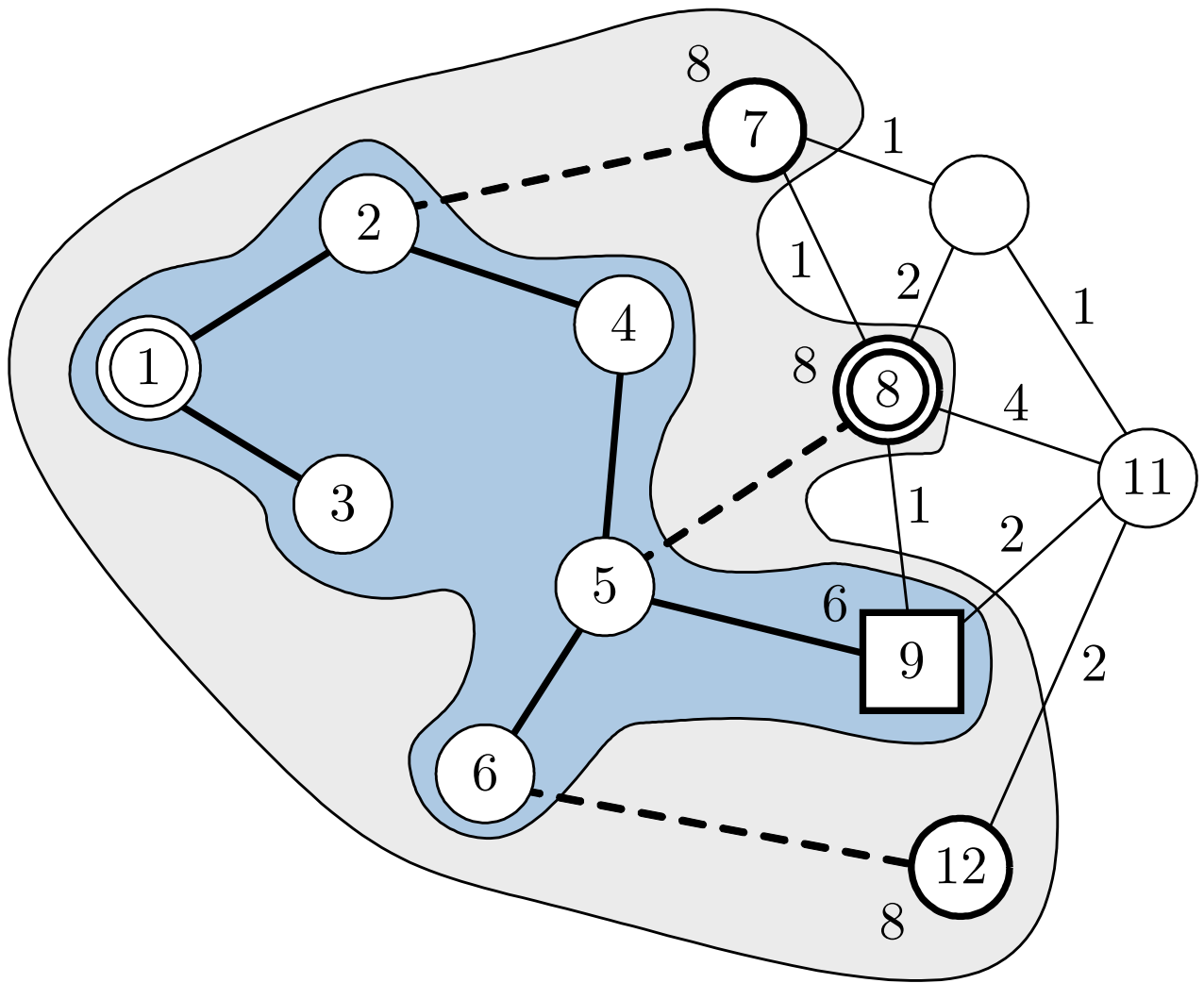
**Abb. 3.17: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach vier Schritten**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.18: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach fünf Schritten**

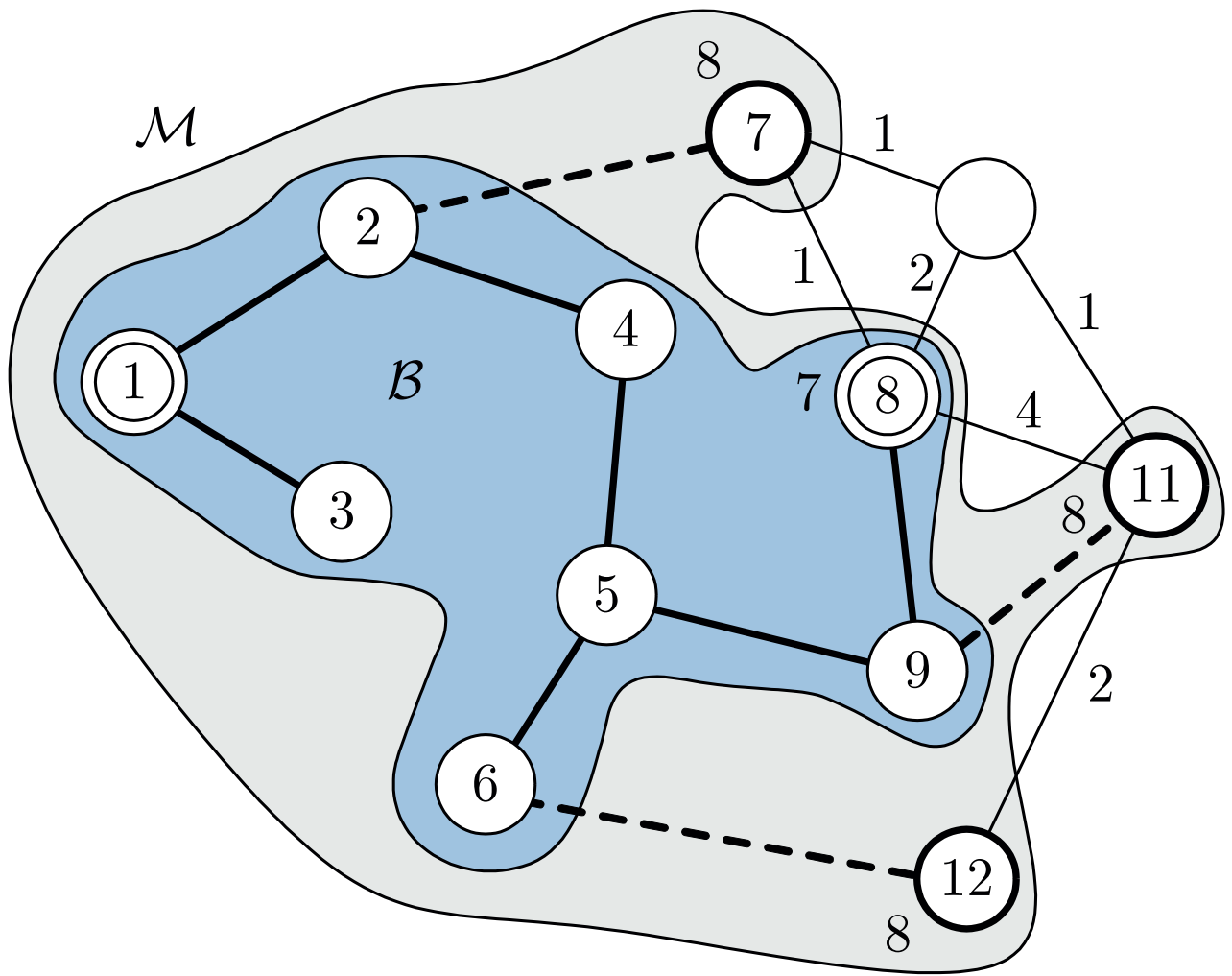
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.18: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach sechs Schritten**

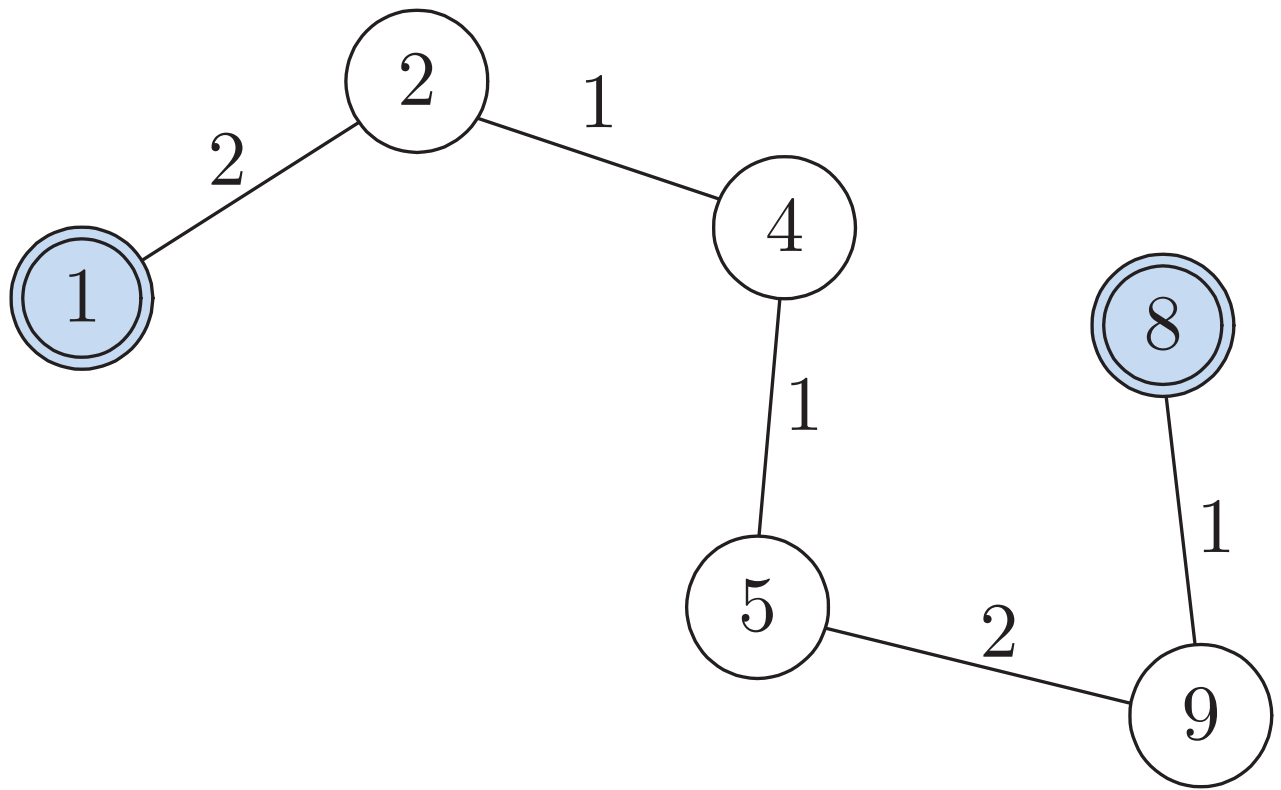
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





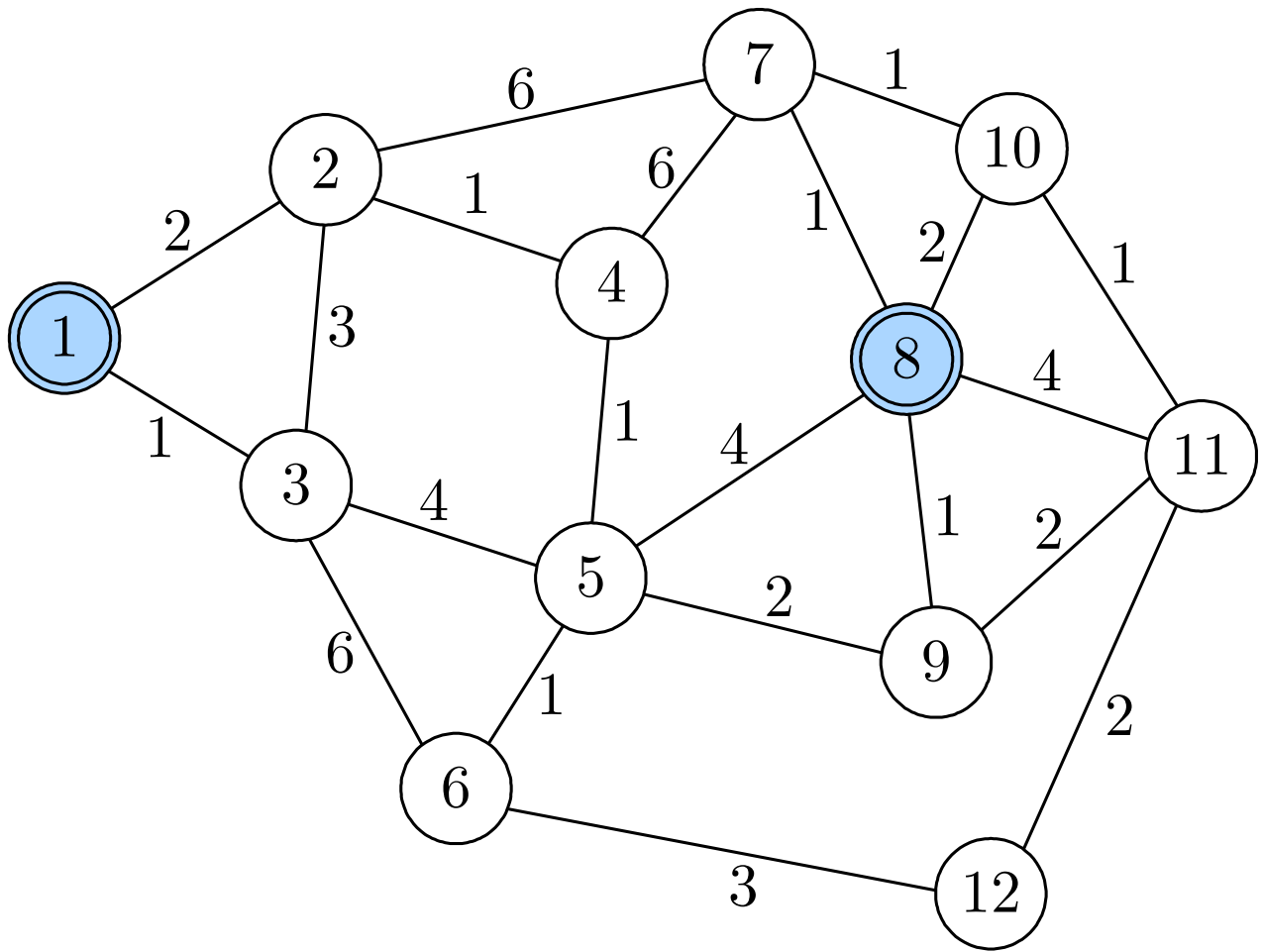
**Abb. 3.19: Ergebnis des Dijkstra-Algorithmus nach sieben Schritten**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



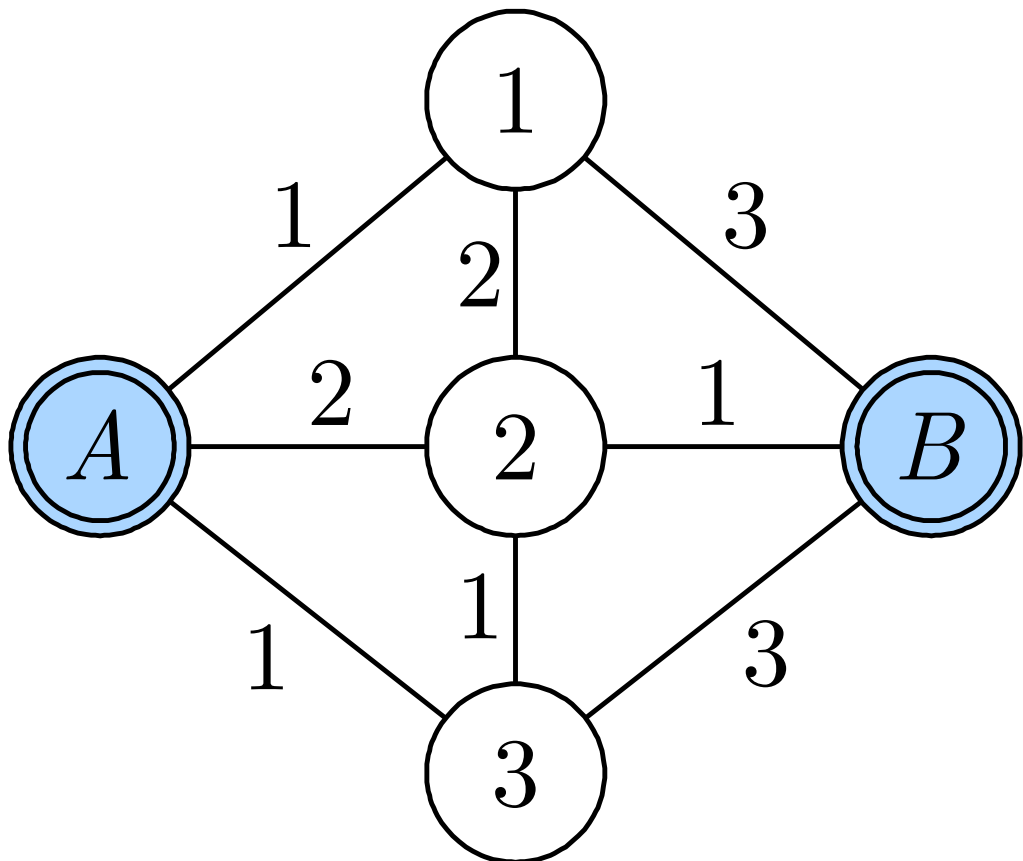
**Abb. 3.19: Optimaler Pfad**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



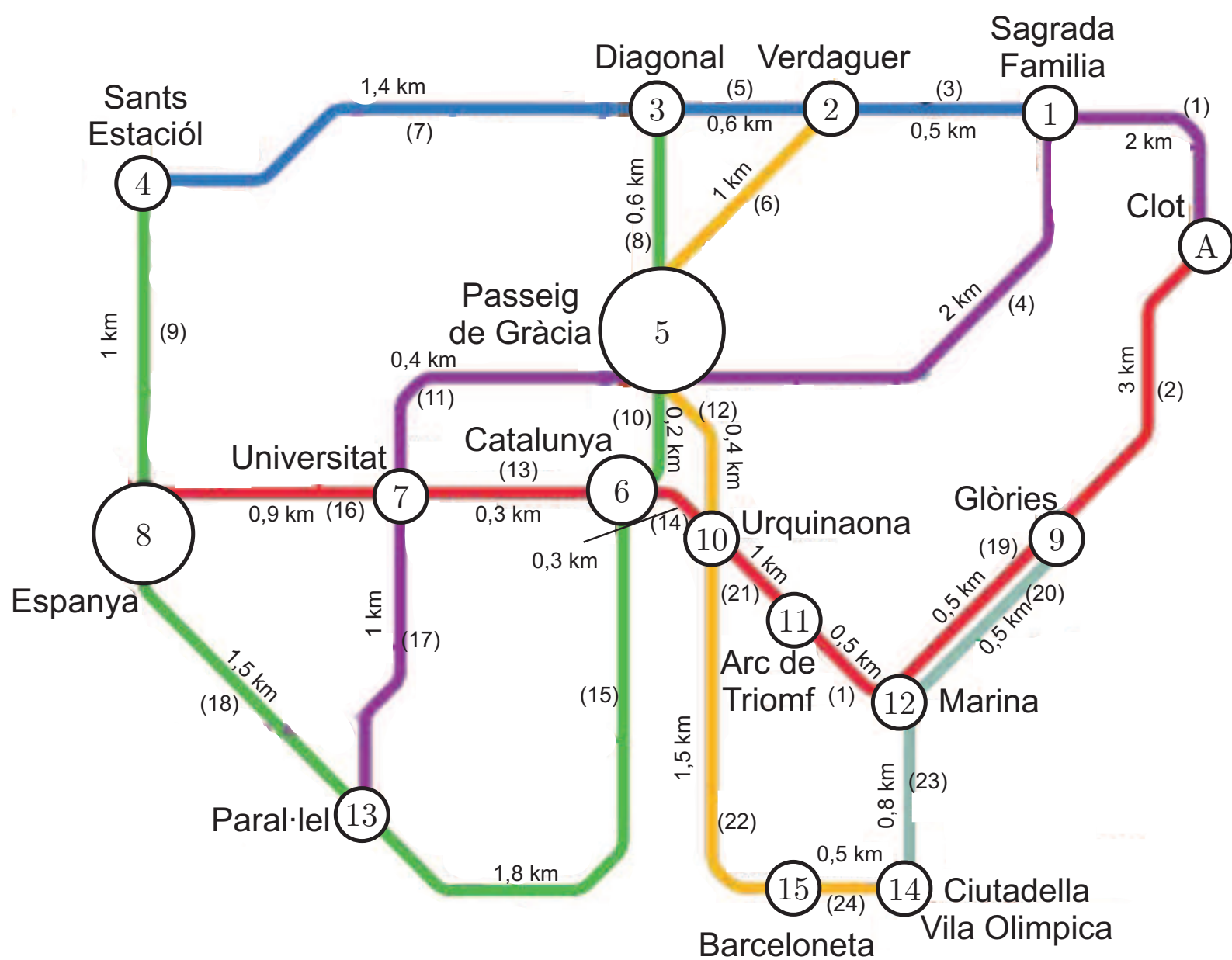
**Abb. 3.20: Beispiel für die Suche optimaler Pfade**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



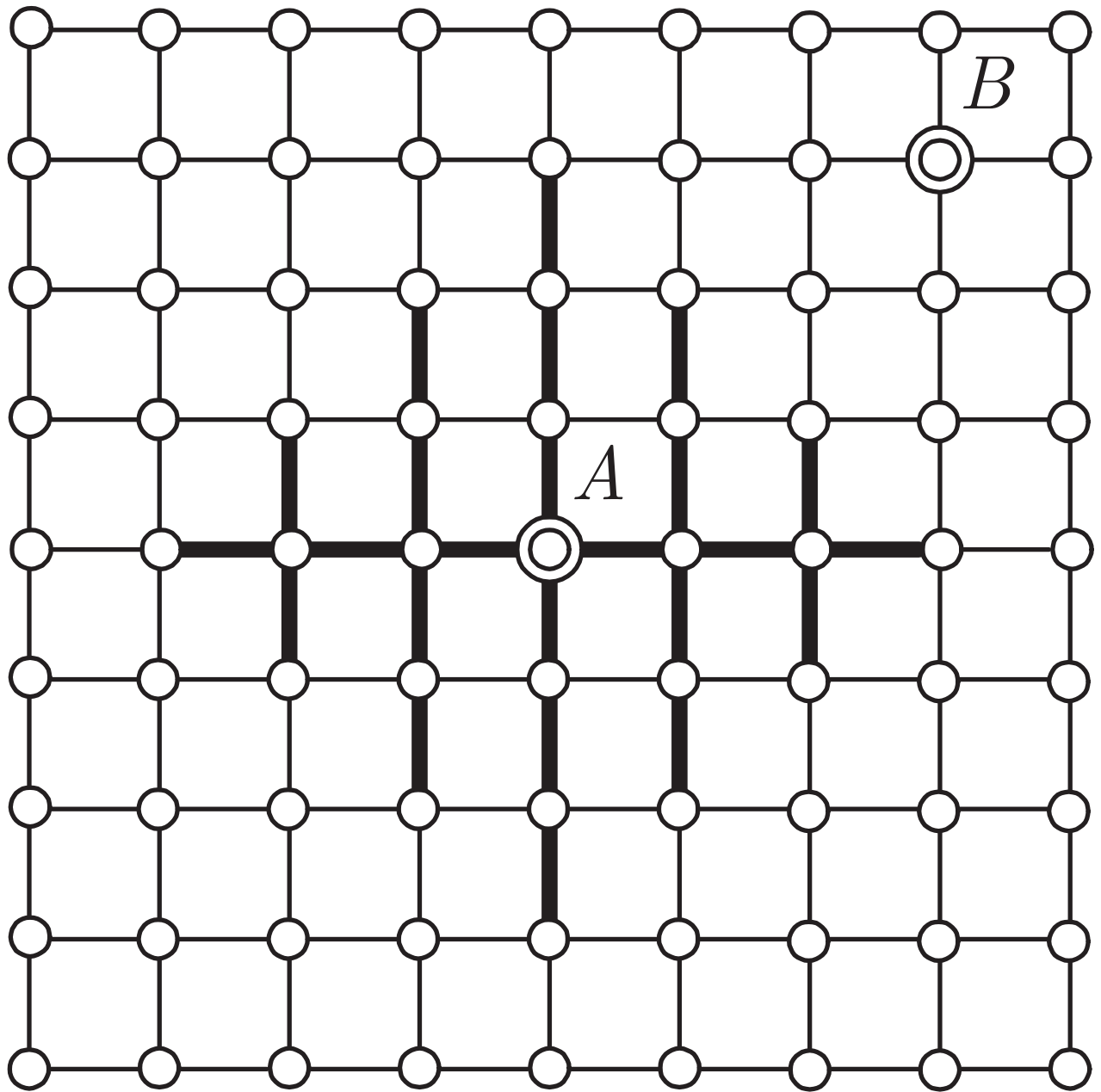
**Abb. 3.20: Beispiel für die Suche optimaler Pfade**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



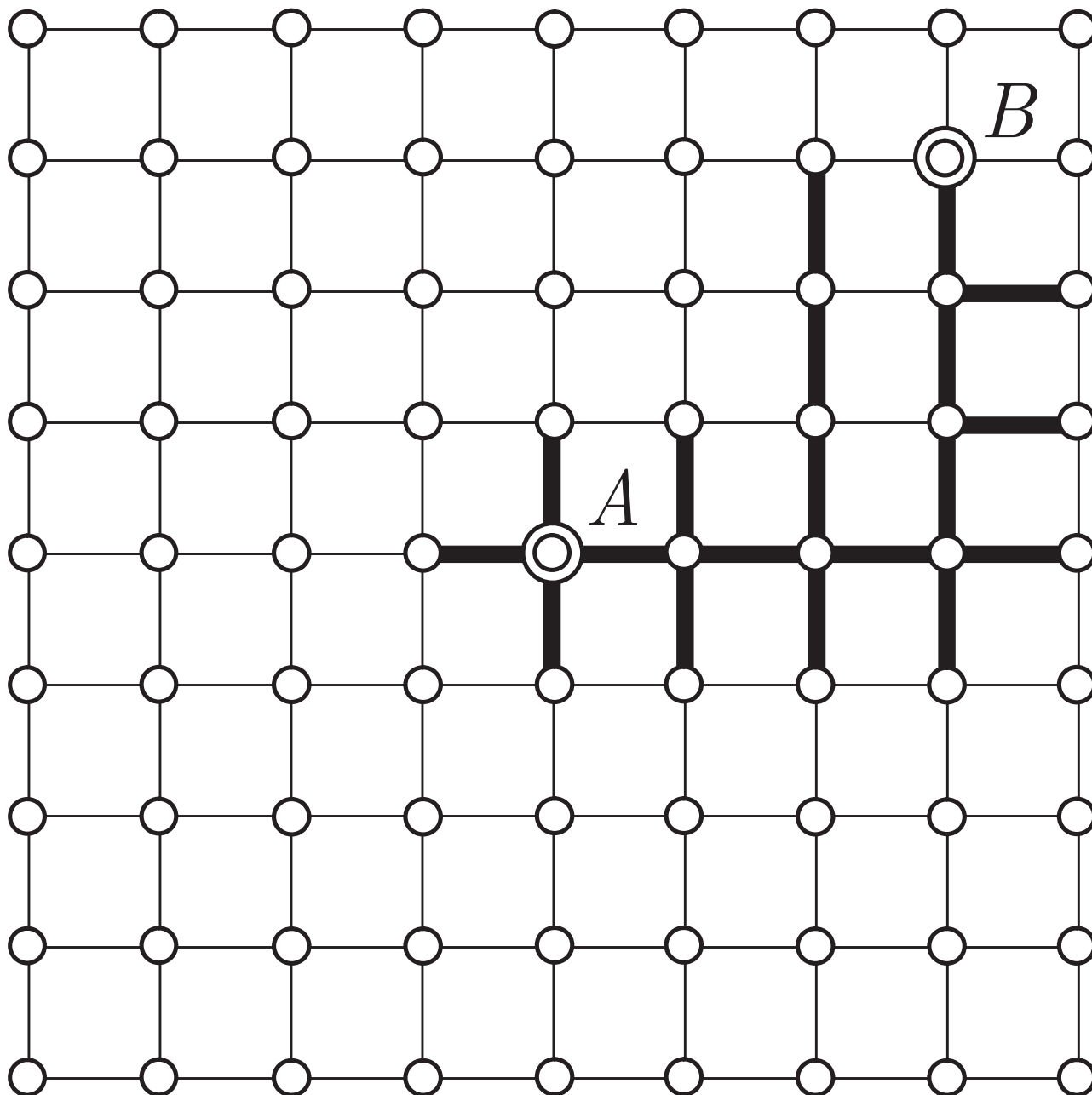
**Abb. 3.21. Metro-Plan von Barcelona**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



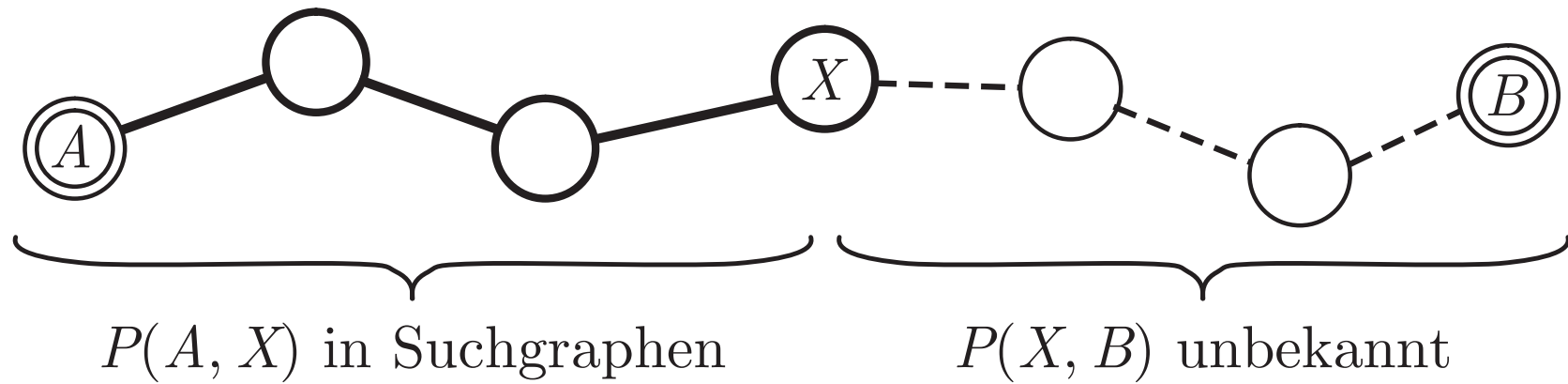
**Abb. 3.22: Ergebnis der Breite-zuerst-Suche**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.22: Ergebnis der heuristischen Suche eines Pfades in einem Gitter**

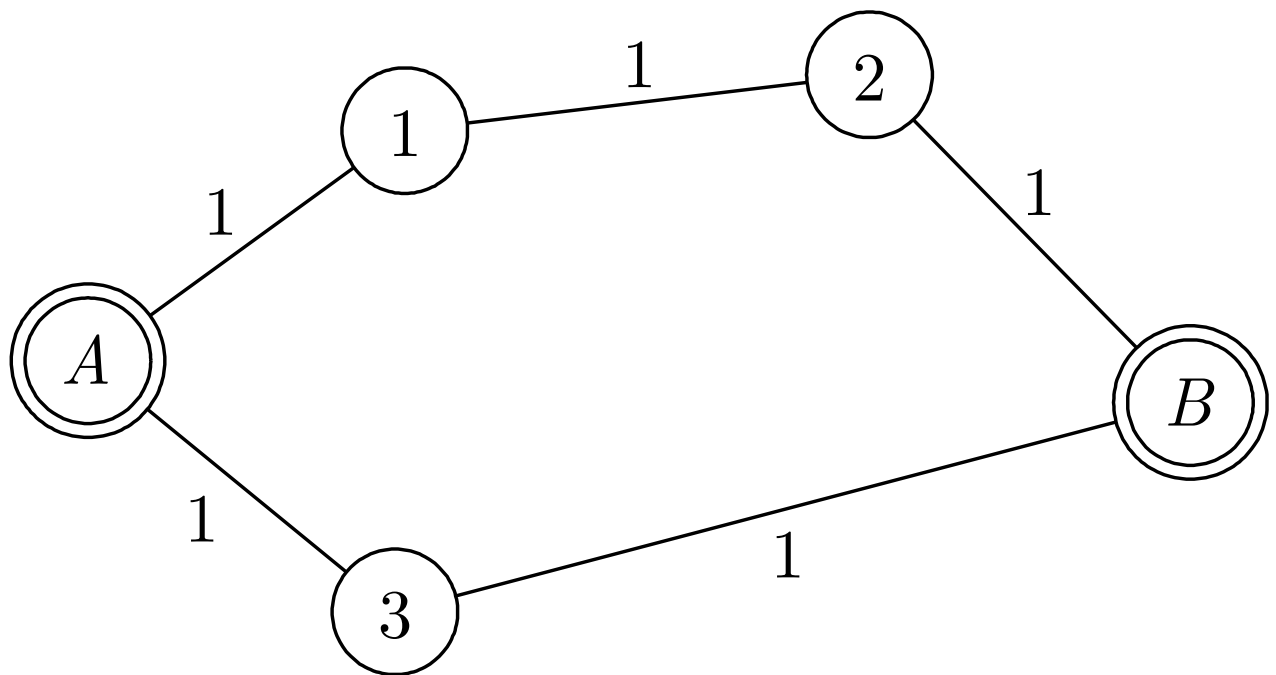
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.23. Erläuterung der Bewertungsfunktion**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





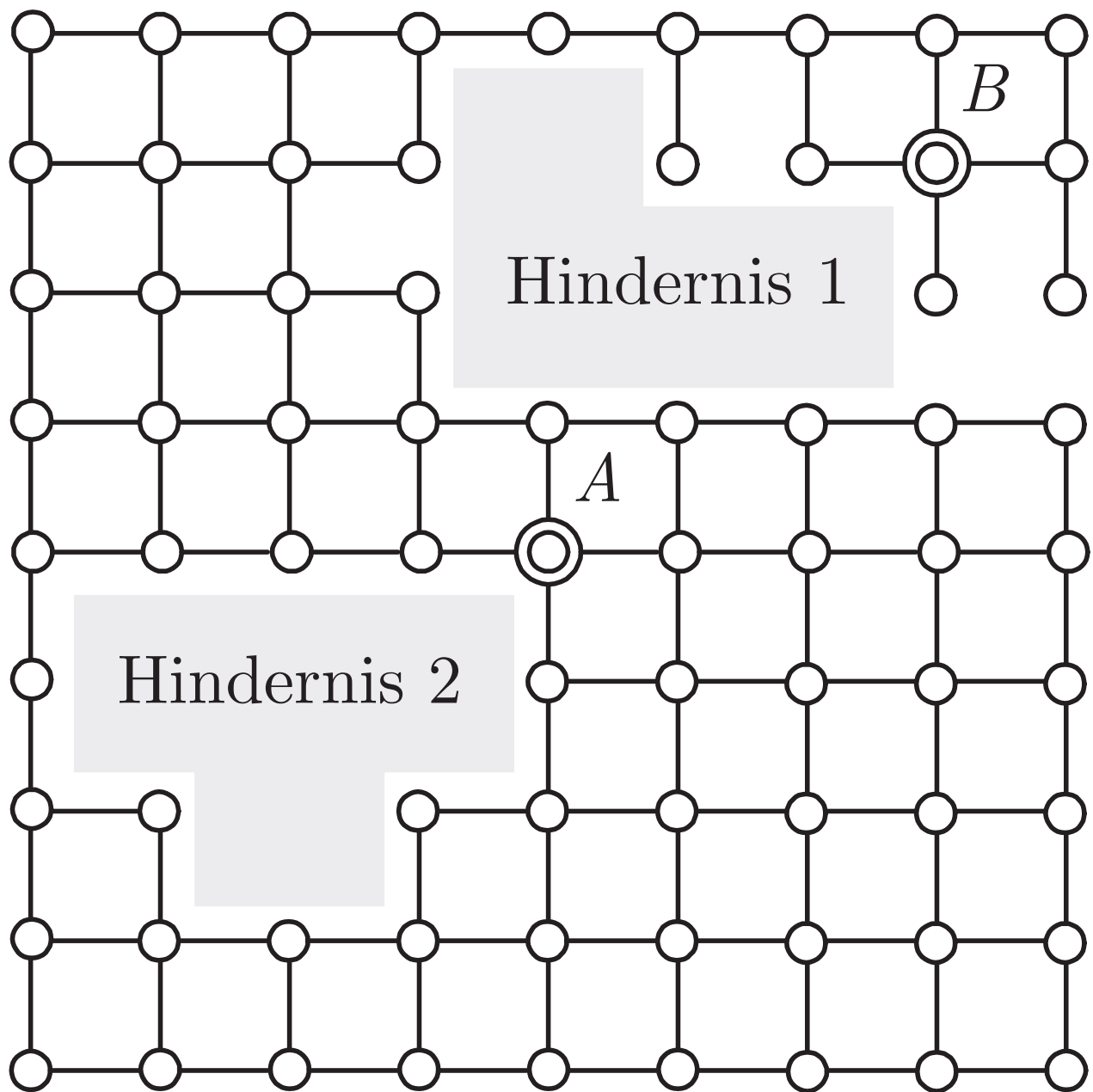
**Abb. 3.24: Beispiel**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



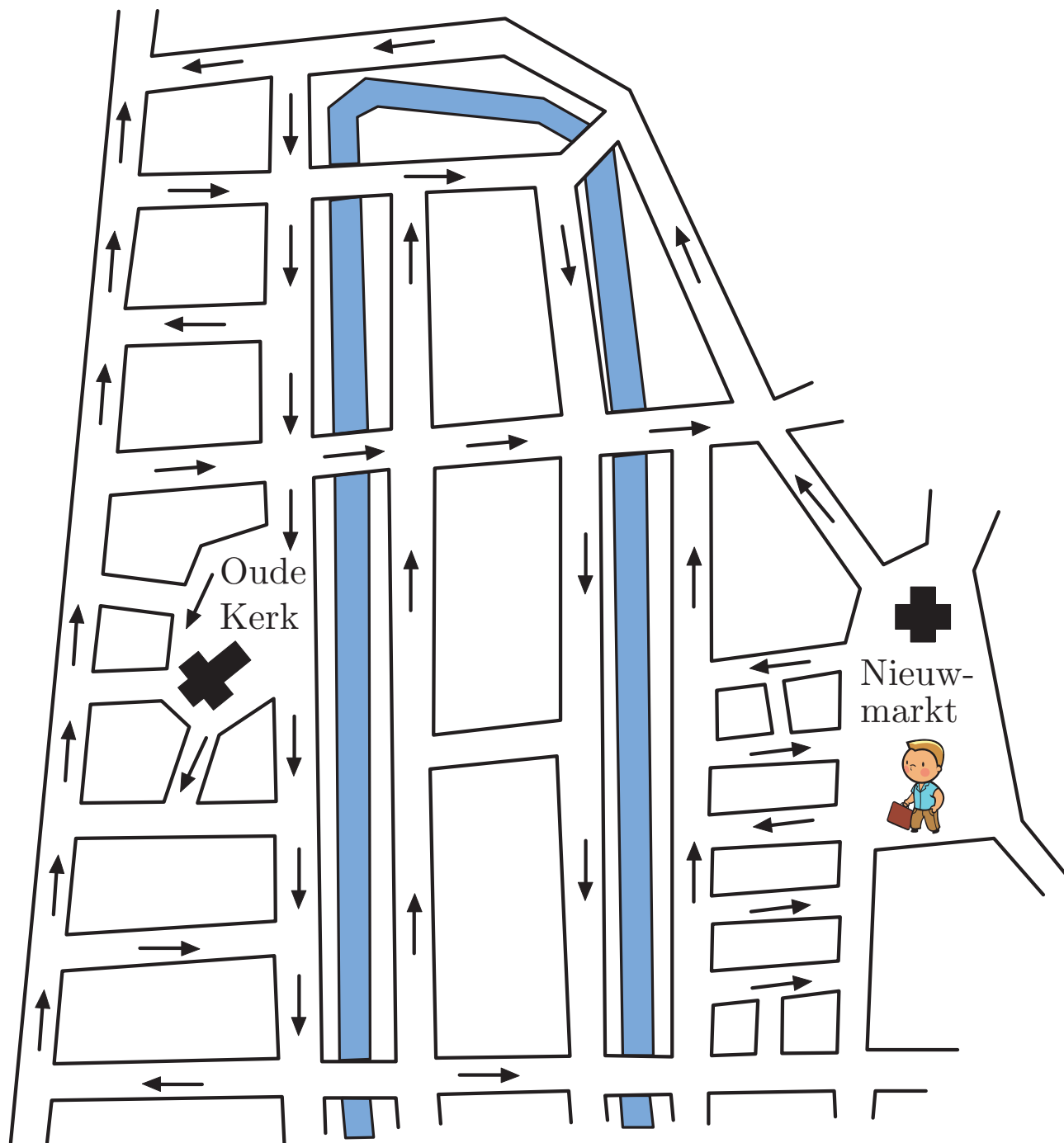
**Abb. 3.25. Vergleich der Suchergebnisse bei Verwendung zweier unterschiedlicher Heuristiken**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



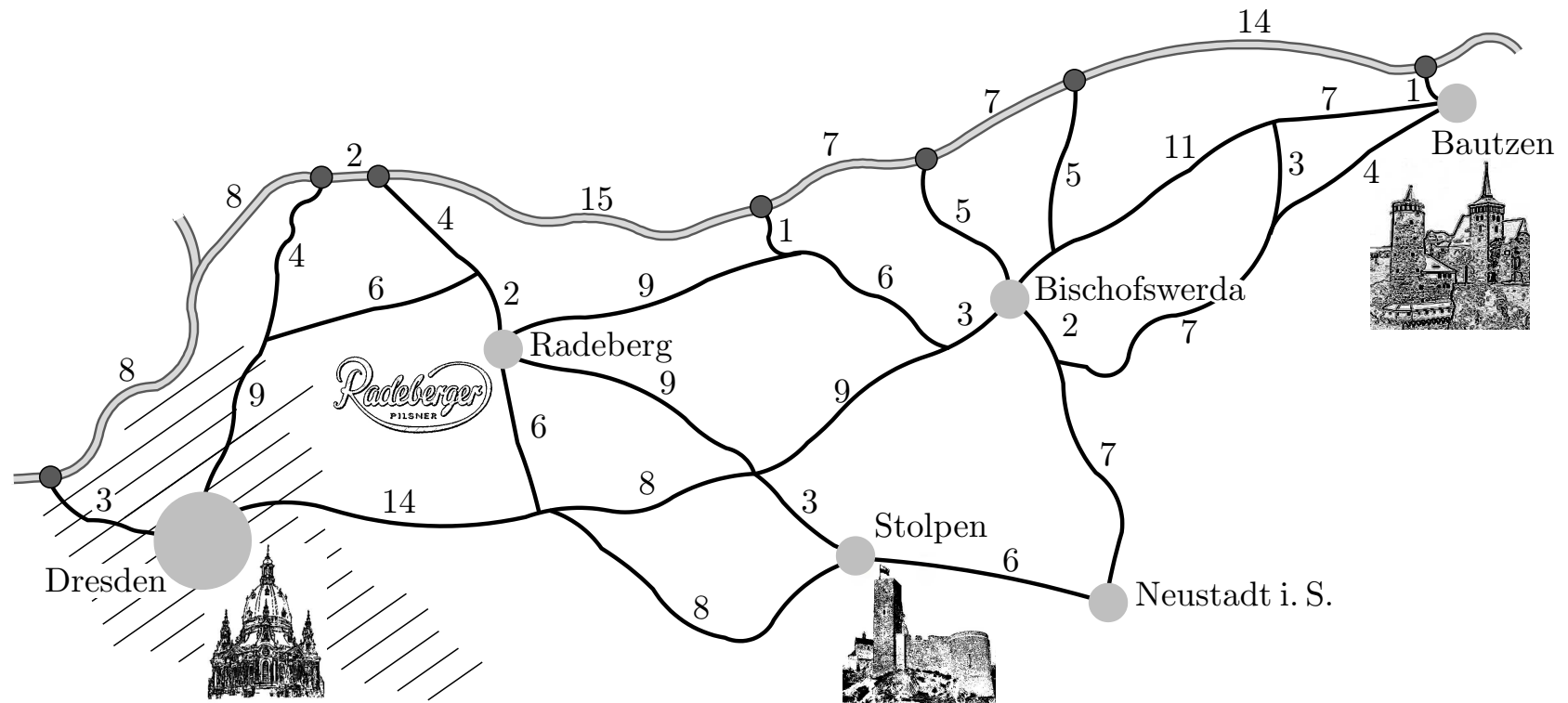
**Abb. 3.26: Suchraum mit Hindernissen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



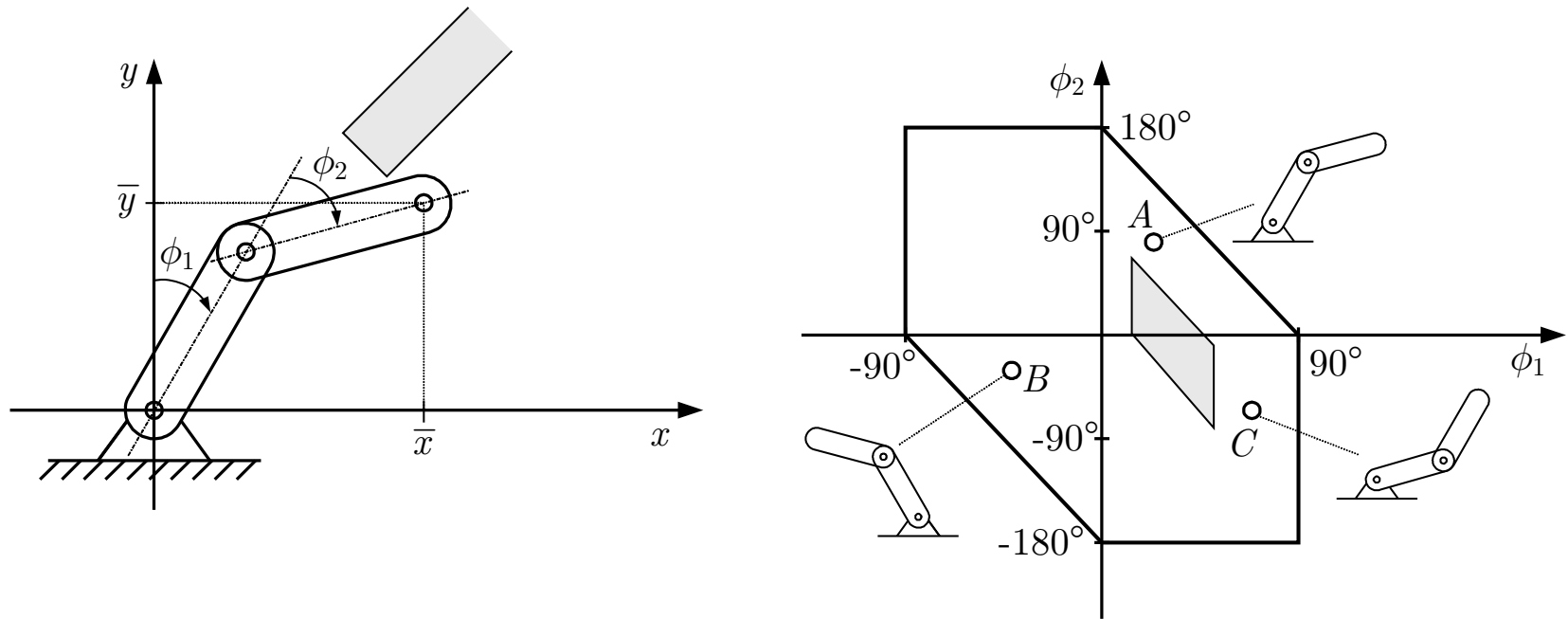
**Abb. 3.27: Ausschnitt aus dem Stadtplan von Amsterdam**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



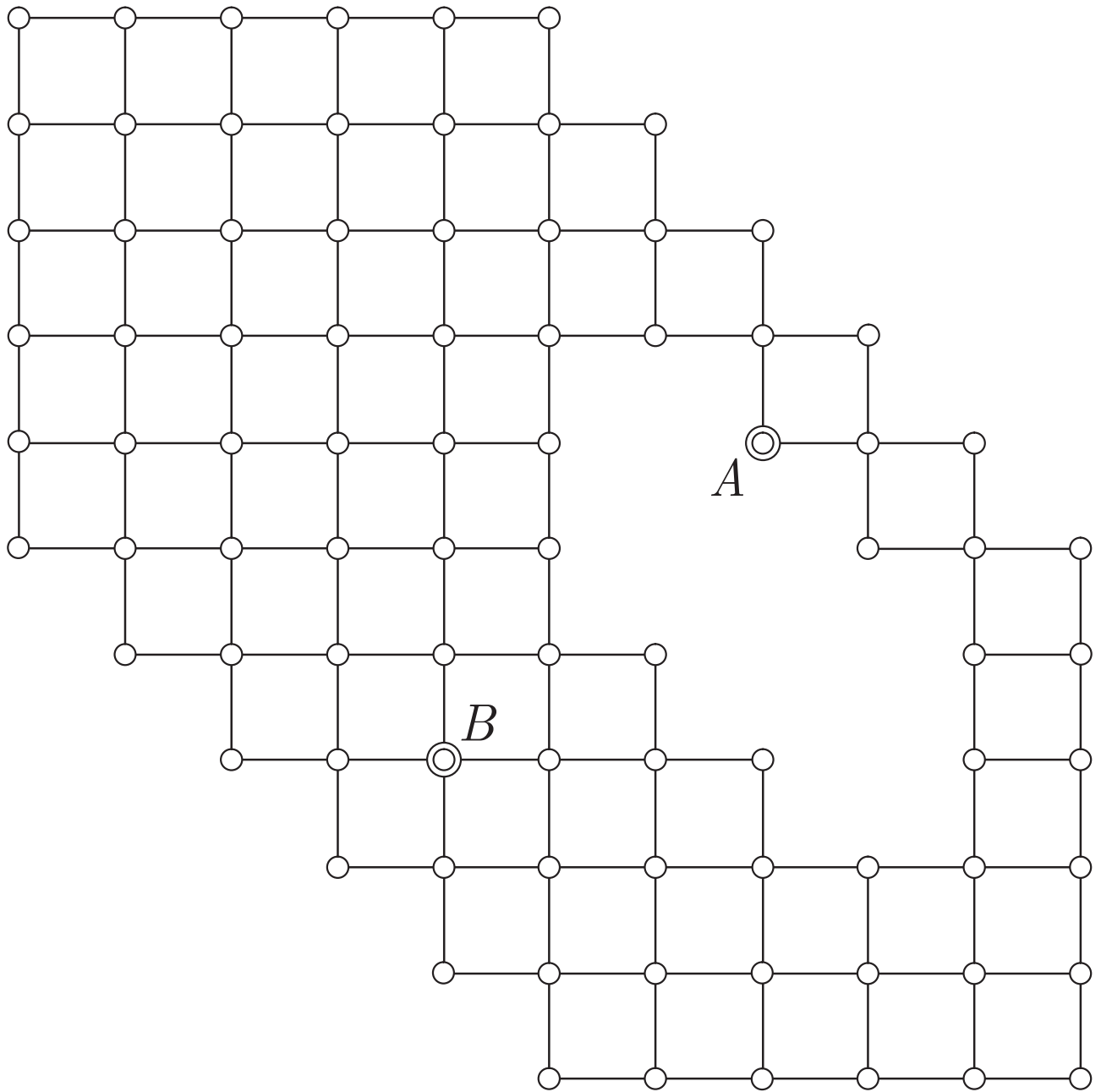
**Abb. 3.28. Ausschnitt aus einer Landkarte mit Entfernungsangaben in Kilometern**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



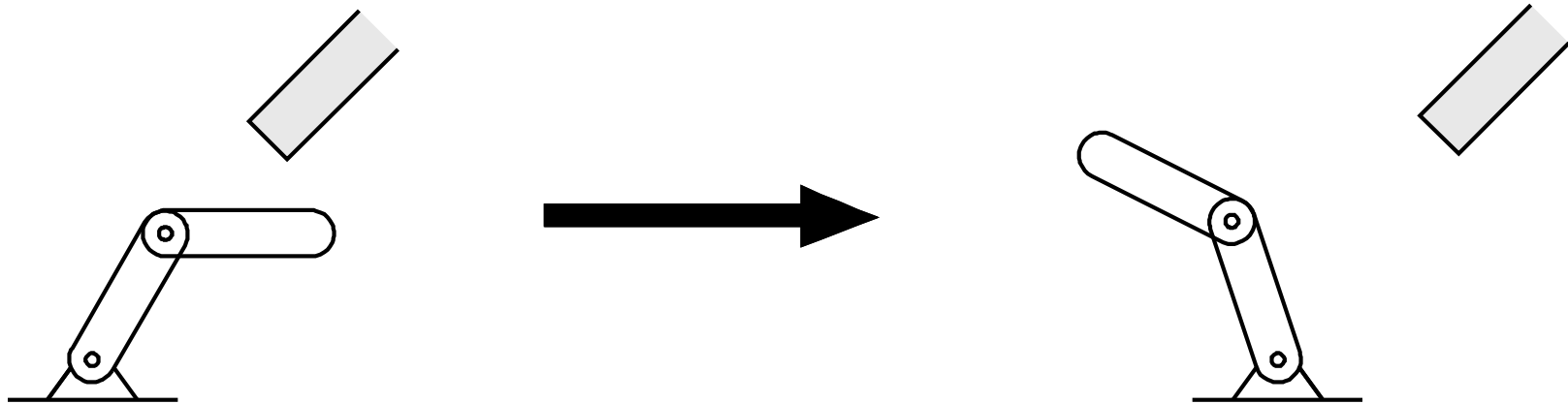
**Abb. 3.29. Bestimmung des Konfigurationsraums eines Roboters mit zwei Freiheitsgraden**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.30: Diskrete Darstellung des Konfigurationsraums**

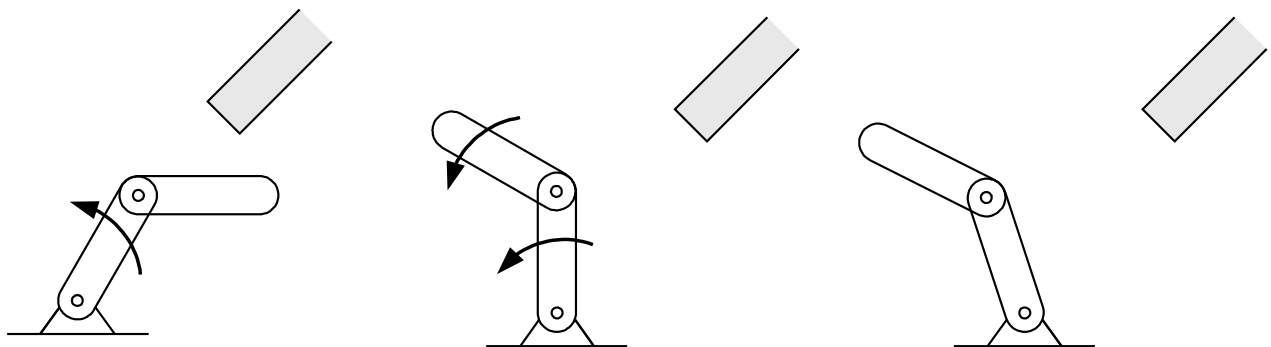
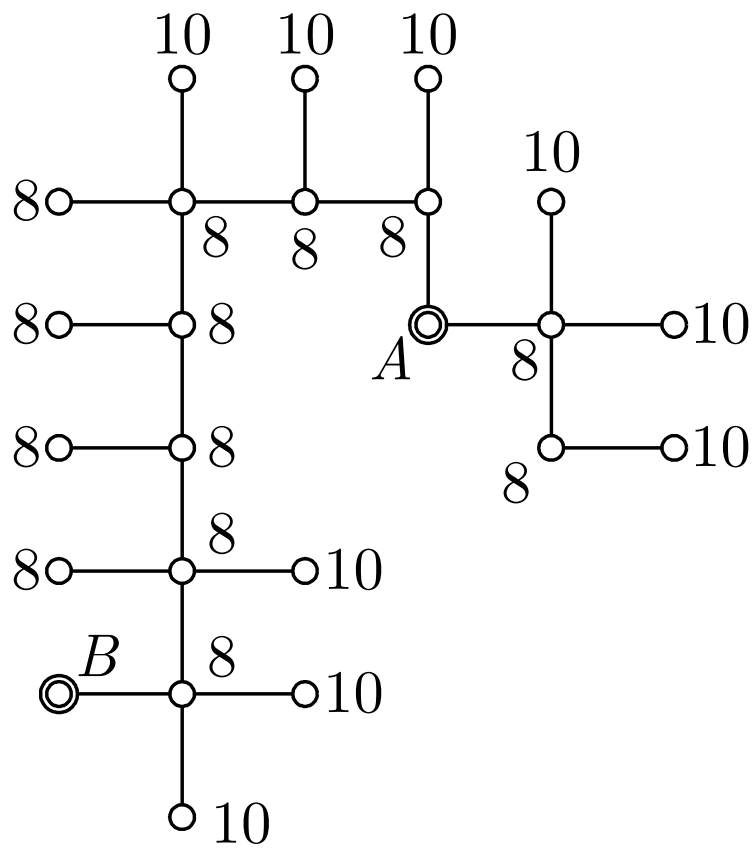
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 3.31. Startkonfiguration *A* und Zielkonfiguration *B***

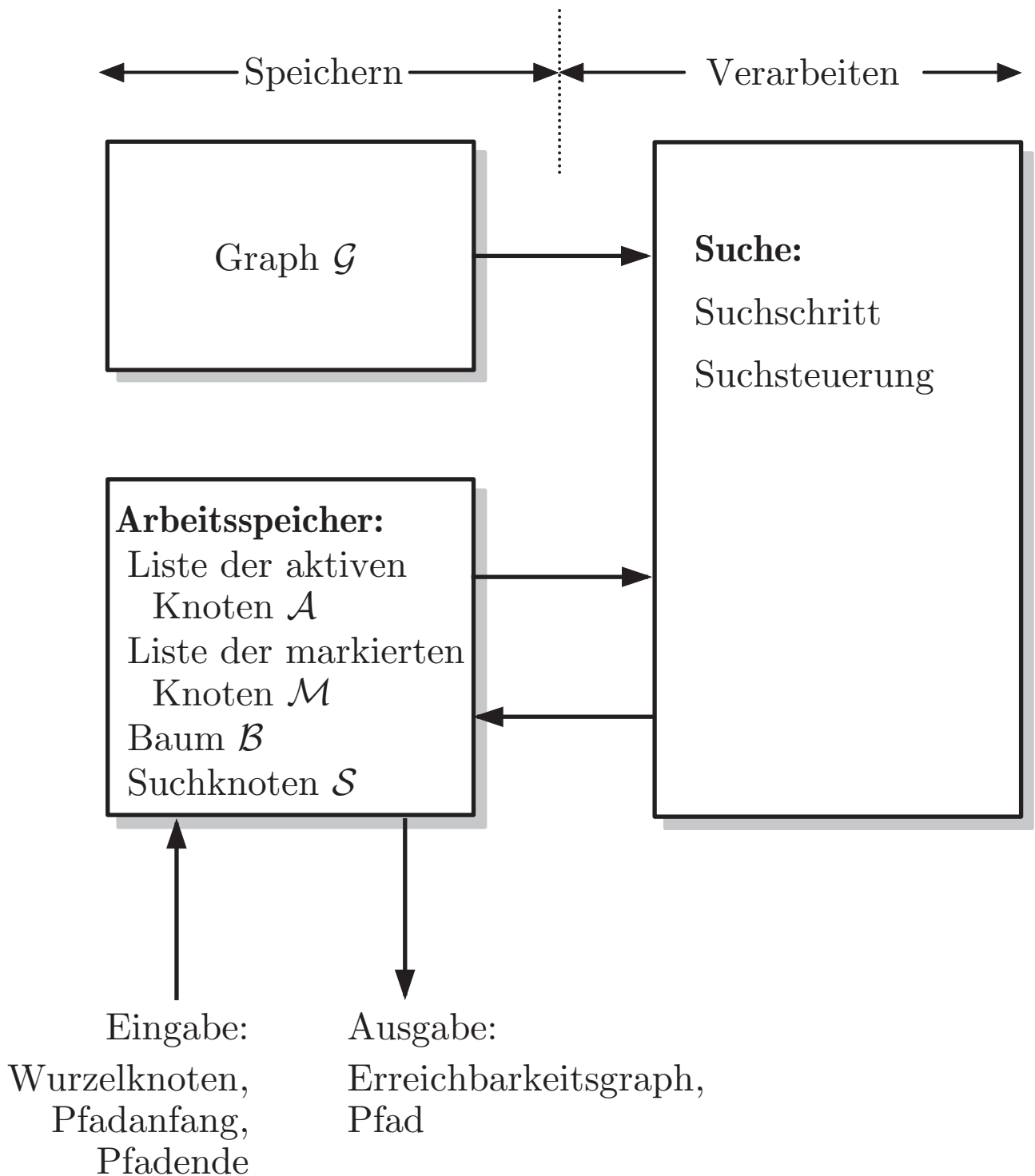
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





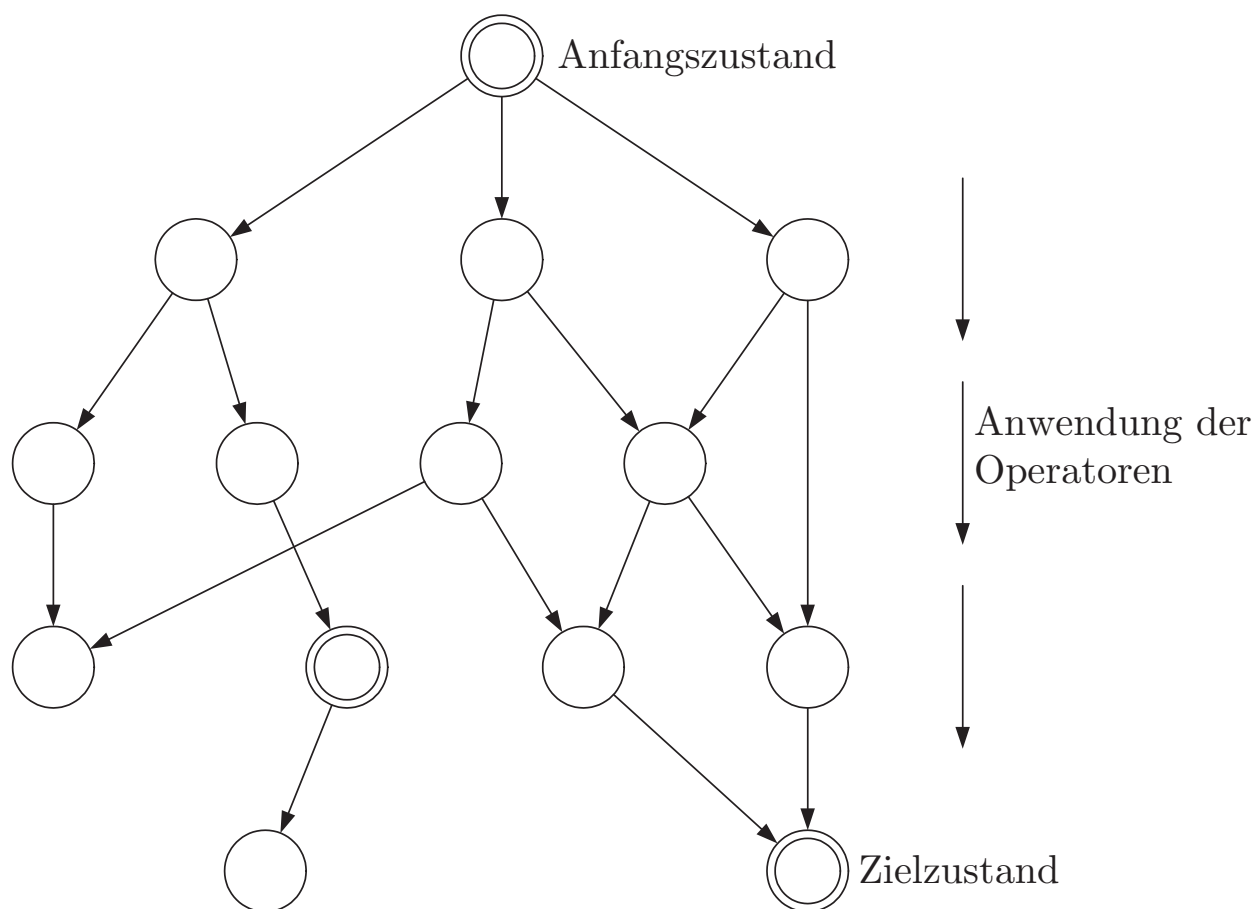
**Abb. 3.32: Roboterbahn zwischen Startpunkt  $A$  und Zielpunkt  $B$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



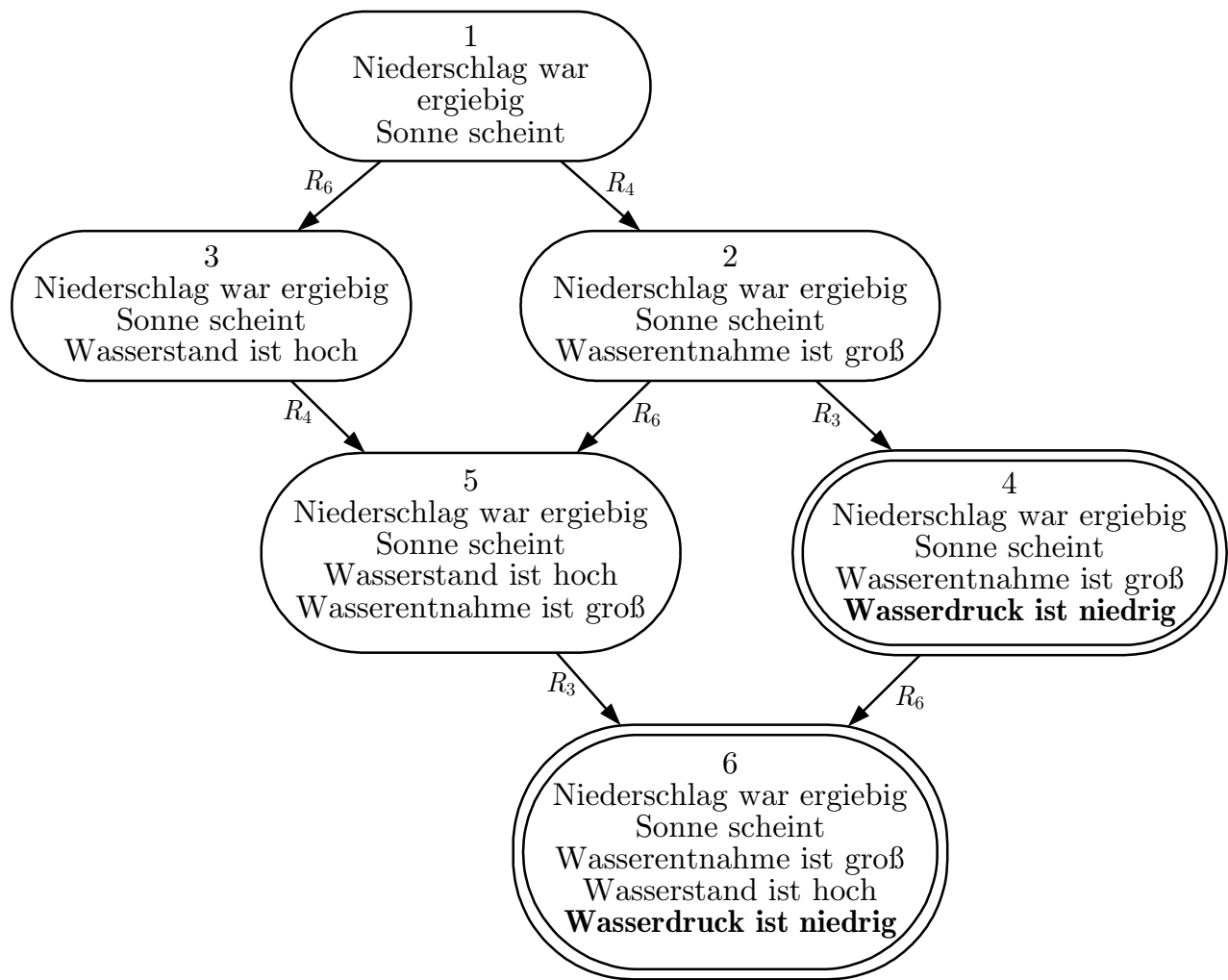
**Abb. 3.33: Architektur von Suchsystemen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



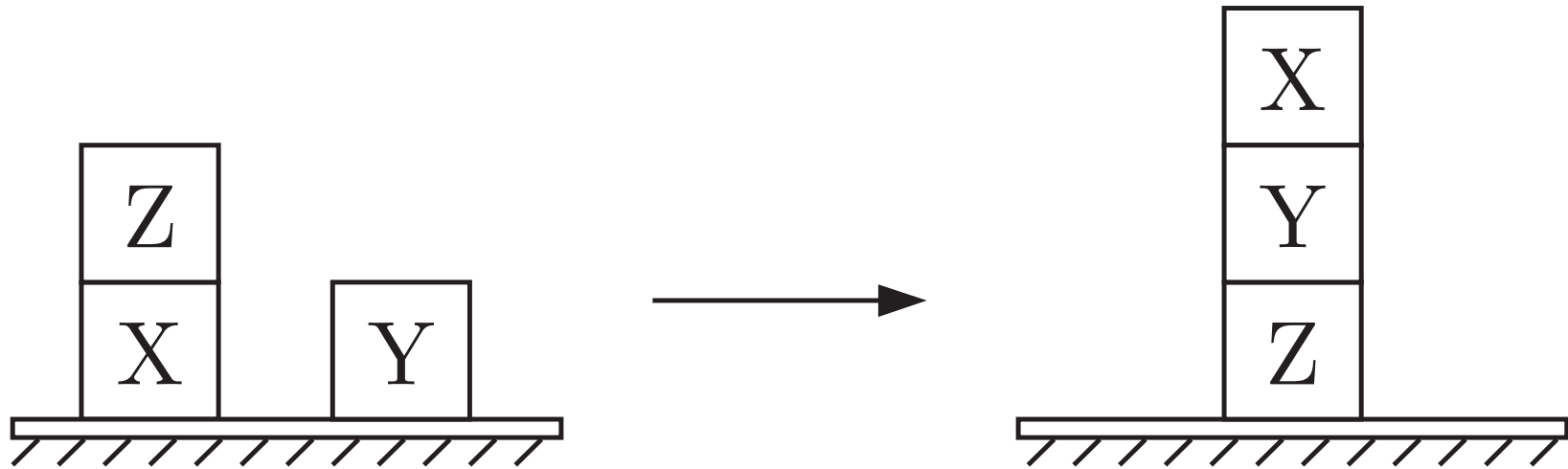
**Abb. 4.1: Zustandsraumbeschreibung von Wissensverarbeitungsproblemen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



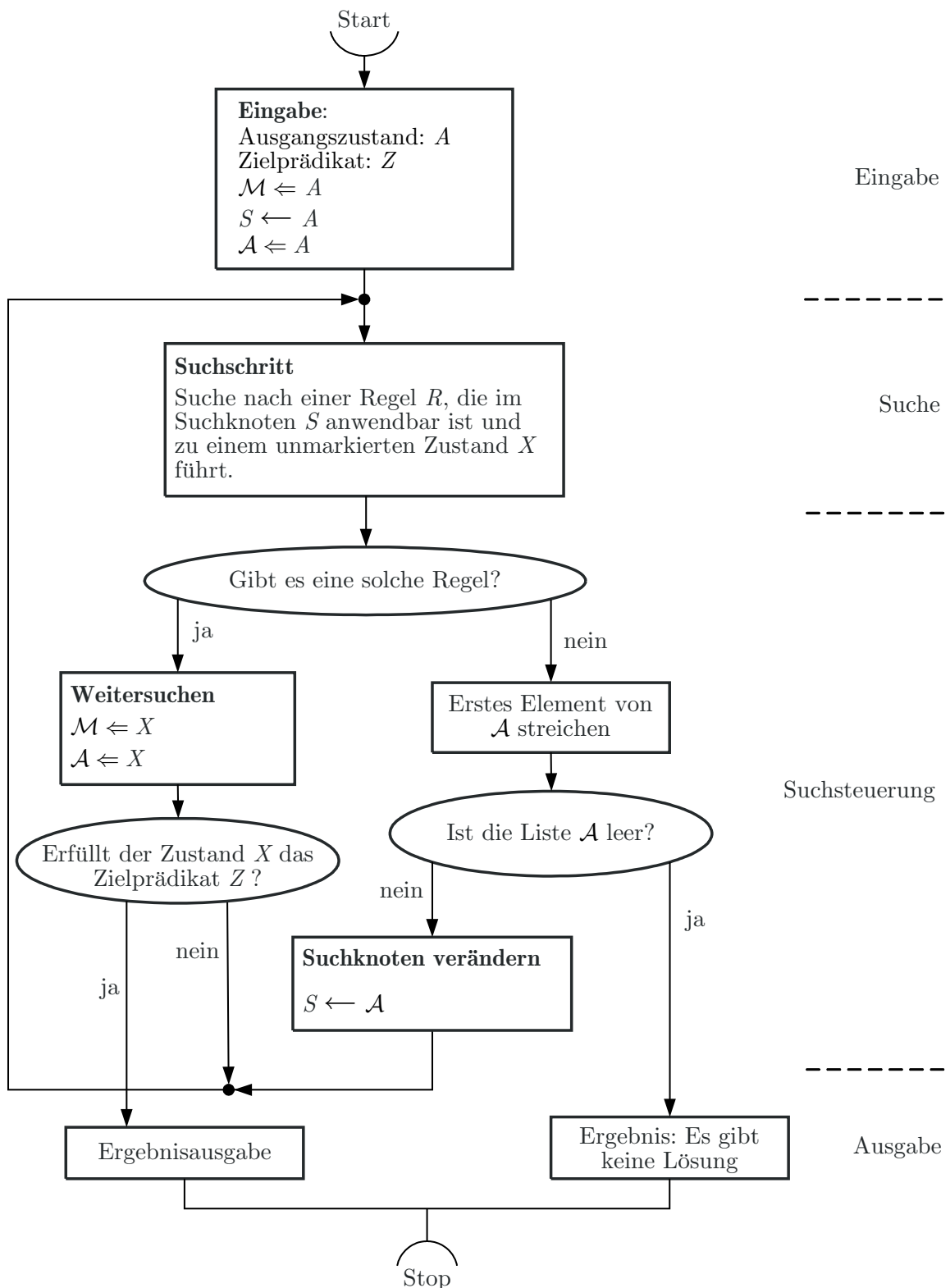
**Abb. 4.2: Suchraum für das Wasserversorgungssystem**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



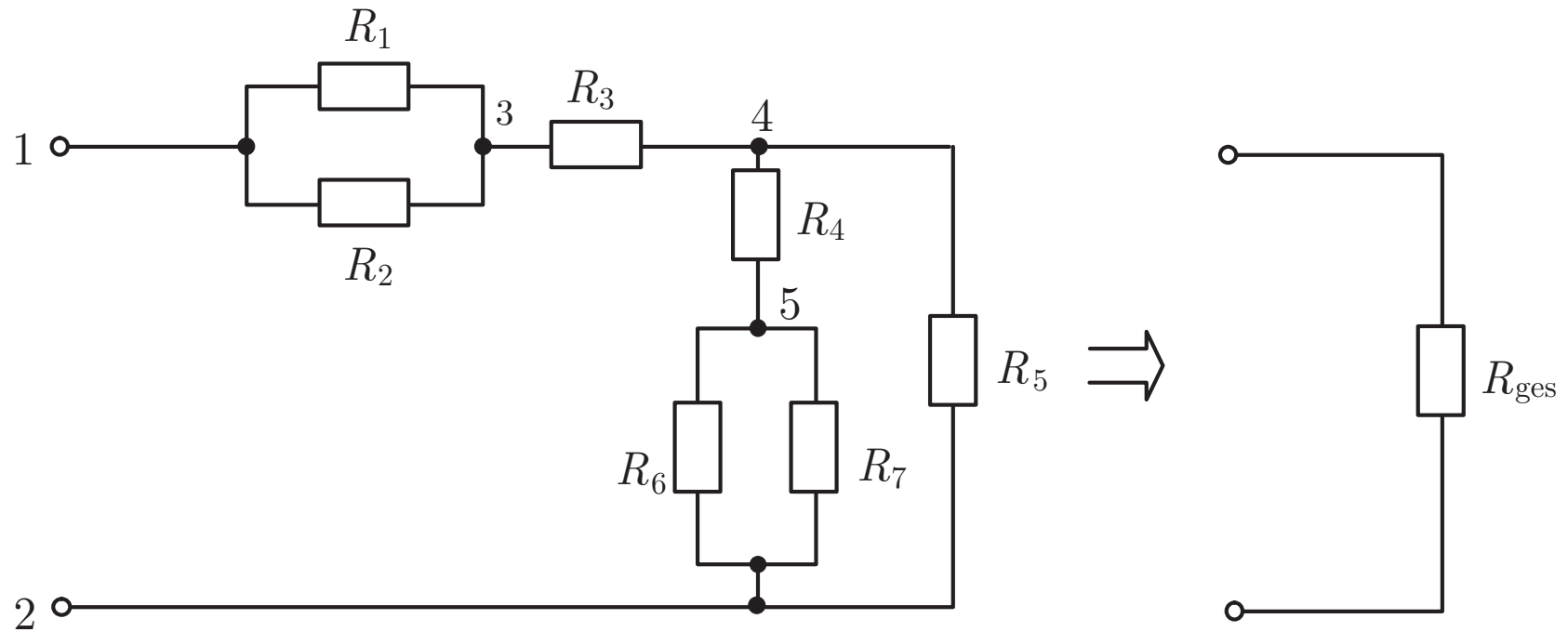
**Abb. 4.3. Planungsaufgabe**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



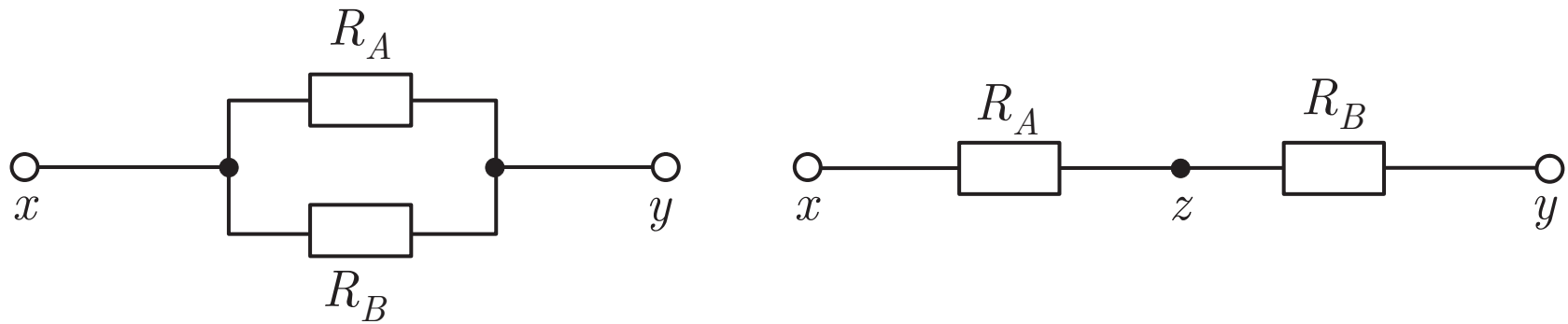
**Abb. 4.4. Vorwärtsverkettung von Regeln (Breite zuerst)**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 4.5. Reihen-Parallelschaltung von Widerständen**

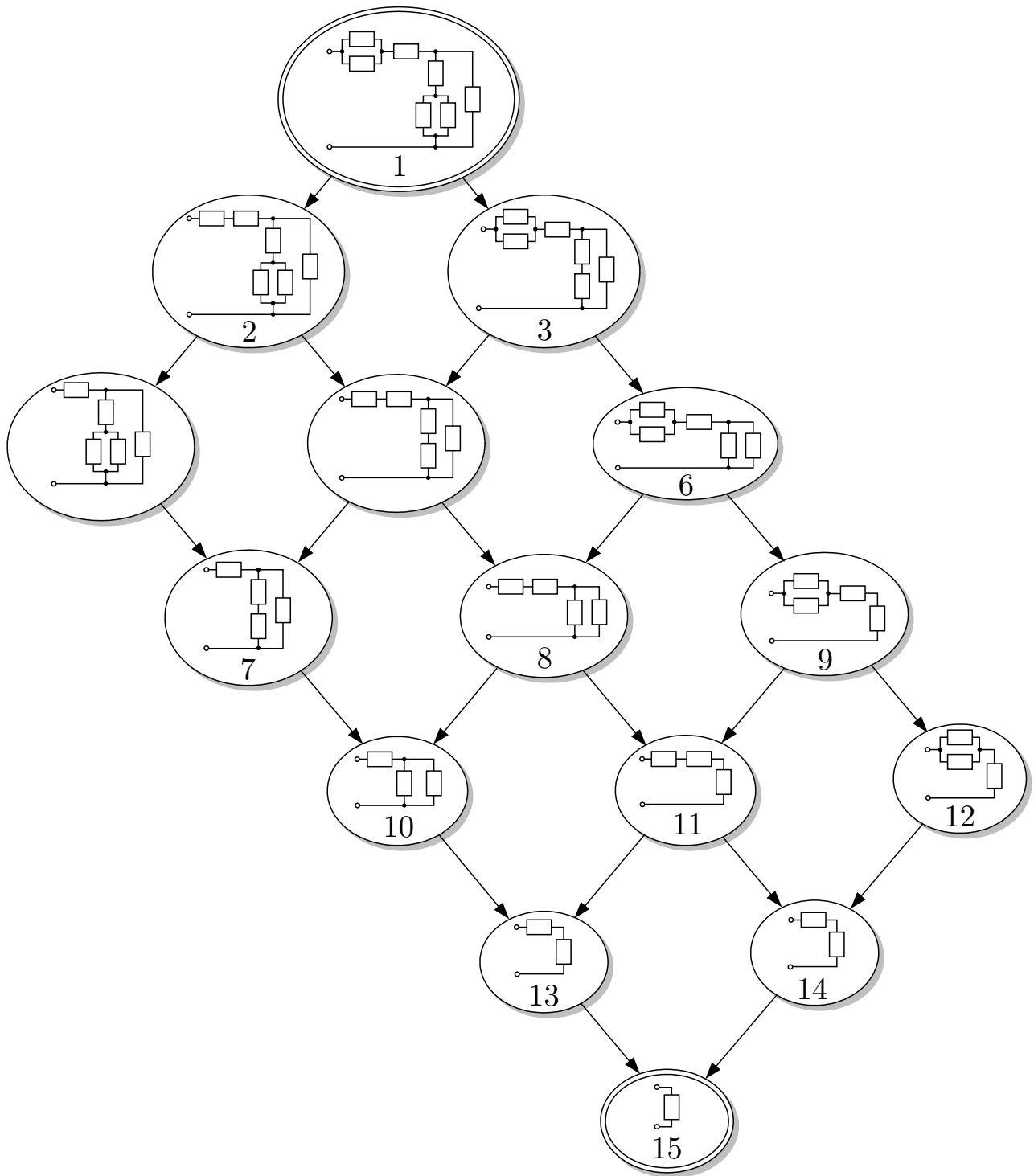
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 4.6. Zusammenfassbare Widerstände**

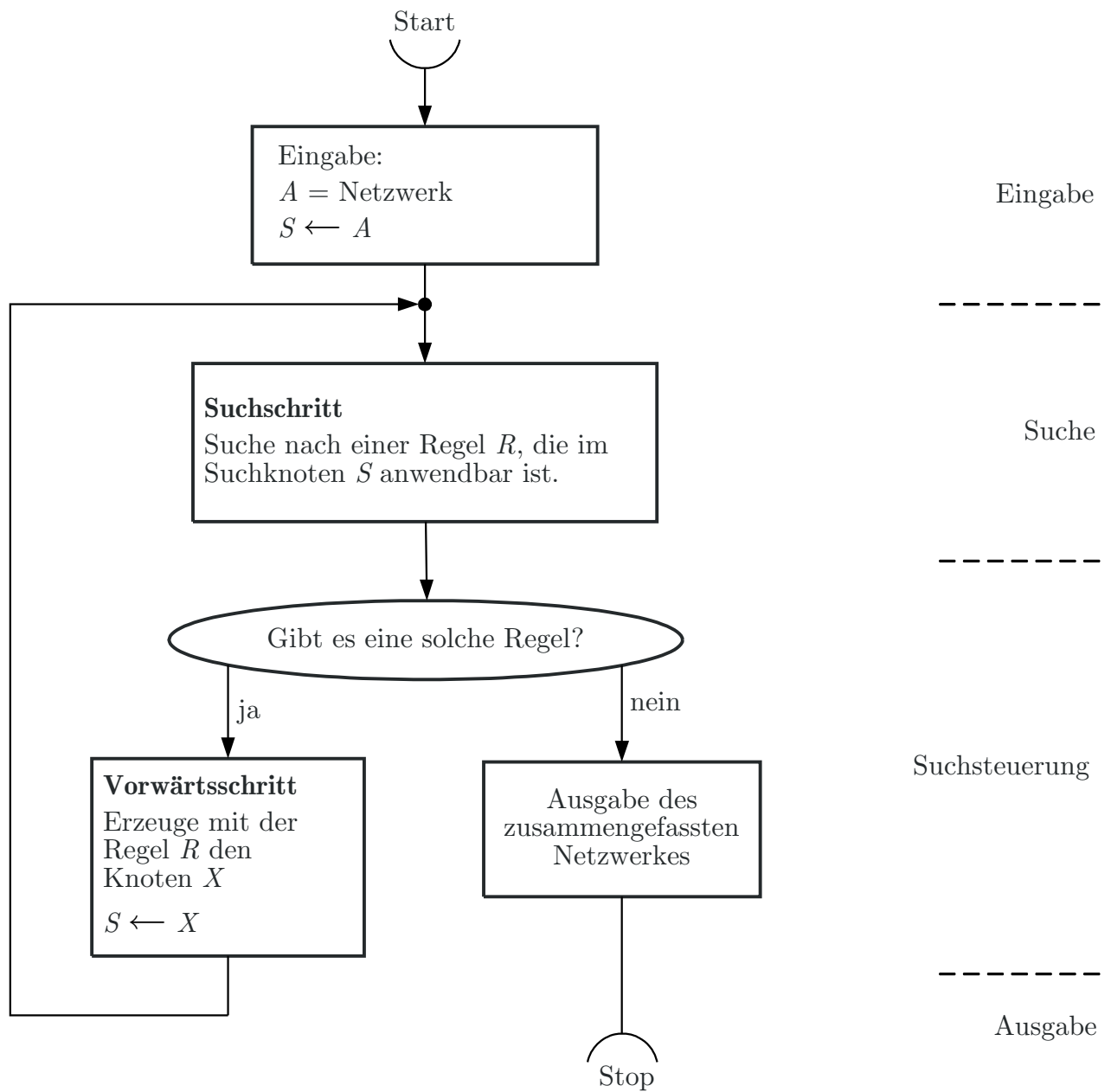
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





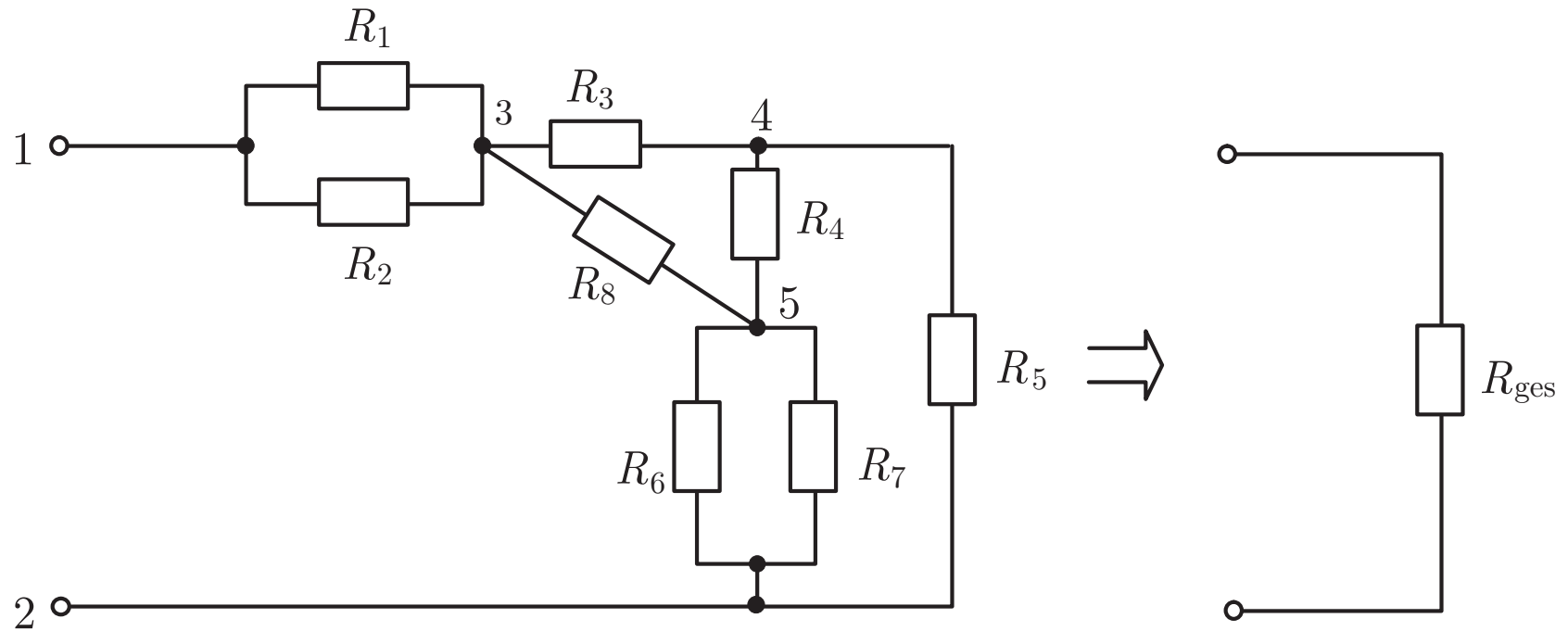
**Abb. 4.7: Umformung des Widerstandsnetzwerkes**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



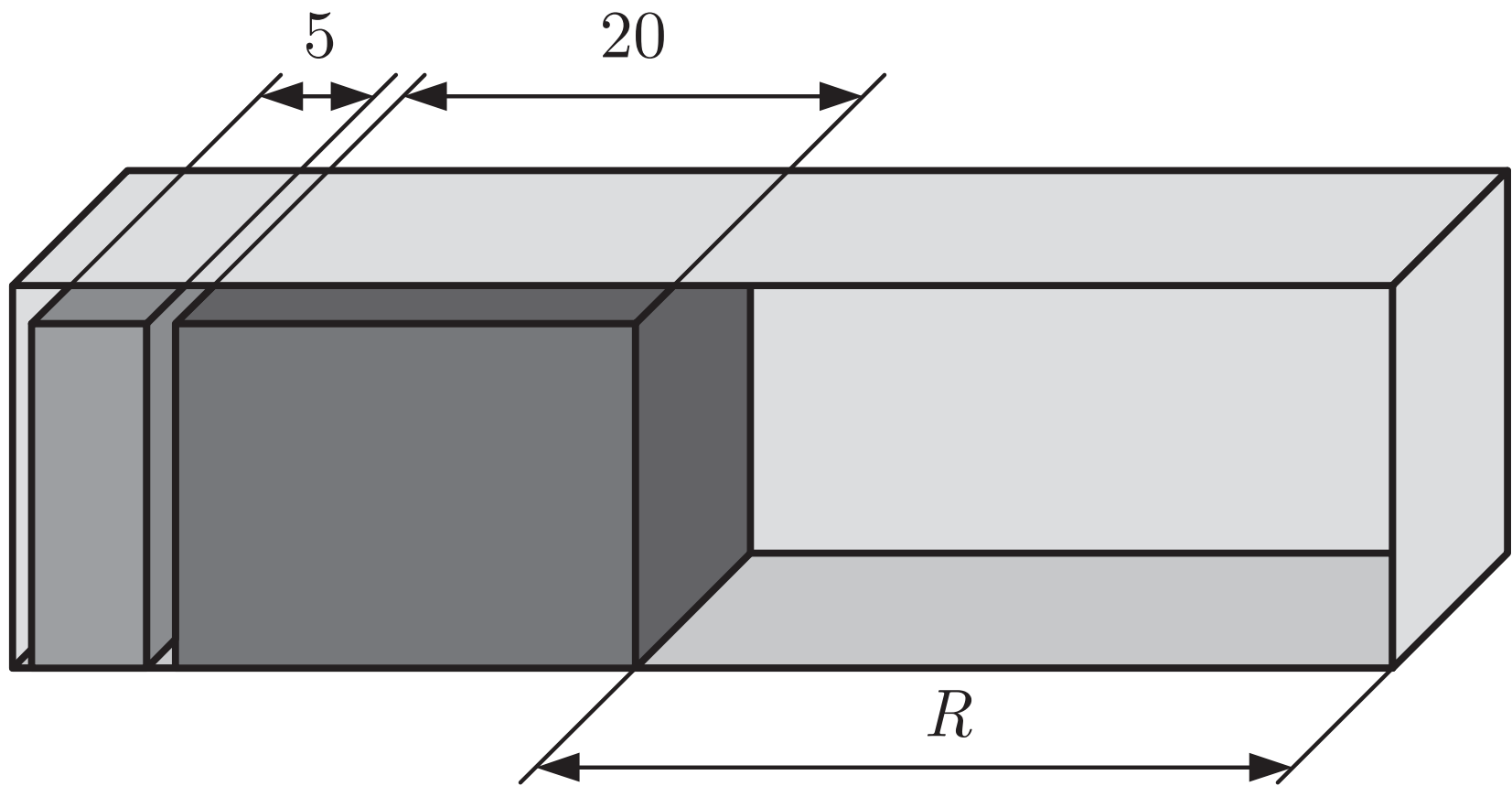
**Abb. 4.8: Algorithmus zur Vorwärtsverkettung der Aktionsregeln mit der Geradeaussuchstrategie**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



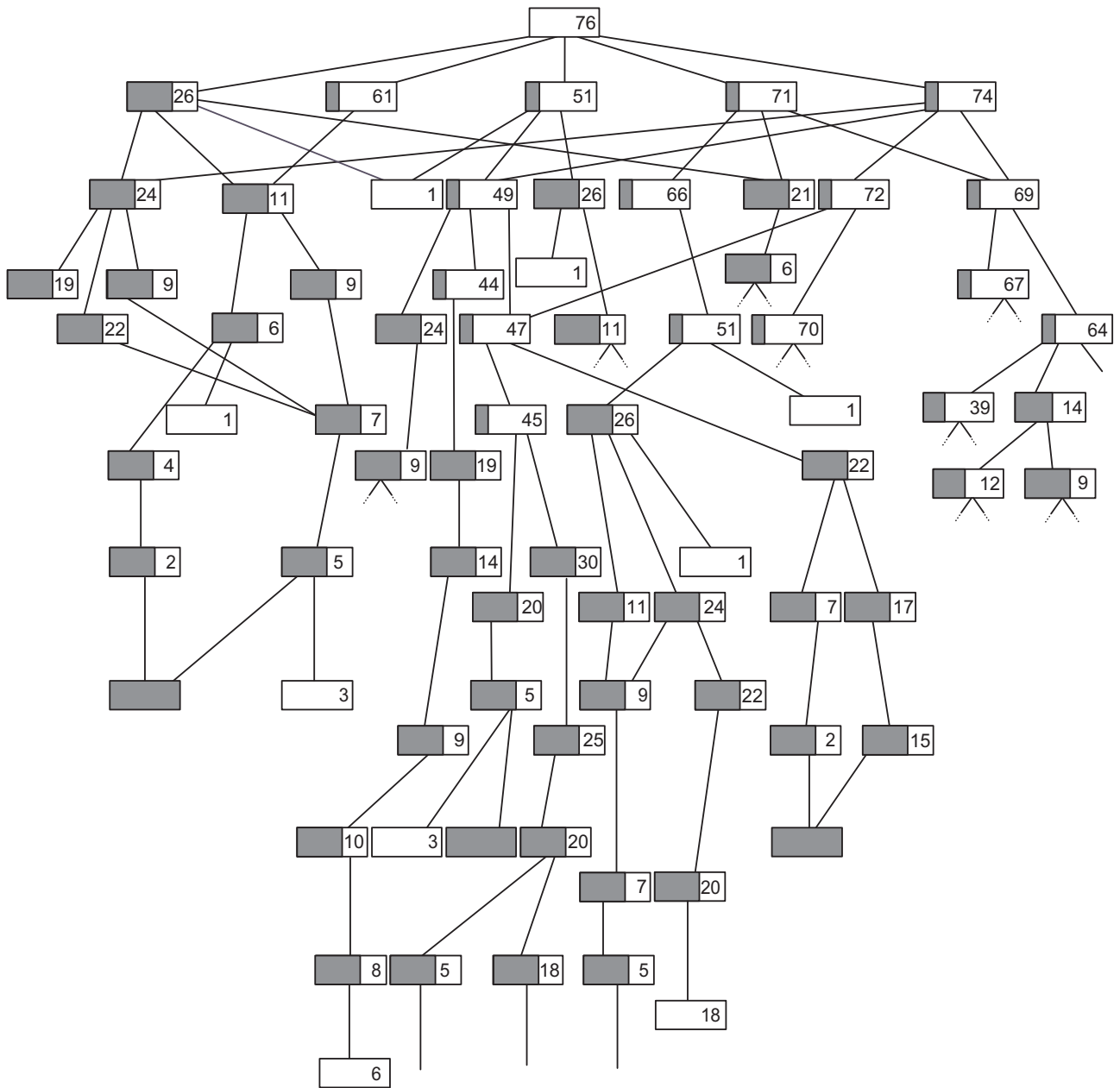
**Abb. 4.9. Widerstandsnetzwerk mit Dreieckschaltung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



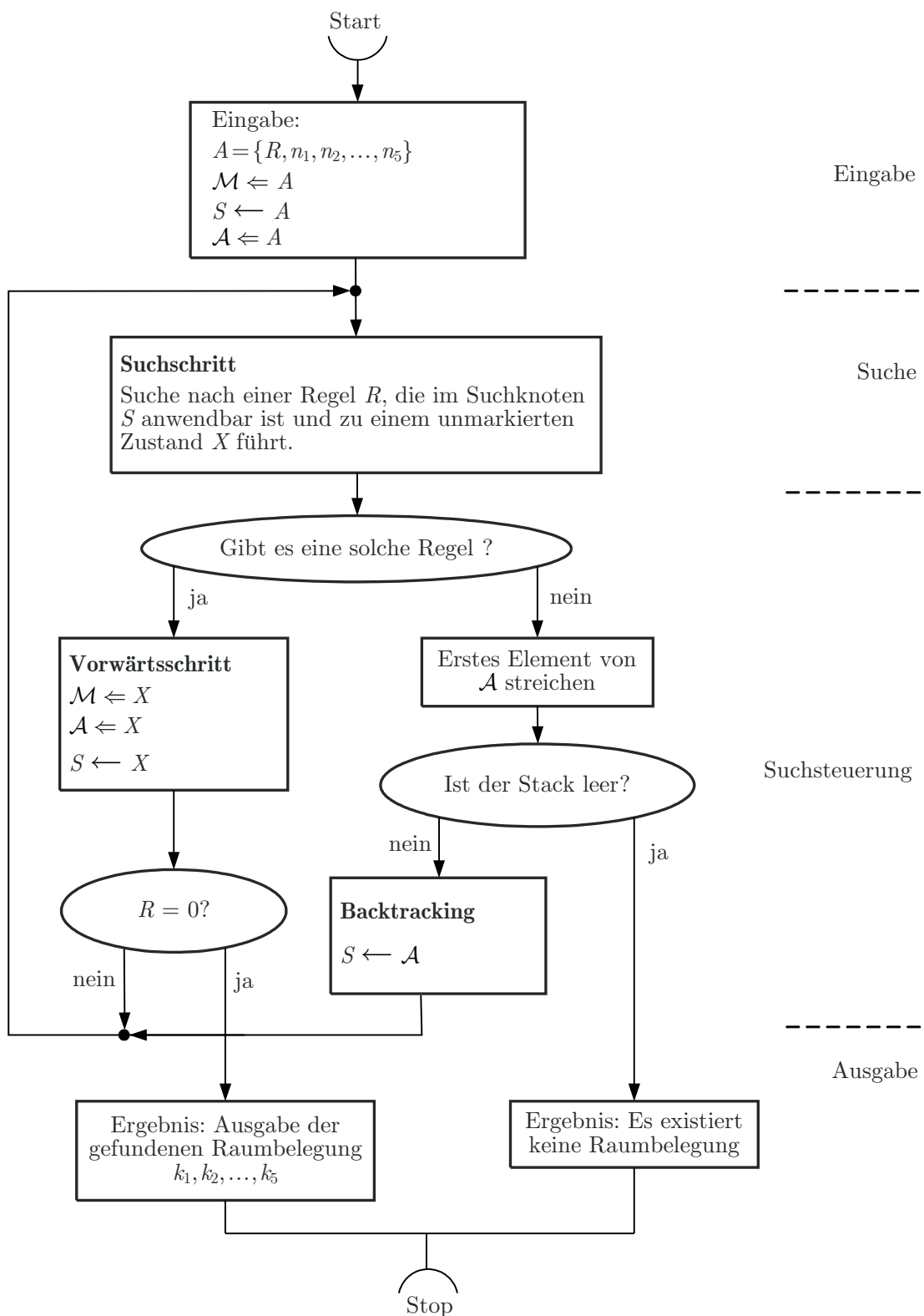
**Abb. 4.10. Packproblem**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



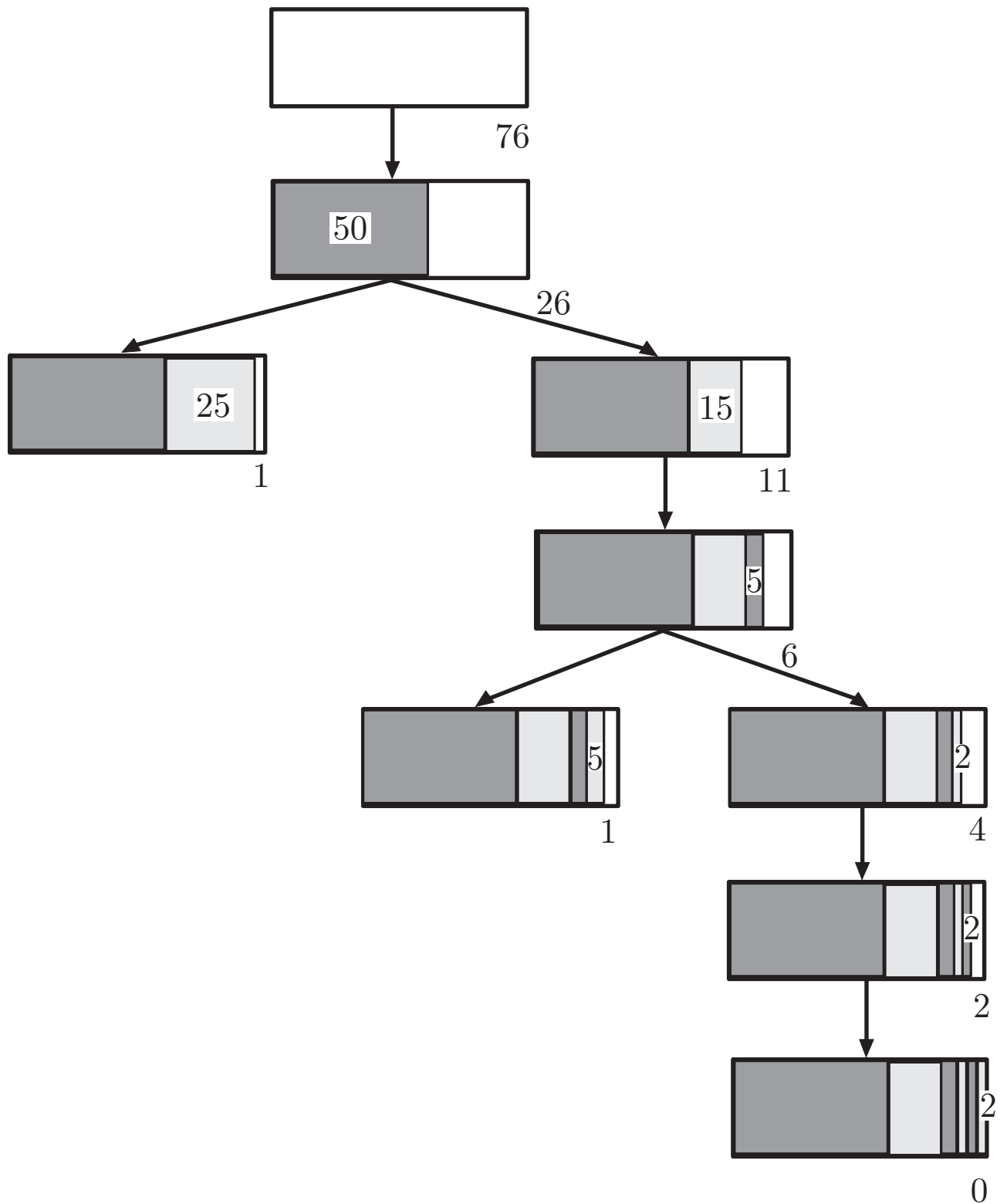
**Abb. 4.11: Ausschnitt aus dem Suchraum des Packproblems**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



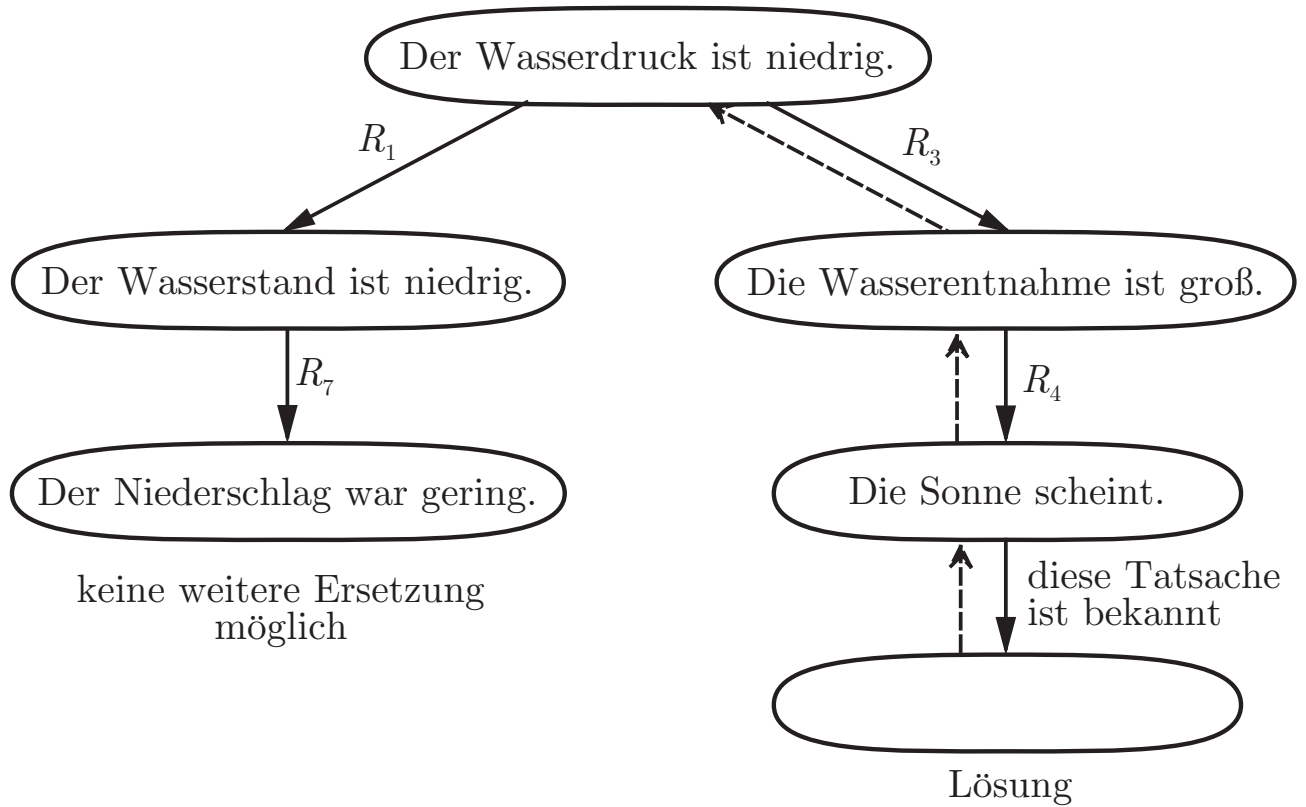
**Abb. 4.12. Algorithmus zur Vorwärtsverkettung der Aktionsregeln mit der Tiefe-zuerst-Suchstrategie**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 4.13: Lösung des Packproblems**

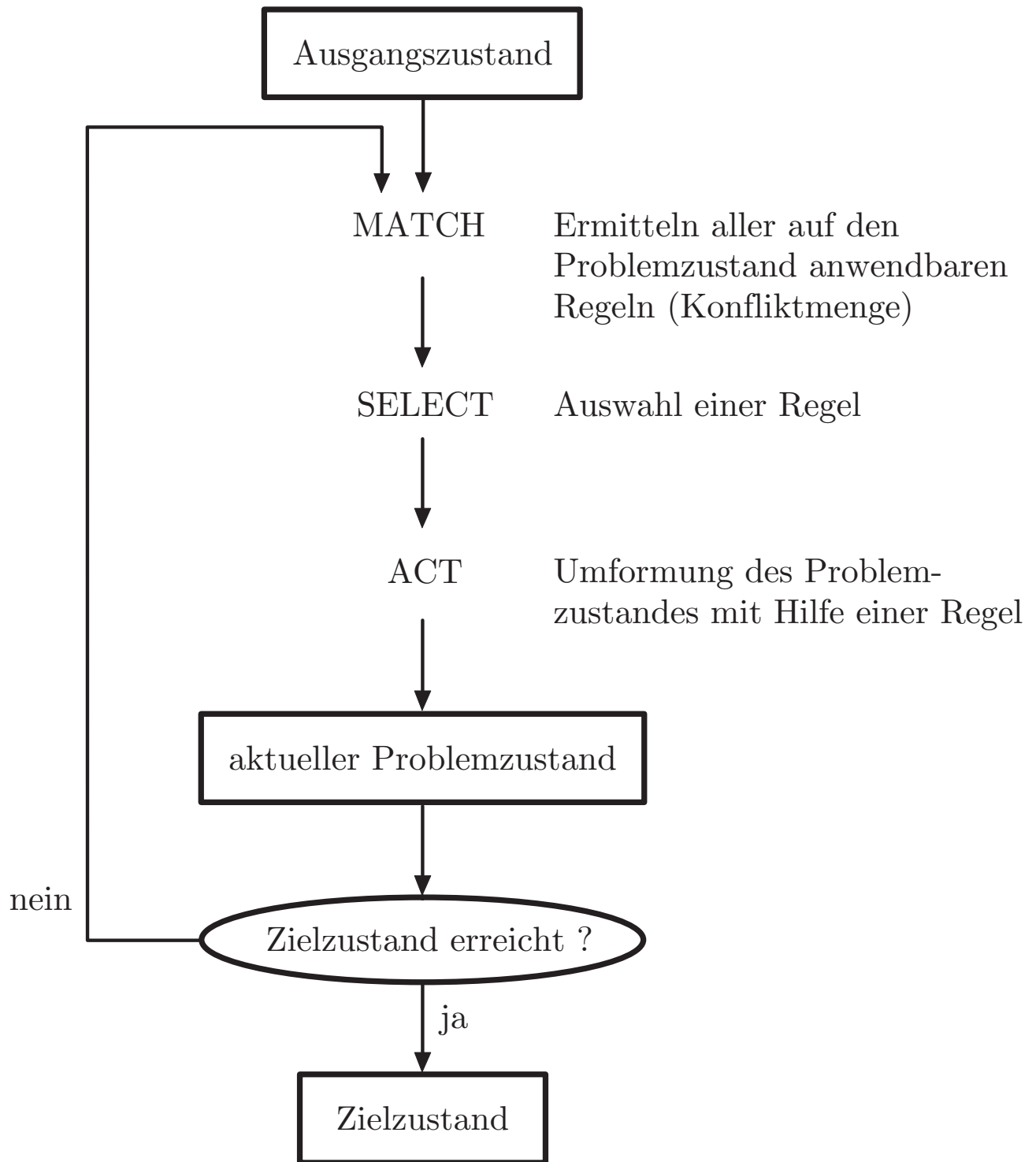
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 4.14: Suchgraph bei der Rückwärtsverkettung der Regeln des Wasserversorgungssystems**

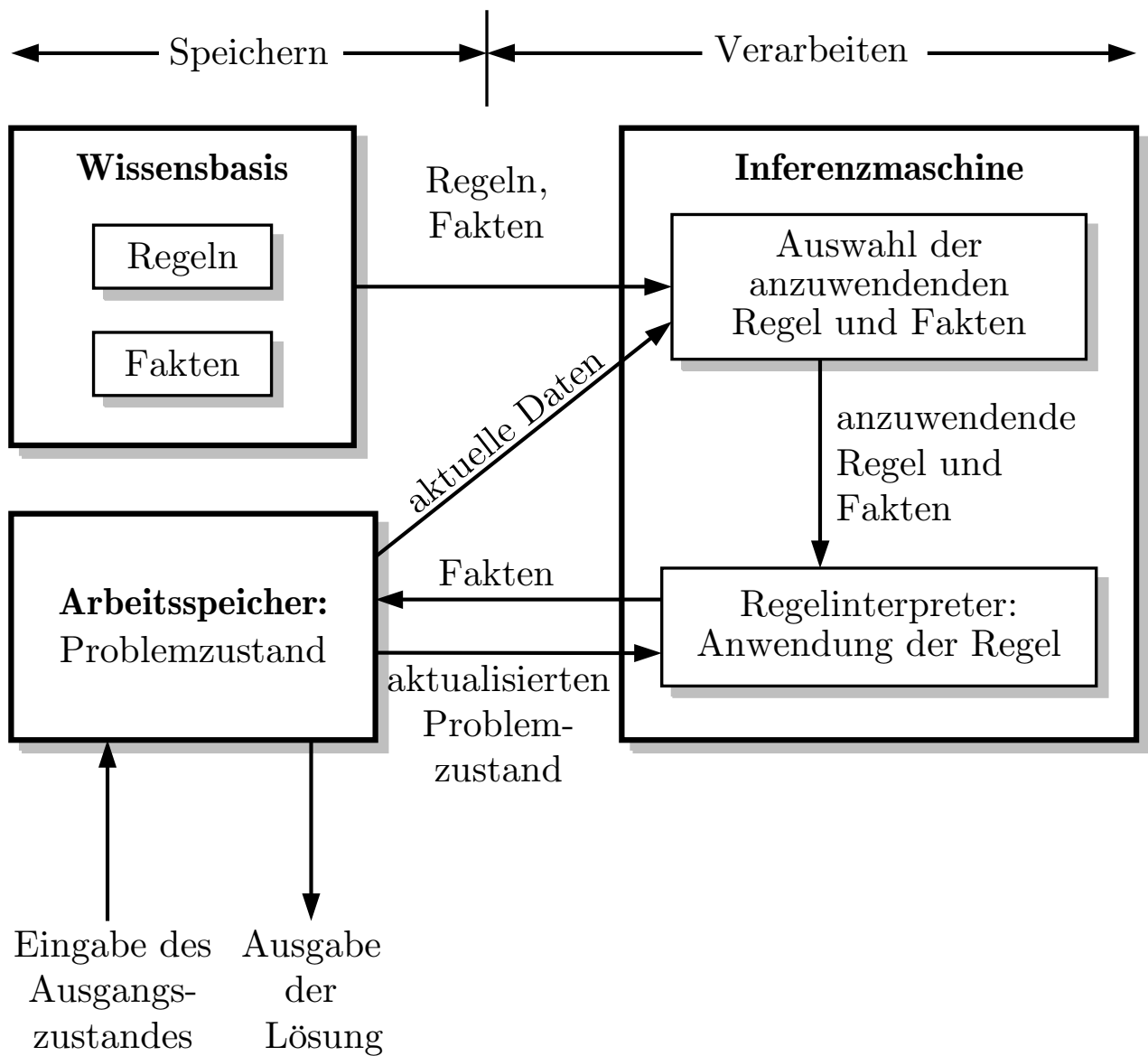
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





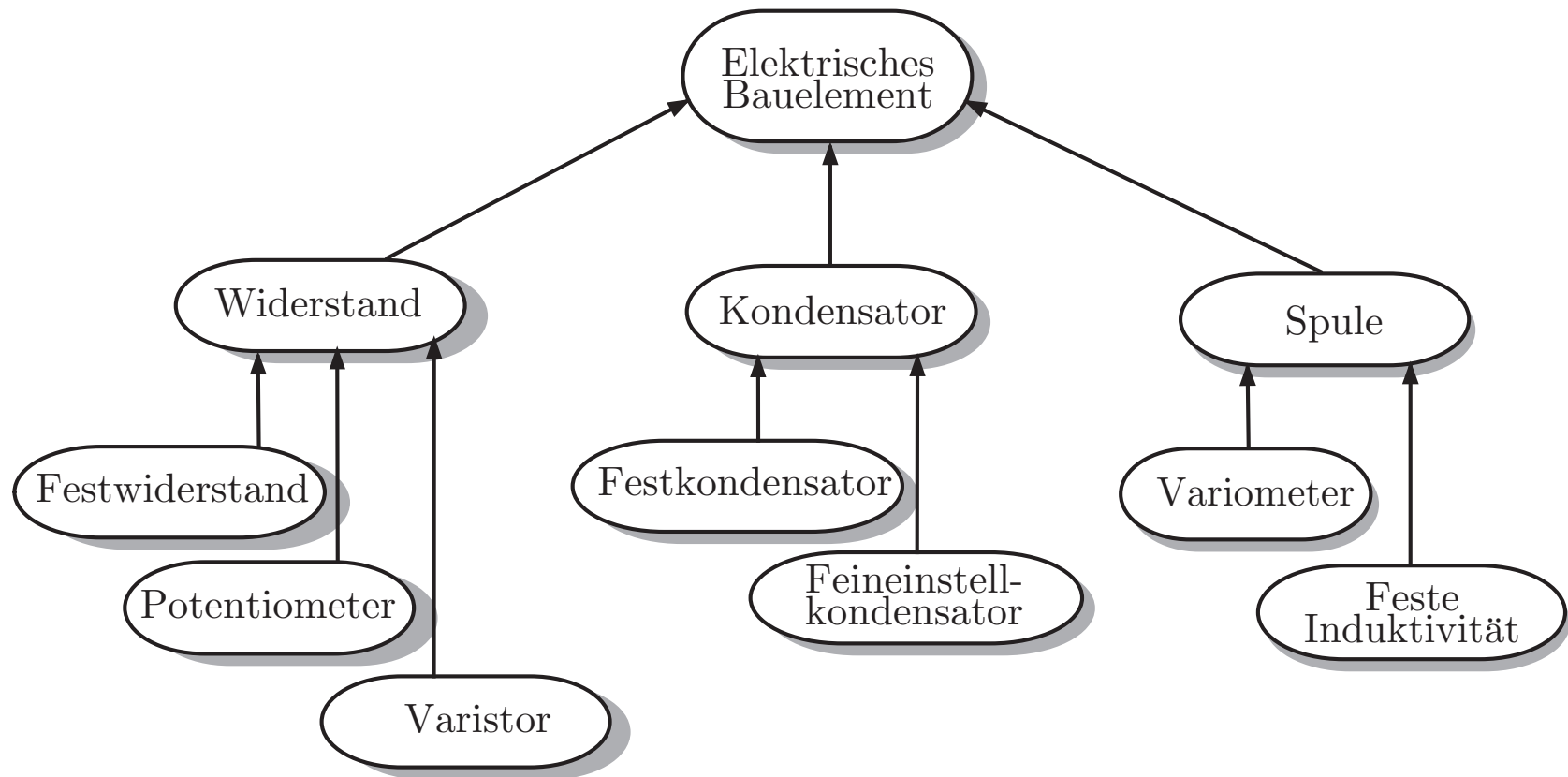
**Abb. 4.15: Allgemeiner Wissensverarbeitungsmechanismus**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



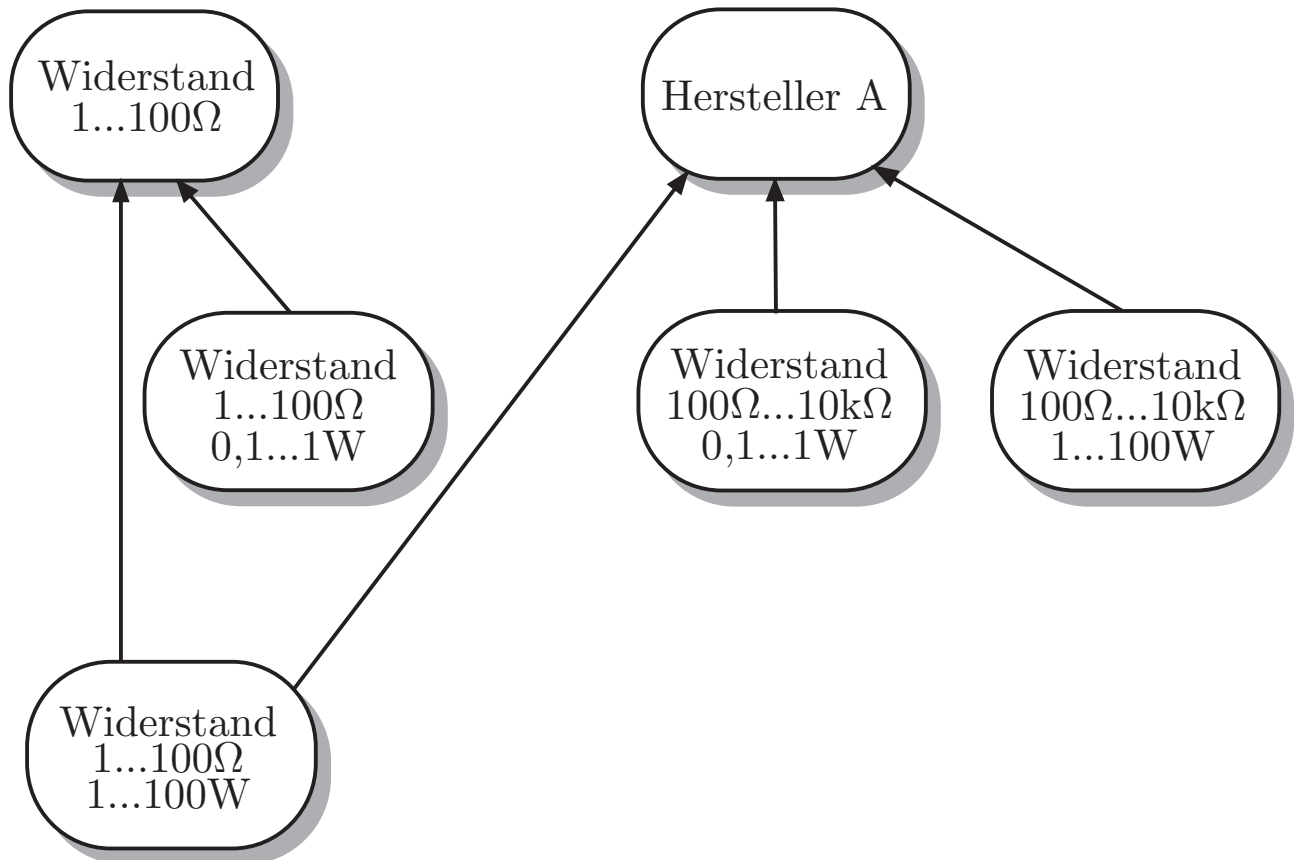
**Abb. 4.16: Architektur regelbasierter Systeme**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



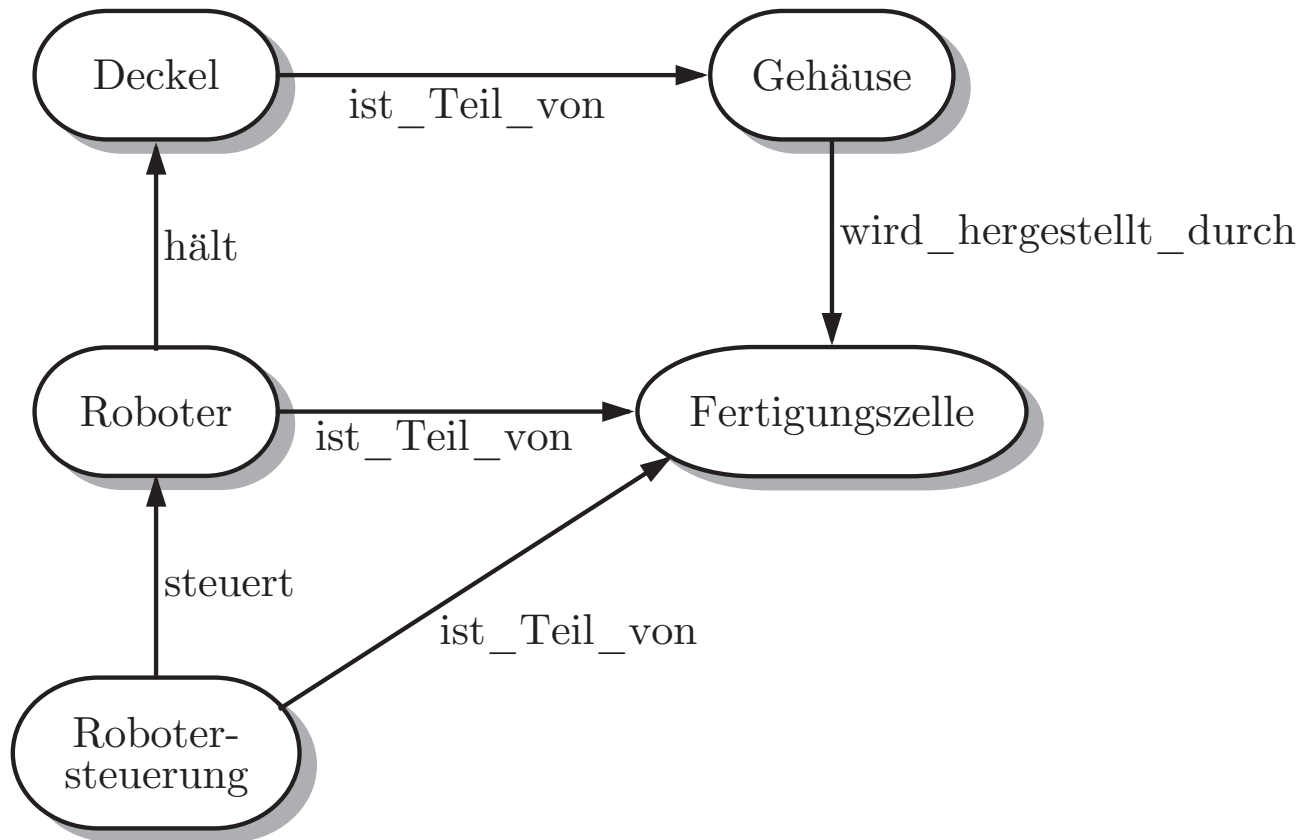
**Abb. 5.1. Taxonomie für elektrische Bauelemente**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



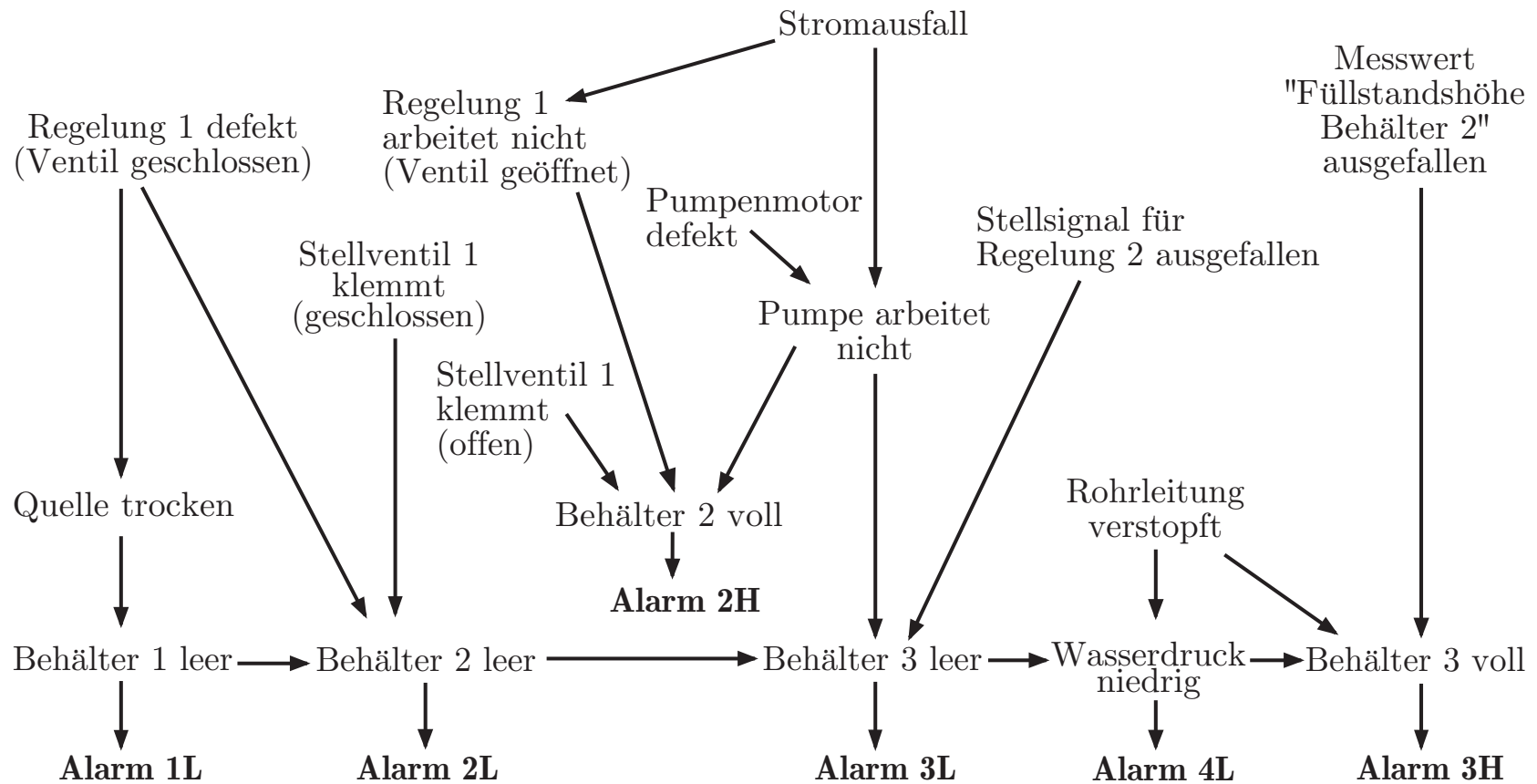
**Abb. 5.2: Beispiel für eine Multihierarchie**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



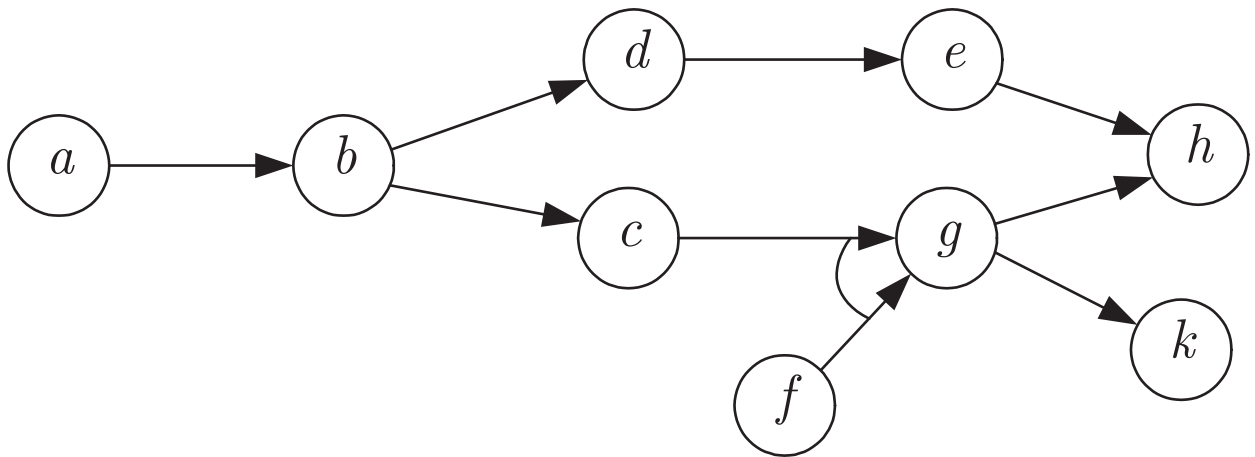
**Abb. 5.3: Semantisches Netz**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



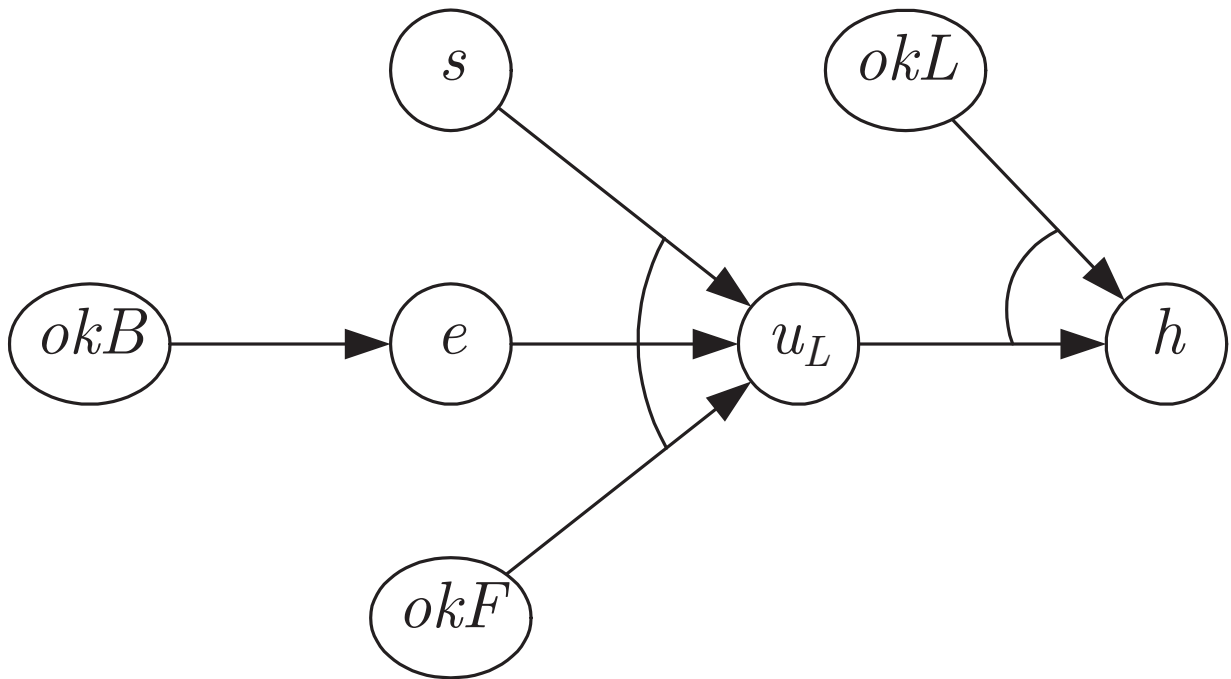
**Abb. 5.4. Kausales Netzwerk zur Beschreibung der Fehlerausbreitung in einem Behältersystem**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 5.5: Kausales Netz**

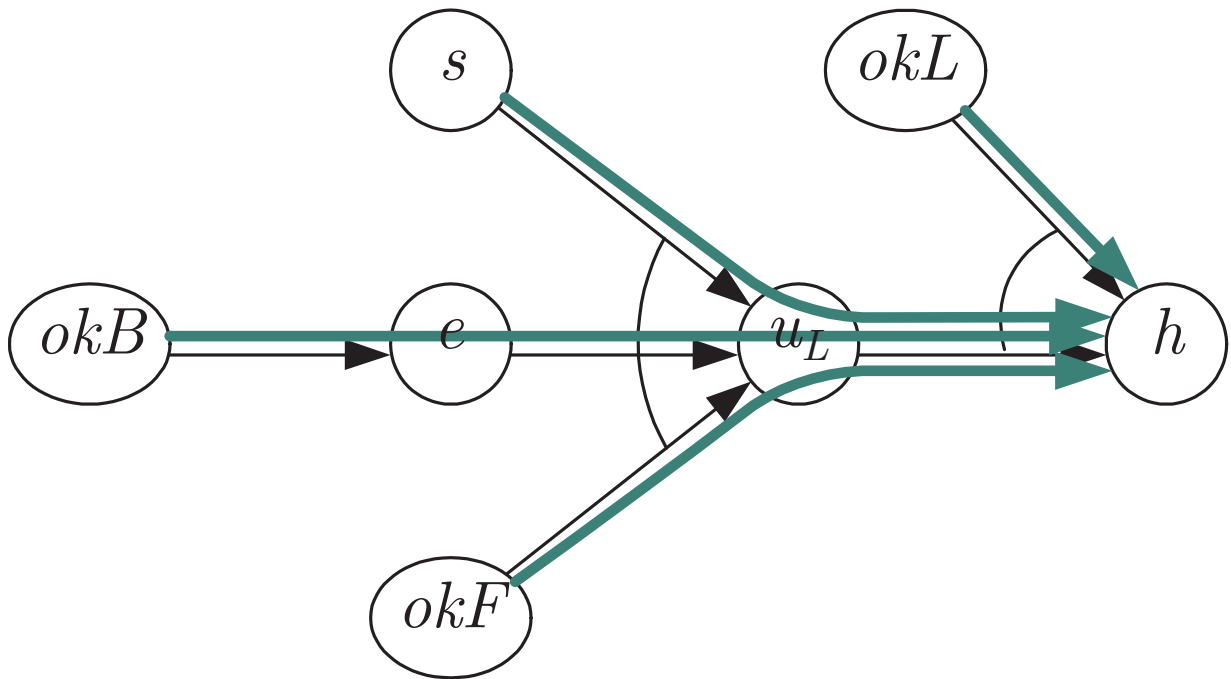
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 5.6: Kausales Netz für die Heckleuchte**

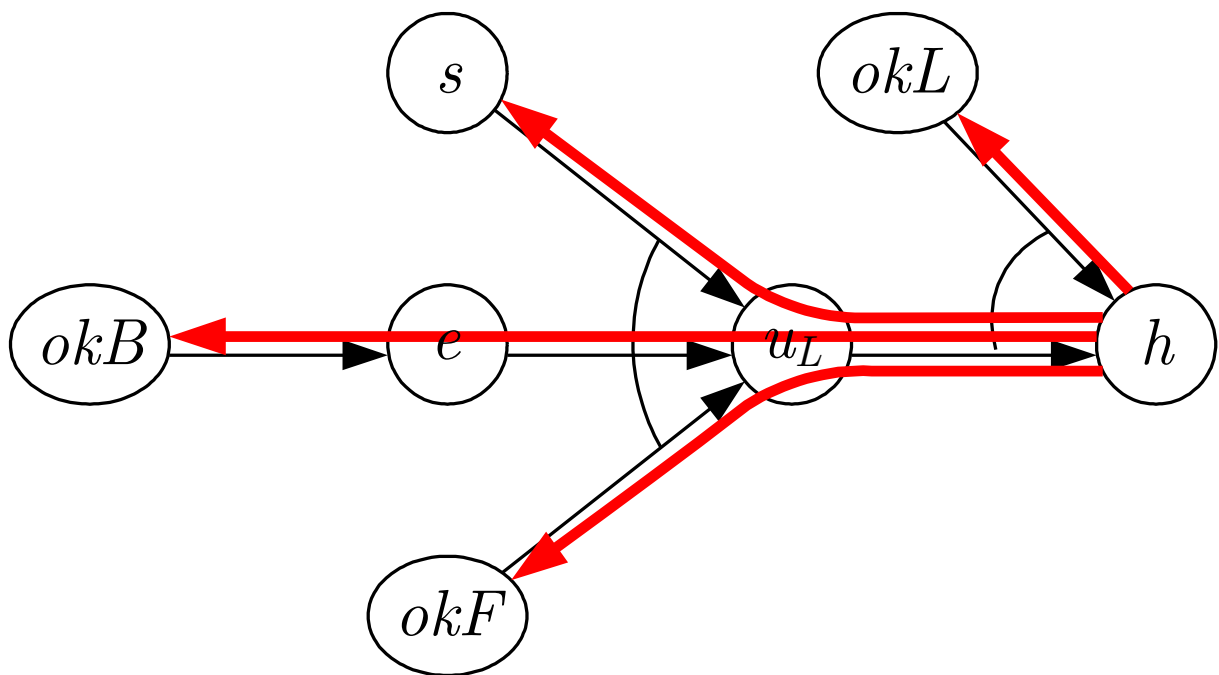
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





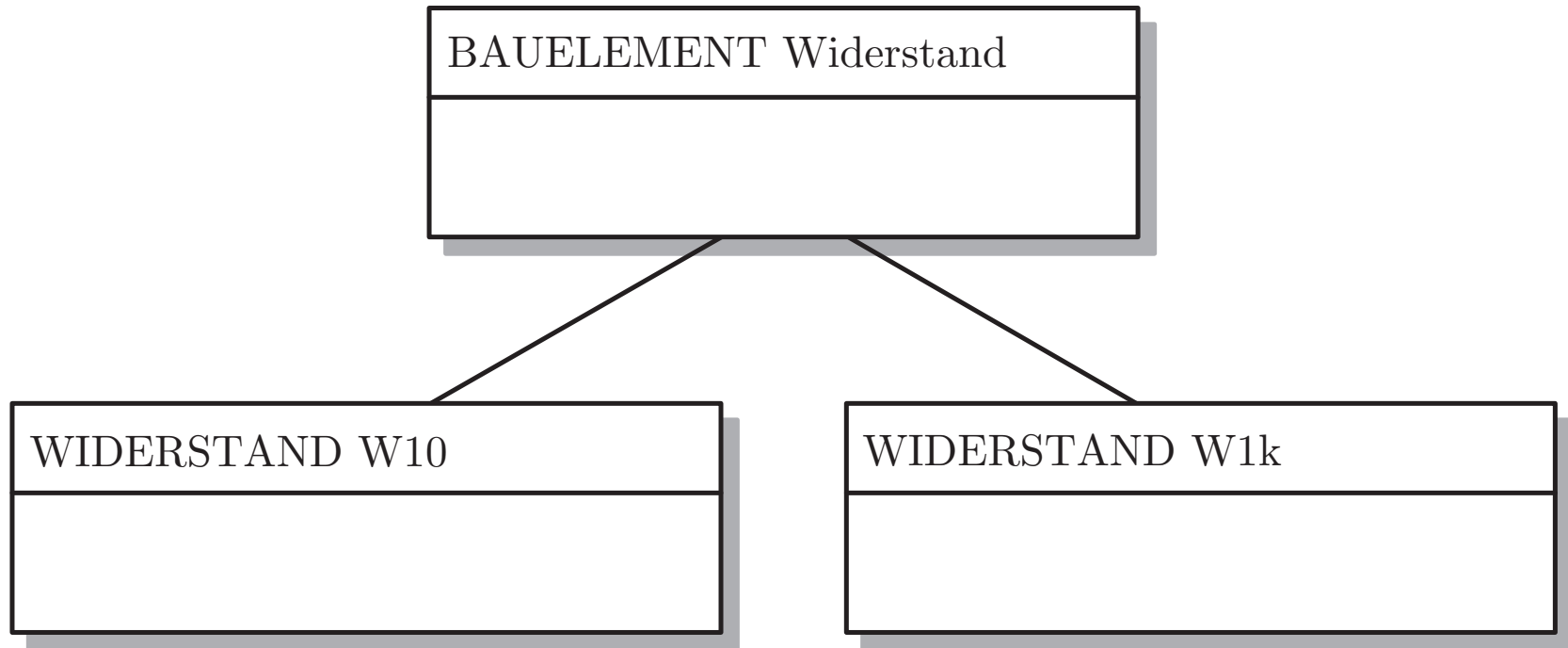
**Abb. 5.7: Kausales Schließen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



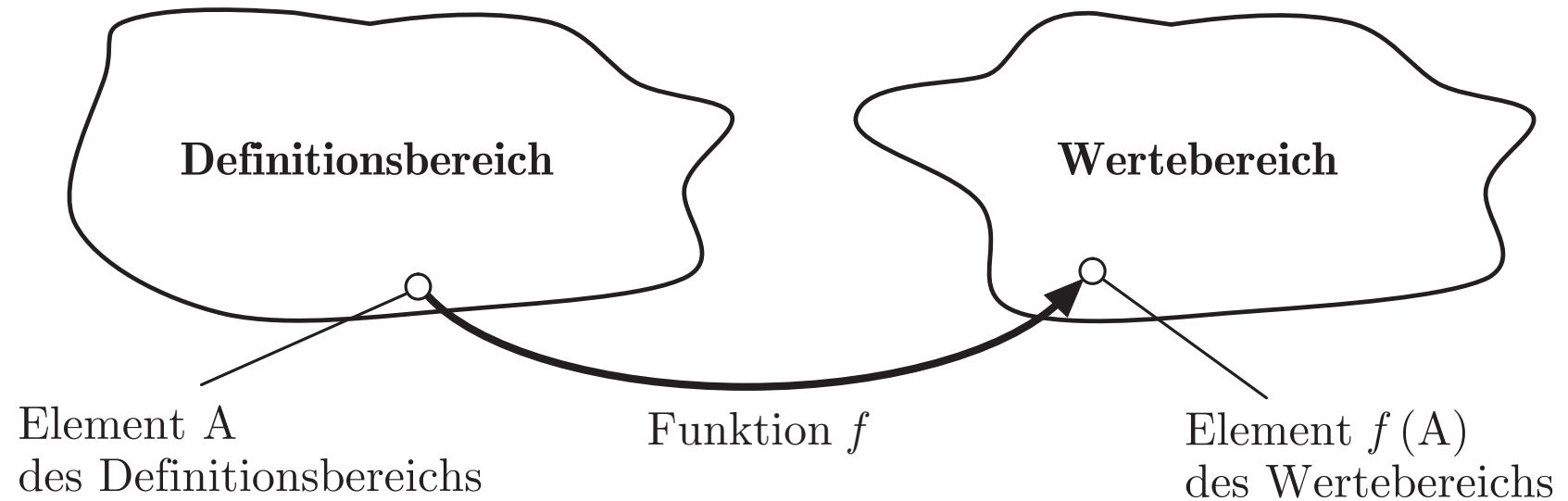
**Abb. 5.7: Diagnostisches Schließen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



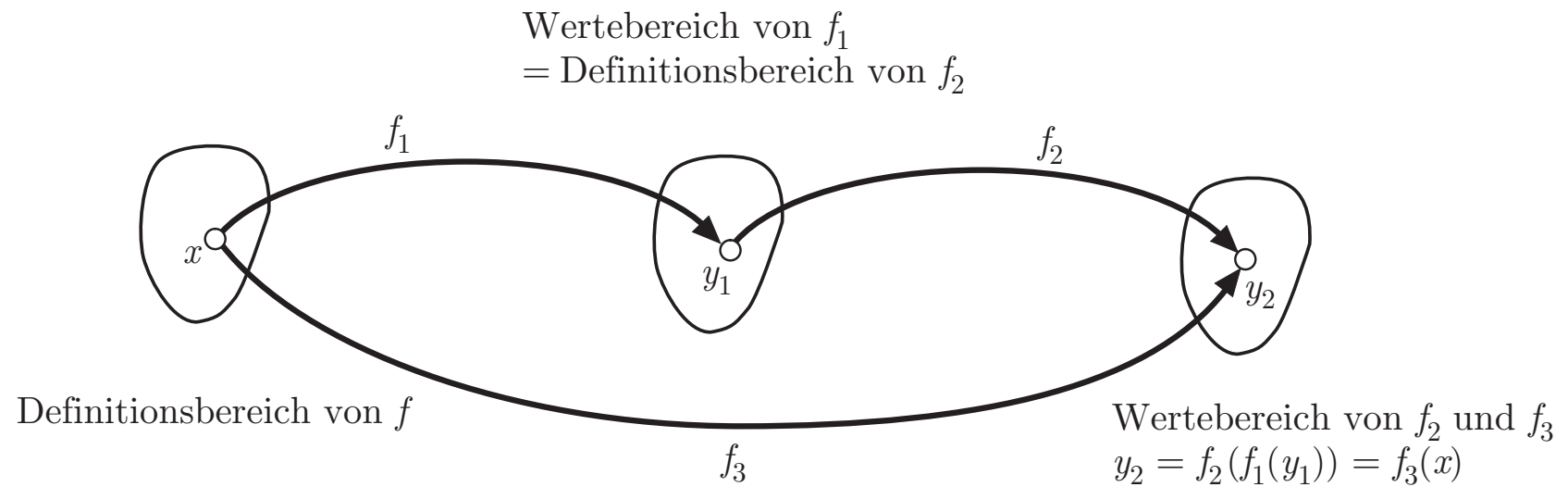
**Abb. 5.8. Hierarchische Anordnung von Frames**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



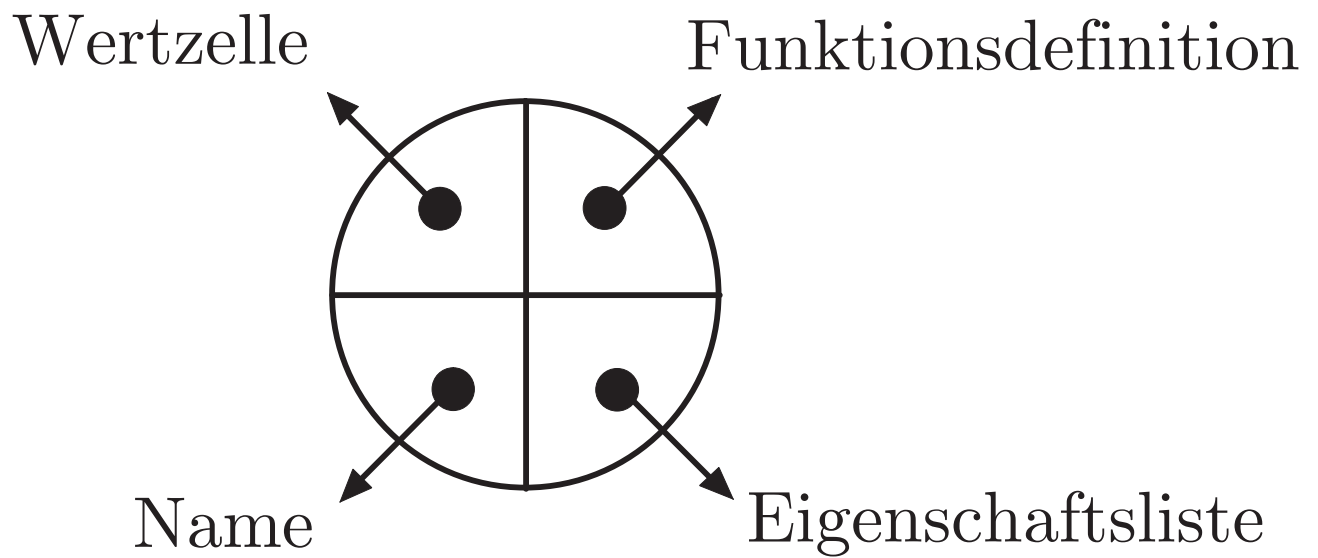
**Abb. 6.1. Funktion als Zuordnungsvorschrift**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



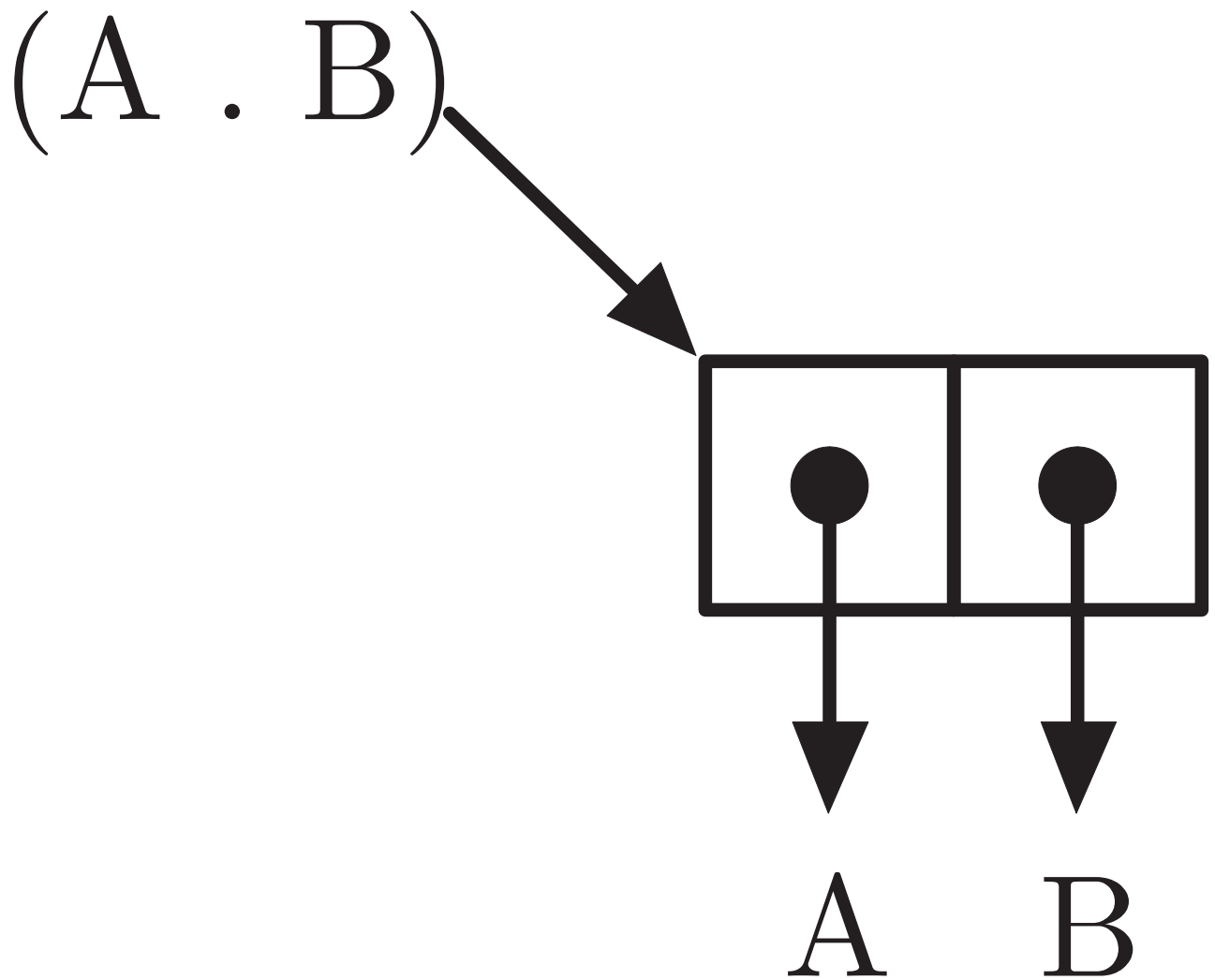
**Abb. 6.2. Zwei verkettete Funktionen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



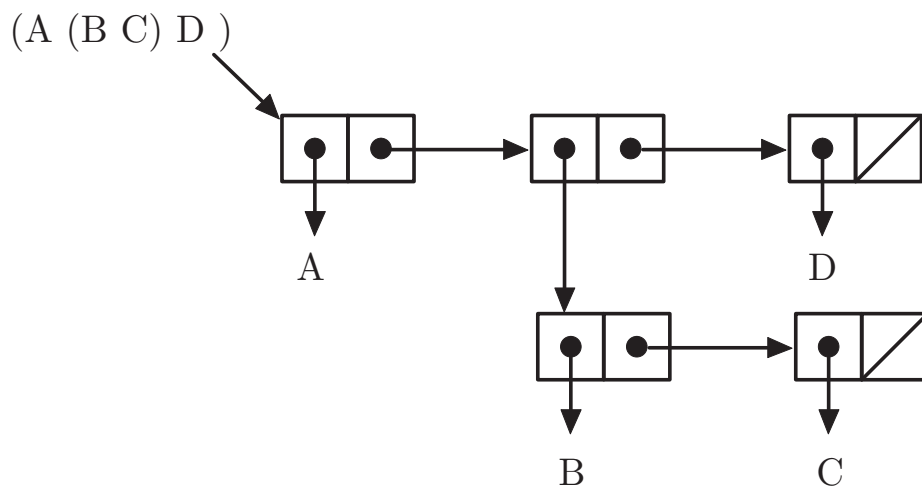
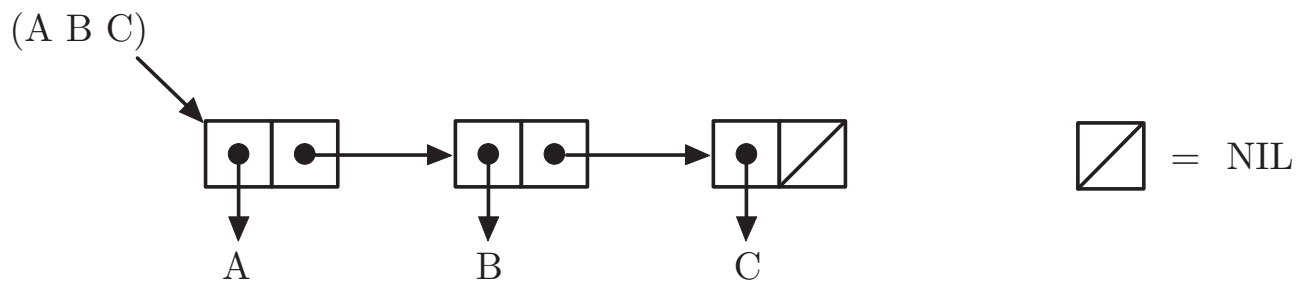
**Abb. 6.3: Literales Atom**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 6.4: Darstellung eines gepunkteten Paares**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

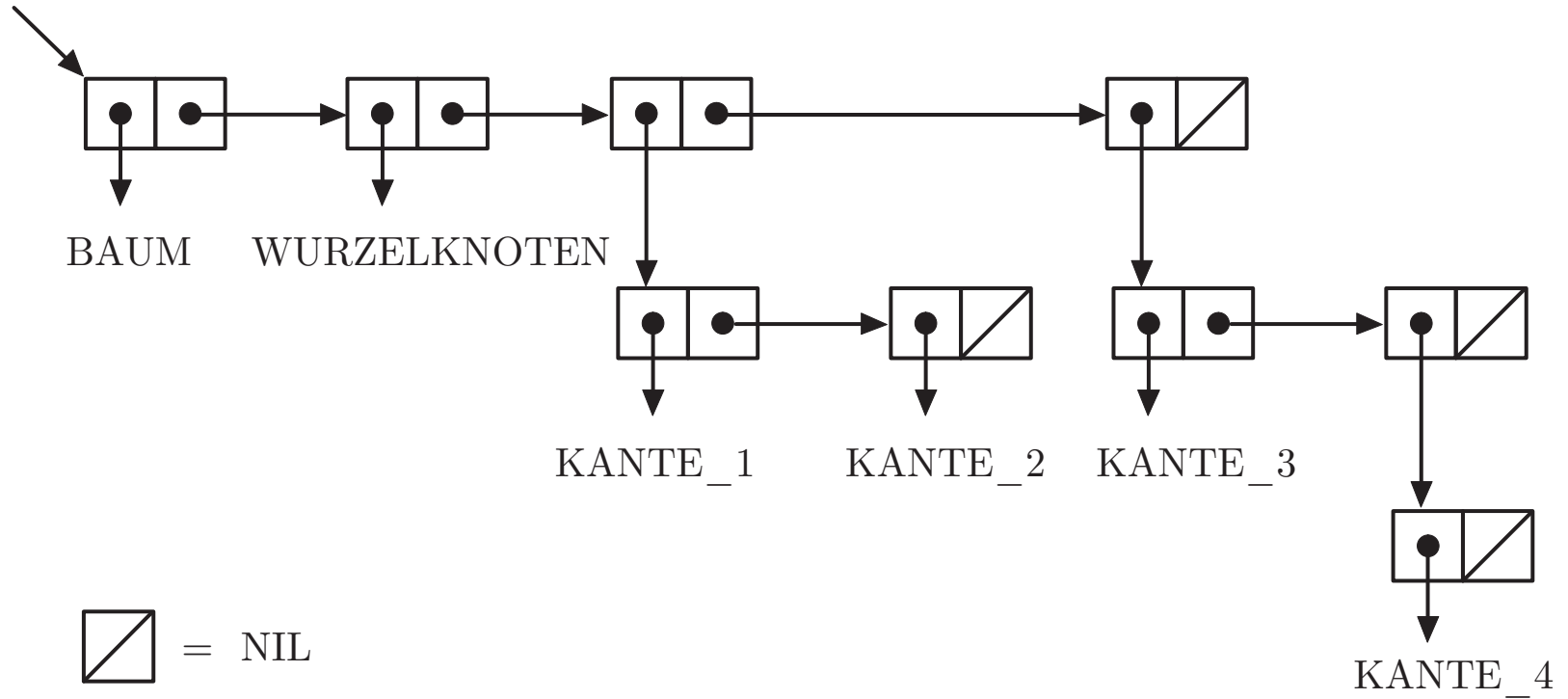


**Abb. 6.5: Darstellung der Liste (A B C) und (A (B C) D)**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

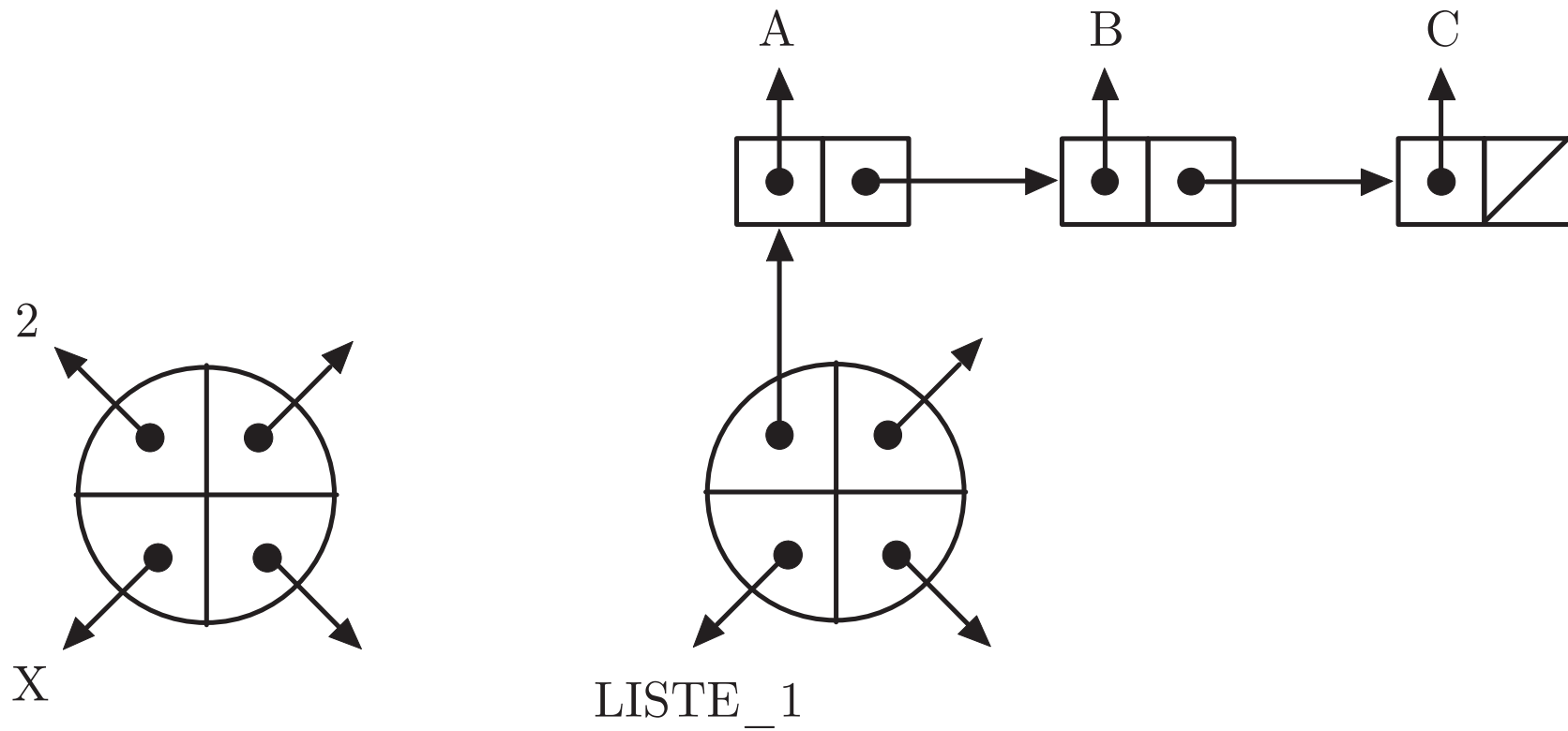


(BAUM WURZELKNOTEN (KANTE\_1 KANTE\_2) (KANTE\_3 (KANTE\_4)) )



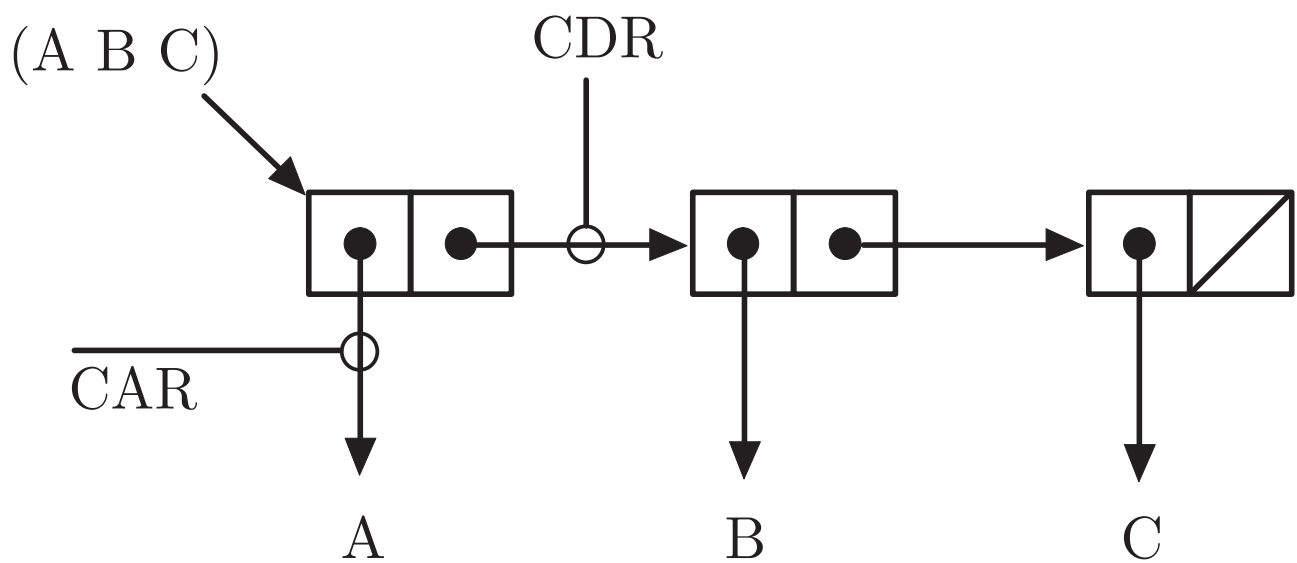
**Abb. 6.6. Darstellung eines Baumes**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 6.7. Seiteneffekte von SETQ**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



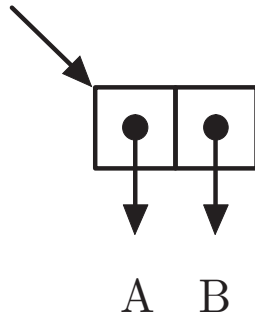
$(\text{CAR } '(A\ B\ C)) \Rightarrow A$

$(\text{CDR } '(A\ B\ C)) \Rightarrow (B\ C)$

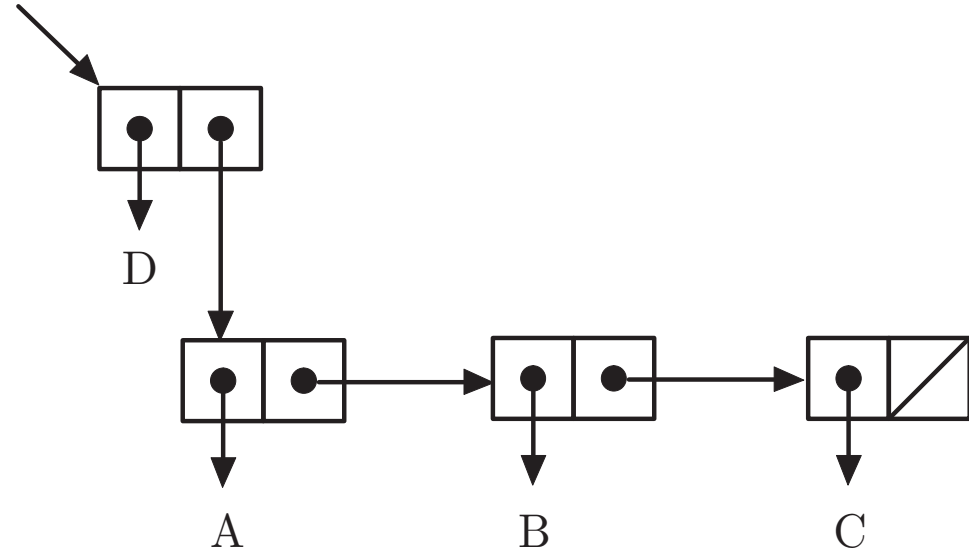
**Abb. 6.8: Veranschaulichung der Operationen CAR und CDR**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

(CONS 'A 'B)



(CONS 'D '(A B C))

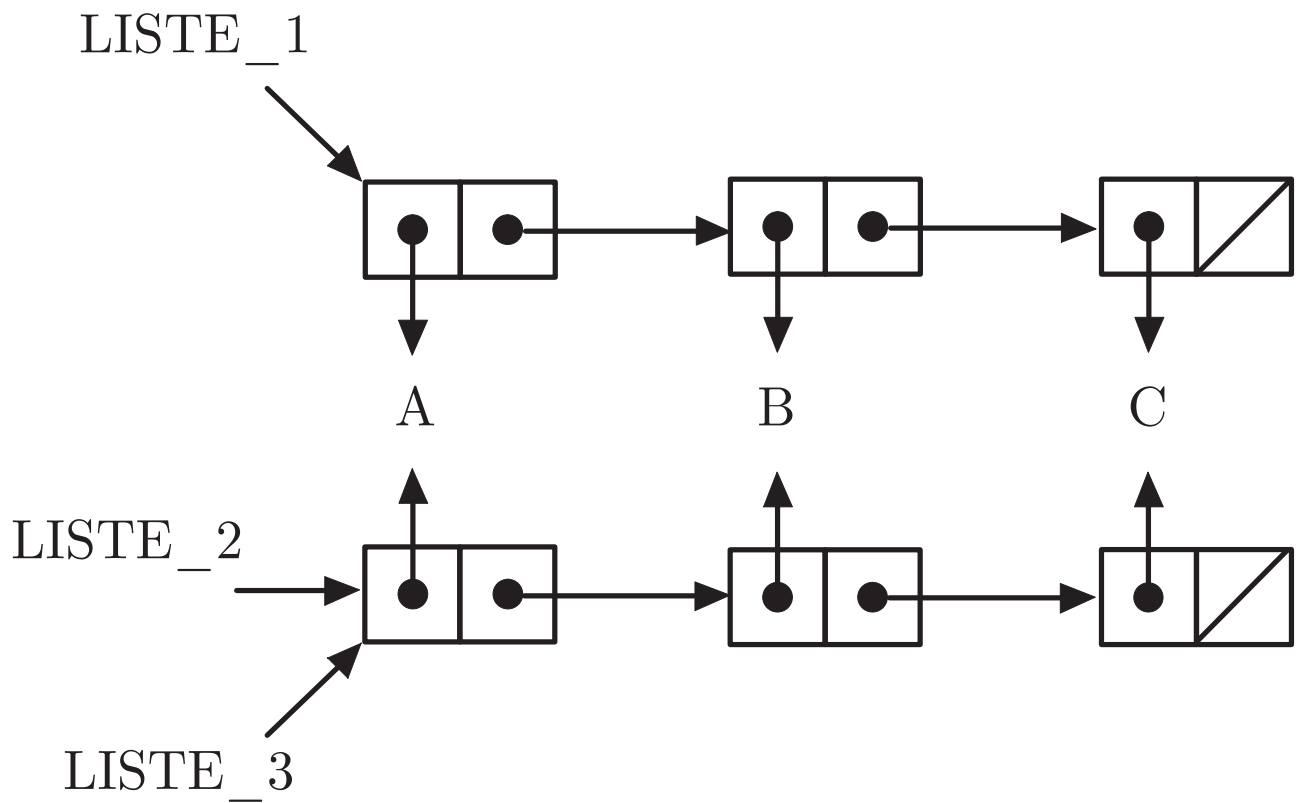


(CONS 'A 'B)  $\Rightarrow$  (A . B)

(CONS 'D '(A B C))  $\Rightarrow$  (D A B C)

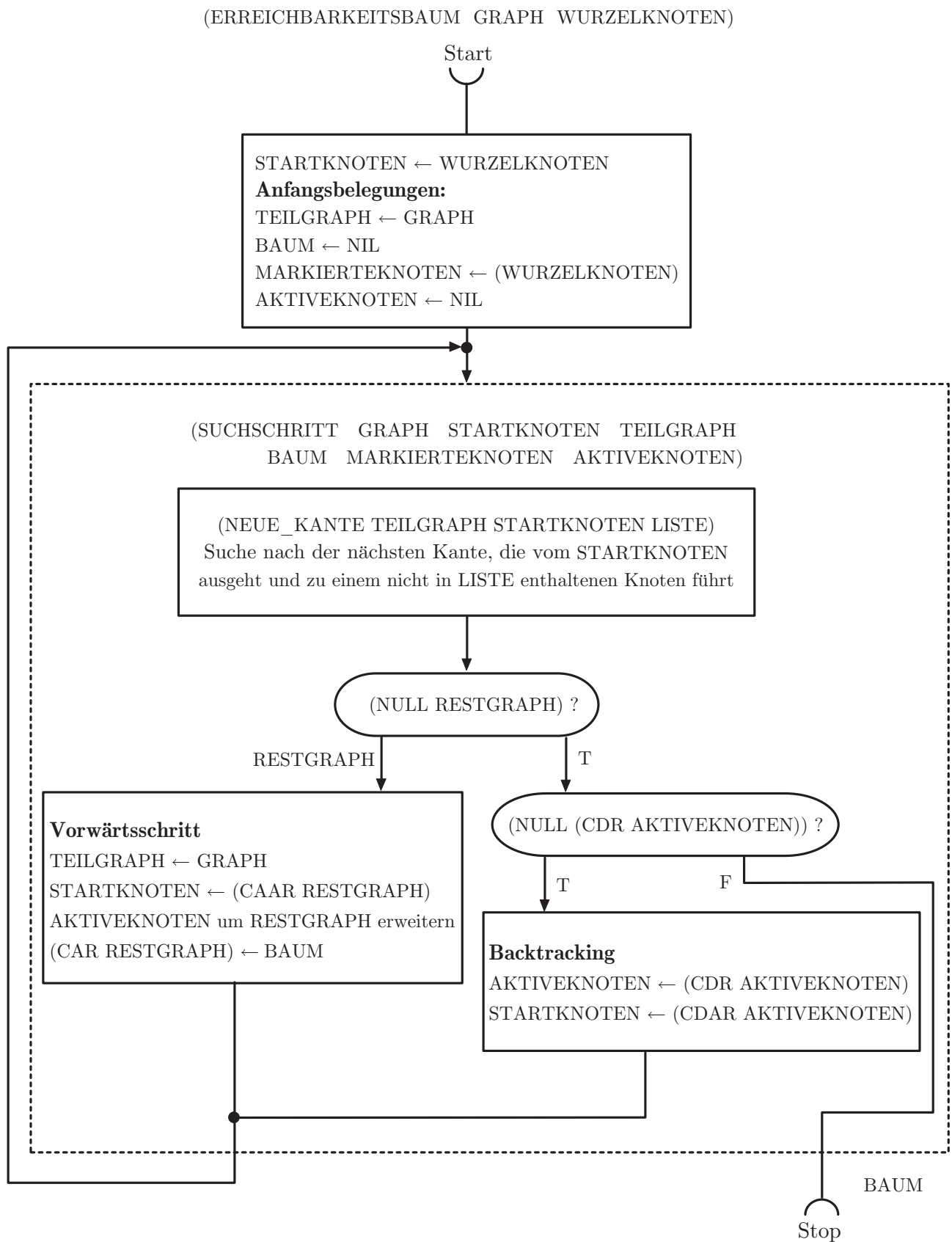
**Abb. 6.9. Veranschaulichung der Operation CONS**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

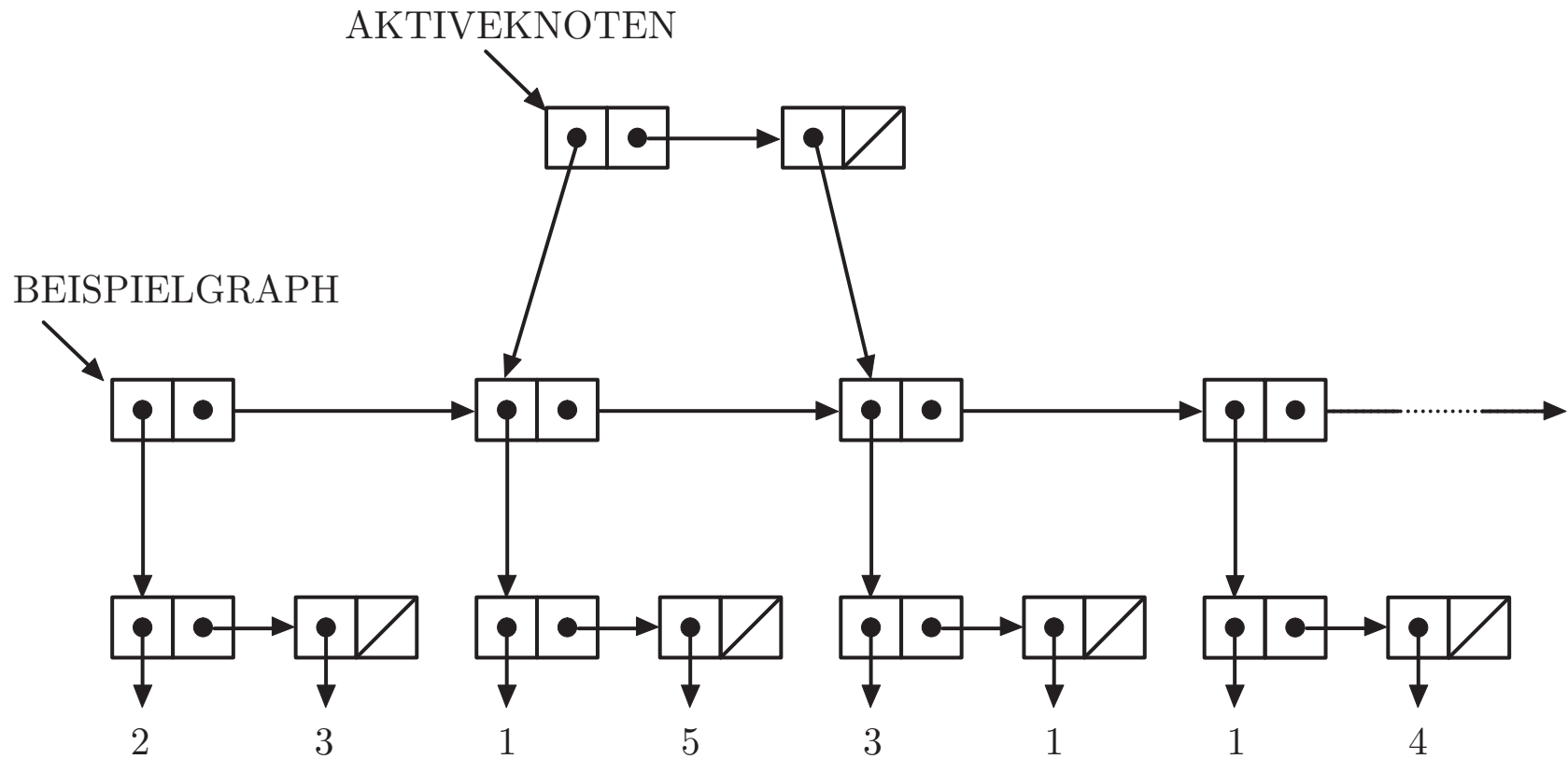


**Abb. 6.10: Interne Darstellung von LISTE\_1, LISTE\_2, LISTE\_3**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

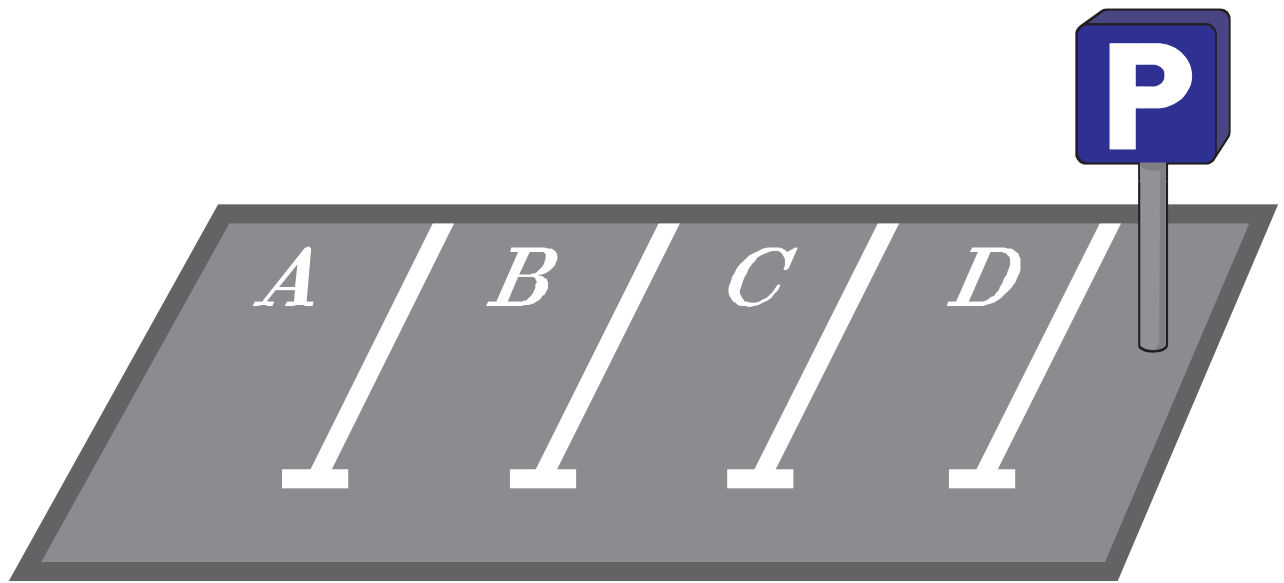


**Abb. 6.11: Tiefe-zuerst-Suche**



**Abb. 6.12. Interne Repräsentation von BEISPIELGRAPH und AKTIVEKNOTEN**

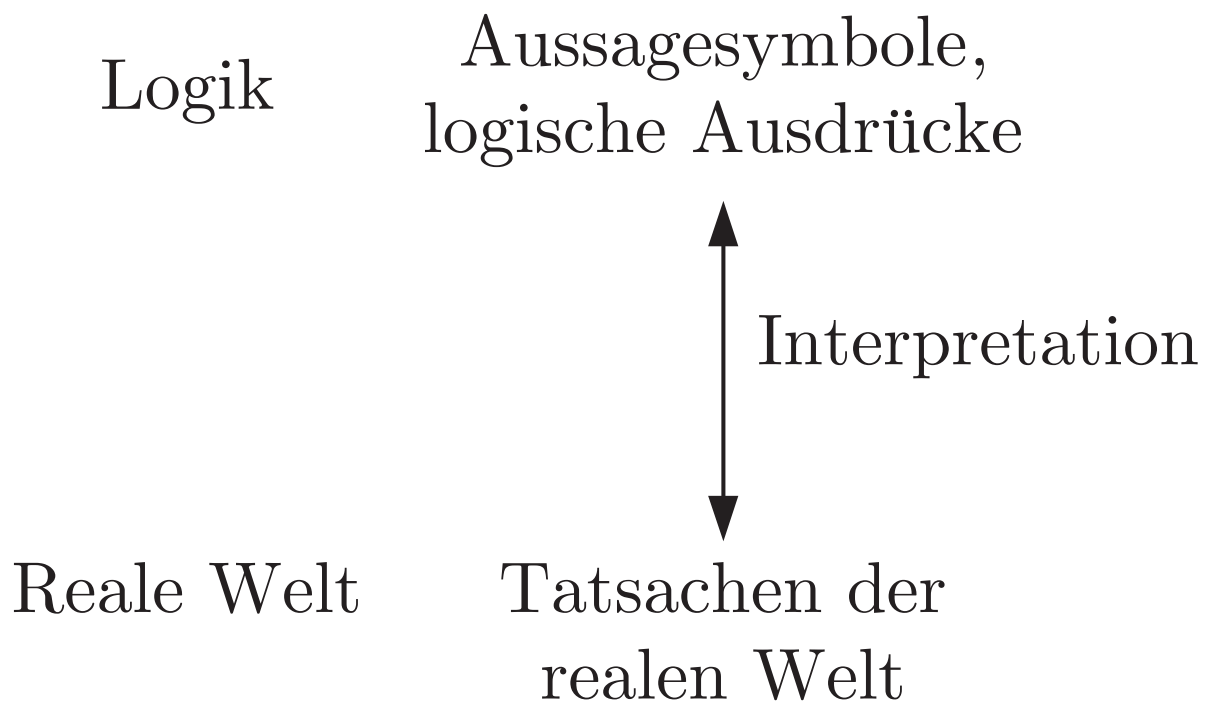
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 7.1: Parkplatz mit vier Stellplätzen**

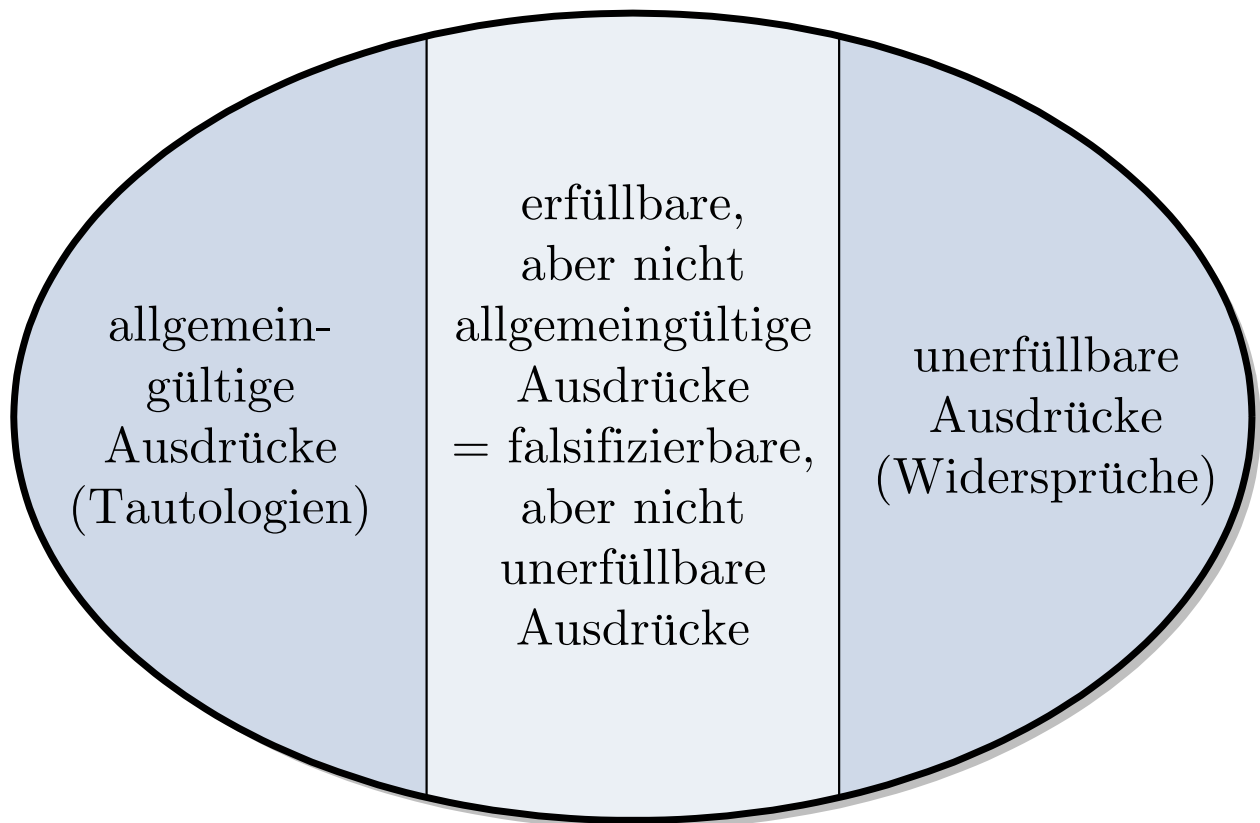
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





**Abb. 7.2: Syntax und Semantik der Aussagenlogik**

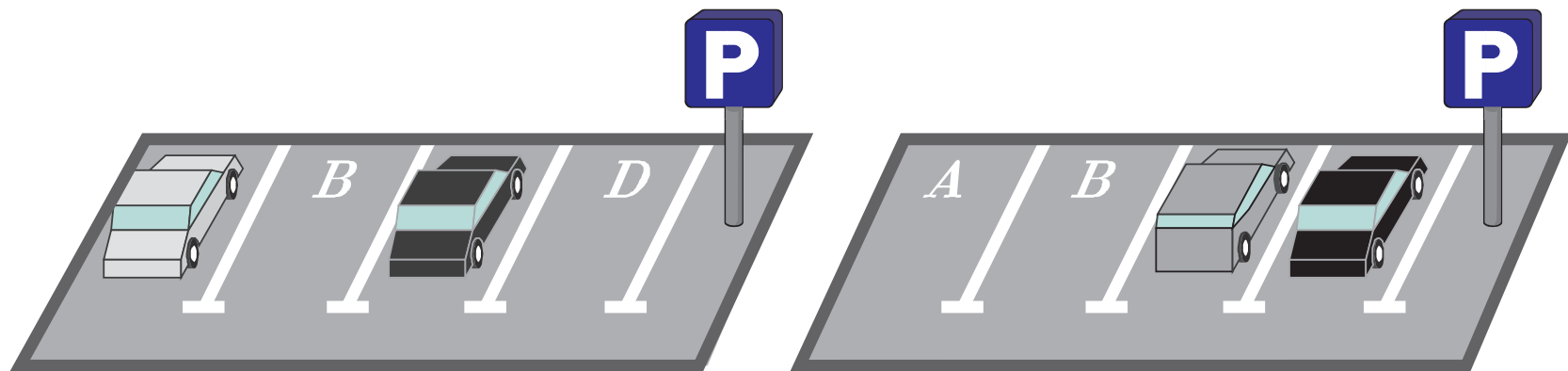
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



Menge der wohlgeformten  
aussagenlogischen Ausdrücke

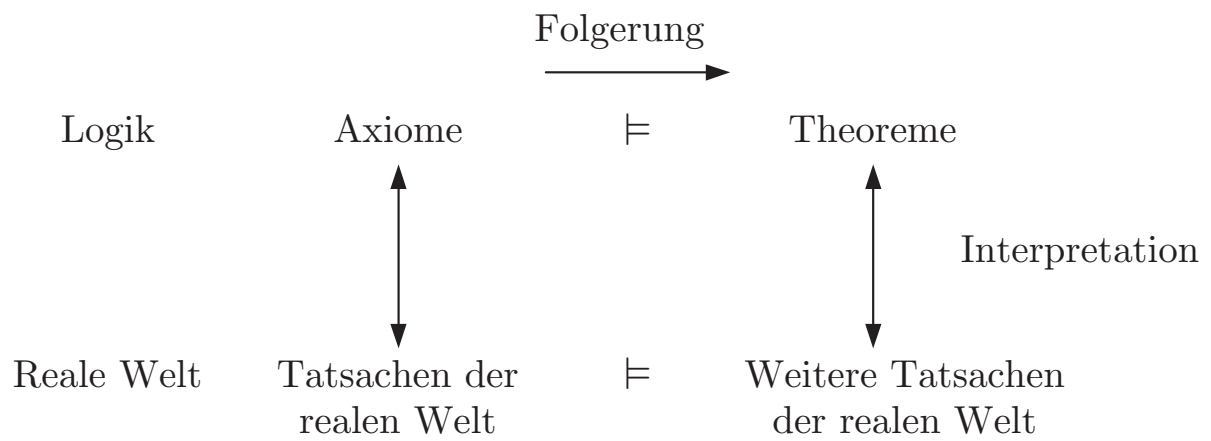
**Abb. 7.3: Klassifikation logischer Ausdrücke**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



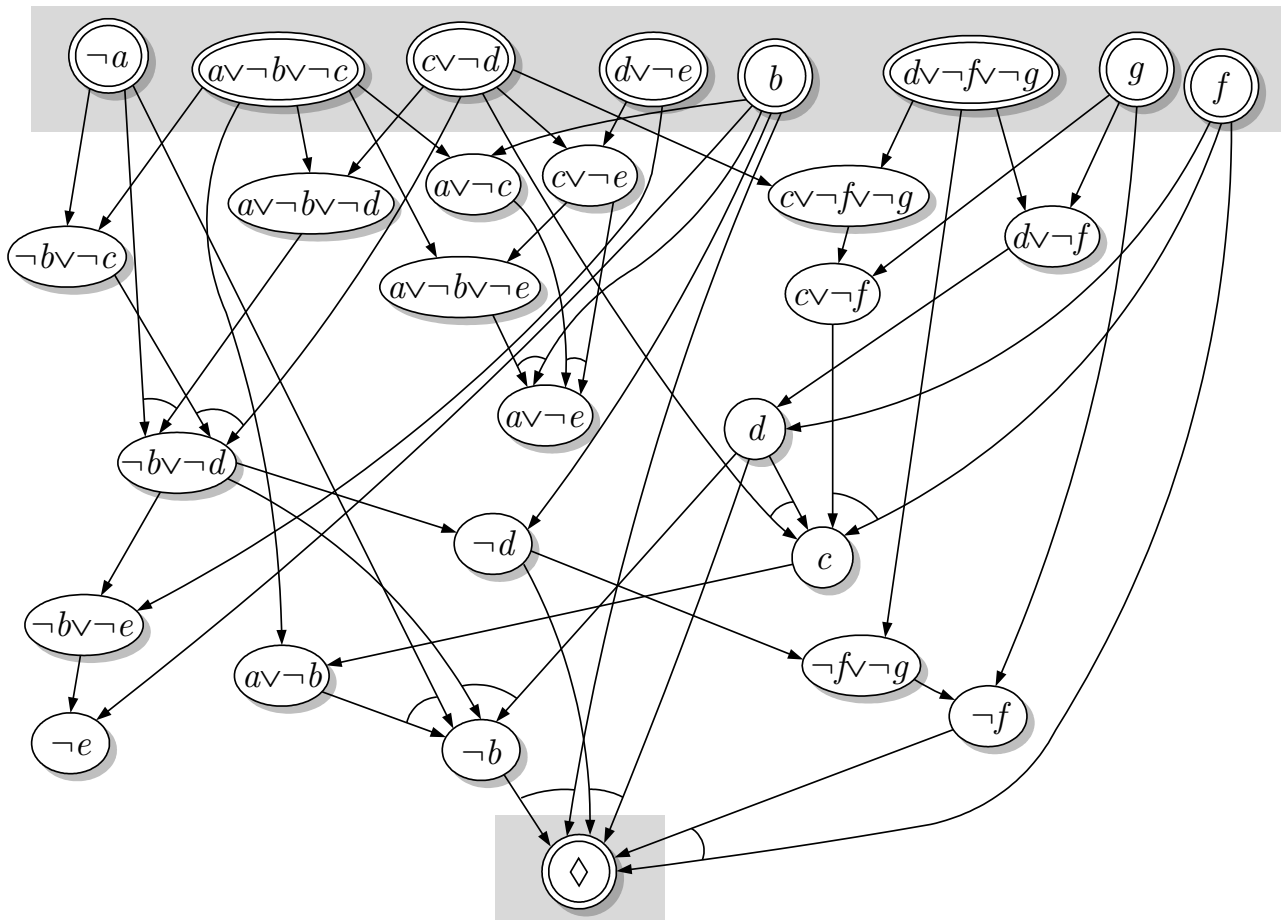
**Abb. 7.4. Zwei Belegungen des Parkplatzes**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



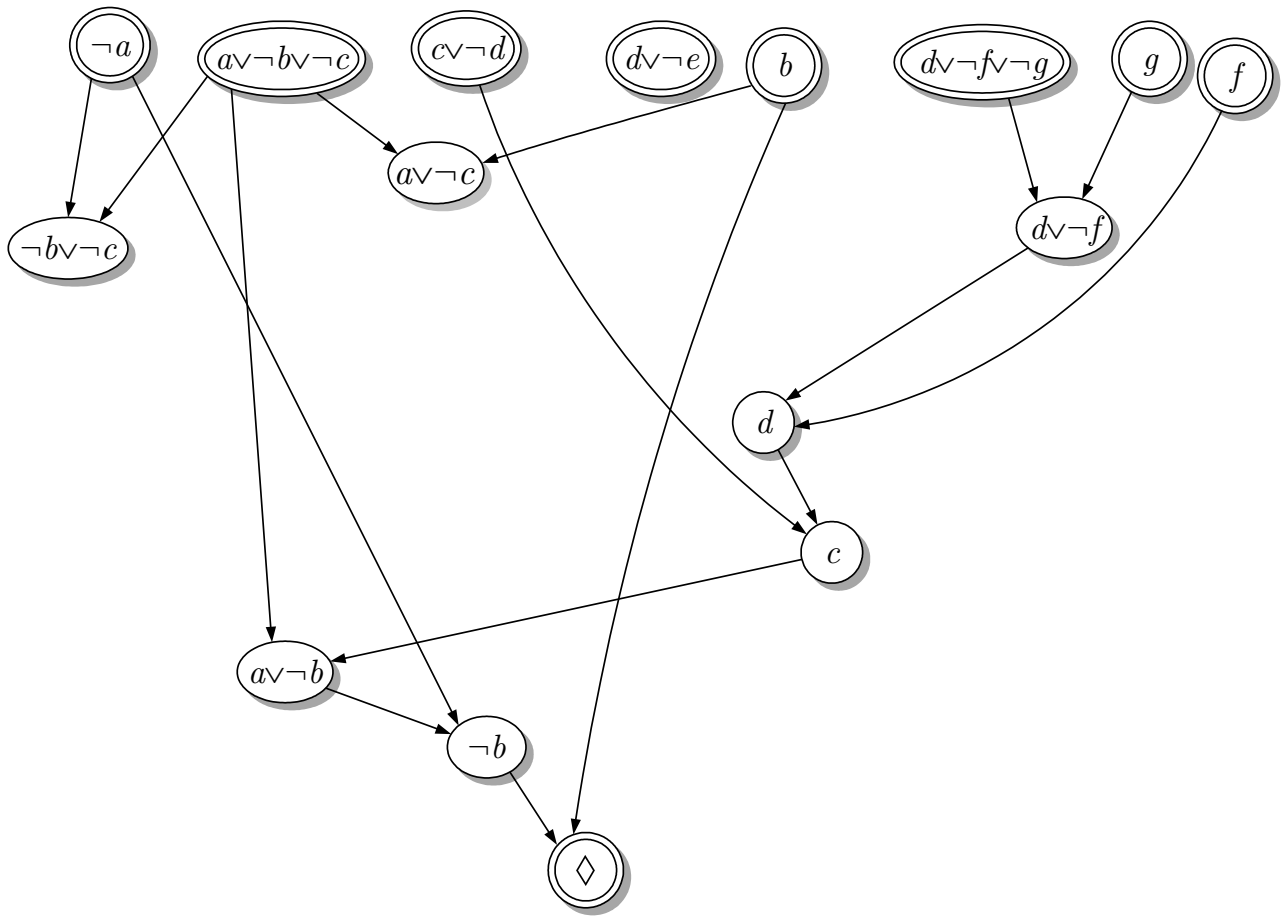
**Abb. 7.5: Folgerungen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



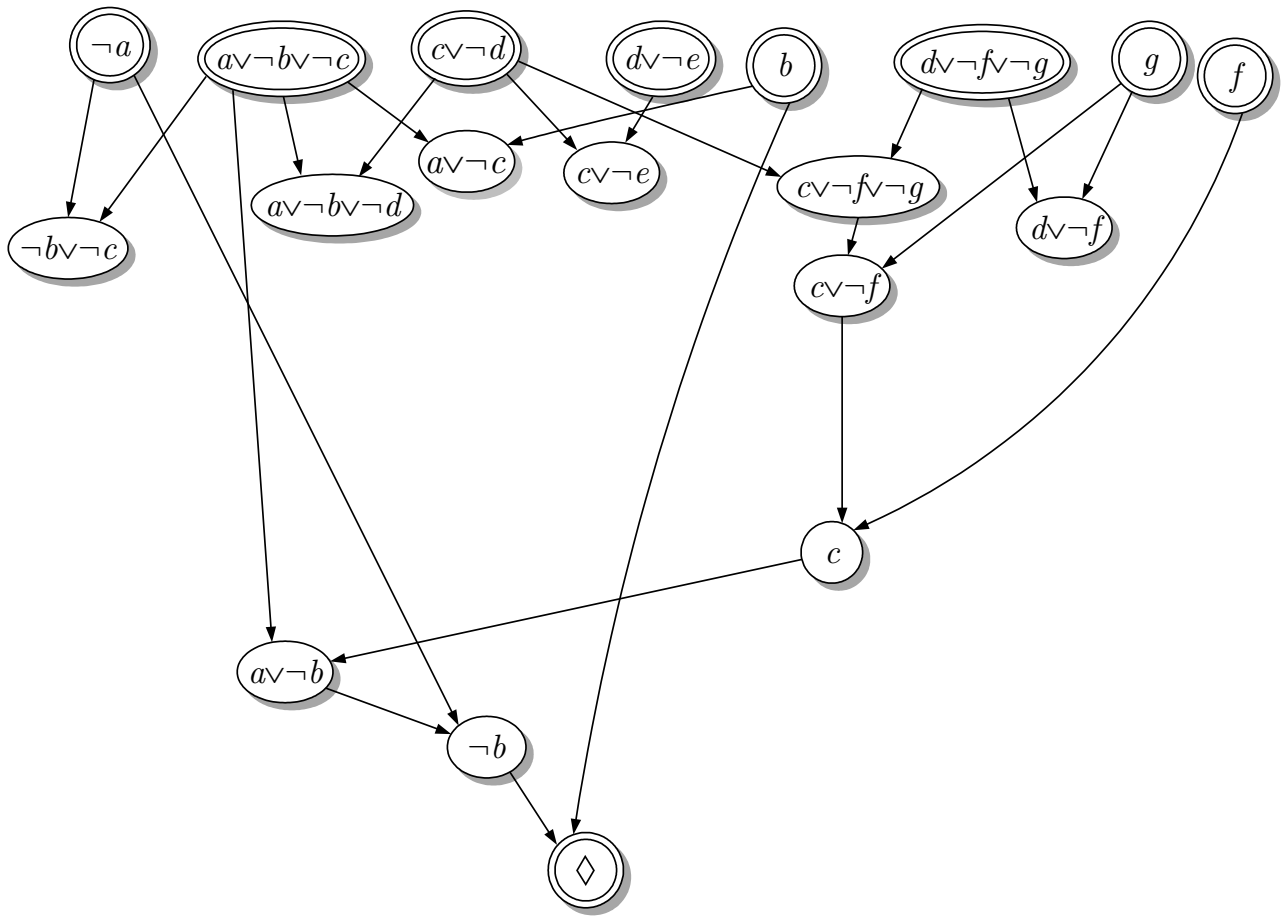
**Abb. 7.6: Ableitungsgraph**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



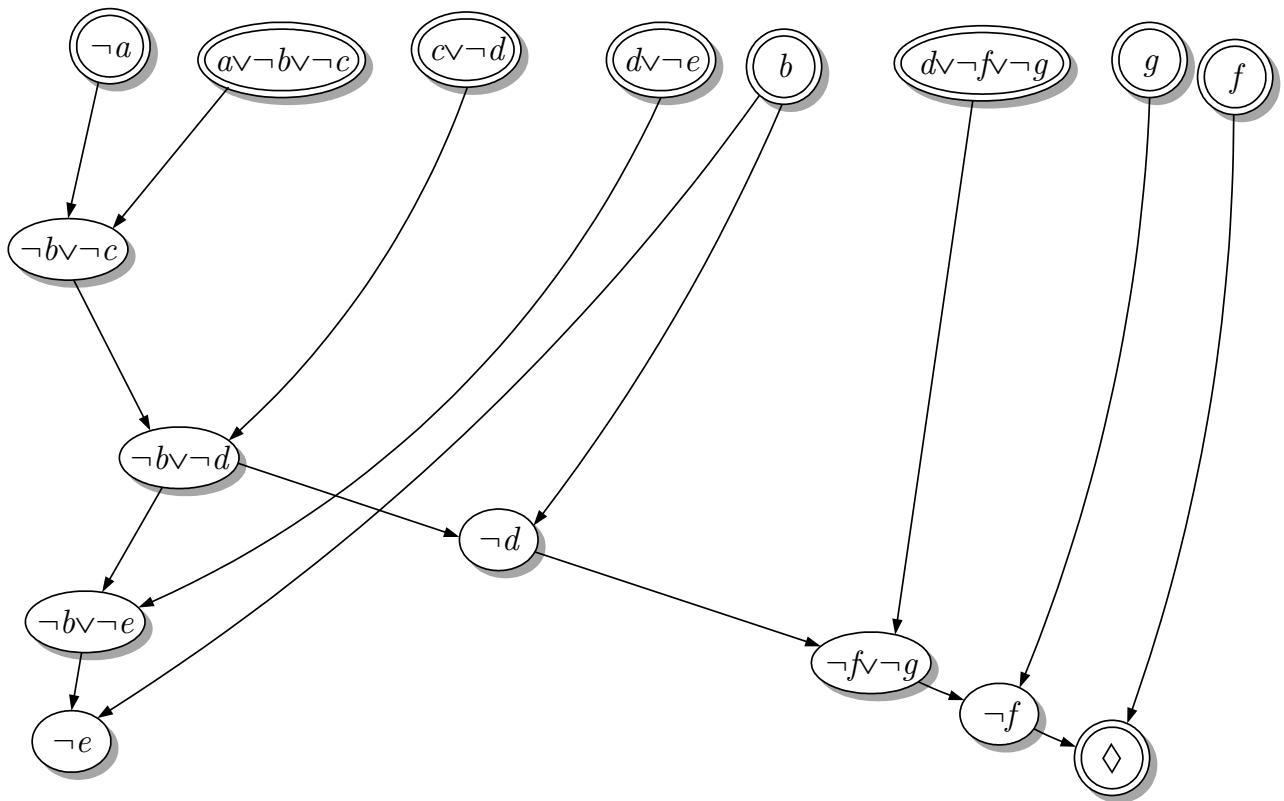
**Abb. 7.7: Ableitungsgraph bei Verwendung der Unit-preference-Strategie**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 7.8: Ableitungsgraph bei Verwendung der Input-preference-Strategie**

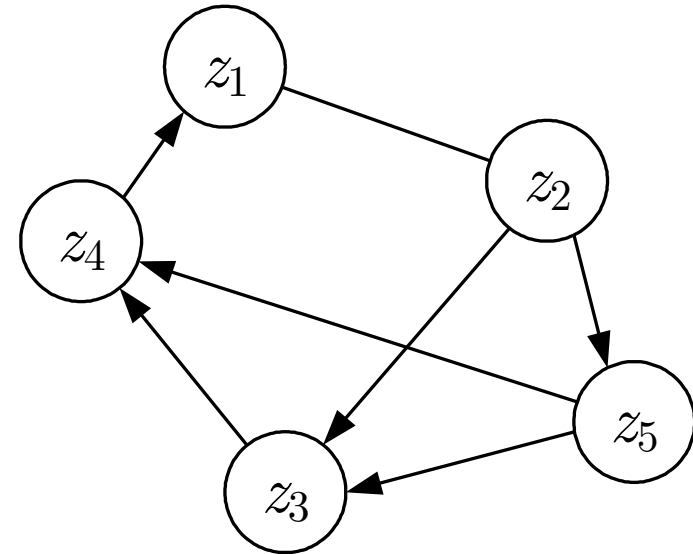
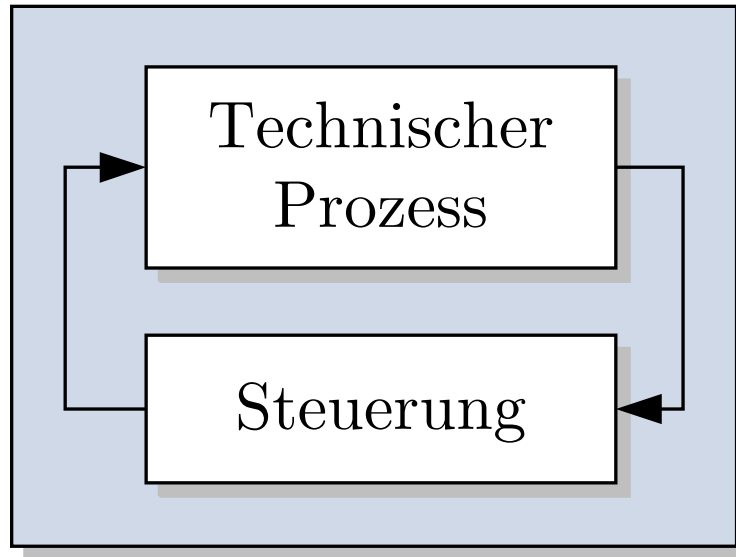
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 7.9: Ableitungsgraph bei Verwendung der Set-of-support-Strategie**

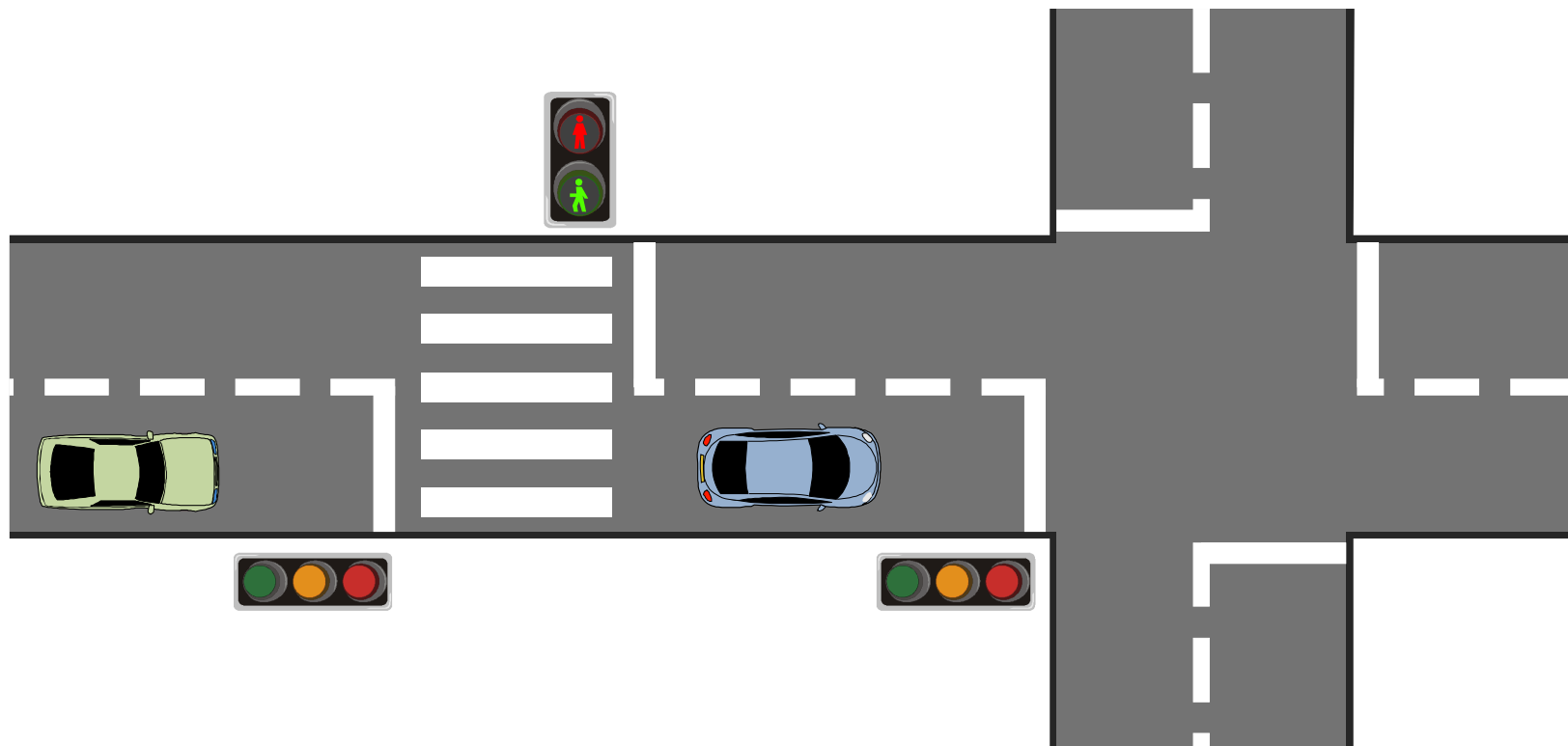
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





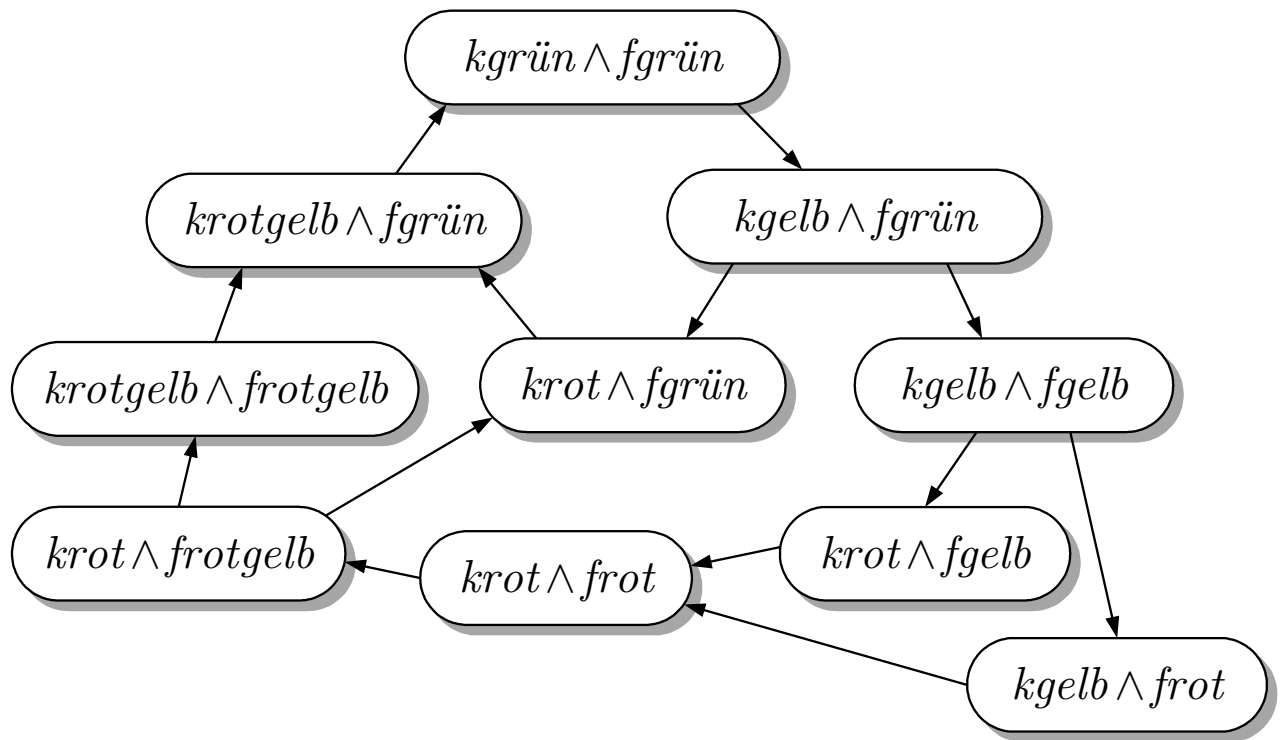
**Abb. 7.10. Verifikation von Steuerungen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



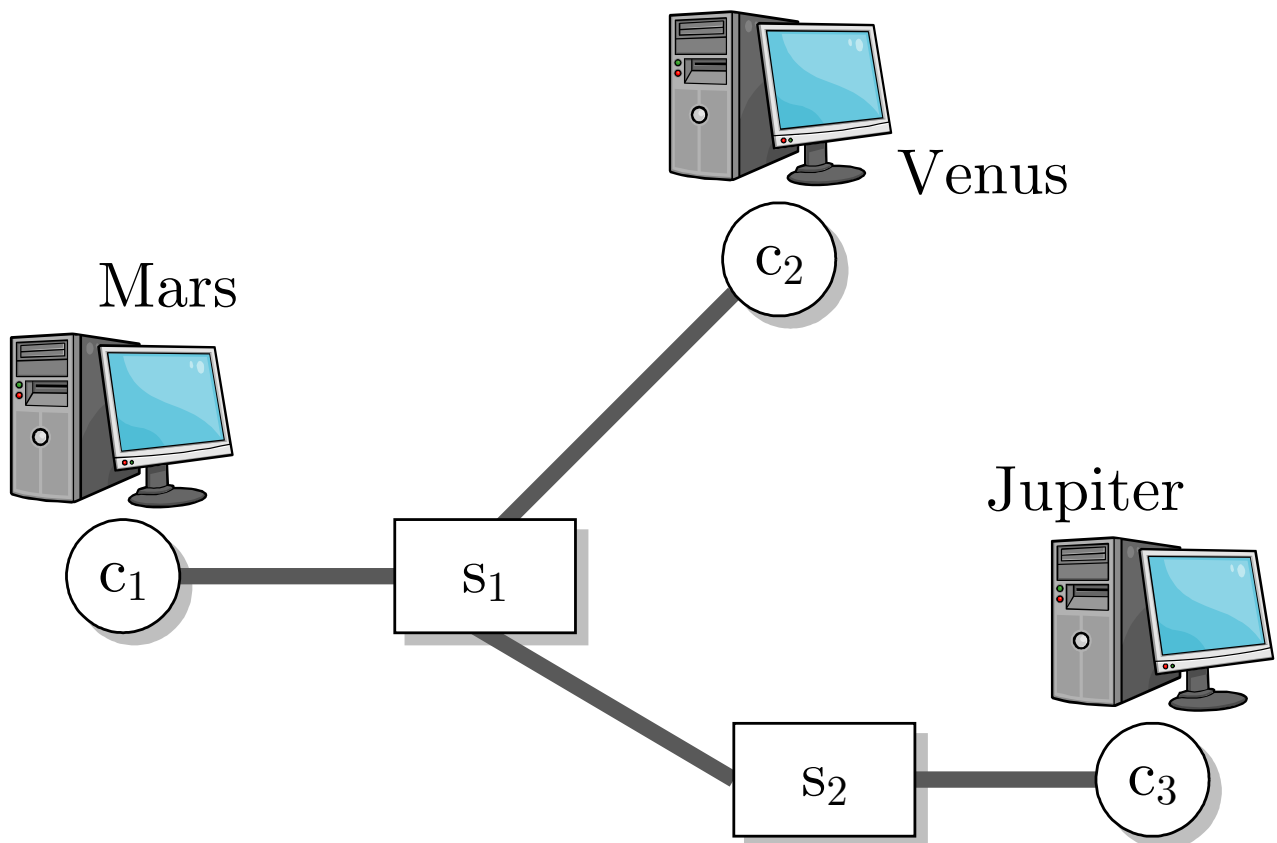
**Abb. 7.11. Zwei gesteuerte Ampeln**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



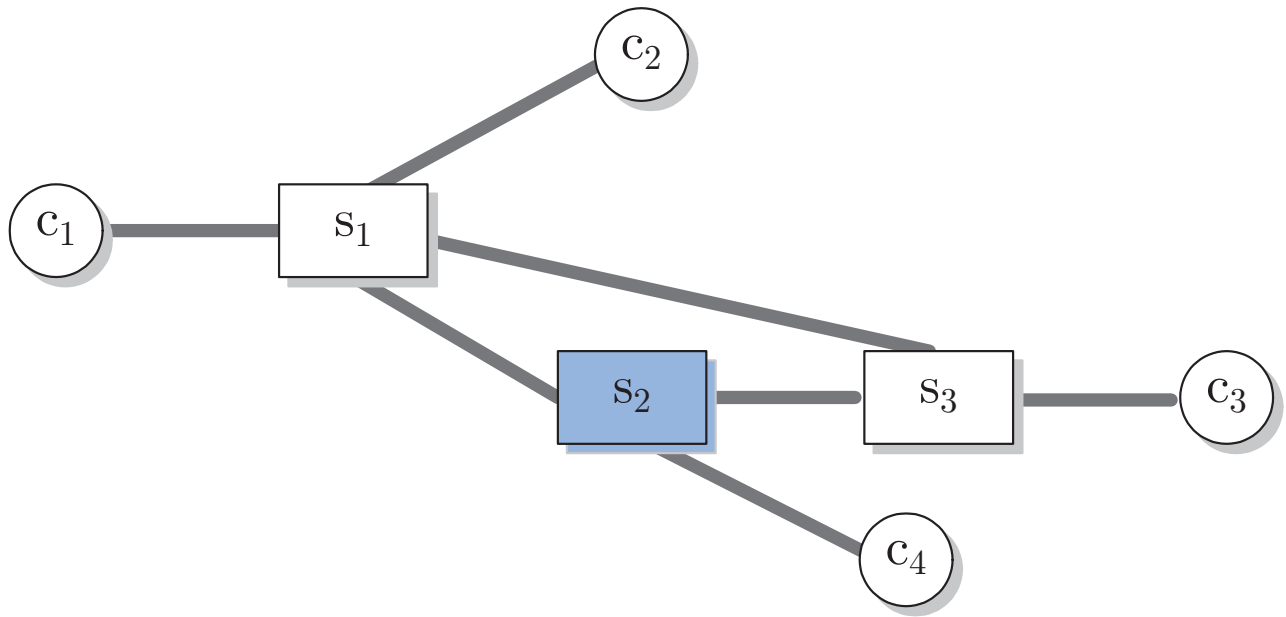
**Abb. 7.12: Modell der zwei Ampeln**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



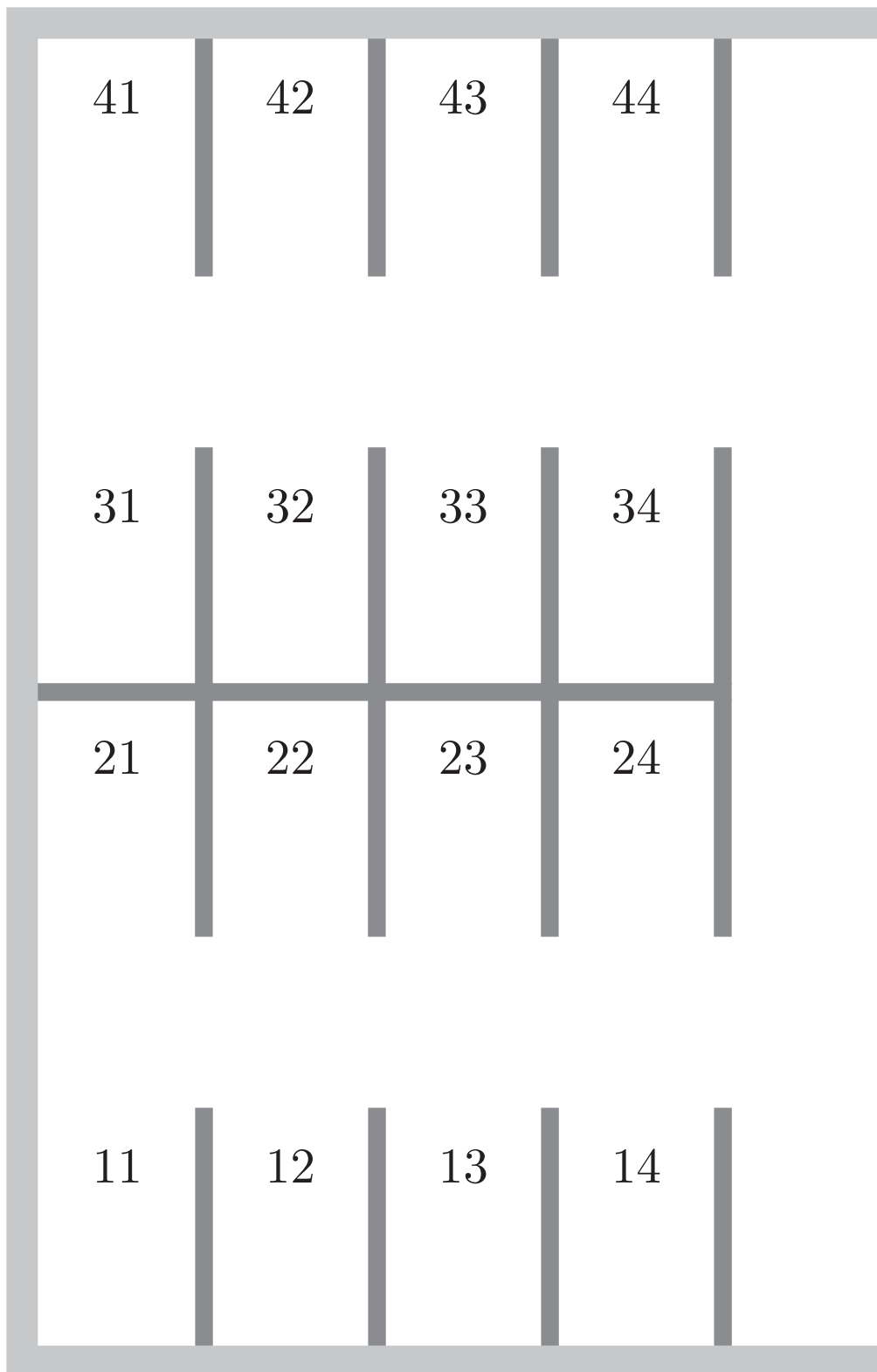
**Abb. 8.1: Einfaches Rechnernetz**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



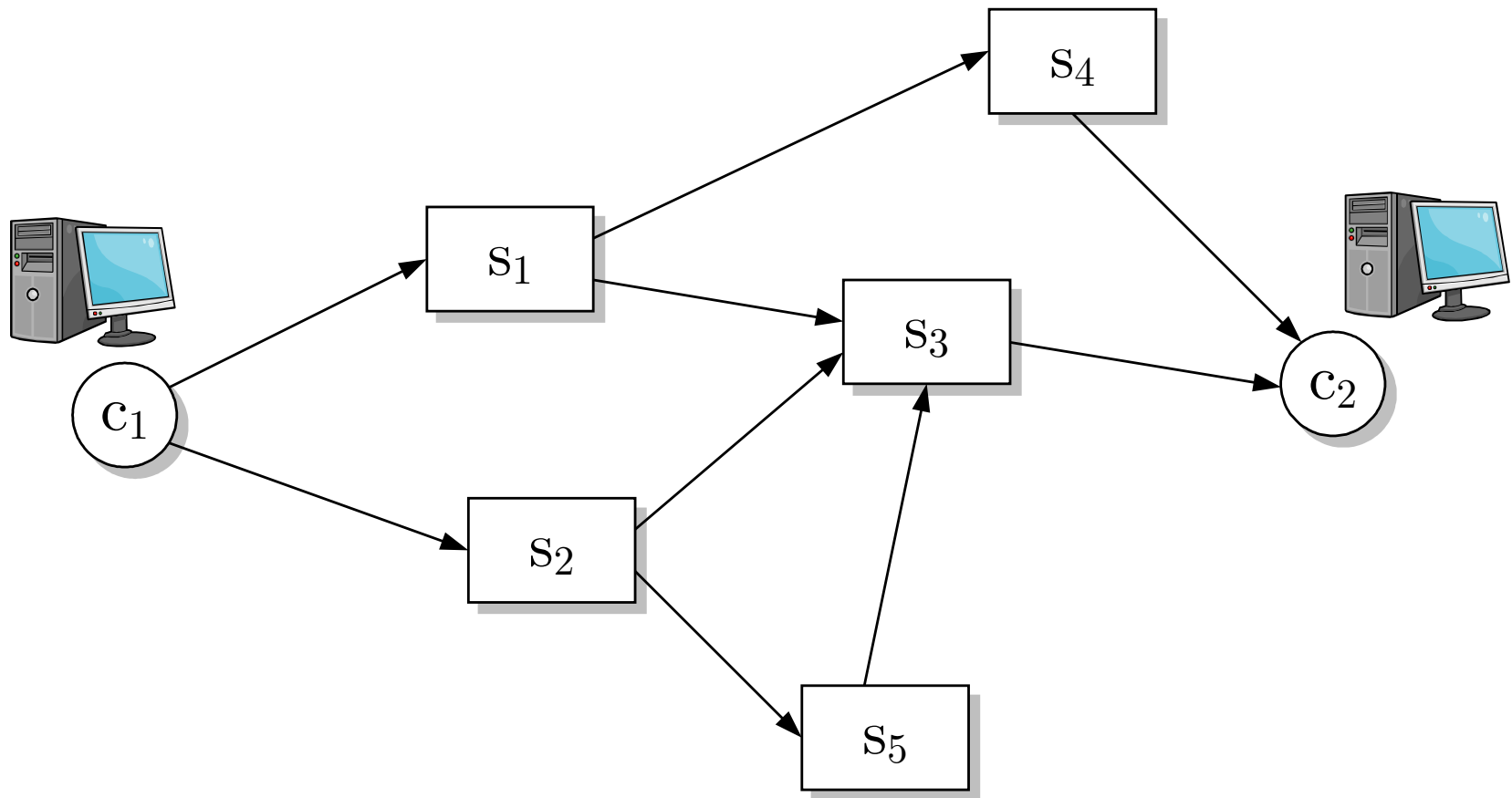
**Abb. 8.2: Unsicheres Kommunikationsnetz**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



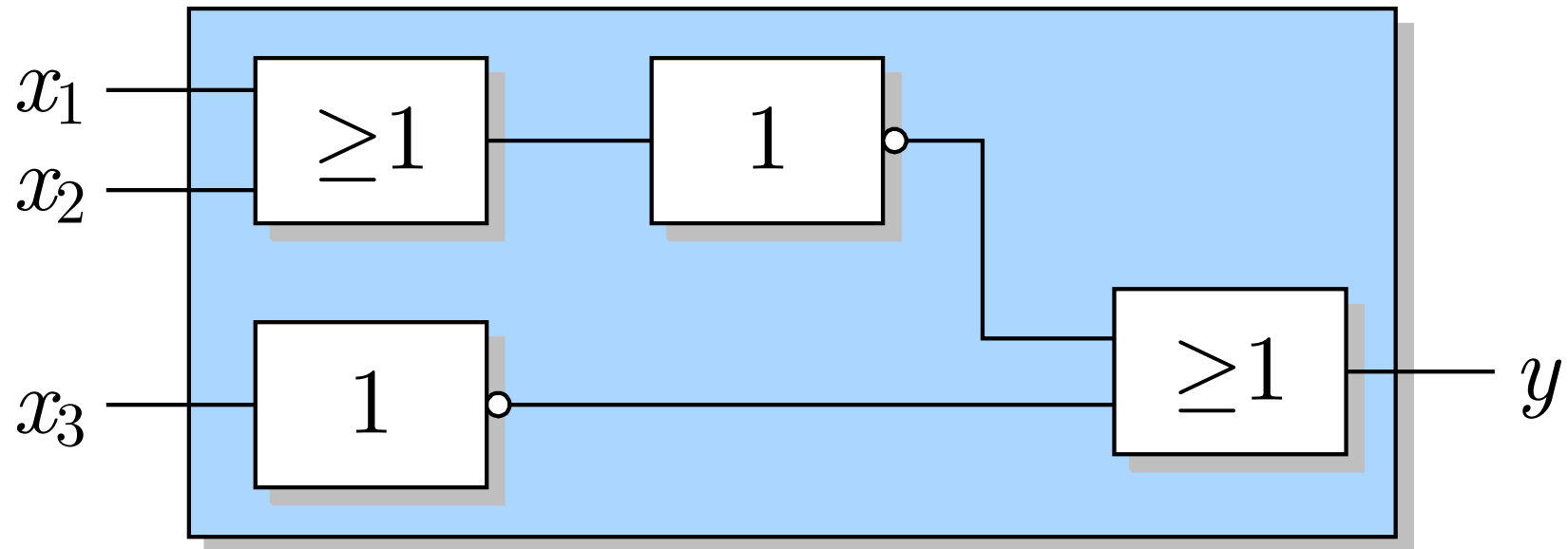
**Abb. 8.3. Grundriss eines Parkhauses**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 8.4. Kommunikationsnetz zwischen zwei Rechnern**

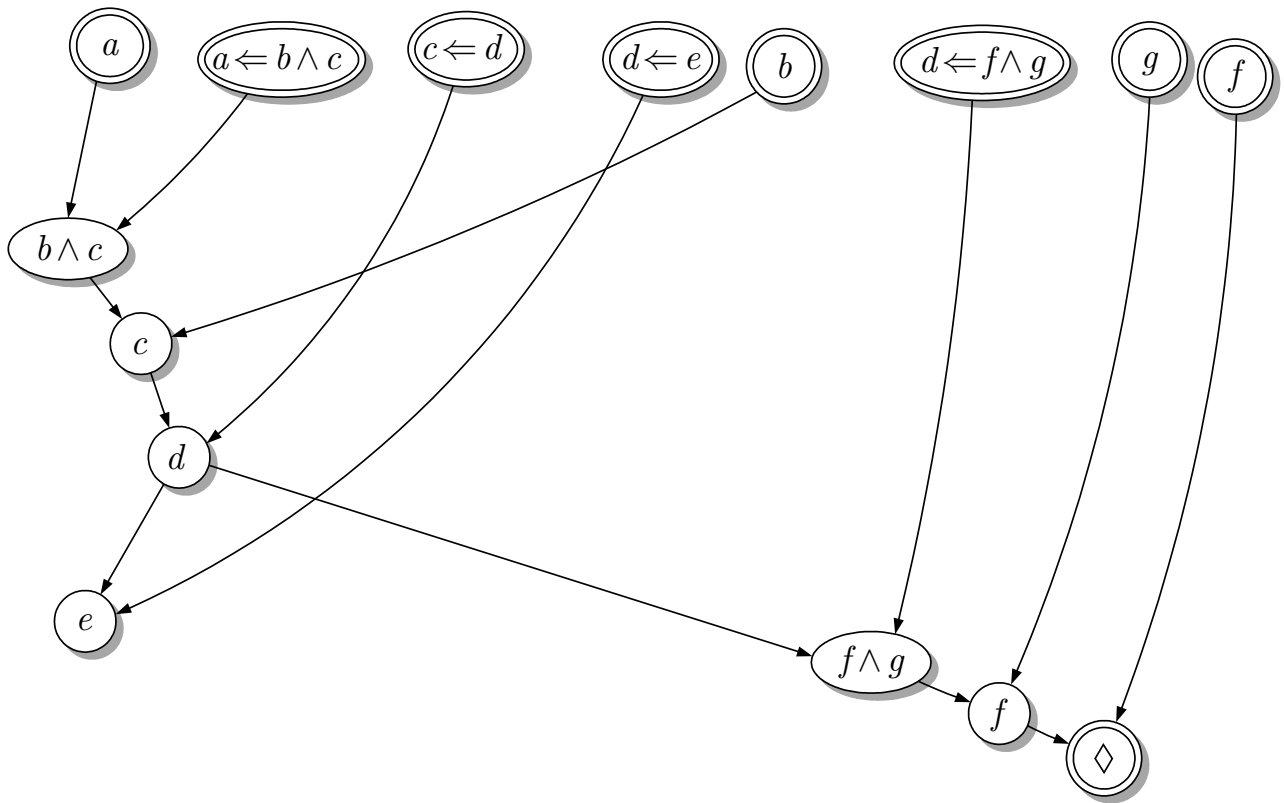
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 8.5. Logische Schaltung**

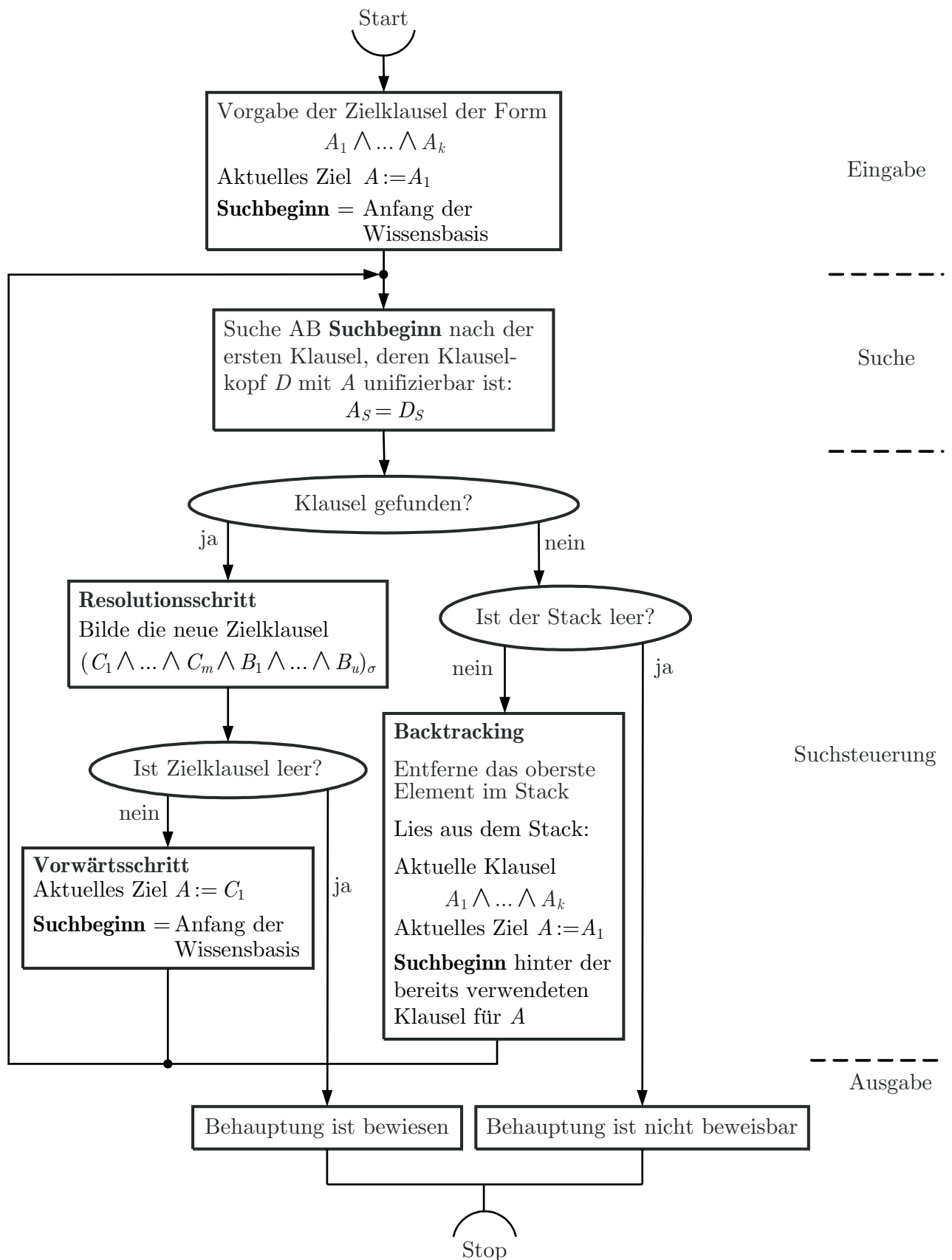
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



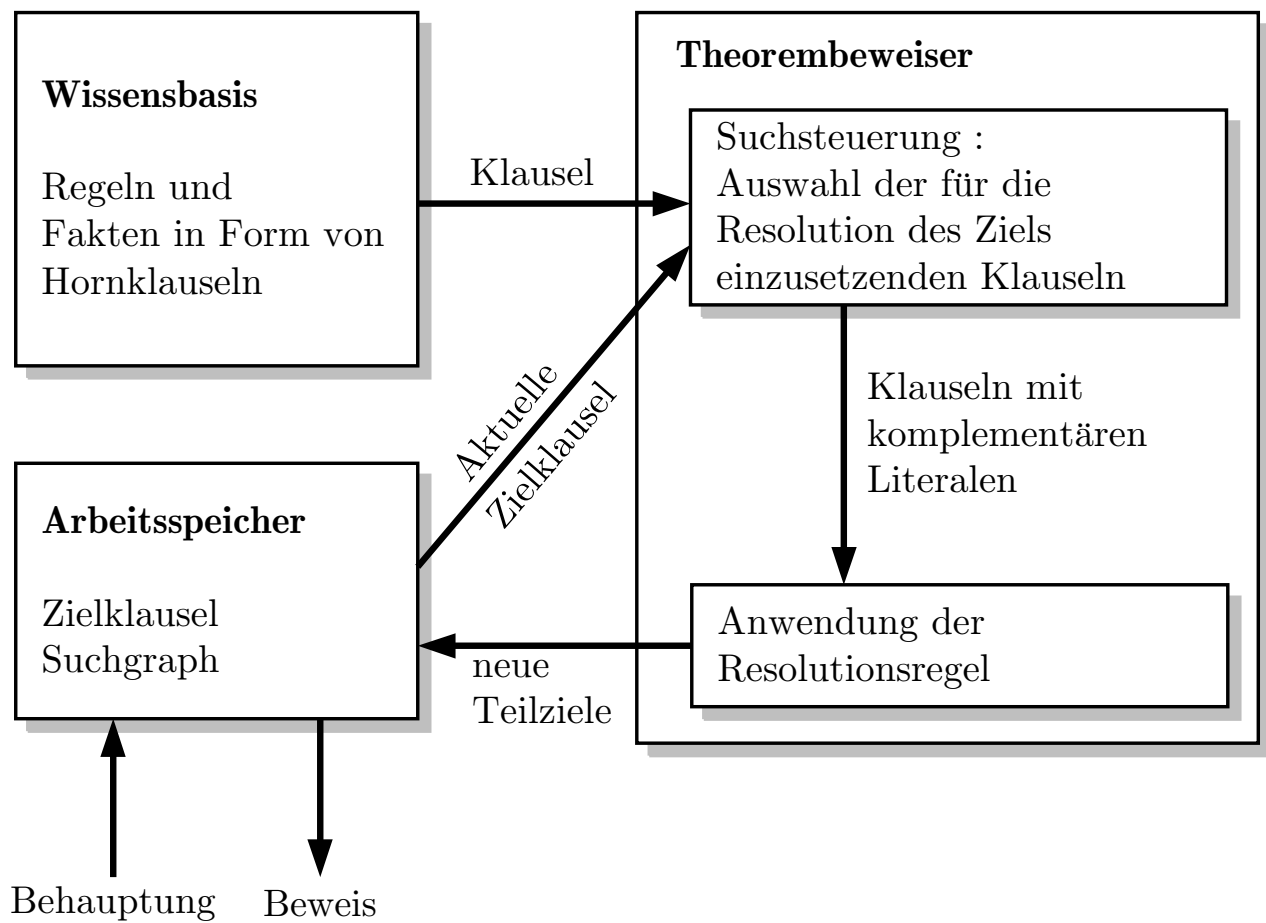


**Abb. 8.6: Ableitungsgraph für den Beweis der Behauptung  $a$  mit der Hornklauselresolution**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

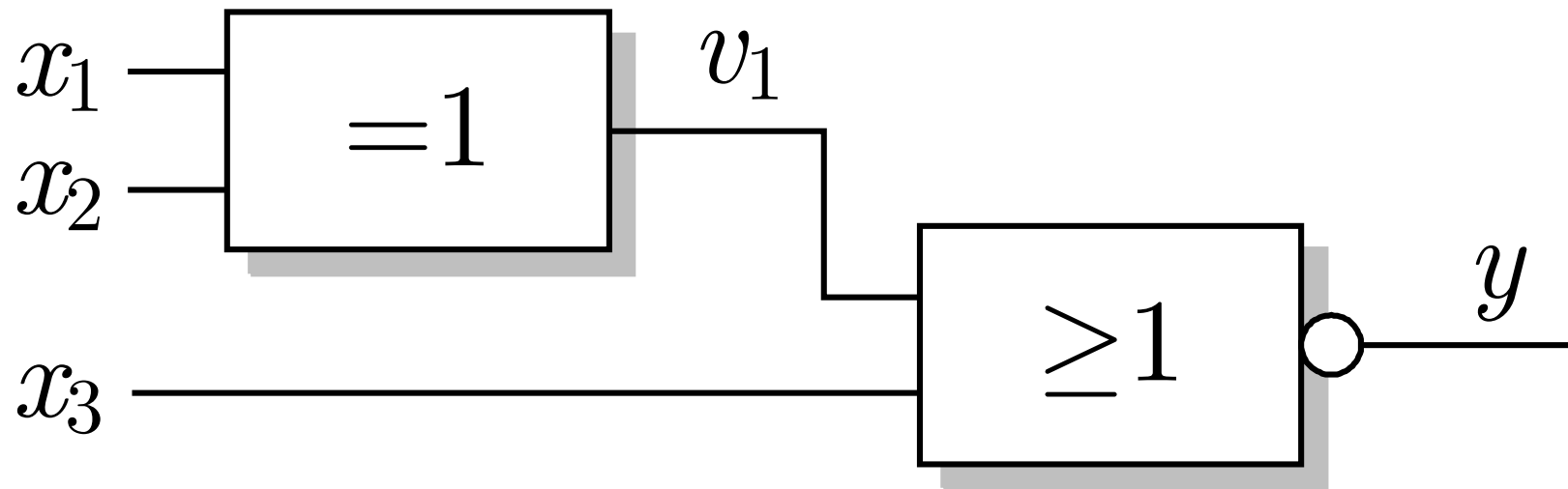


**Abb. 8.7: Beweisverfahren der logischen Programmierung**



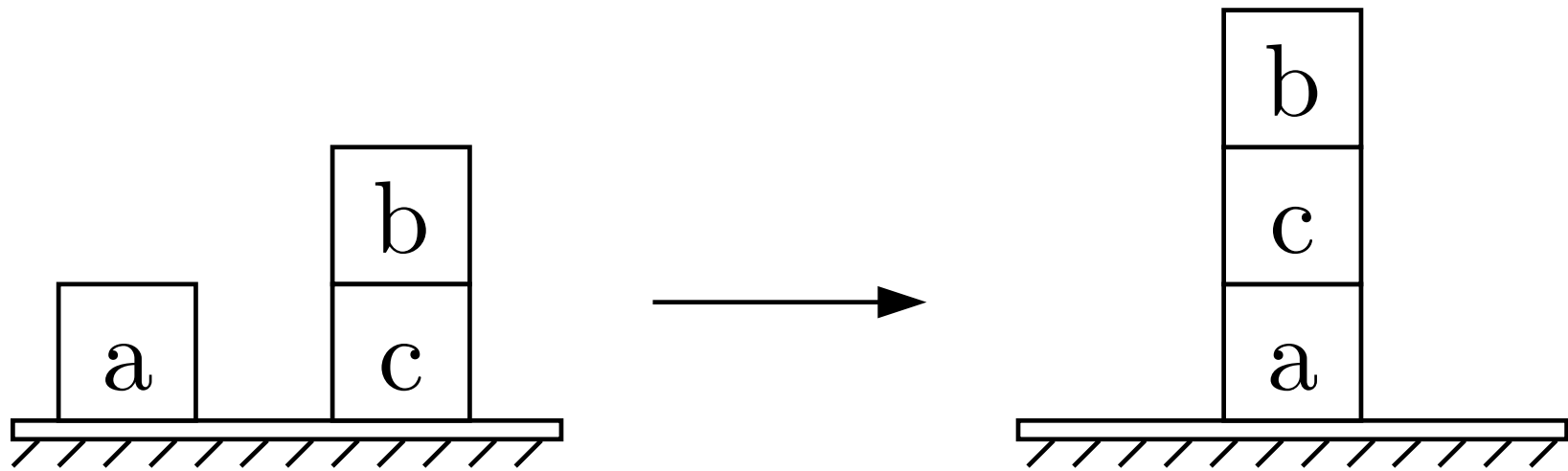
**Abb. 8.8: Regelbasiertes System zum Theorembeweisen mit Hornklauseln**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



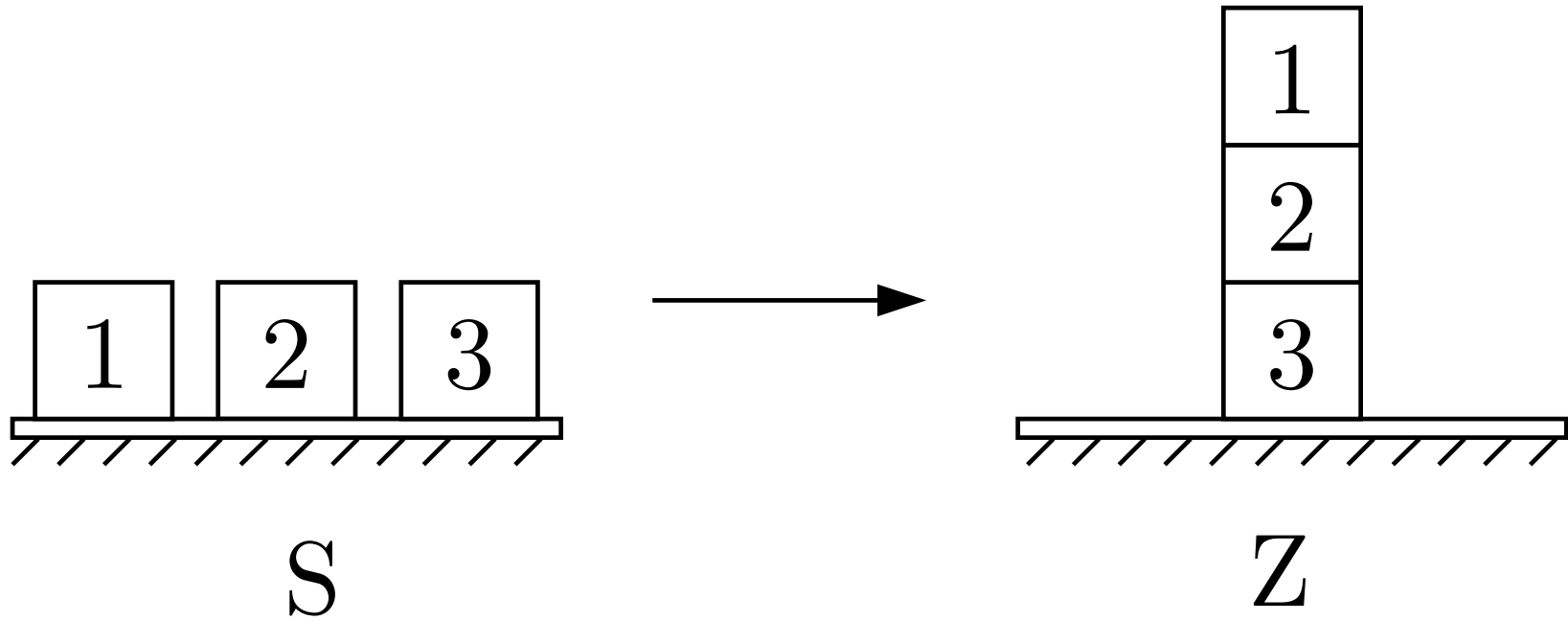
**Abb. 8.9. Digitale Schaltung mit XOR- und NAND-Glied**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



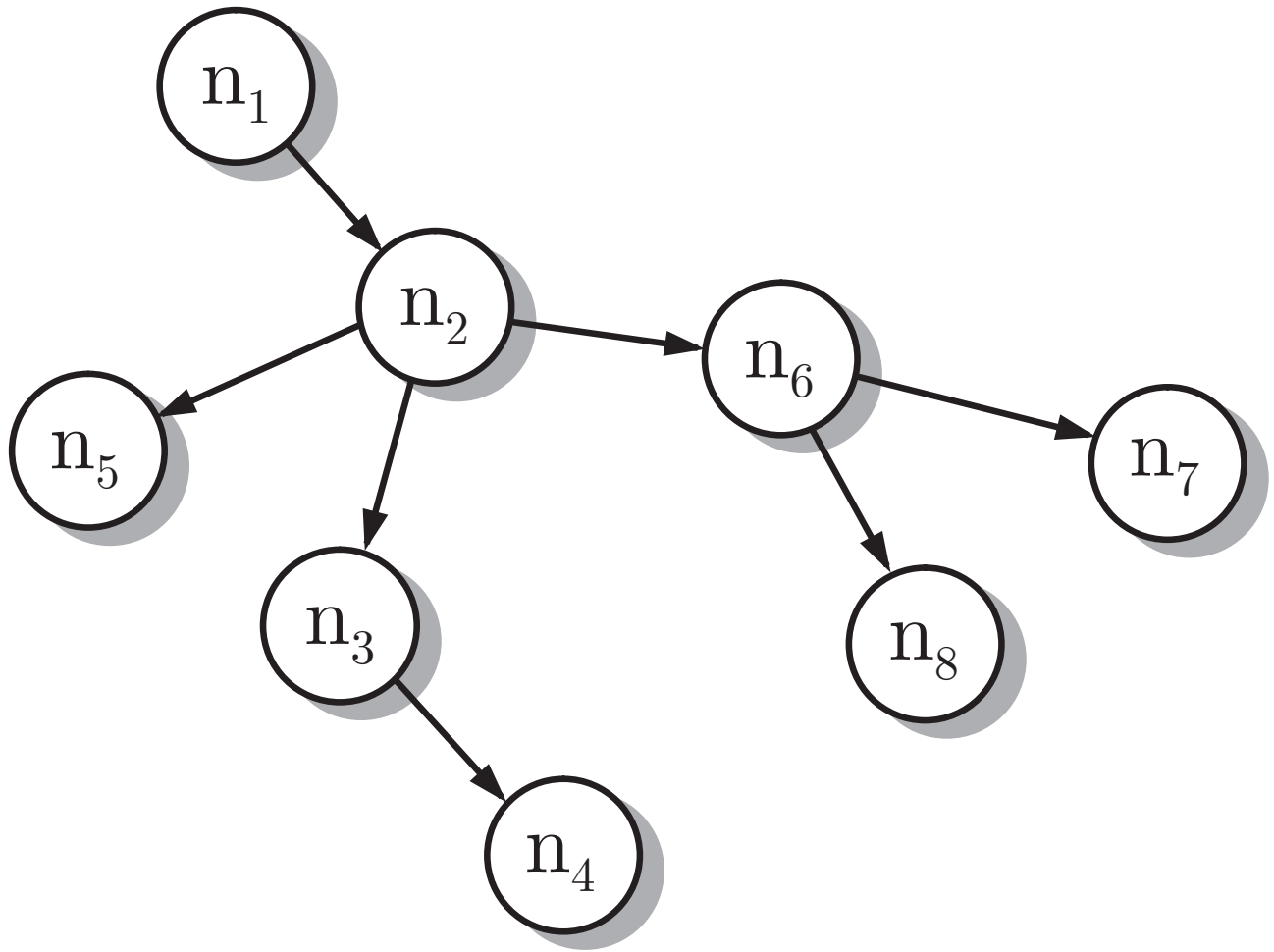
**Abb. 8.10. Planungsaufgabe**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



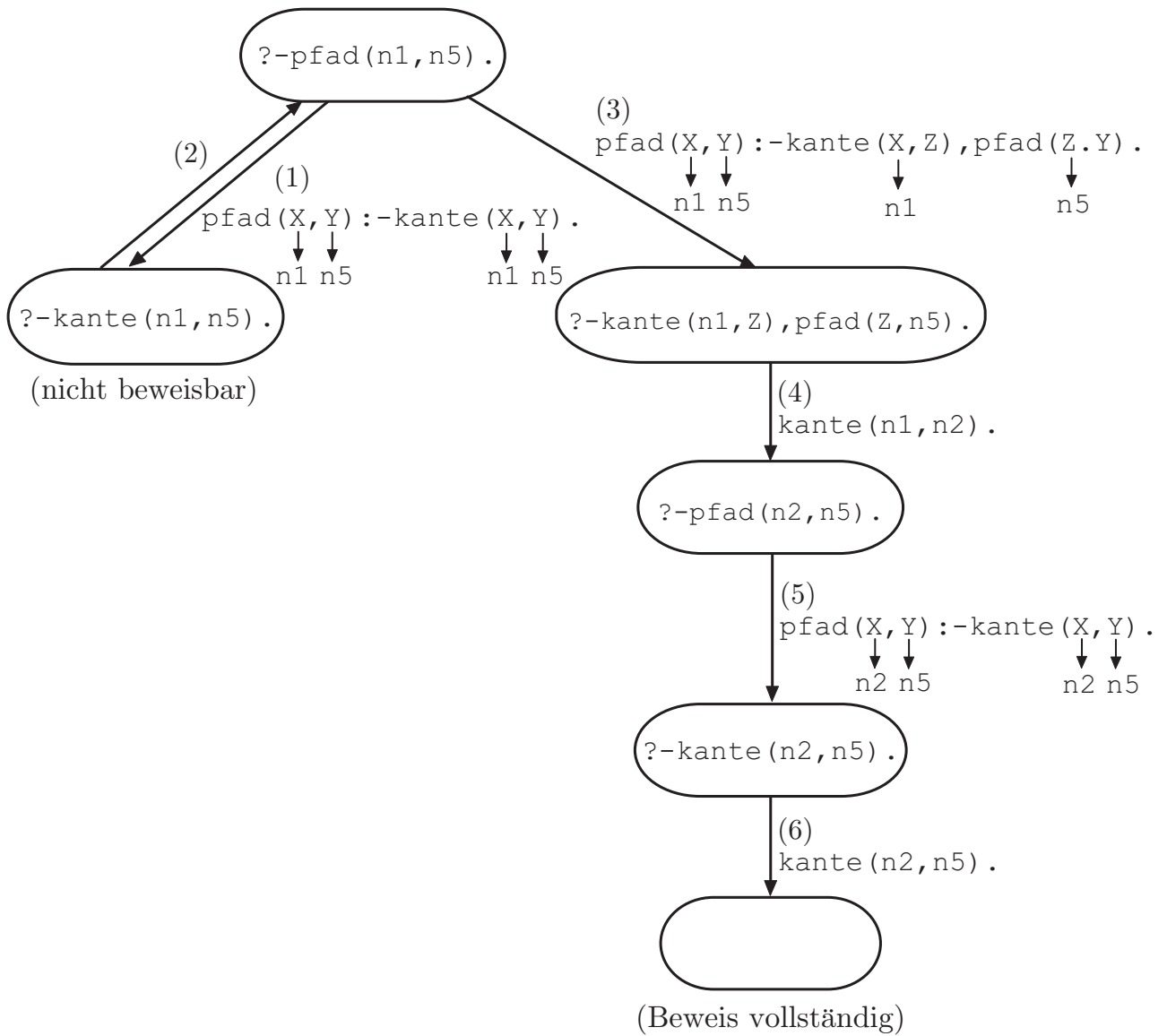
**Abb. 8.11. Planungsaufgabe für zwei Roboter**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 9.1: Zyklenfreier Graph**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



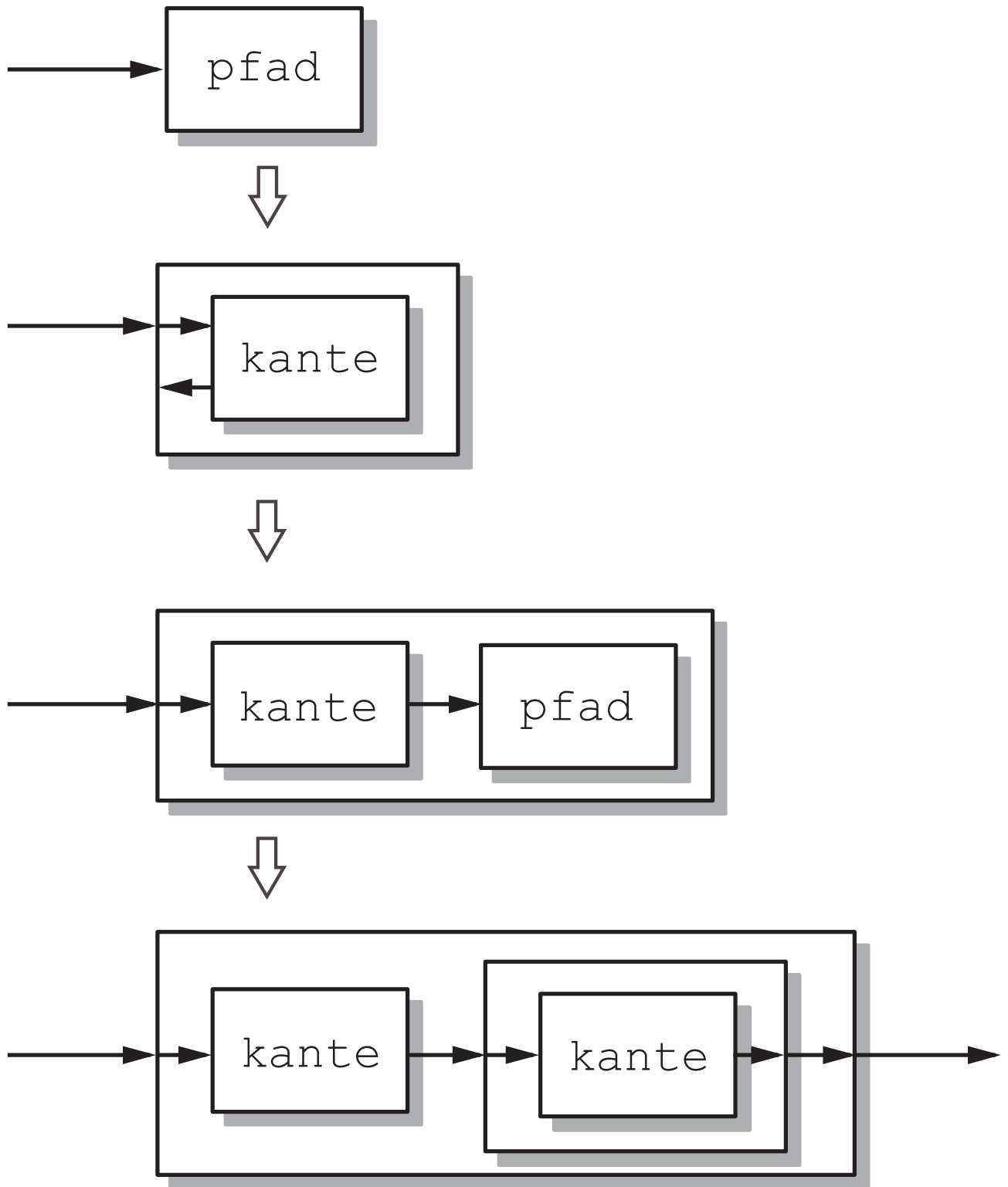
**Abb. 9.2: Suchgraph für die Anfrage  $?-pfad(n1, n5)$ .**





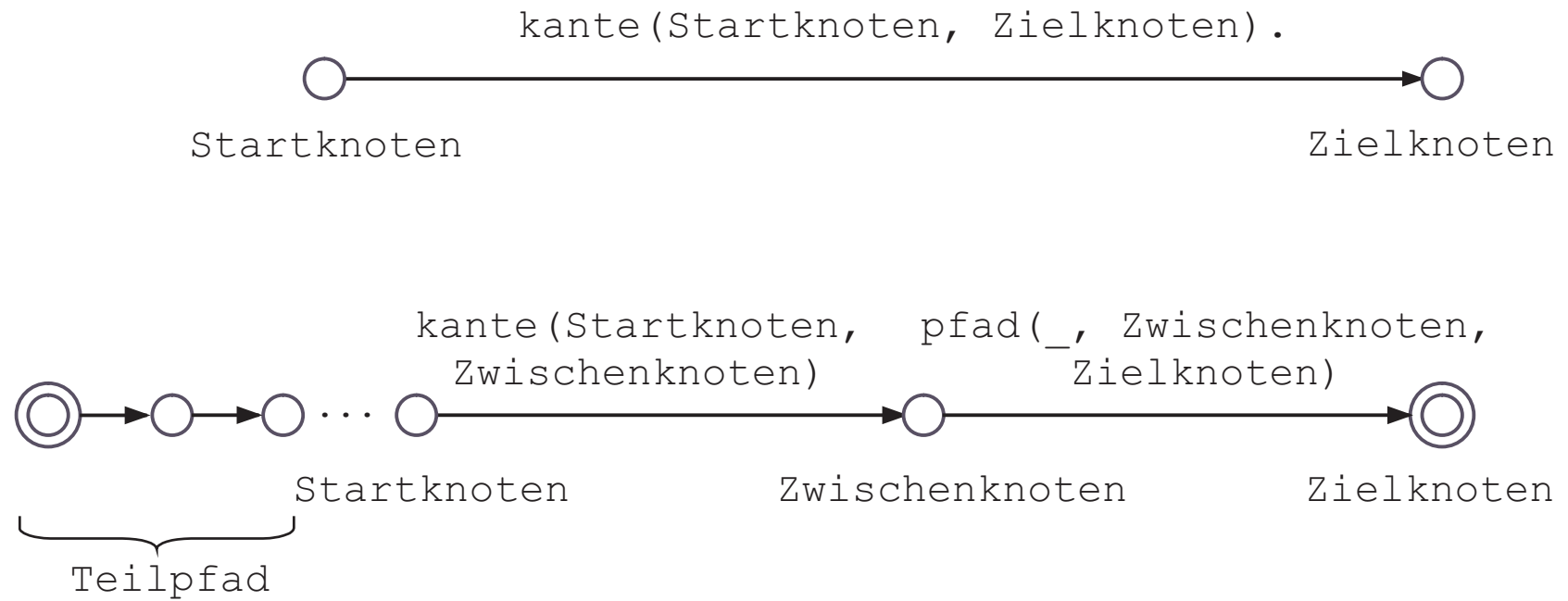
**Abb. 9.3. Boxenmodell für einen Prozeduraufruf**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



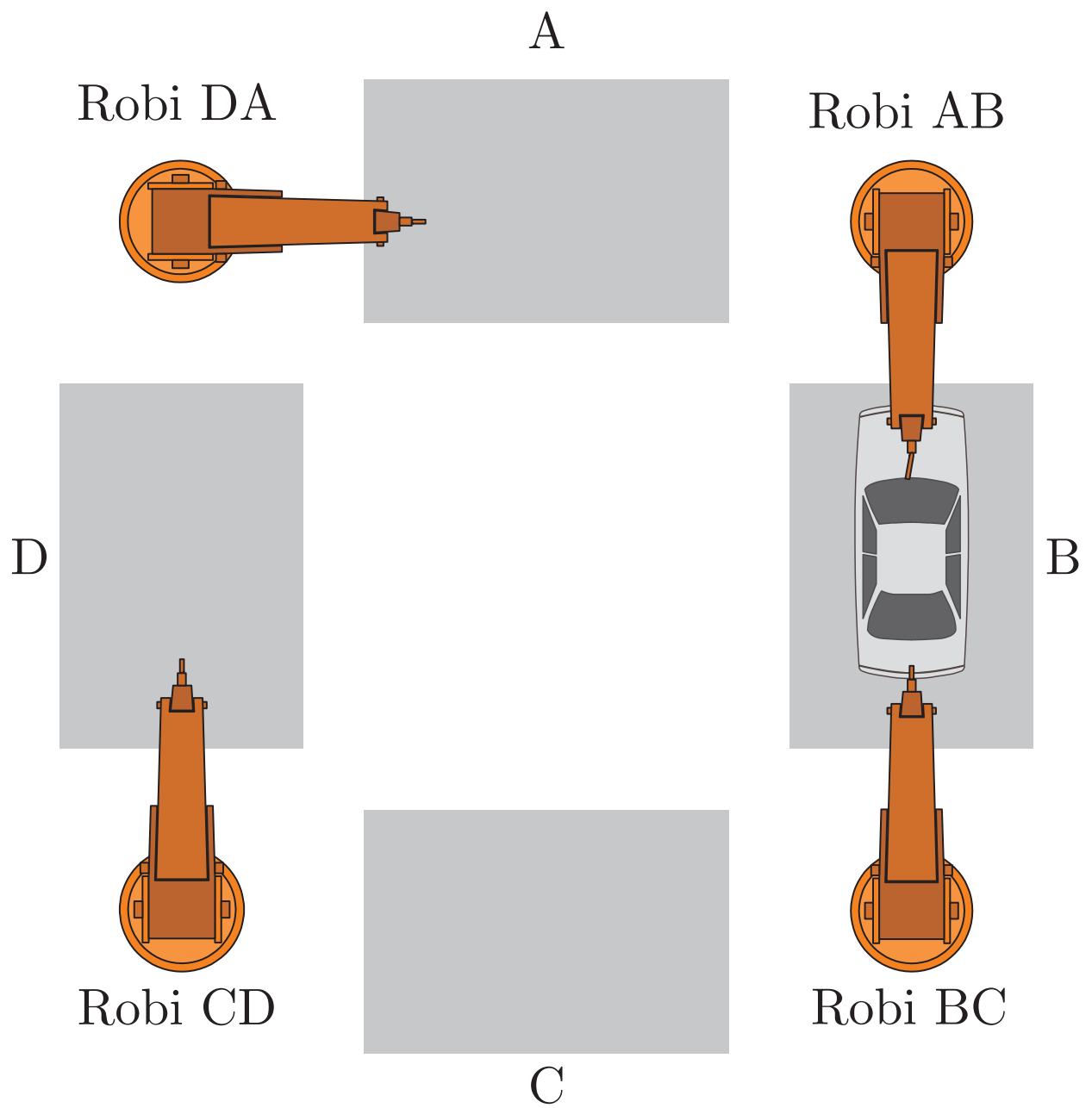
**Abb. 9.4: Darstellung des Programmablaufes**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



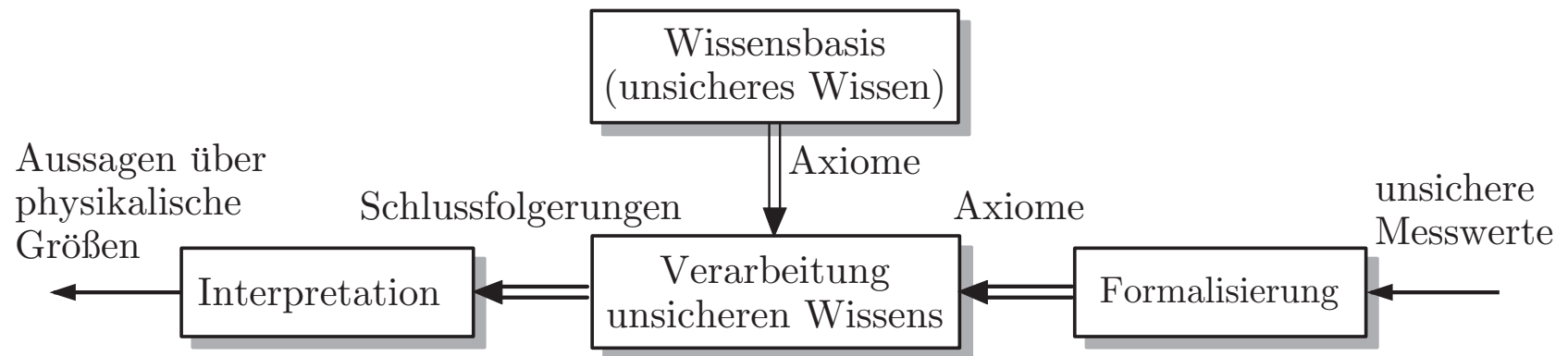
**Abb. 9.5. Definition des Prädikats `pfad`**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



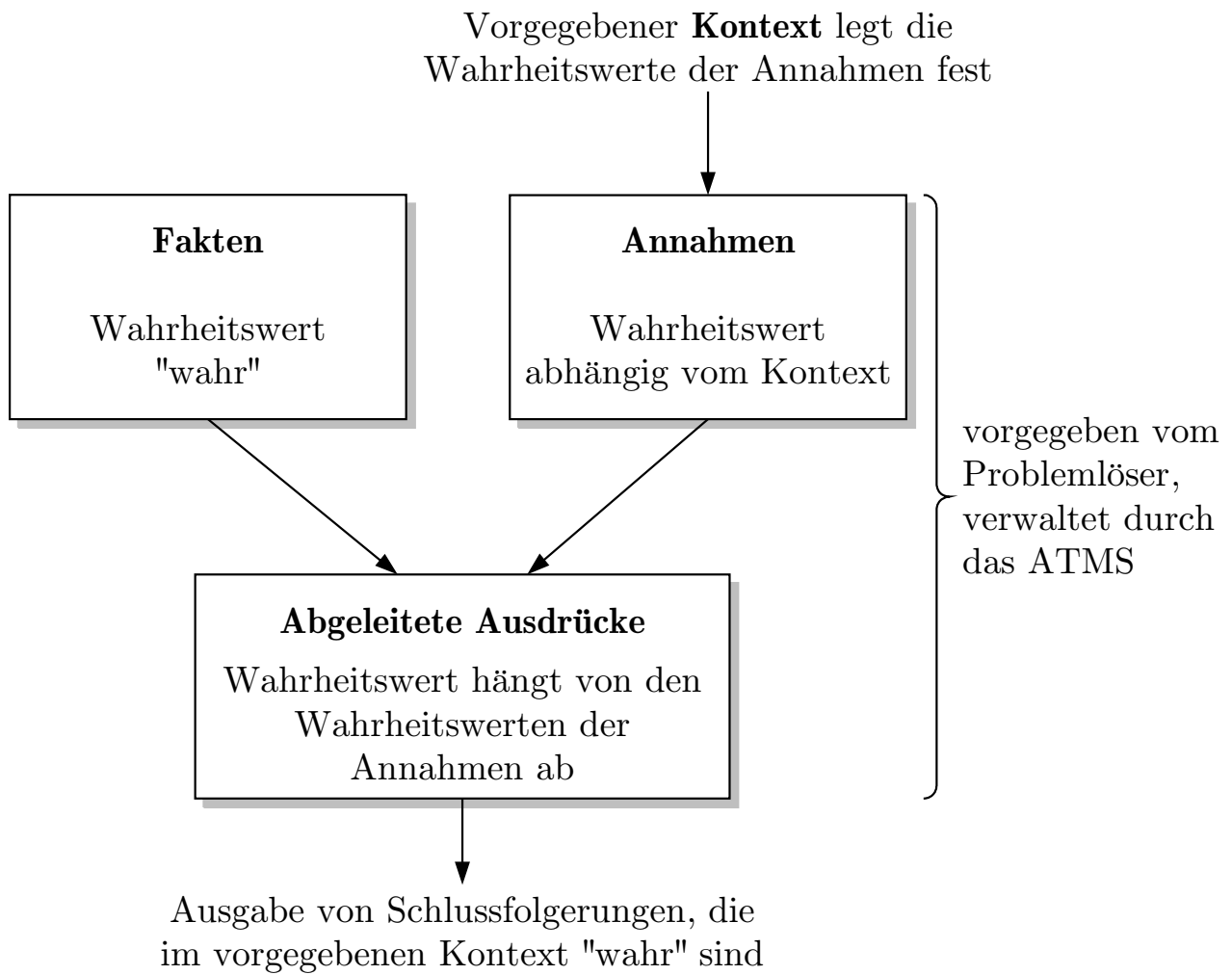
**Abb. 9.6: Fertigungszelle mit vier Robotern**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



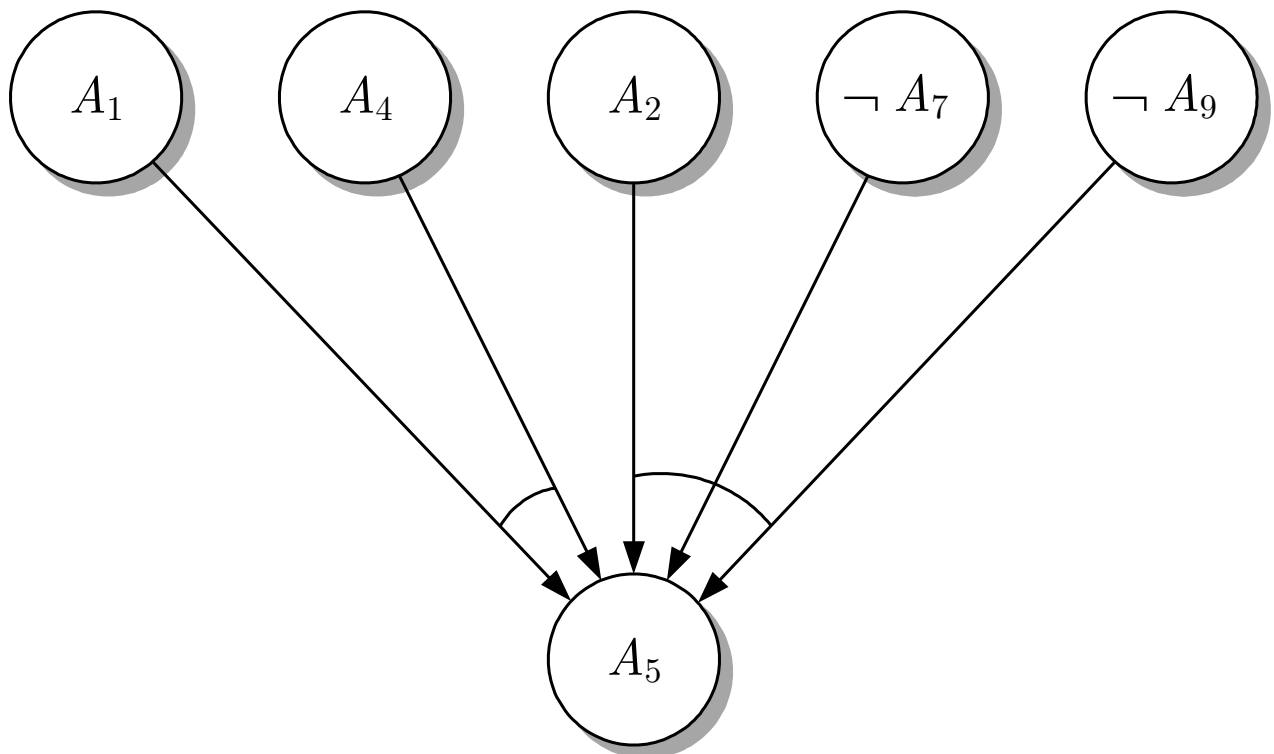
**Abb. 10.1. Verarbeitung unsicheren Wissens**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



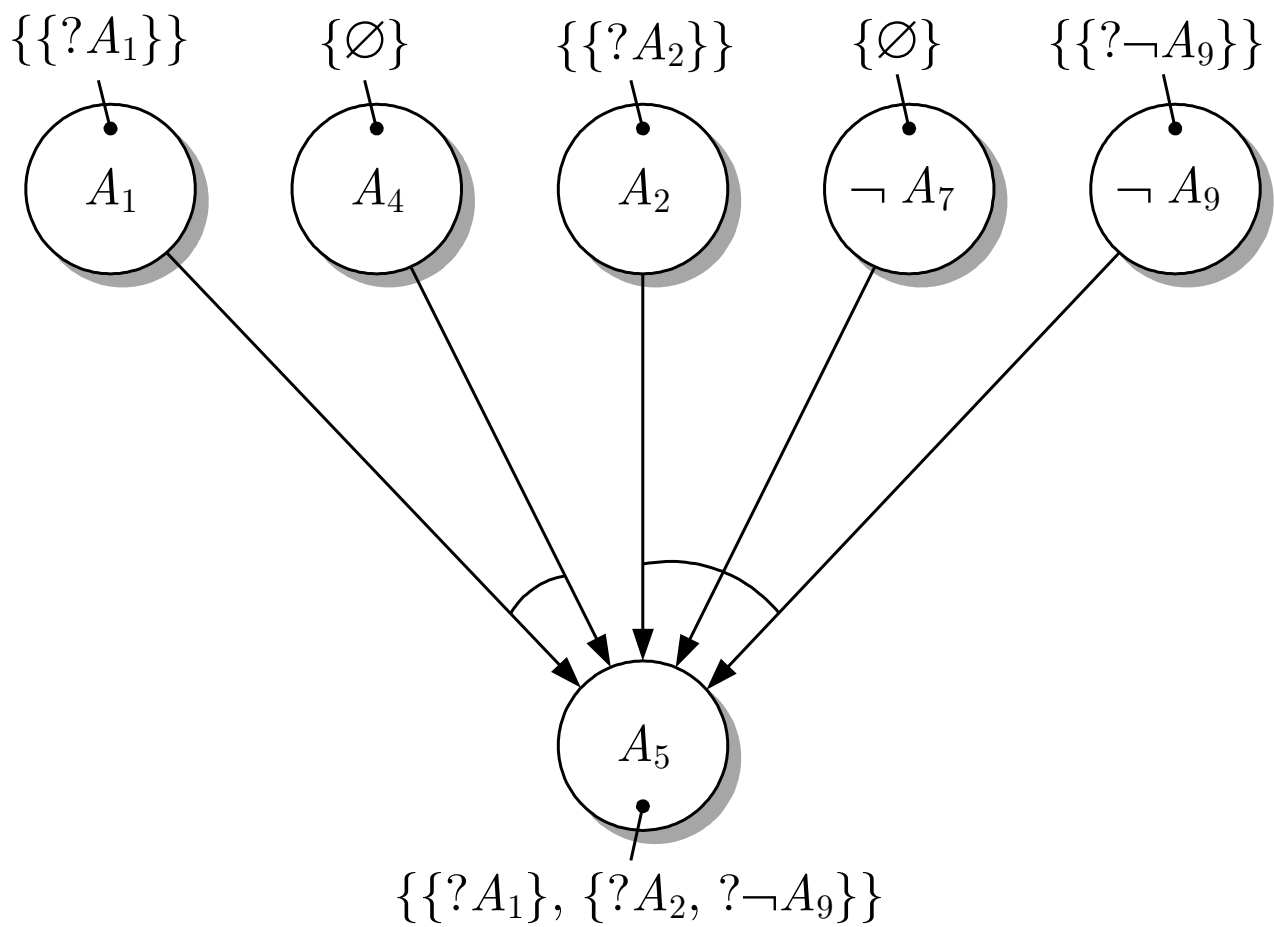
**Abb. 10.2: Verwaltung von Wahrheitswerten bei wechselndem Kontext**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 10.3: UND-ODER-Graph zur Darstellung der Abhängigkeit des Wahrheitswertes der Aussage  $A_5$  von den Wahrheitswerten der Aussagen  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_4$ ,  $\neg A_7$  und  $\neg A_9$**

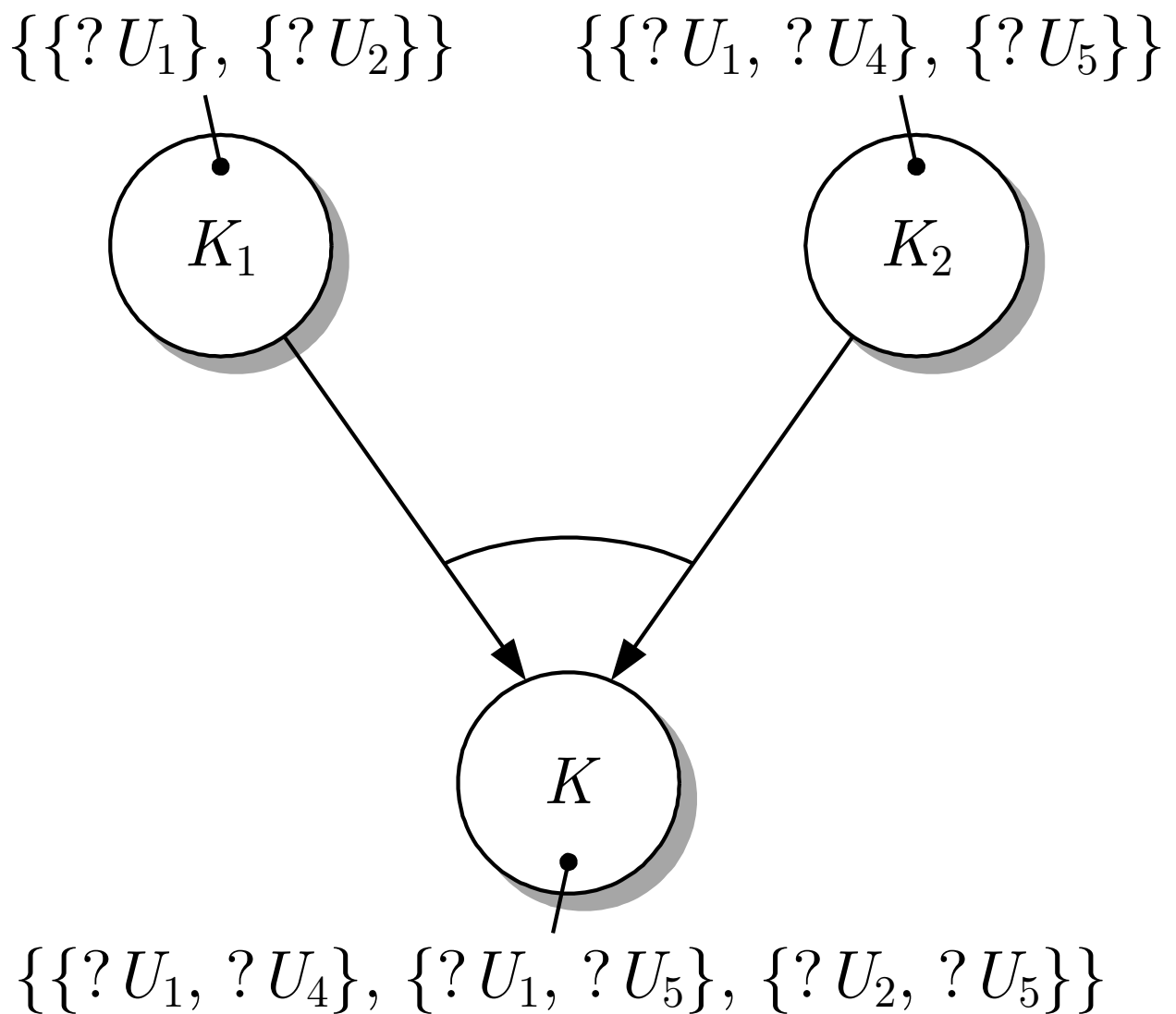
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 10.4: UND-ODER-Graph mit Kennzeichnung der globalen Umgebungen**

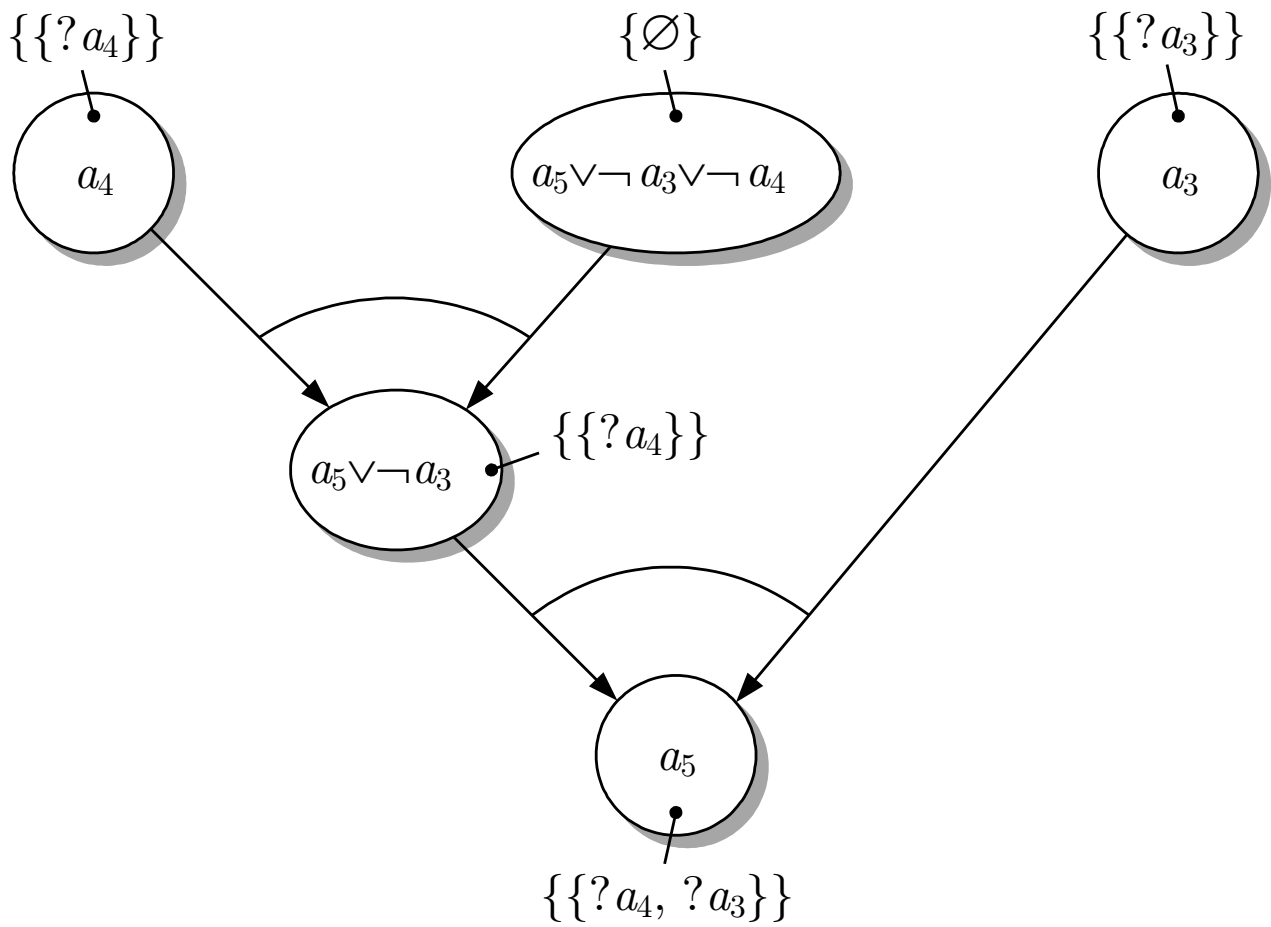
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





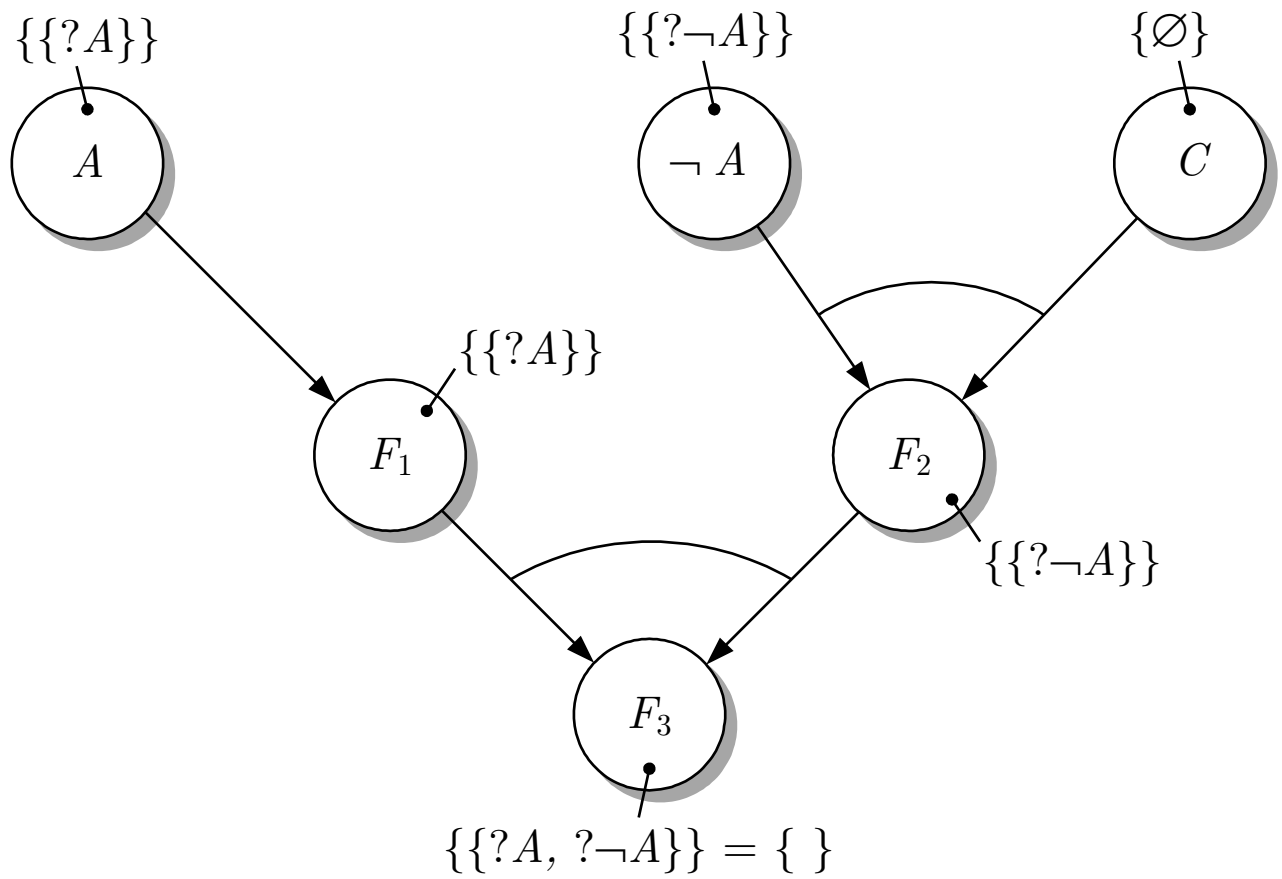
**Abb. 10.5: Beispielgraph zur Behandlung mehrfacher globaler Umgebungen**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



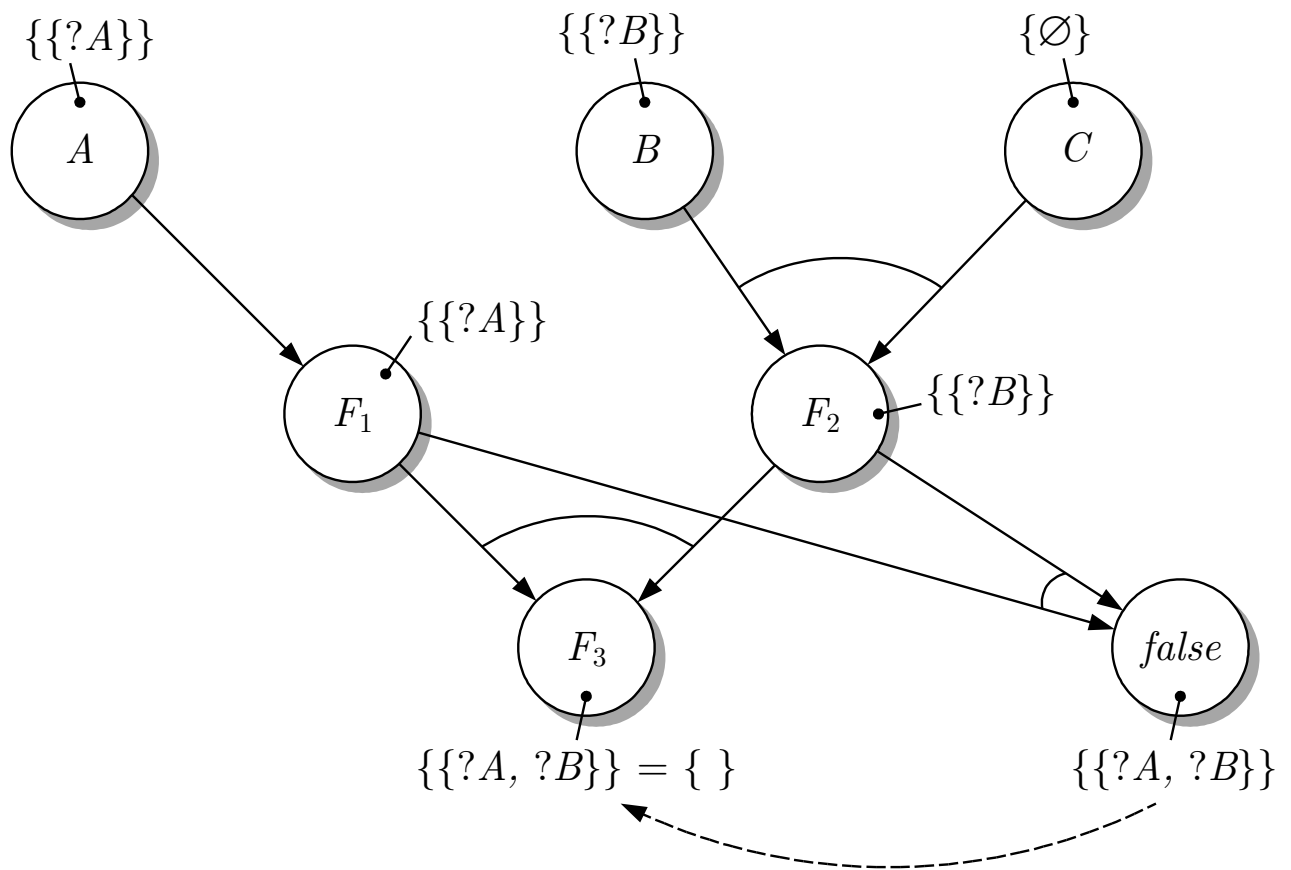
**Abb. 10.6: ATMS-Graph für das Beispiel**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



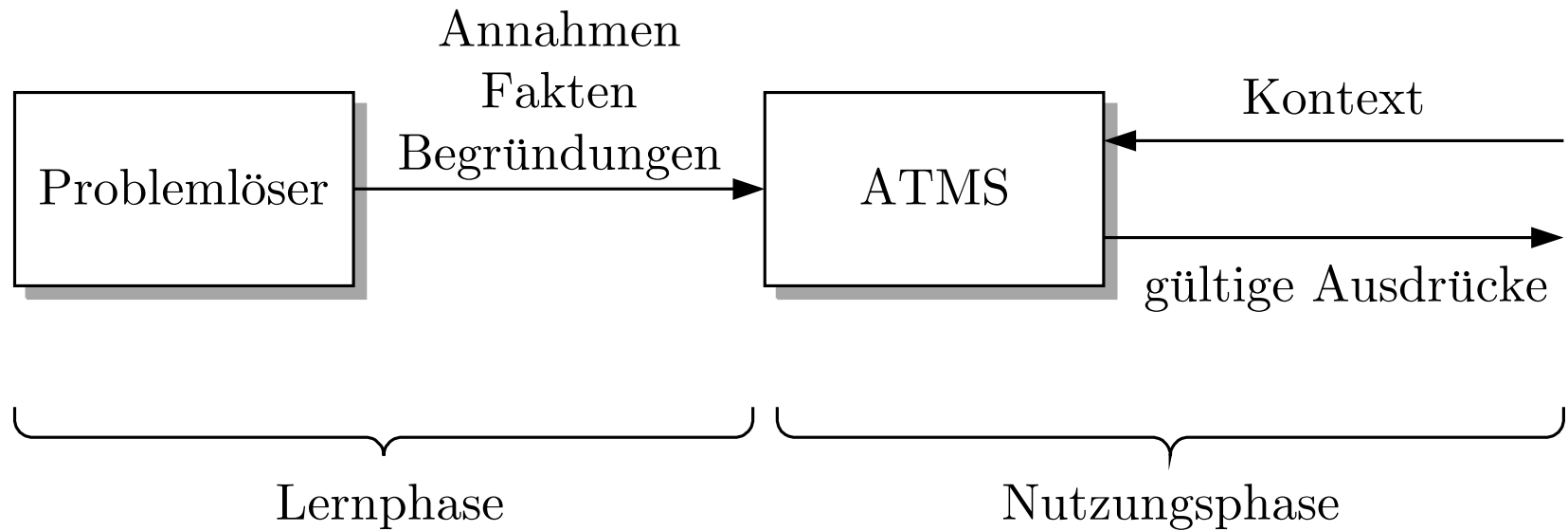
**Abb. 10.7: ATMS-Graph mit ungültiger Formel**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



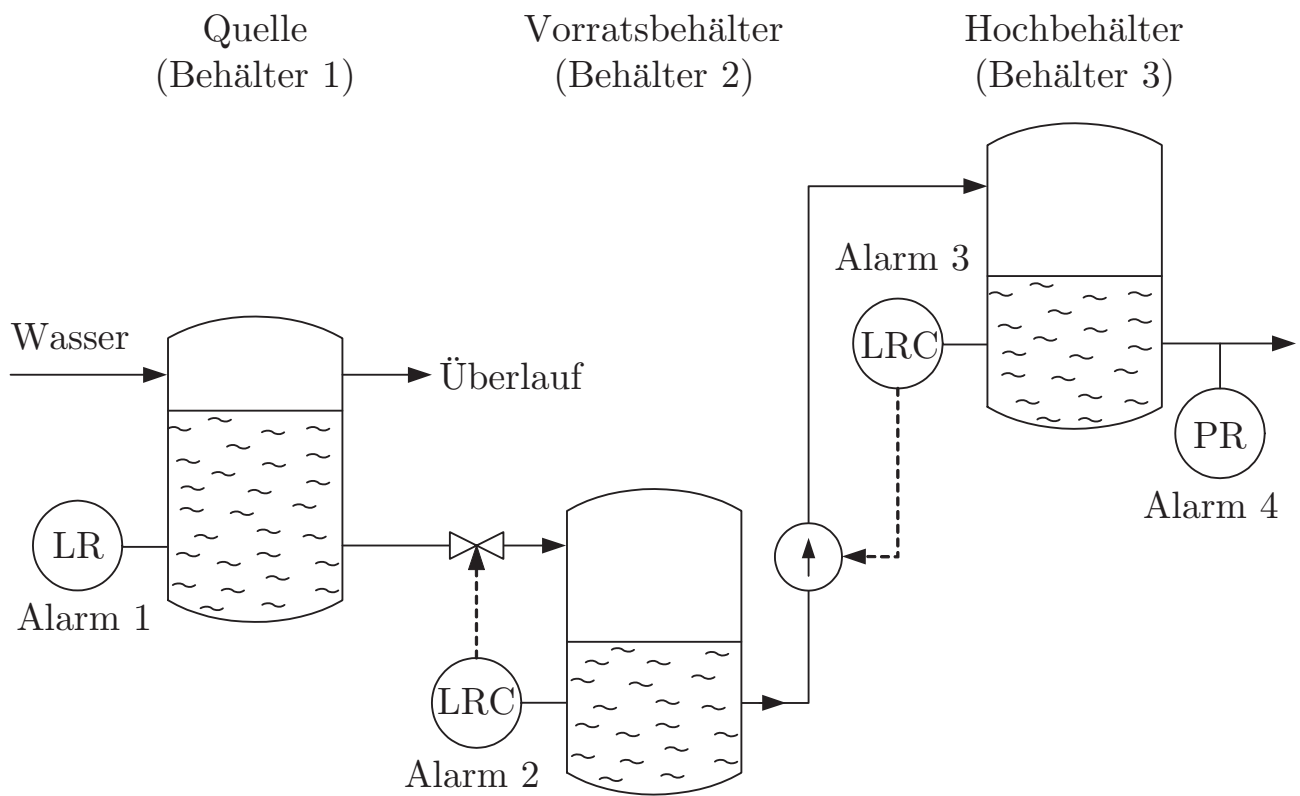
**Abb. 10.8: ATMS-Graph mit expliziter Angabe eines Widerspruchs**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



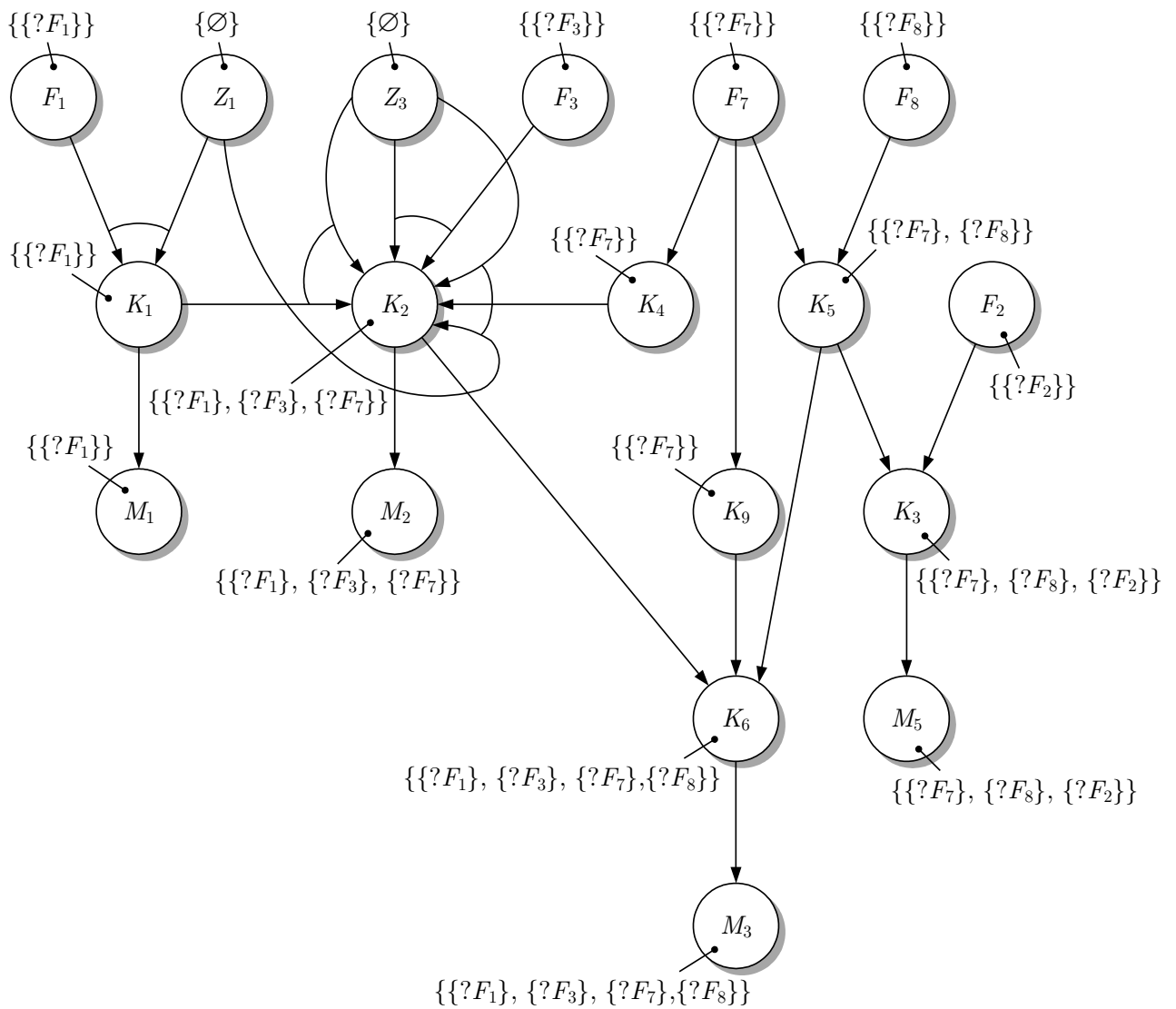
**Abb. 10.9. Problemlösen mit ATMS**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



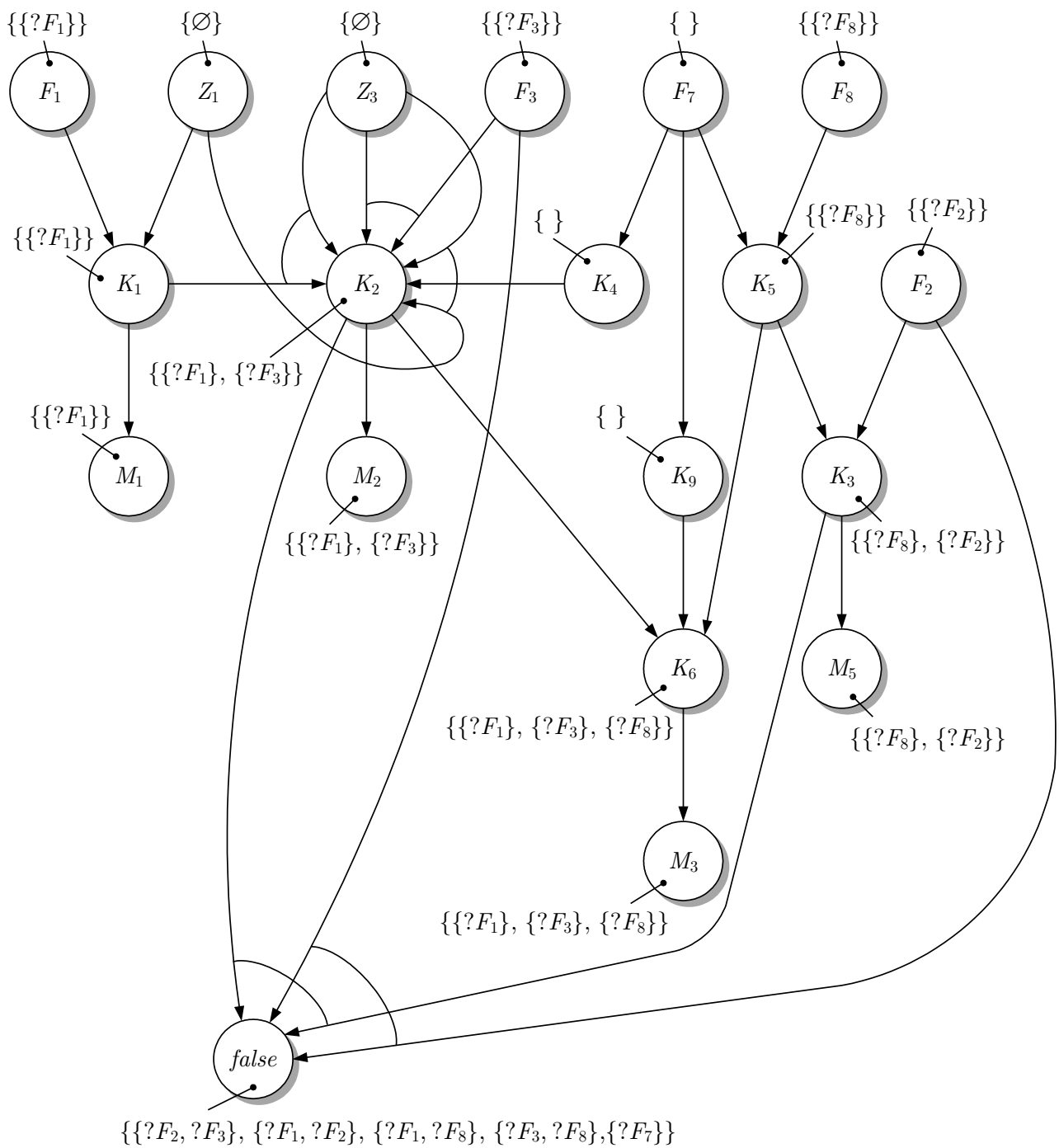
**Abb. 10.10: Behältersystem**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 10.11: ATMS-Graph für das Behältersystem**

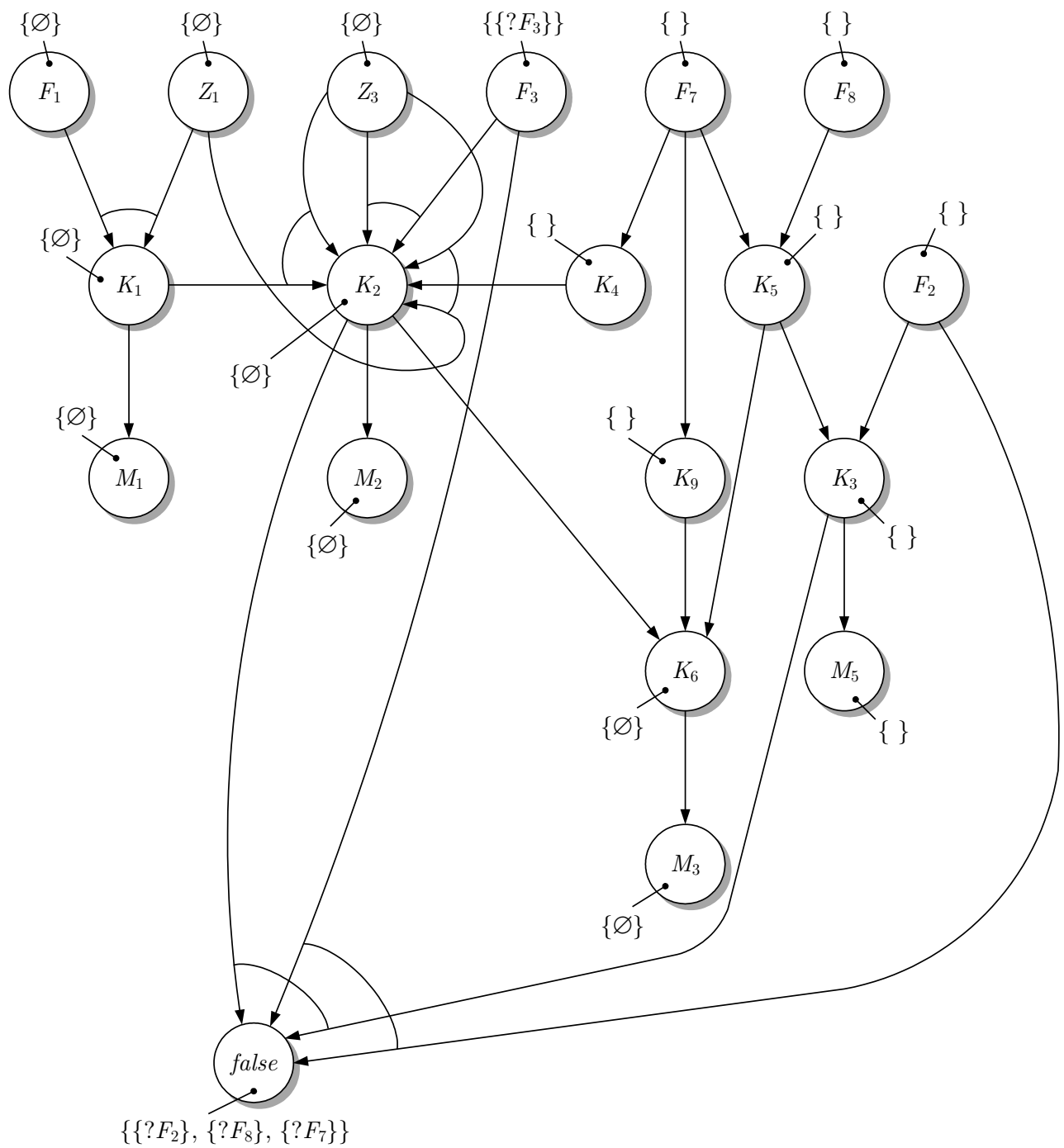
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 10.12: ATMS-Graph für das Behältersystem mit eingetragenen Widersprüchen**

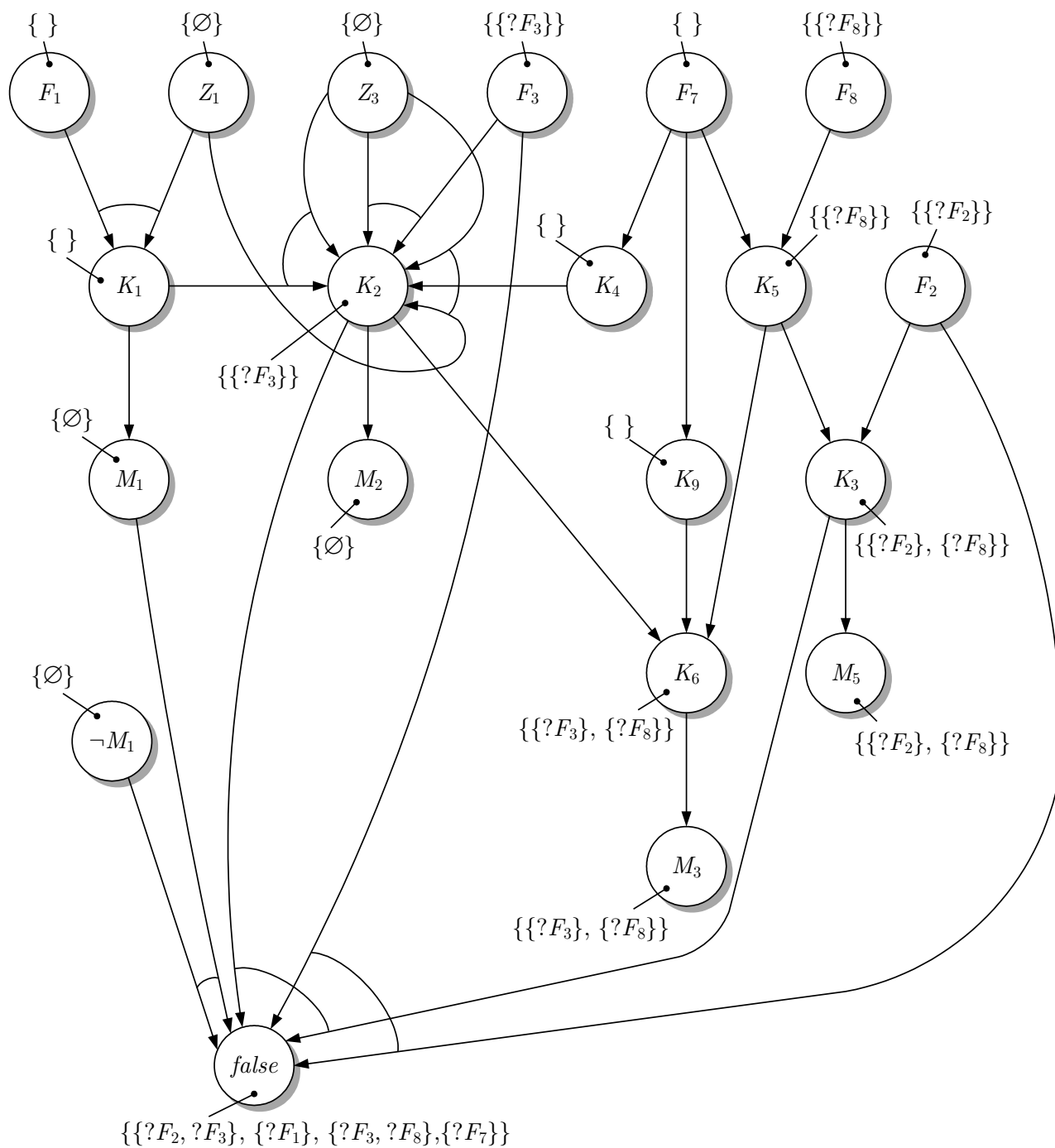
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





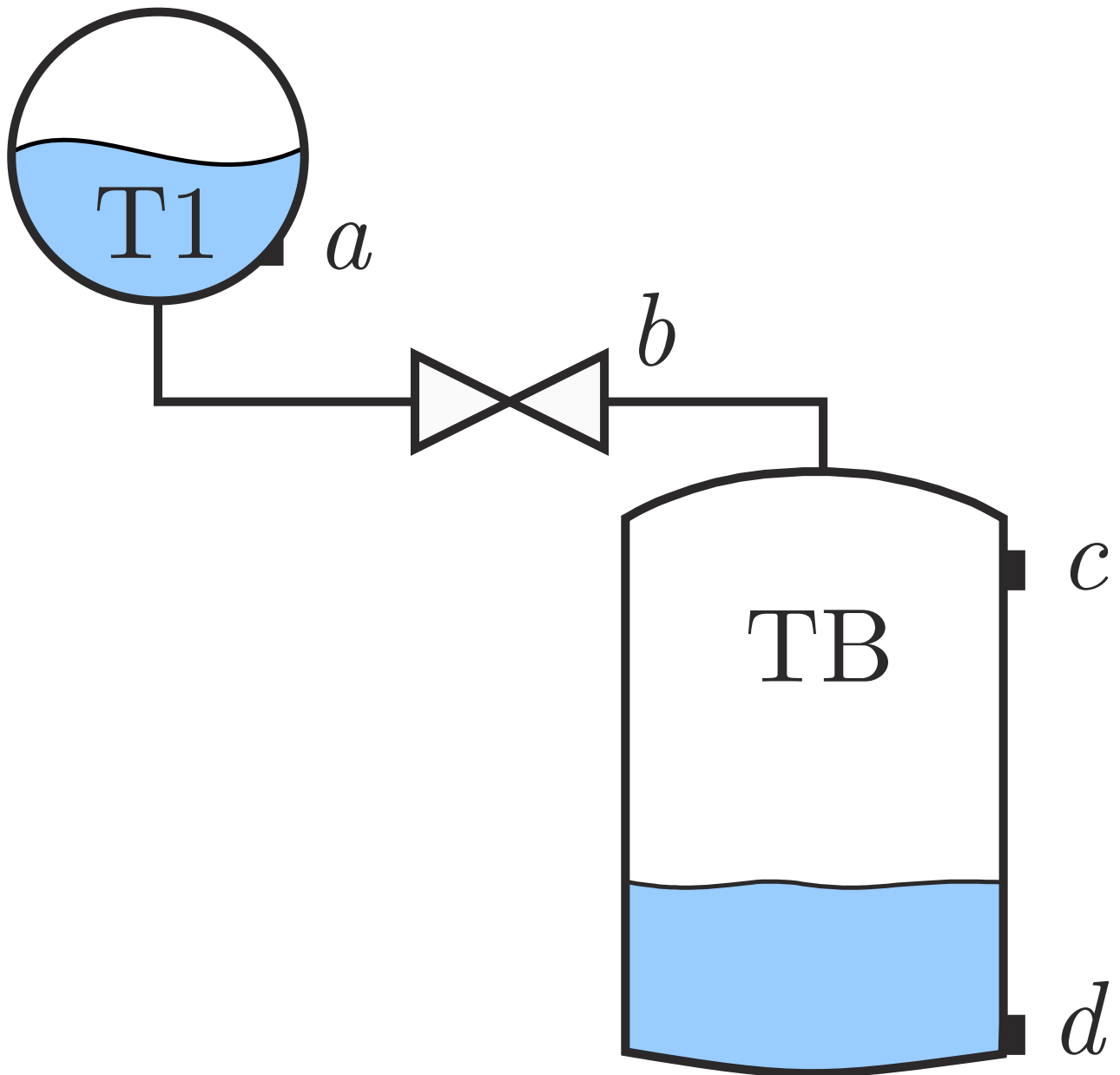
**Abb. 10.13: ATMS-Graph für das Behältersystem für den Fehlerfall  $F_1$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



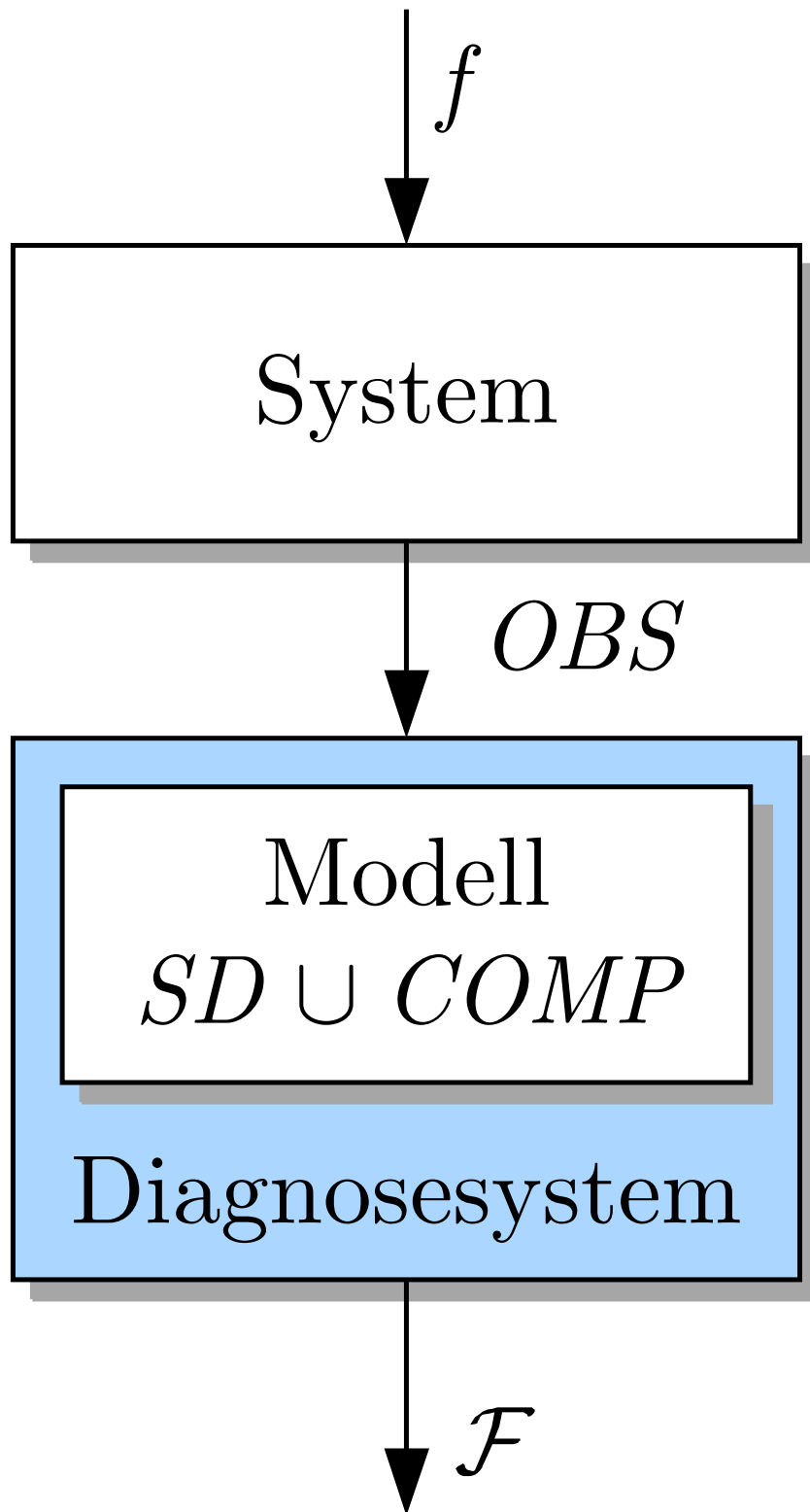
**Abb. 10.14: ATMS-Graph für das Behältersystem nach Aktivierung der Alarmmeldungen  $M_2$  und Nichteintreten der Alarmmeldung  $M_1$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



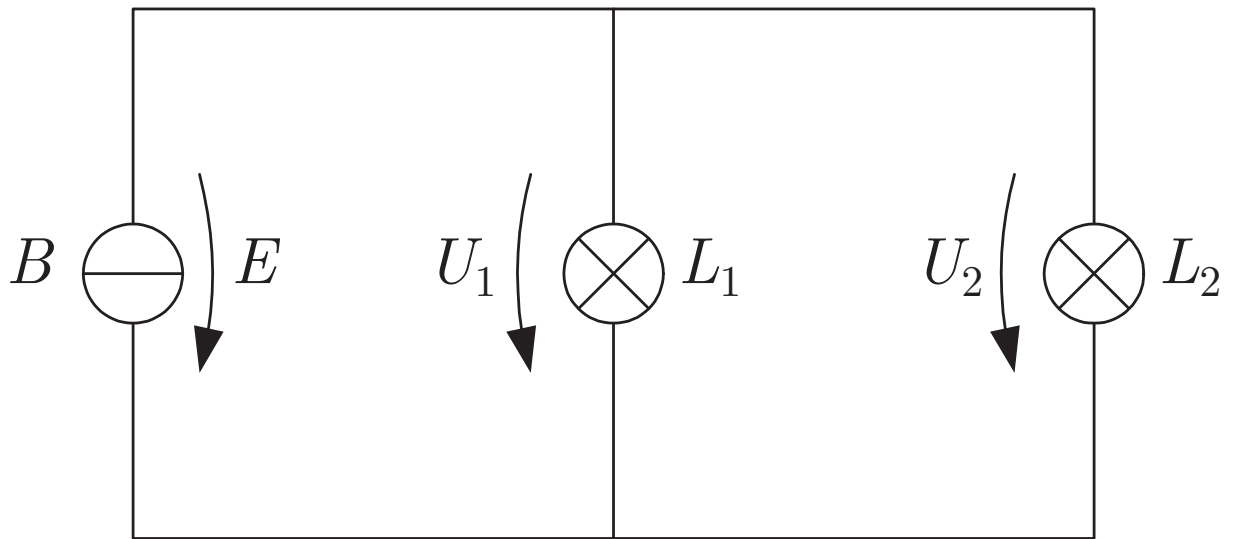
**Abb. 10.15: Behälter T1 und TB mit Ventil und Füllstandssensoren**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



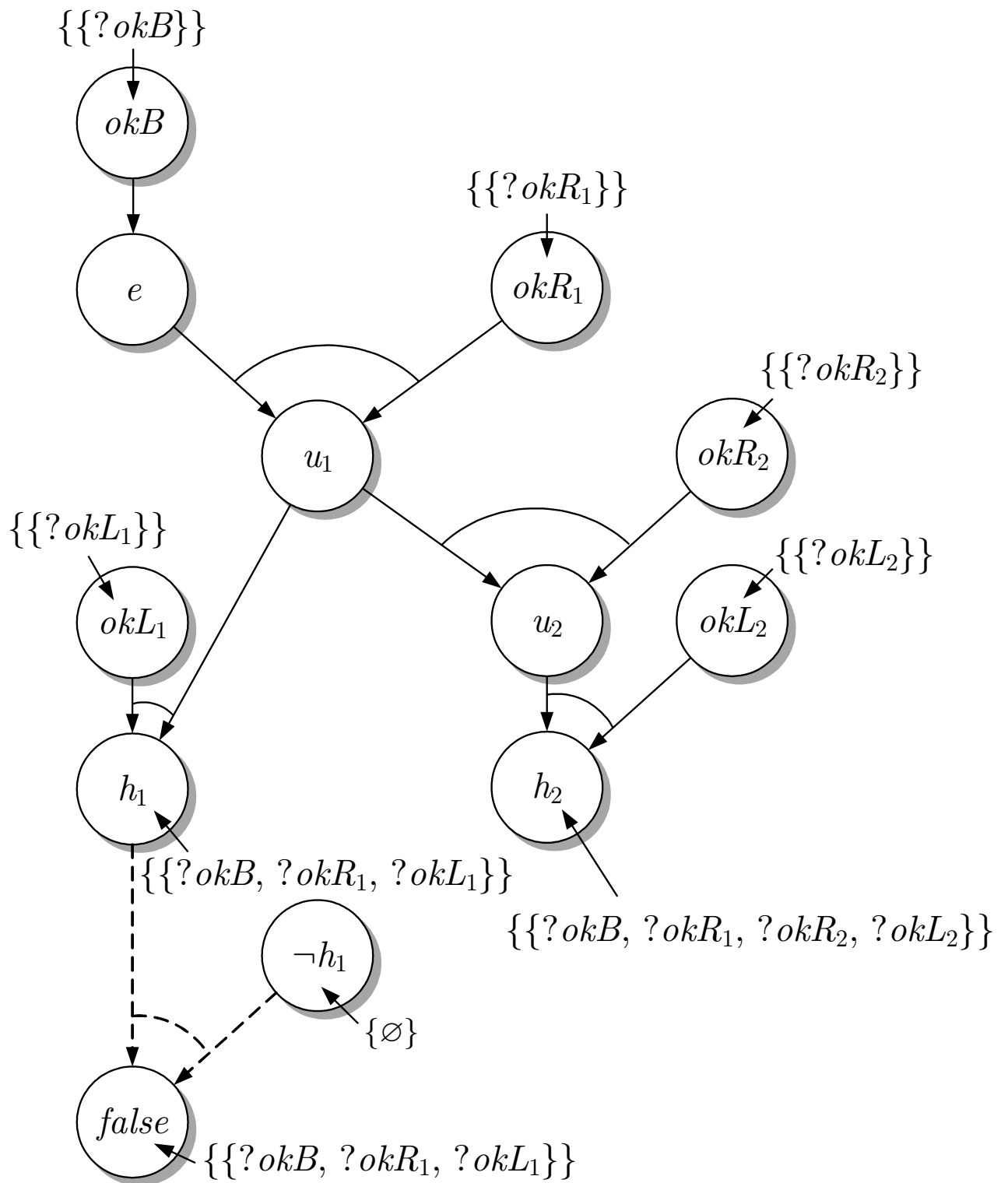
**Abb. 10.16. Modellbasierte Diagnose**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



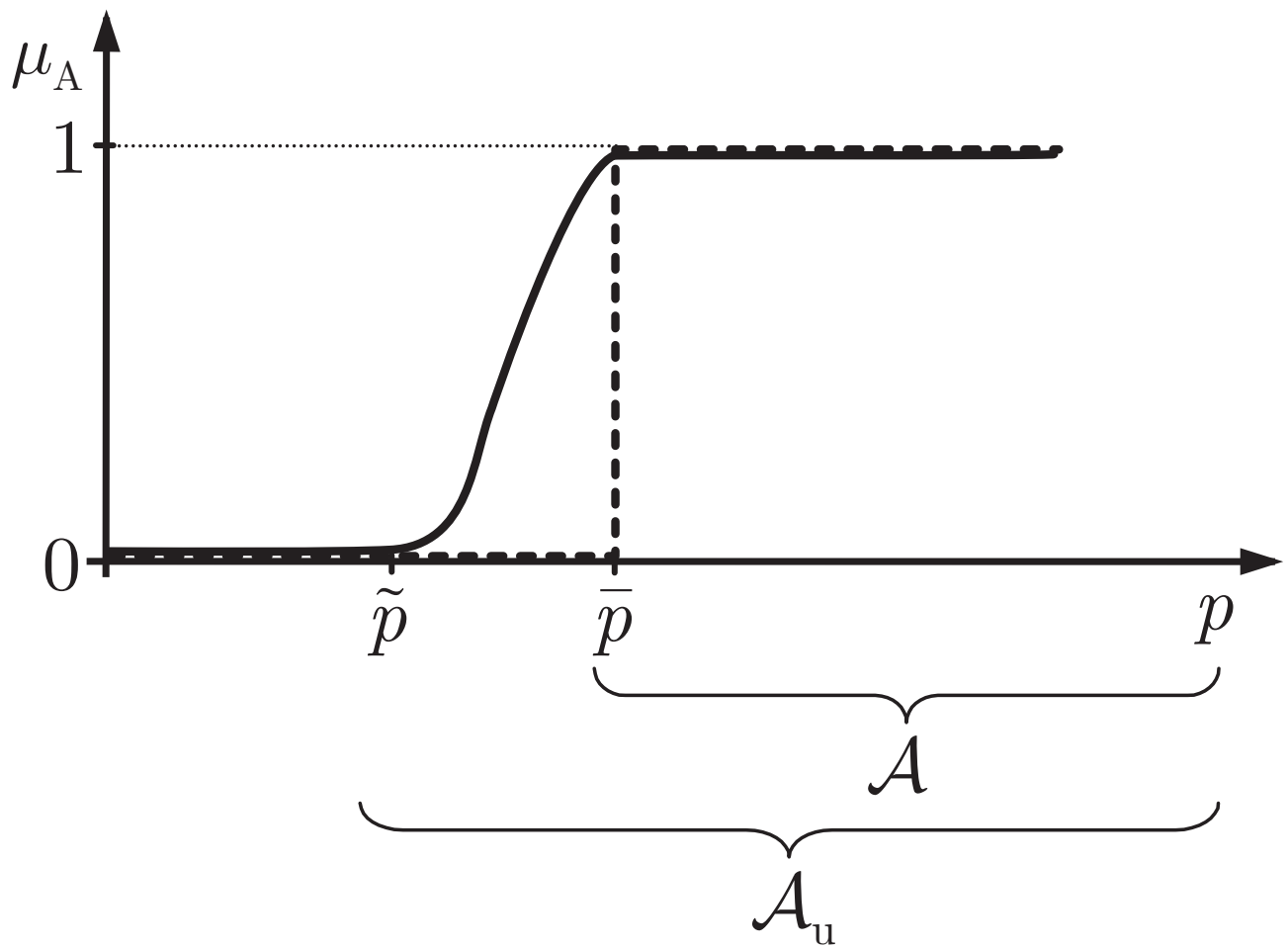
**Abb. 10.17: Schaltplan einer Beleuchtungseinrichtung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



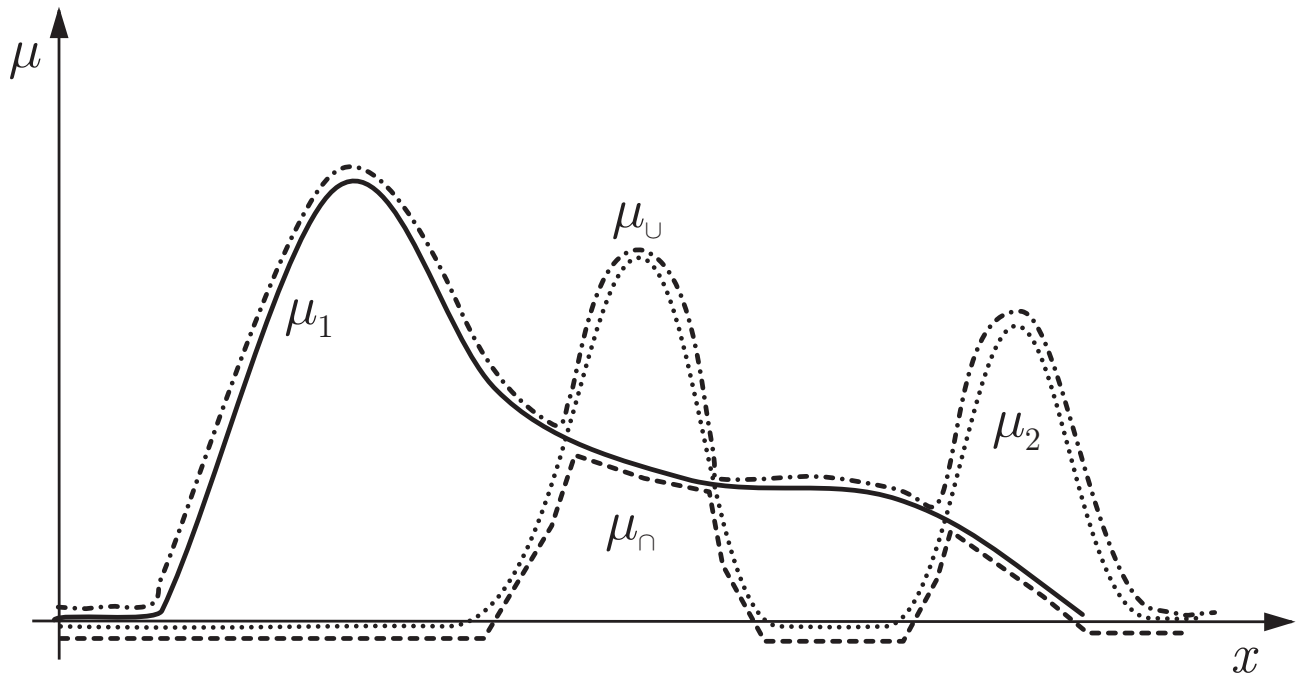
**Abb. 10.18: ATMS-Graph für das Diagnosebeispiel**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 11.1: Zugehörigkeitsfunktion der unscharfen Menge „gefährlicher“ Druckwerte**

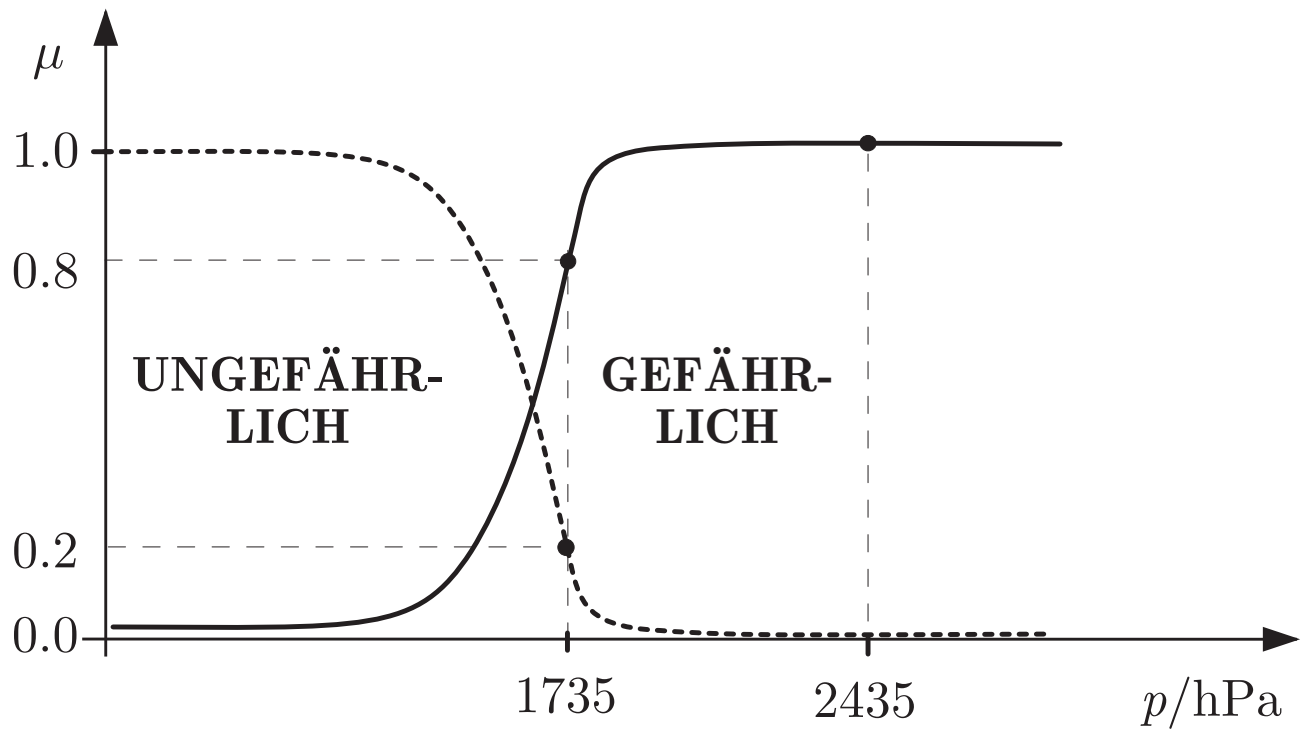
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 11.2: Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_1$  und  $\mu_2$  der Mengen  $\mathcal{M}_1$  und  $\mathcal{M}_2$  sowie  $\mu_{\cup}$  und  $\mu_{\cap}$  der Vereinigung bzw. des Durchschnitts beider Mengen**

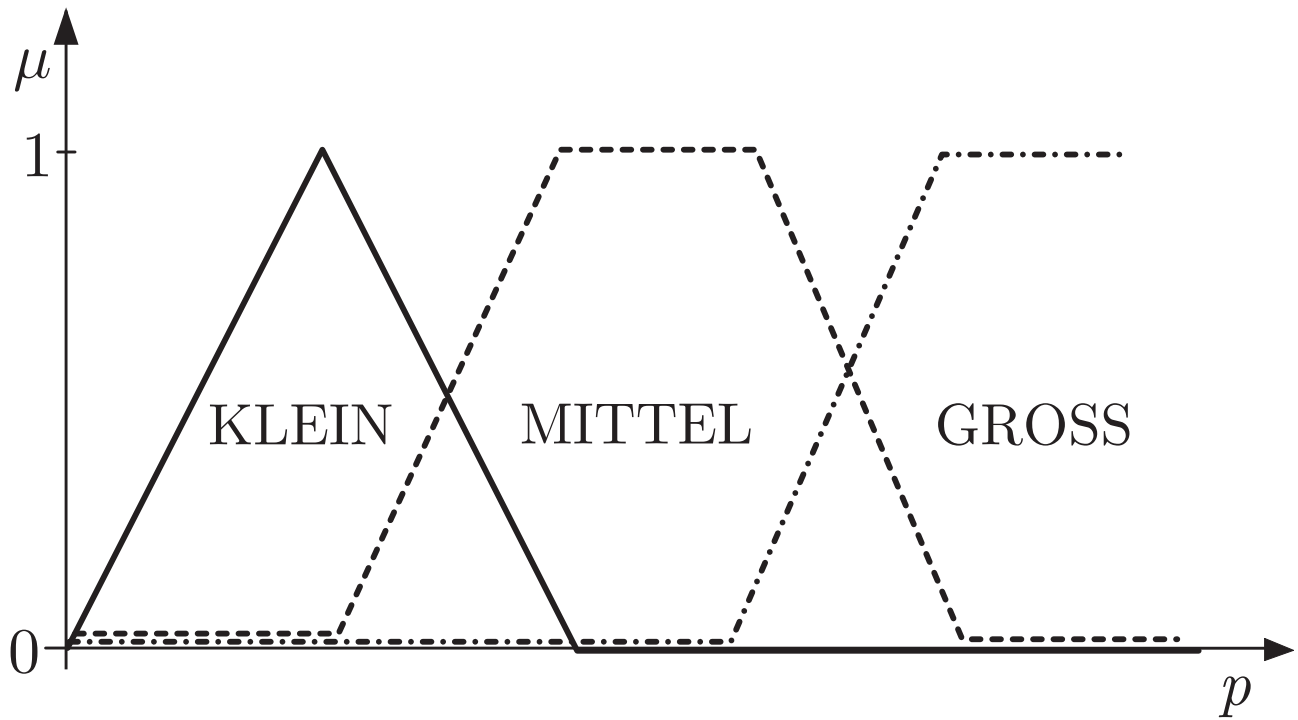
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





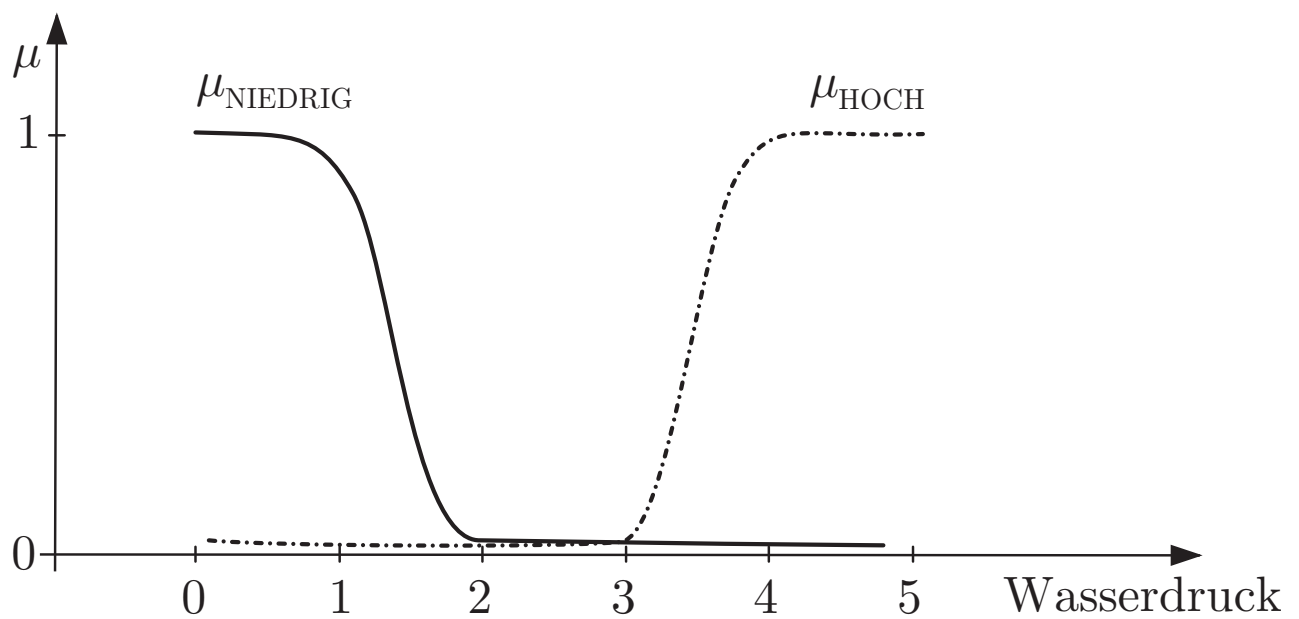
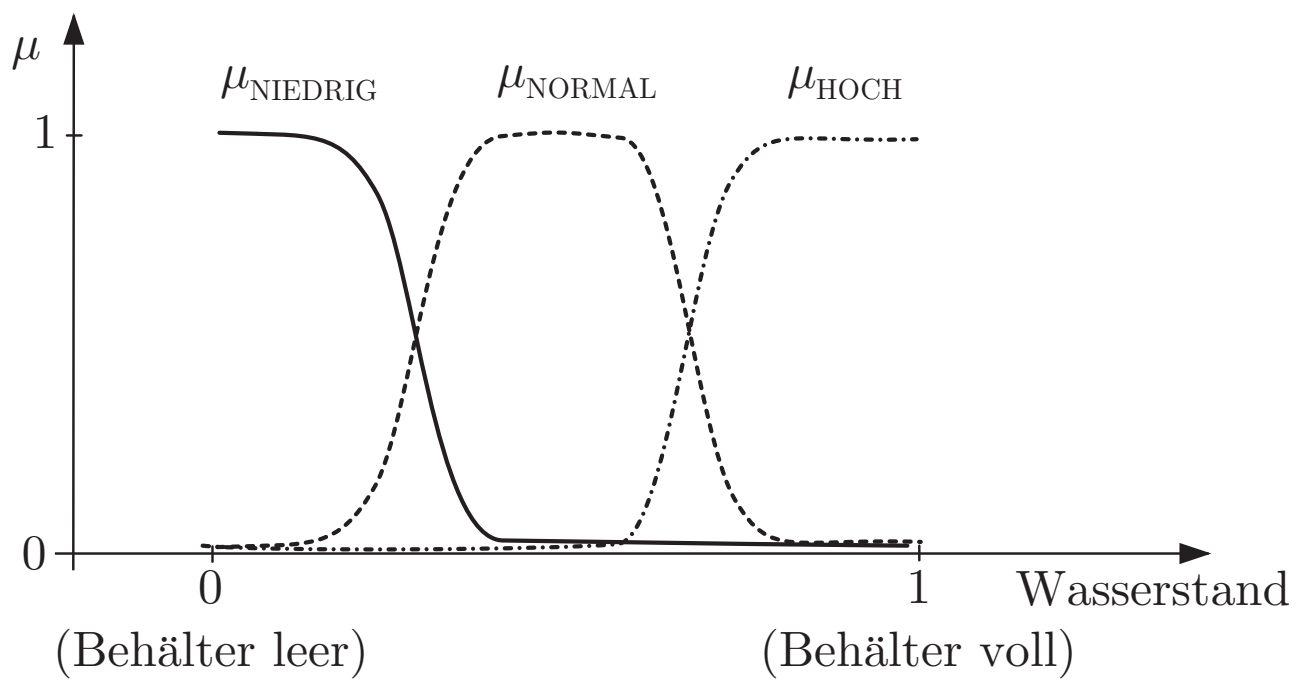
**Abb. 11.3: Gefährliche und ungefährliche Druckwerte**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



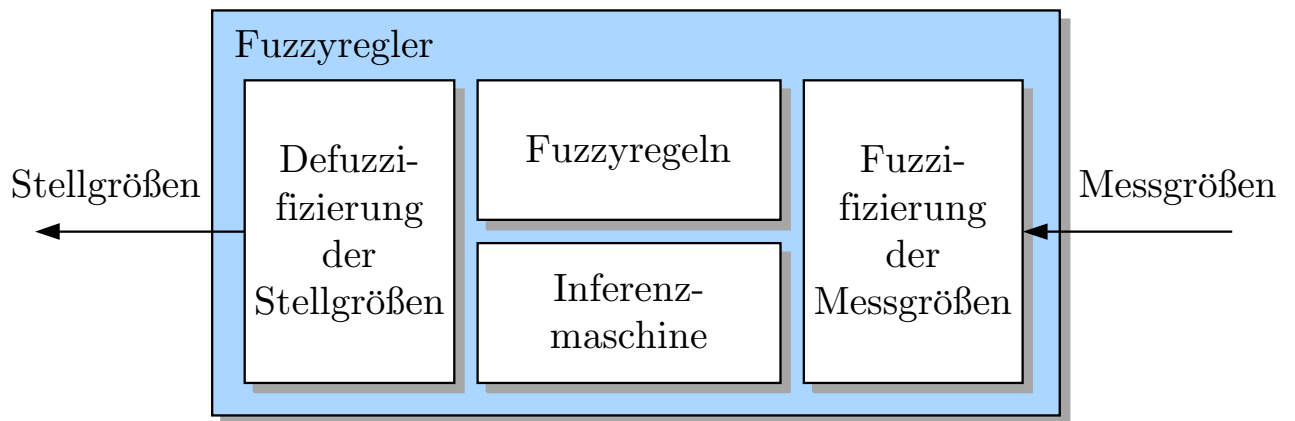
**Abb. 11.4: Beispiele für Zugehörigkeitsfunktionen zur Darstellung der unscharfen Mengen der kleinen, mittelgroßen bzw. großen Werte von  $p$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



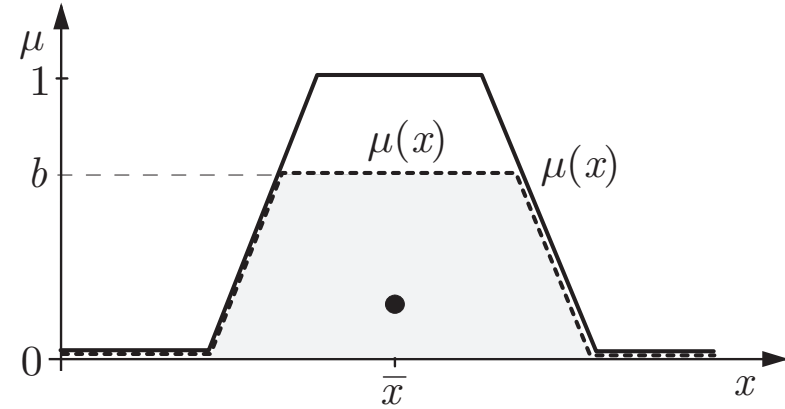
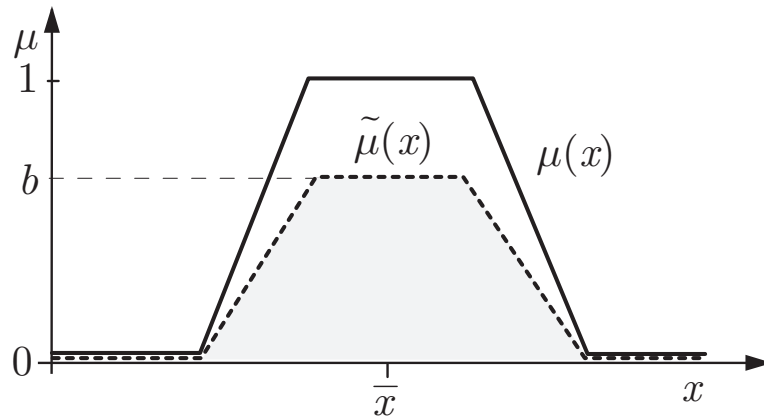
**Abb. 11.5: Definition unscharfer Mengen zur qualitativen Beschreibung des Verhaltens des Wasserversorgungssystems**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



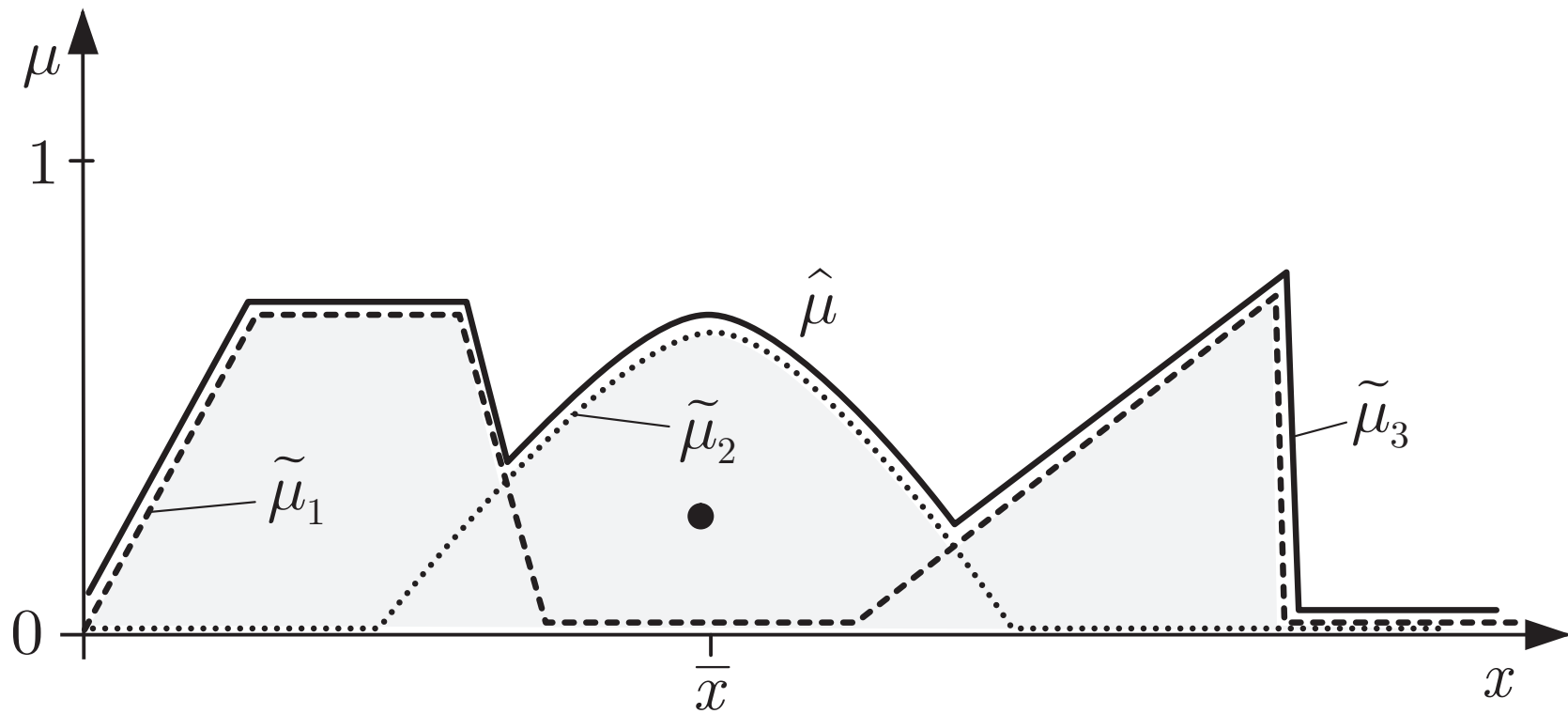
**Abb. 11.6: Fuzzyregler**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



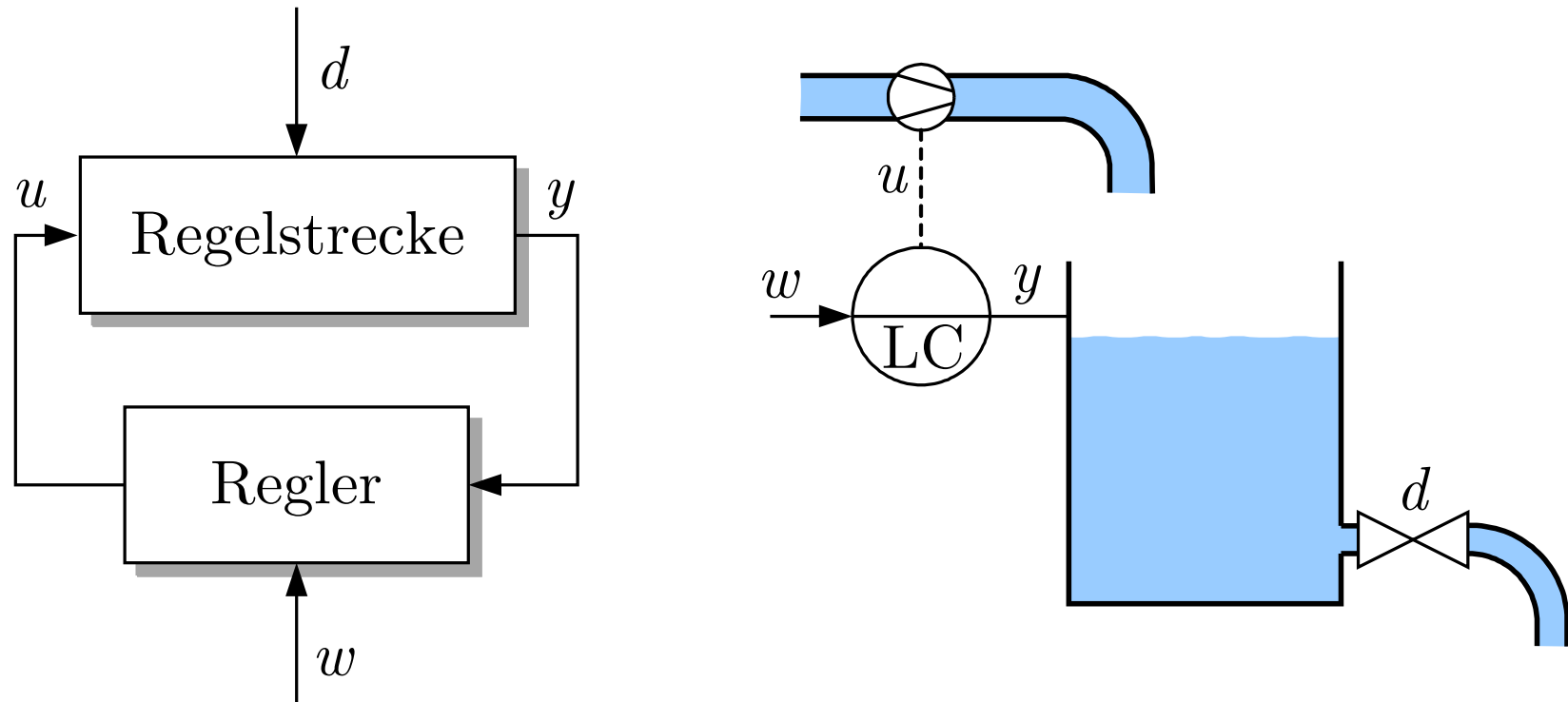
**Abb. 11.7. Gewichtete Zugehörigkeitsfunktion**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

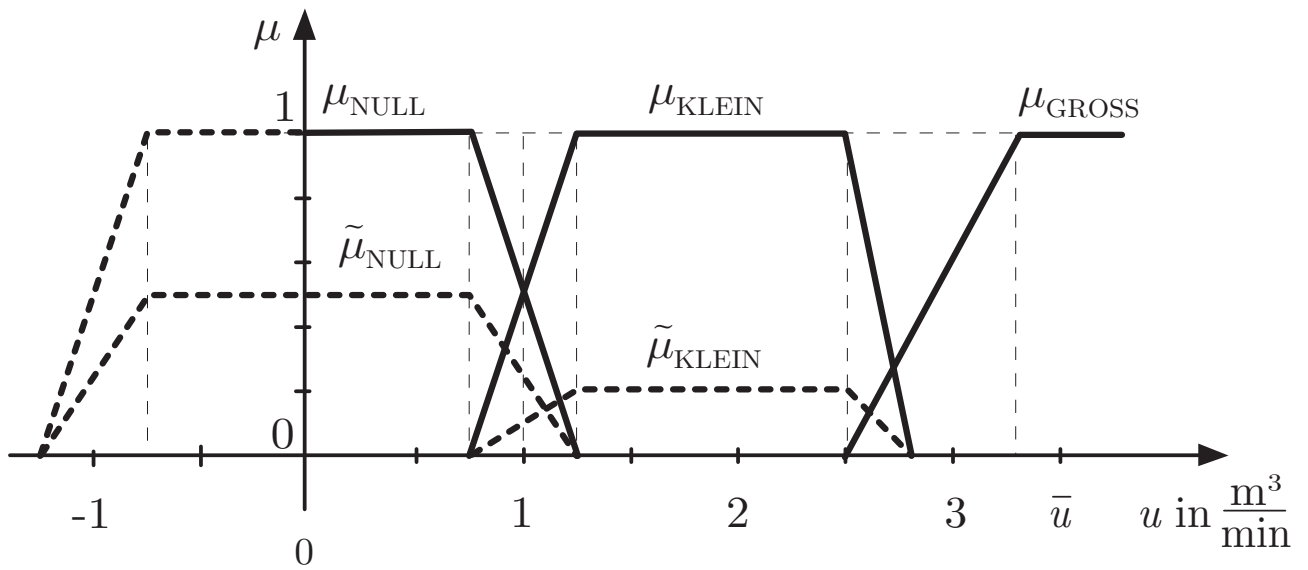
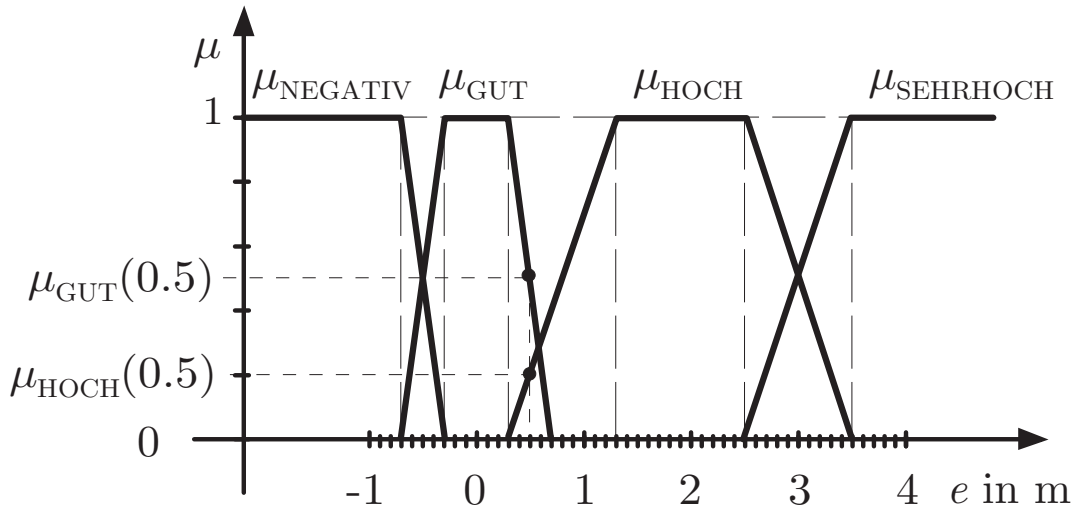


**Abb. 11.8. Anwendung der Schwerpunktmethode**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



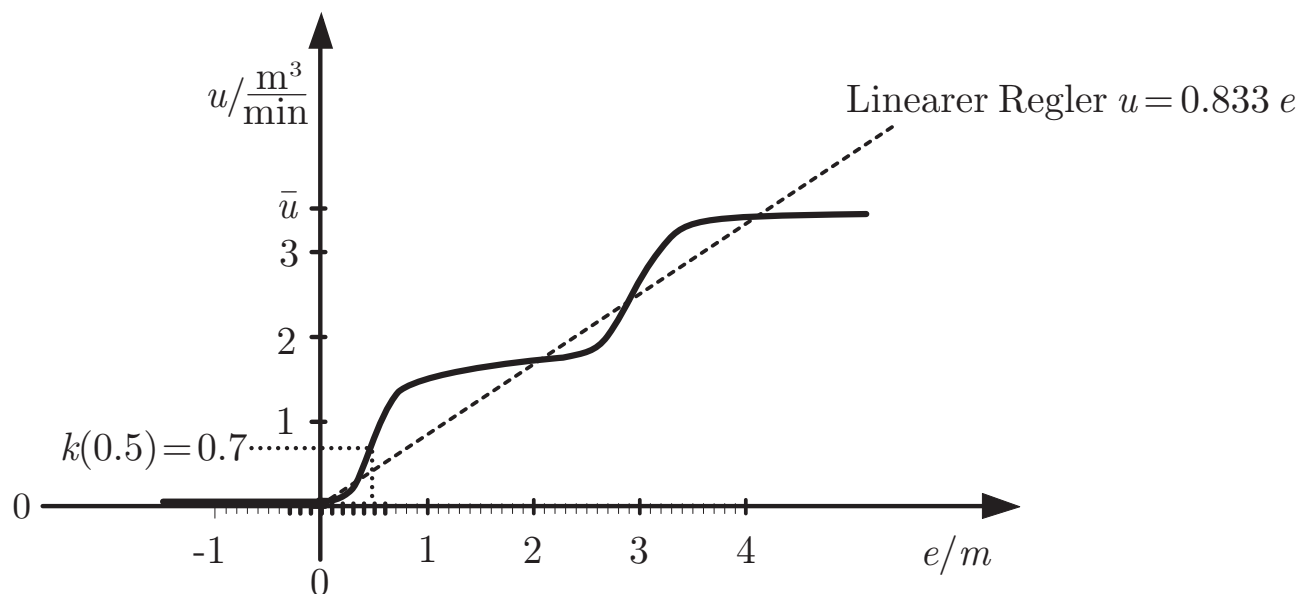
**Abb. 11.9. Blockschaltbild von Regelkreisen (links) und Füllstandsregelung (rechts)**



**Abb. 11.10: Zugehörigkeitsfunktionen der unscharfen Mengen zur Beschreibung der Regelabweichung (oben) und der Stellgröße (unten)**

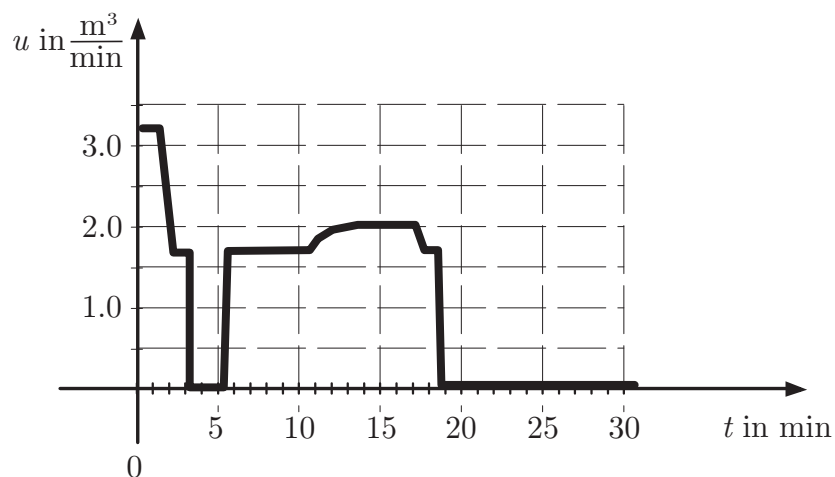
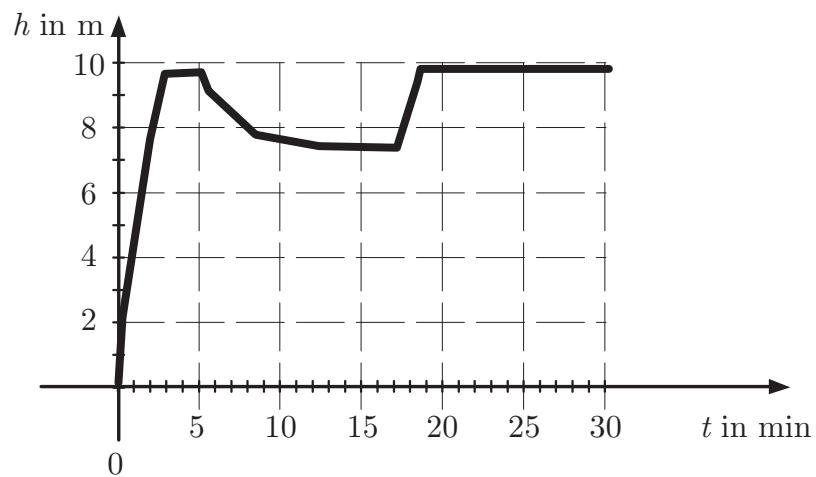
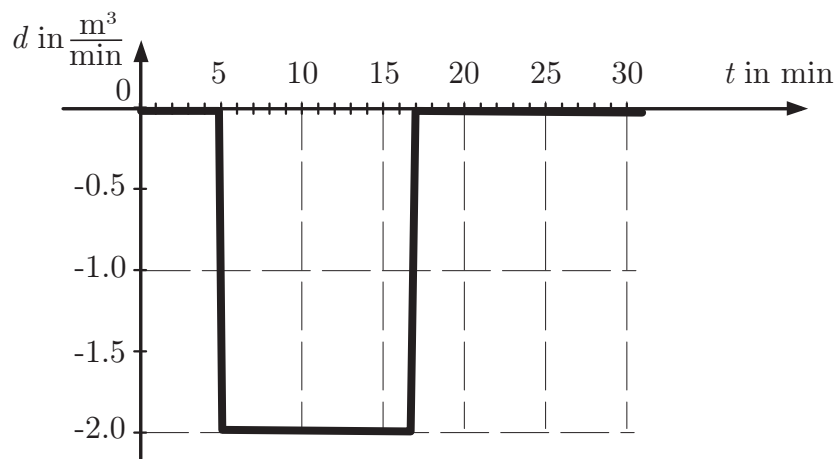
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





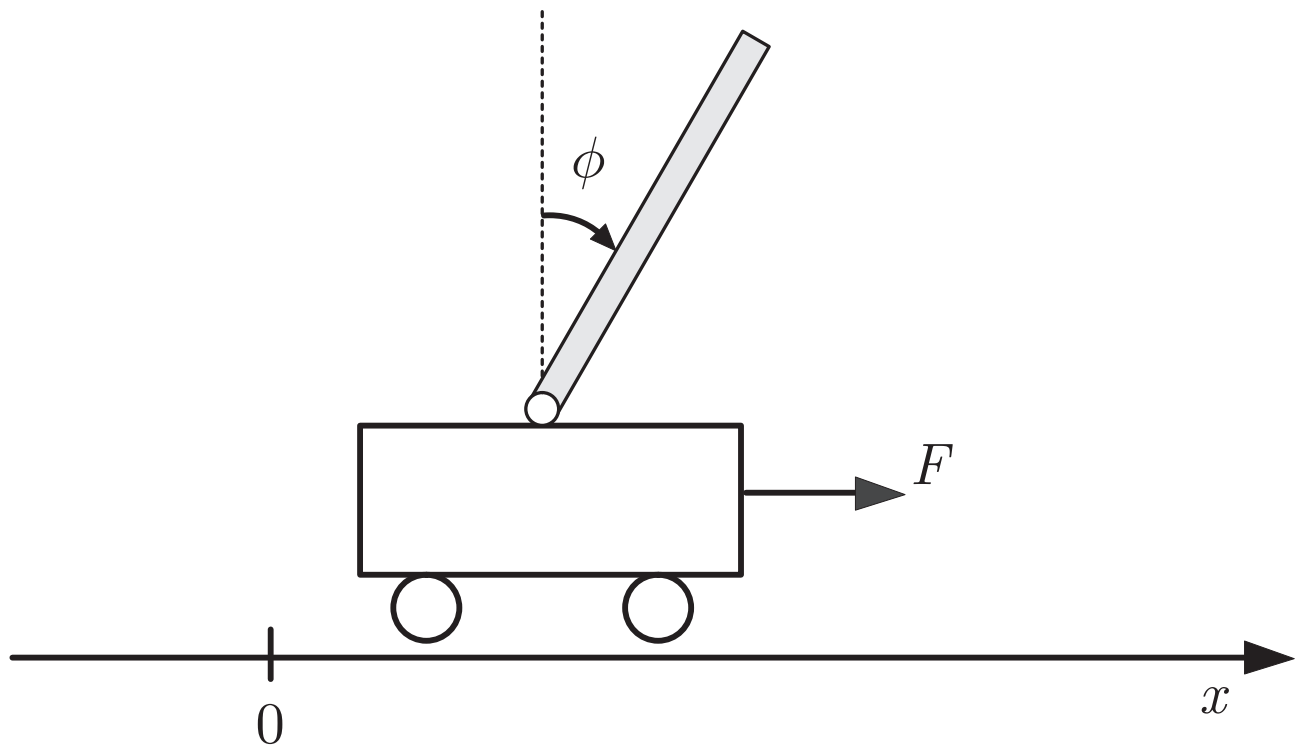
**Abb. 11.11: Grafische Darstellung des Reglergesetzes**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



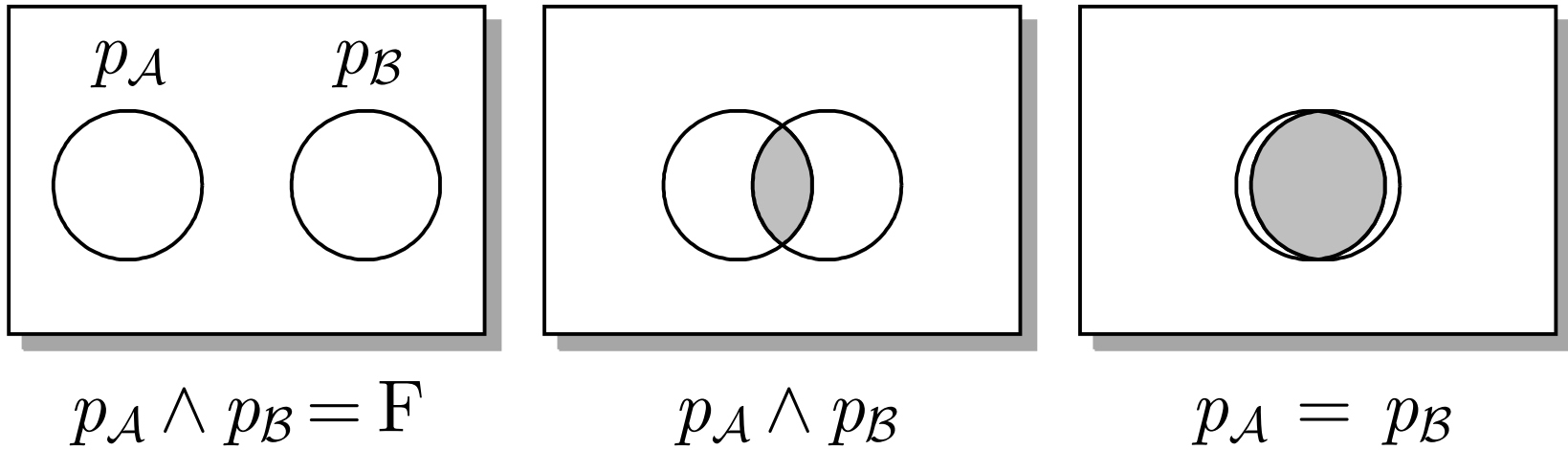
**Abb. 11.12. Verhalten des geschlossenen Regelkreises**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



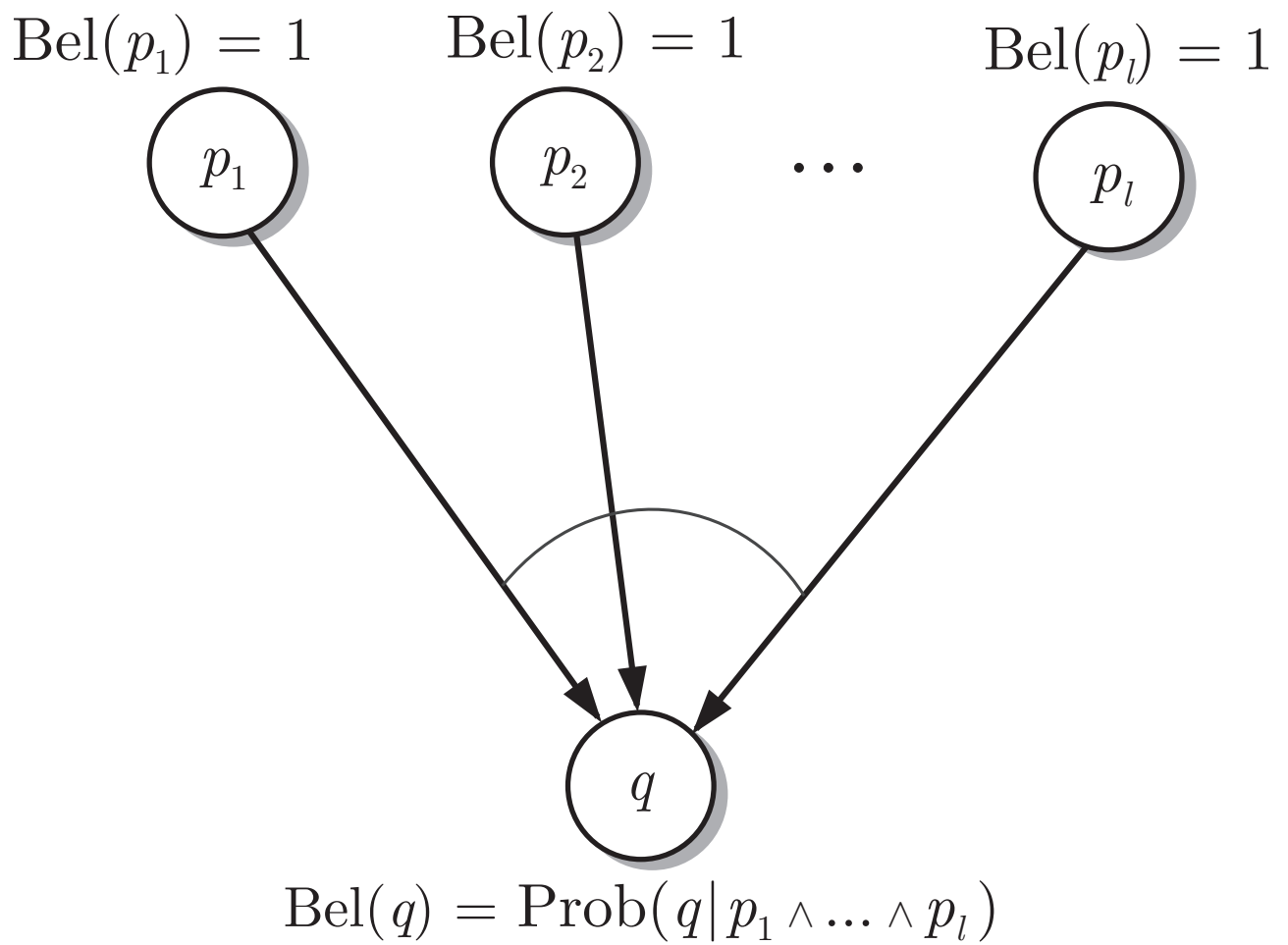
**Abb. 11.13: Invertiertes Pendel**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



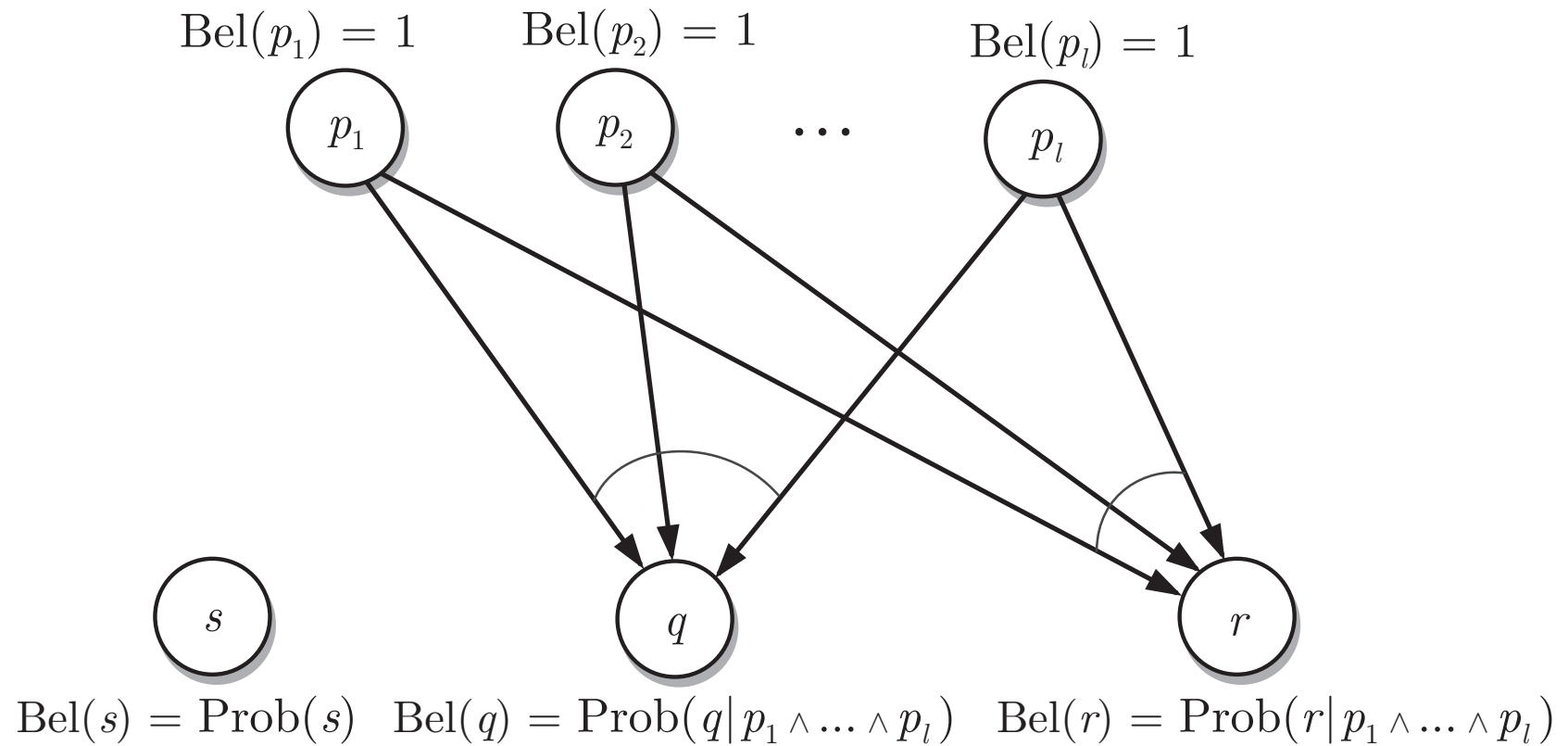
**Abb. 12.1. Fallunterscheidung bezüglich der Gültigkeit der Aussagen  $p_A$  und  $p_B$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.2: Veranschaulichung der Abtrennregel der probabilistischen Logik**

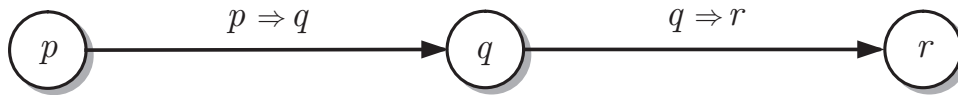
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.3. Anwendung der Abtrennregel der probabilistischen Logik**

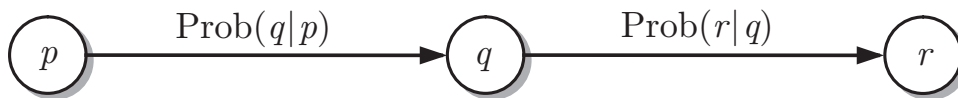
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

beobachtet:  $\models$  gefolgert:  $\models$  gefolgert:  
 $p$  ist wahr  $q$  ist wahr  $r$  ist wahr



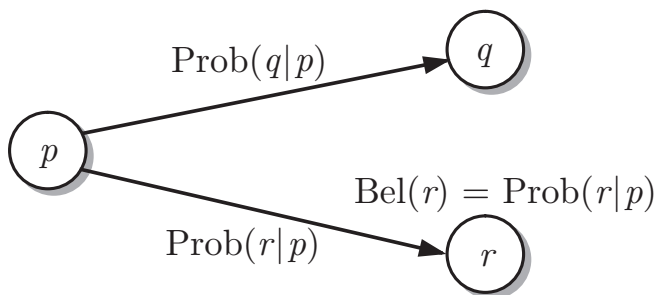
(a) Folgerungskette der klassischen Logik

beobachtet:  $\models$  gefolgert:  $\models$  gefolgert:  
 $\text{Bel}(p) = 1$   $\text{Bel}(q) = \text{Prob}(q|p)$   $\text{Bel}(r) = \text{Prob}(r|q) \text{Prob}(q|p)$



(b) Folgerungskette der probabilistischen Logik, die nur unter der Bedingung  $\text{Prob}(r|p) = \text{Prob}(r|q) \cdot \text{Prob}(q|p)$  gilt

beobachtet:  $\models$  gefolgert:  
 $\text{Bel}(p) = 1$   $\text{Bel}(q) = \text{Prob}(q|p)$

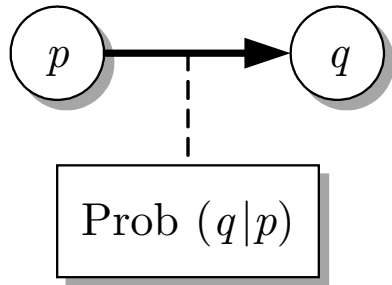


(c) Folgerungen der probabilistischen Logik, die stets gelten

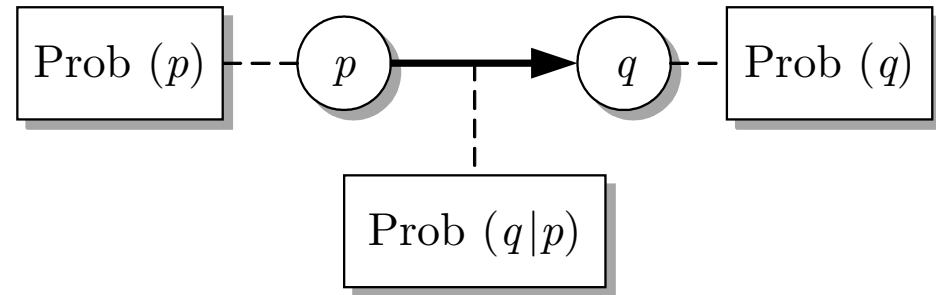
### Abb. 12.4: Schlussfolgerungen in klassischer und in probabilistischer Logik

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

Folgerungsrichtung



Folgerungsrichtung



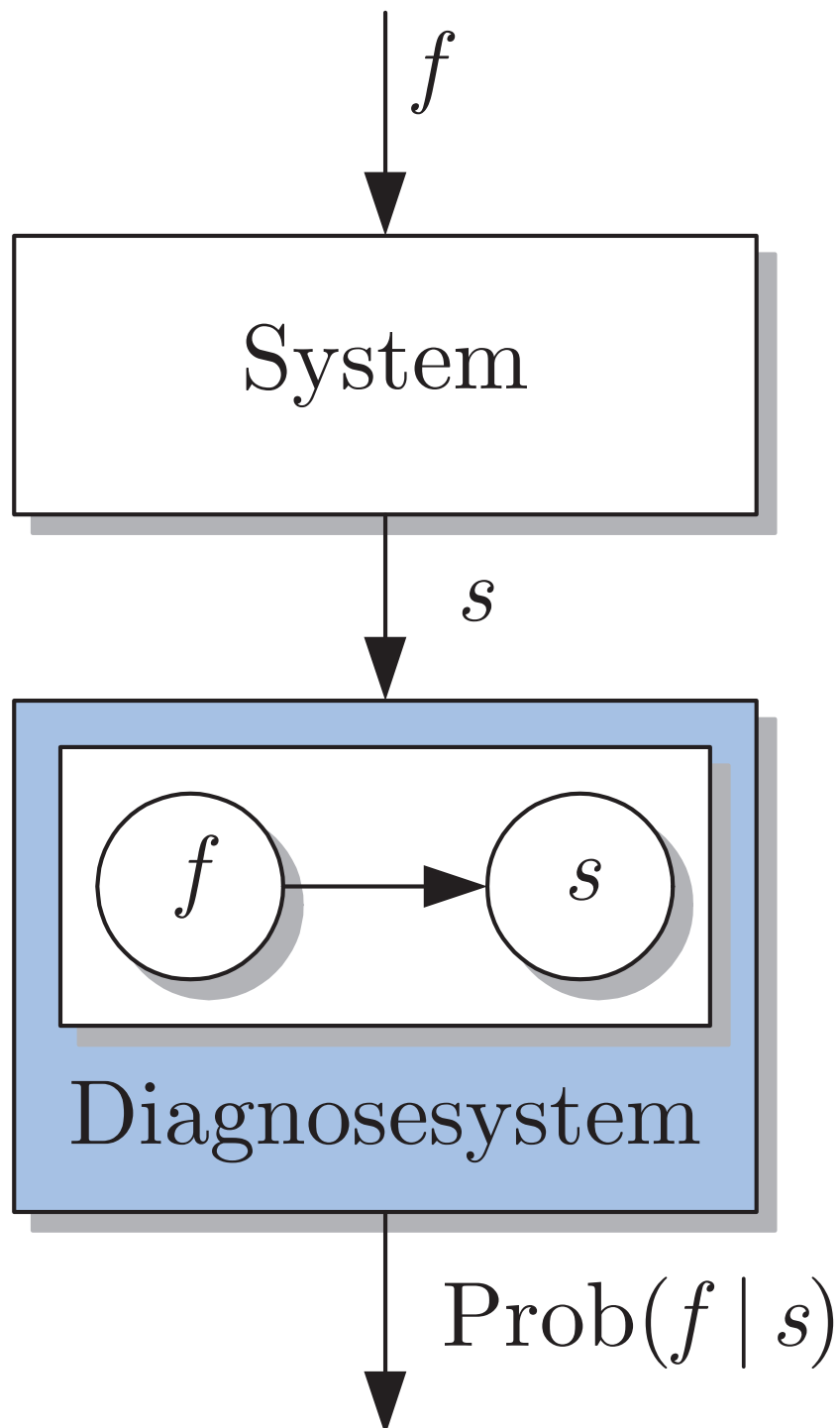
$$\text{Bel}(p) = 1 \models \text{Bel}(q) = \text{Prob}(q|p)$$

$$\text{Bel}(p) = \frac{\text{Prob}(q|p) \cdot \text{Prob}(p)}{\text{Prob}(q)} \models \text{Bel}(q) = 1$$

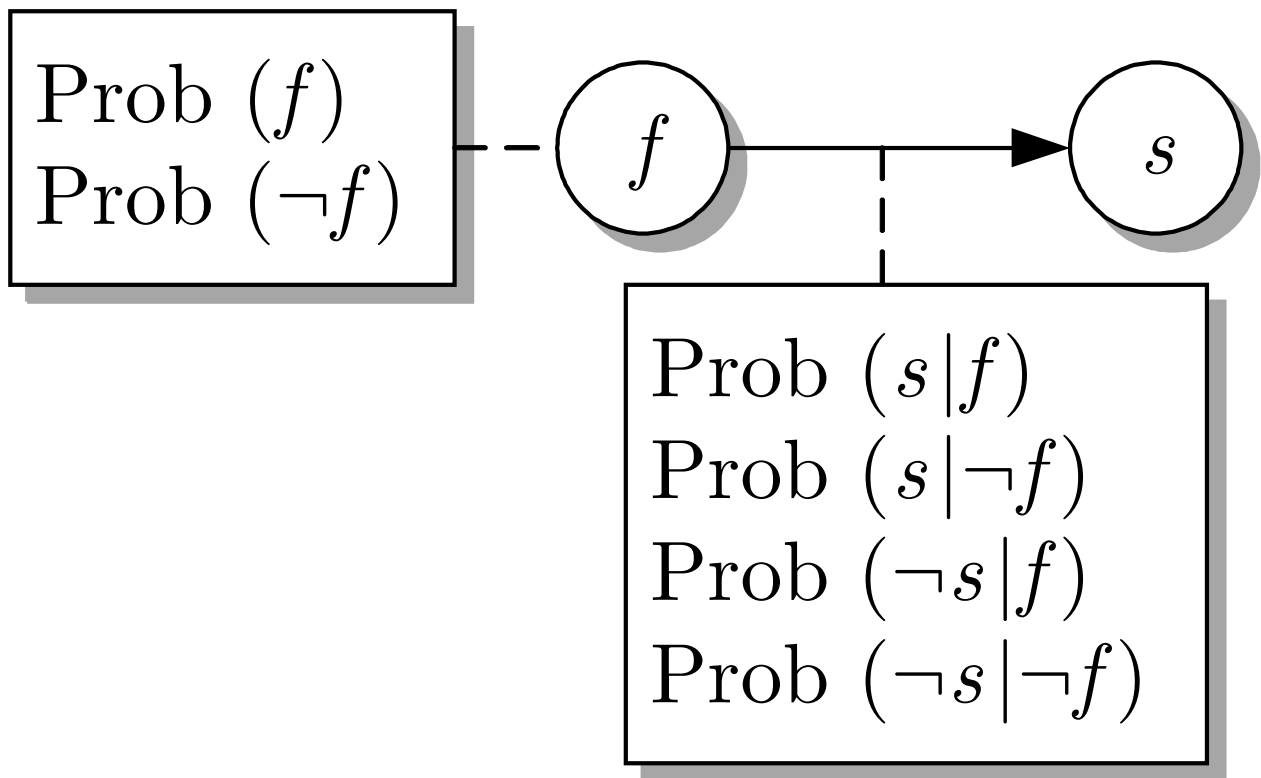
### Abb. 12.5. Bayessche Inferenzregel

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



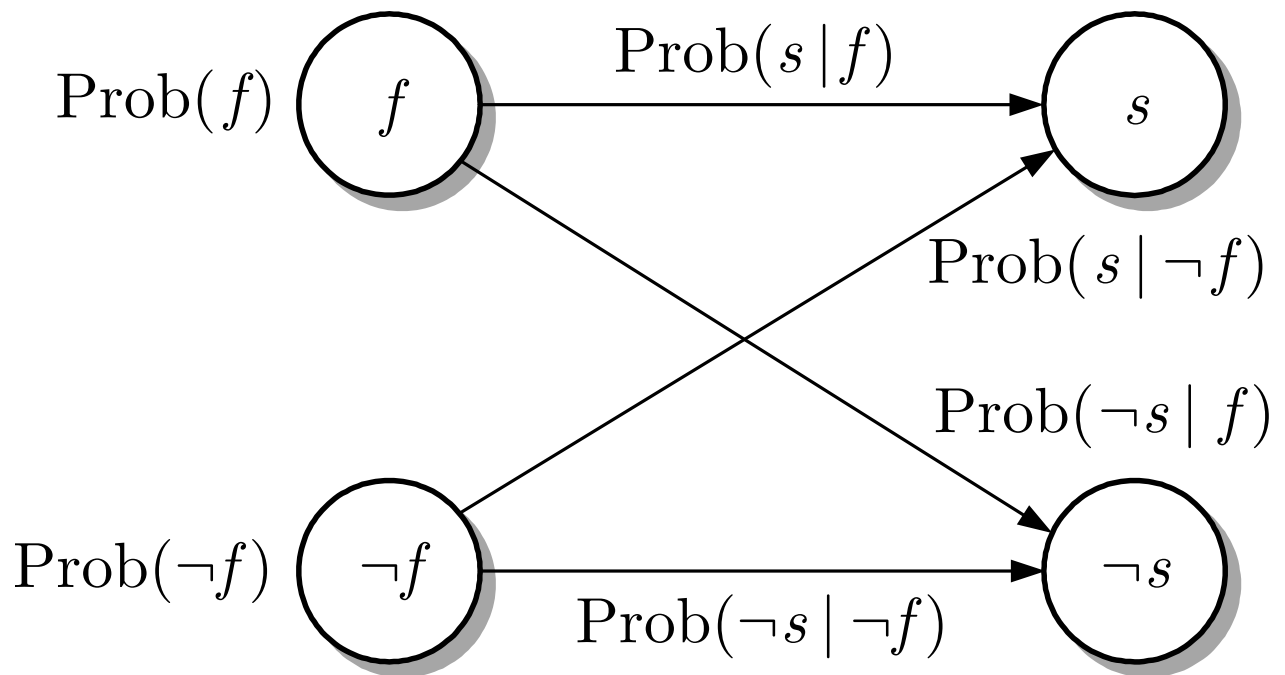


**Abb. 12.6. Modellbasierte Diagnose mit probabilistischer Logik**



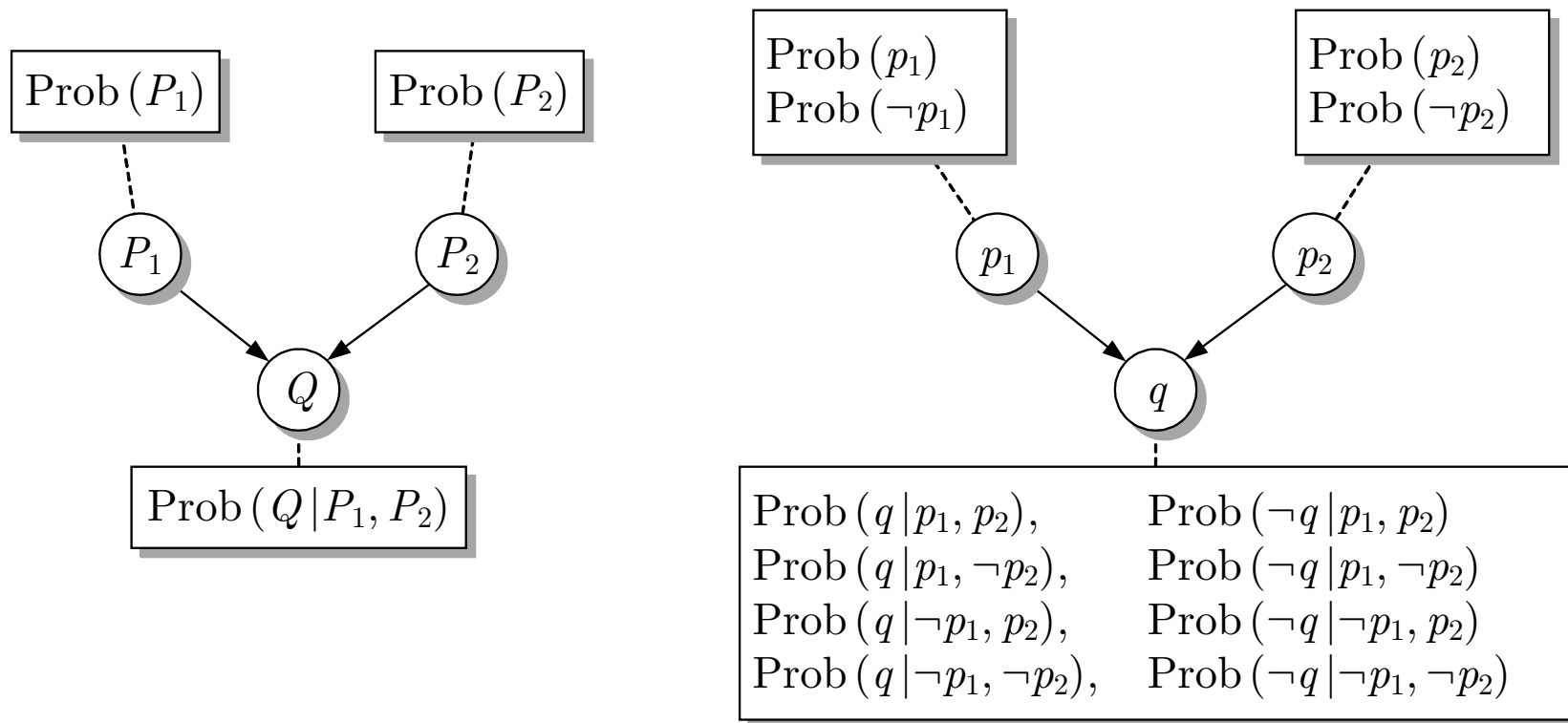
**Abb. 12.7: Kausale Beschreibung der Wirkung eines Fehlers**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



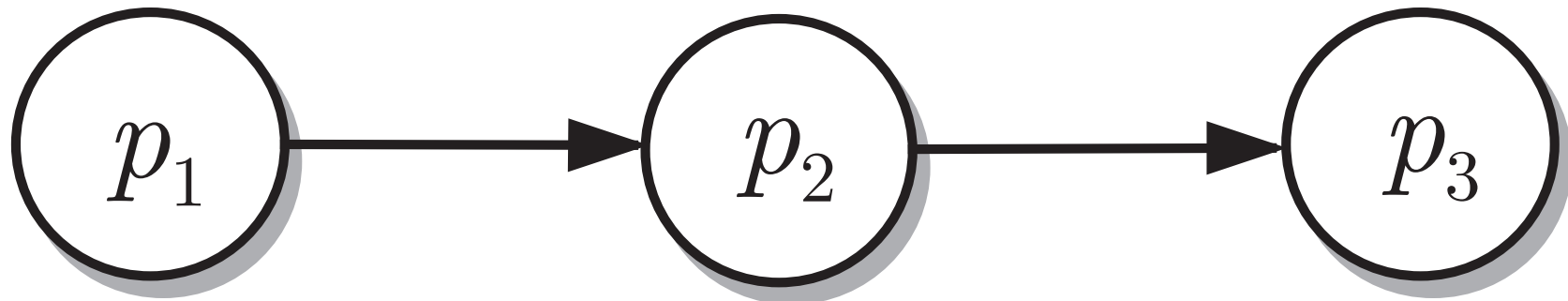
**Abb. 12.8: Lösung einer Diagnoseaufgabe mit der bayesschen Inferenzregel (12.20)**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



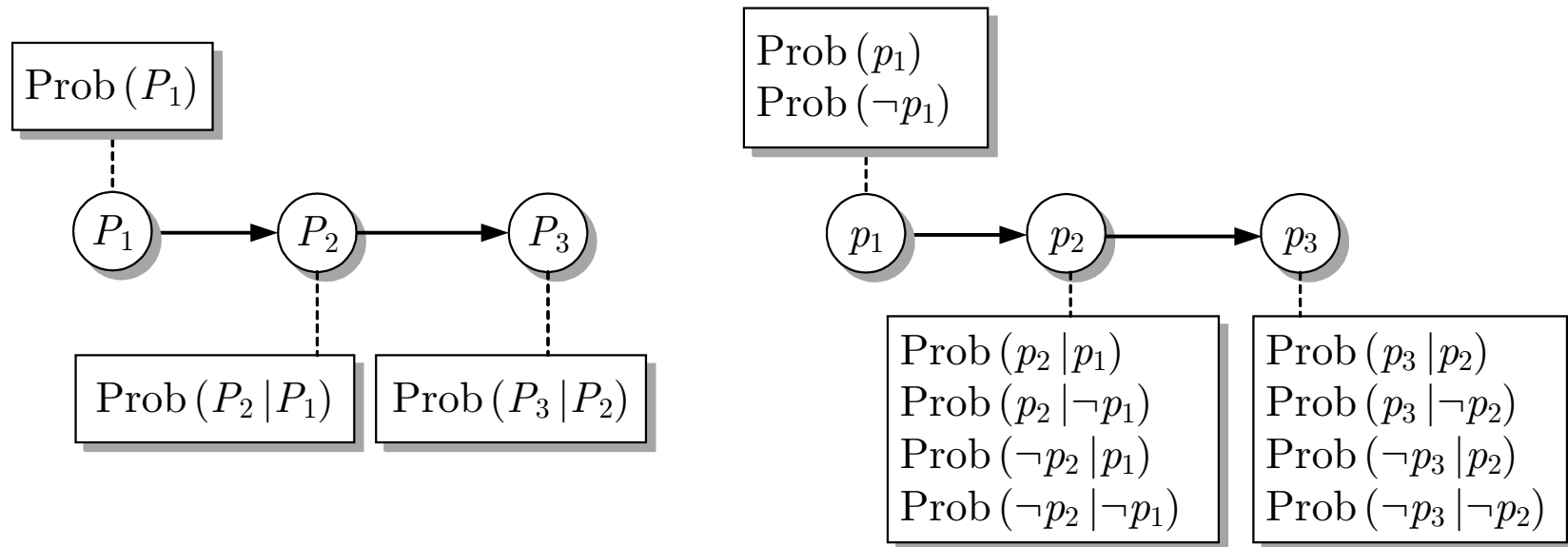
**Abb. 12.9. Beispiel für ein einfaches Bayesnetz**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



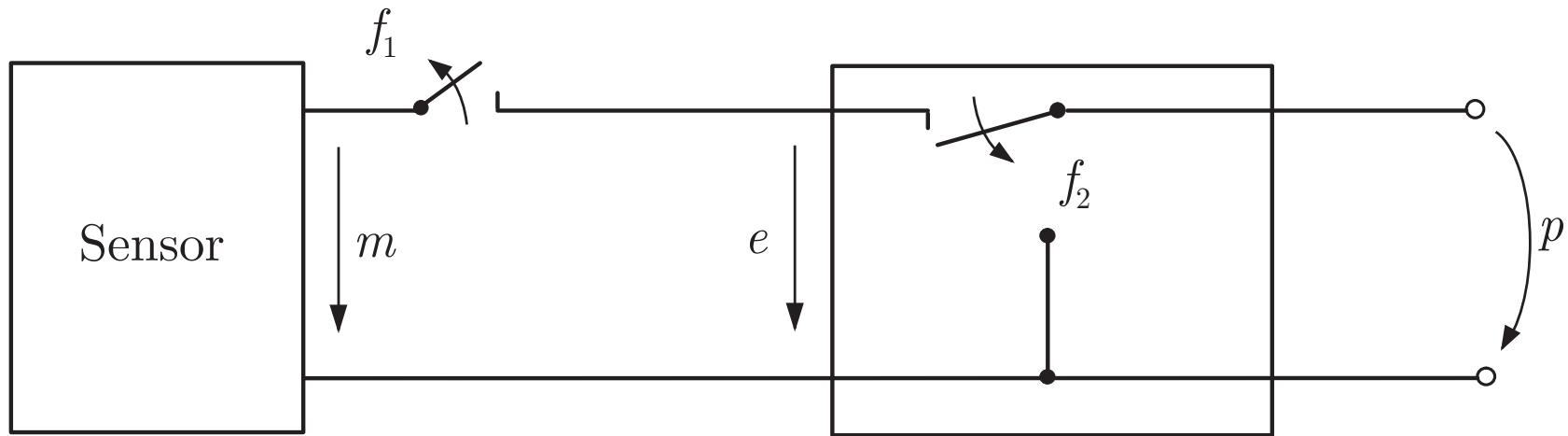
**Abb. 12.10. Bedingt unabhängige Ereignisse**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



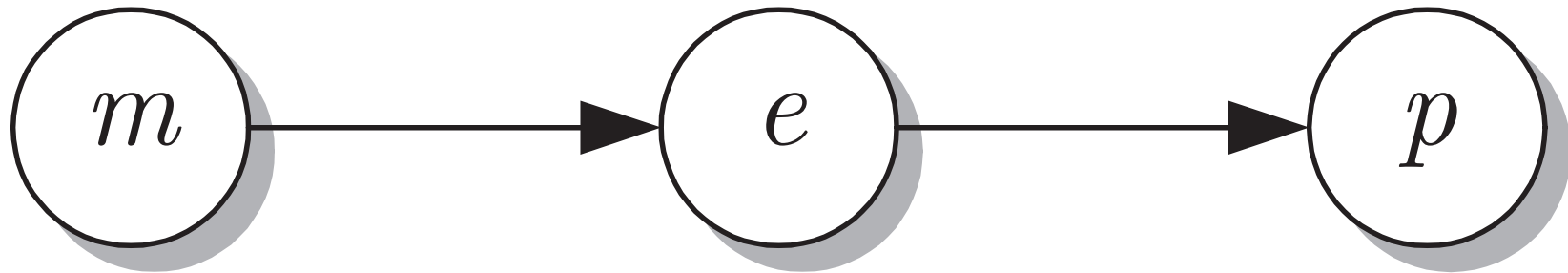
**Abb. 12.11. Informationen über bedingt unabhängige Ereignisse**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.12. Fehlerquellen in einem Messgerät**

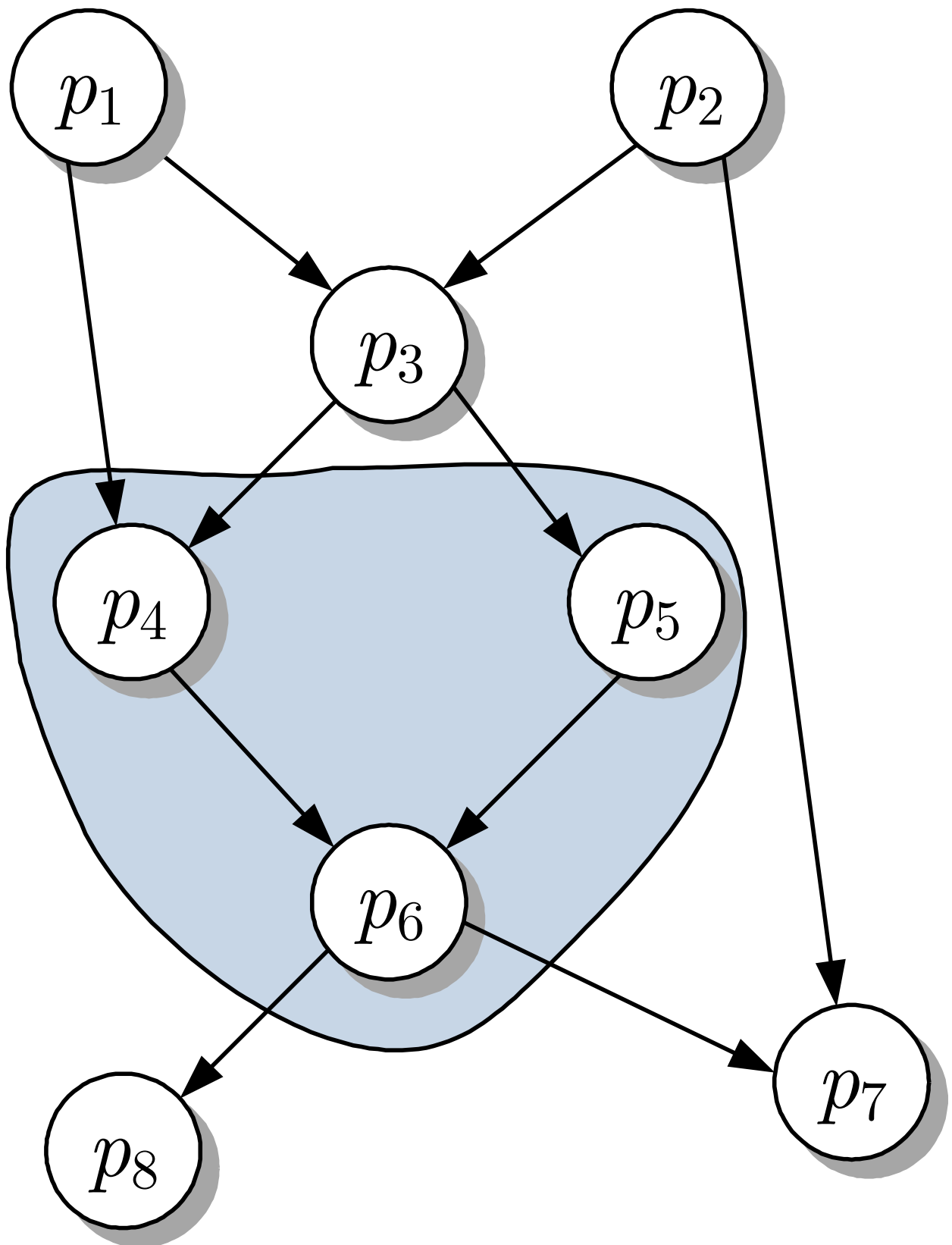
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.13. Bedingt unabhängige Ereignisse für das Messgerät**

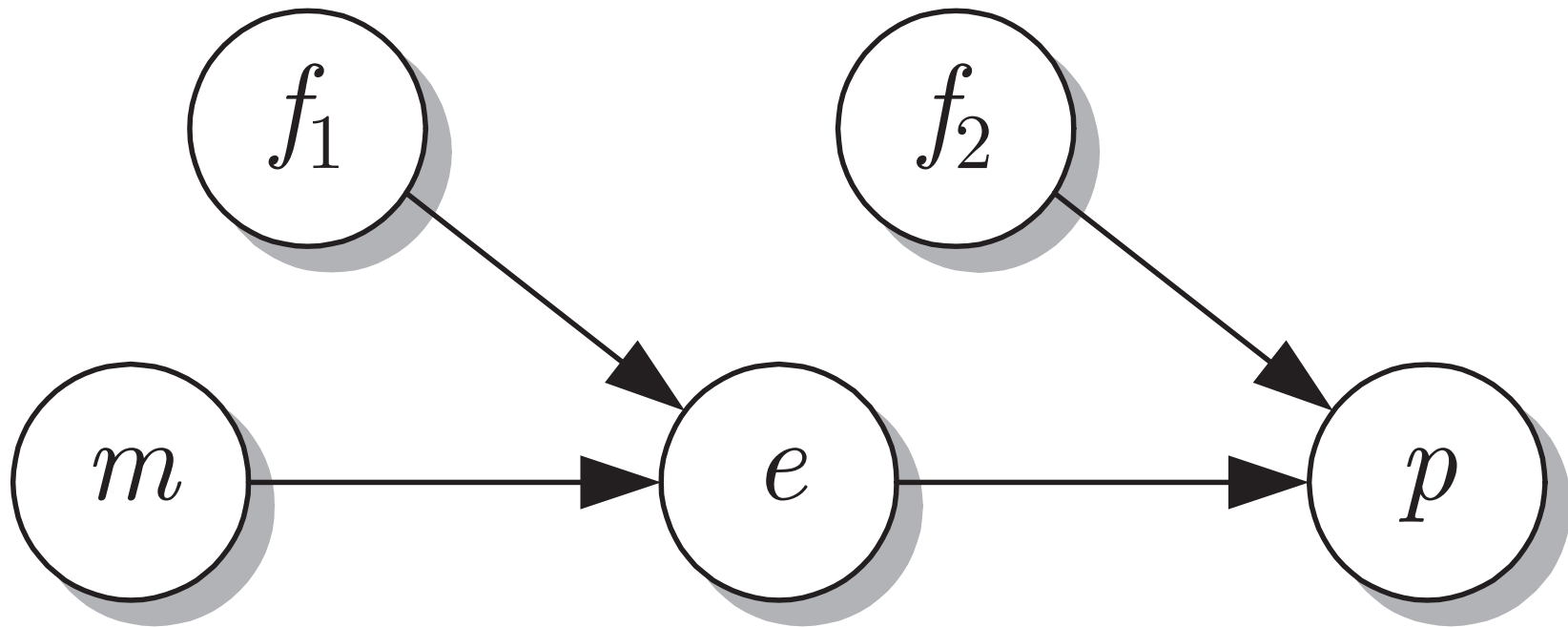
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





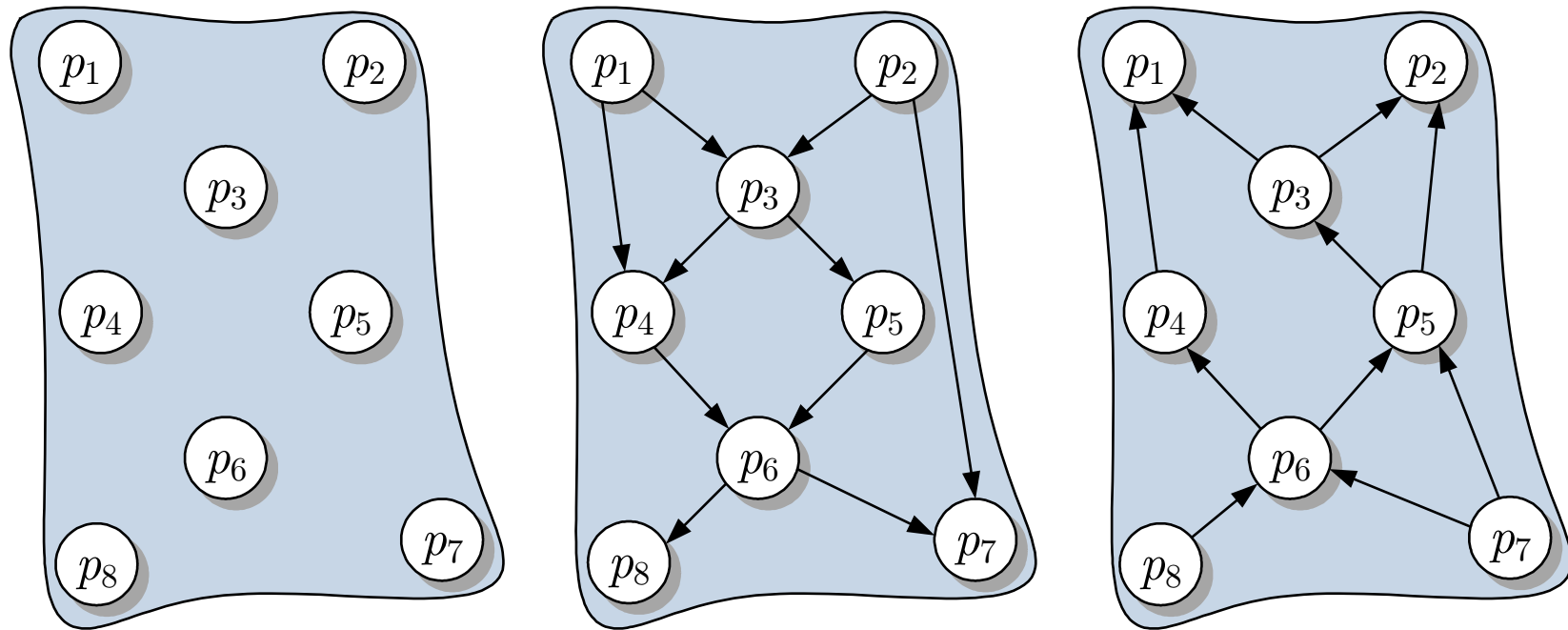
**Abb. 12.14: Bayesnetz**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



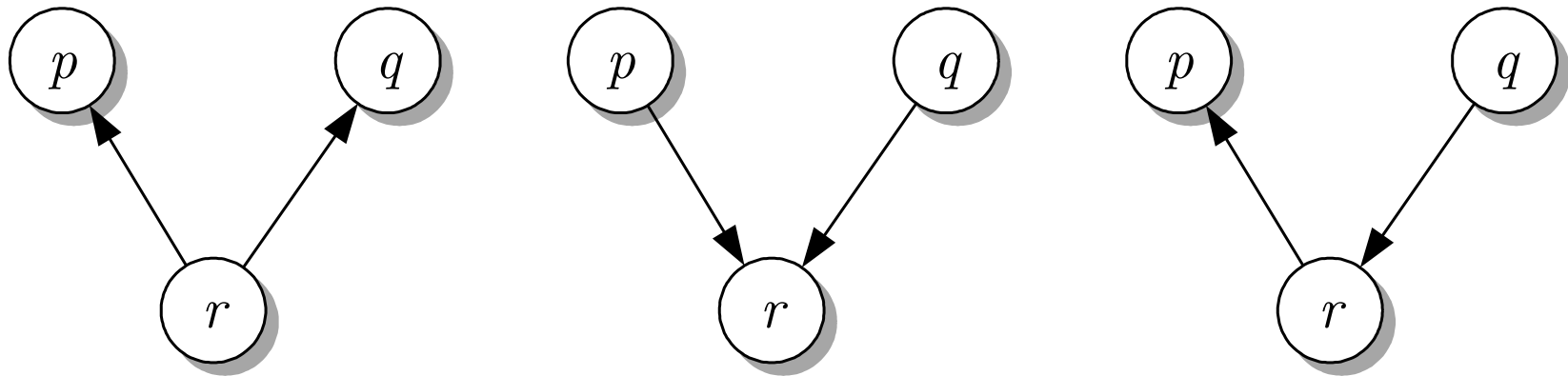
**Abb. 12.15. Bayesnetz für das Messgerät**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



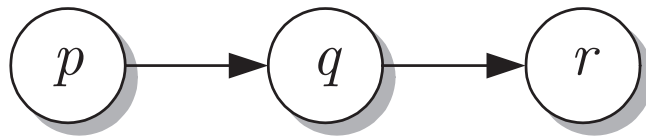
**Abb. 12.16. Unterschiedliche Darstellungsweisen der Verbundwahrscheinlichkeitsverteilung  $\text{Prob}(p_1, p_2, \dots, p_8)$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

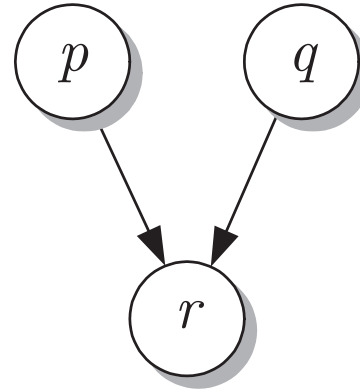


**Abb. 12.17. Mehrdeutigkeit der Bayesnetze**

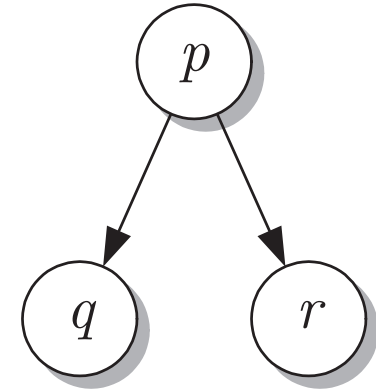
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



kausale Kette



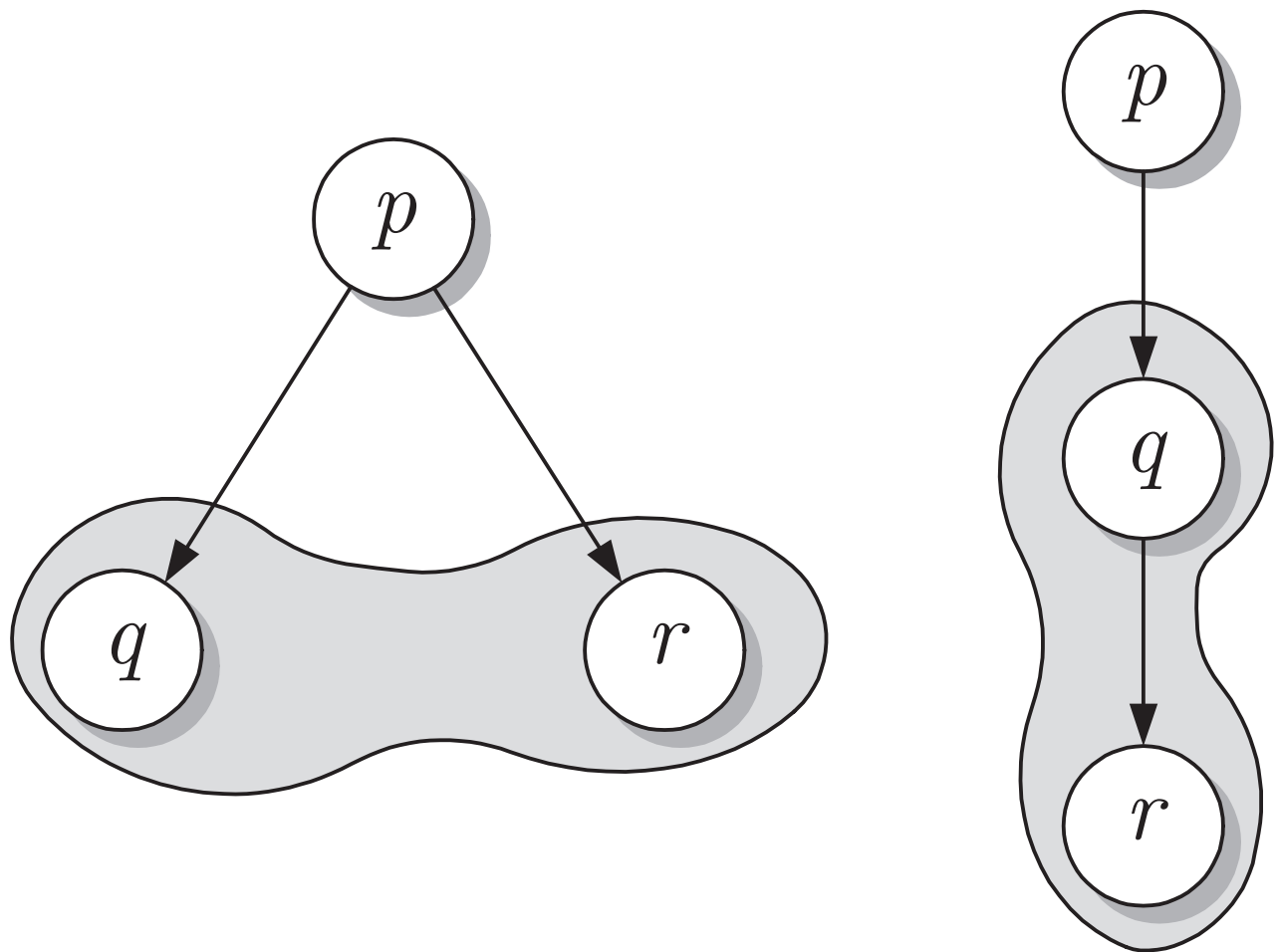
gemeinsame  
Ursachen



gemeinsame  
Wirkungen

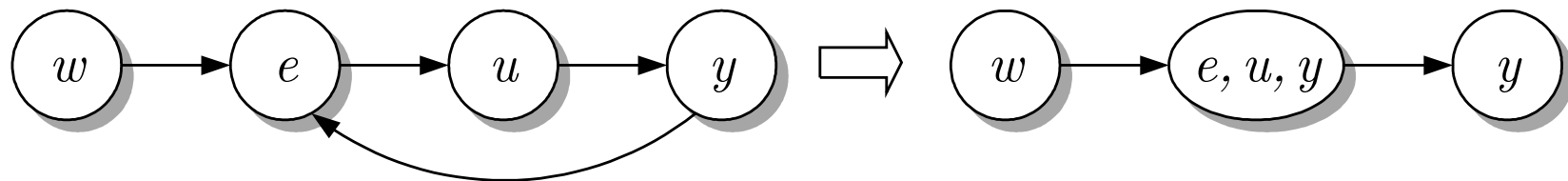
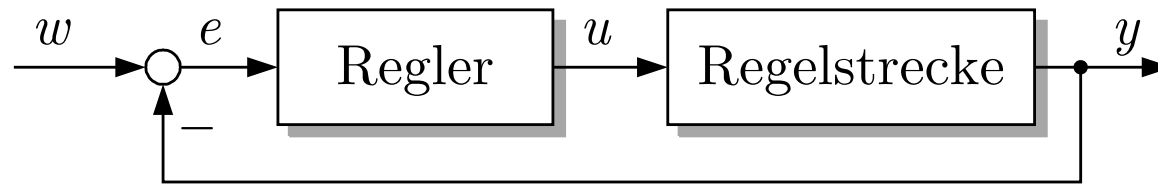
**Abb. 12.18. Typische Elemente eines Bayesnetzes**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.19: Korrelation und Kausalität**

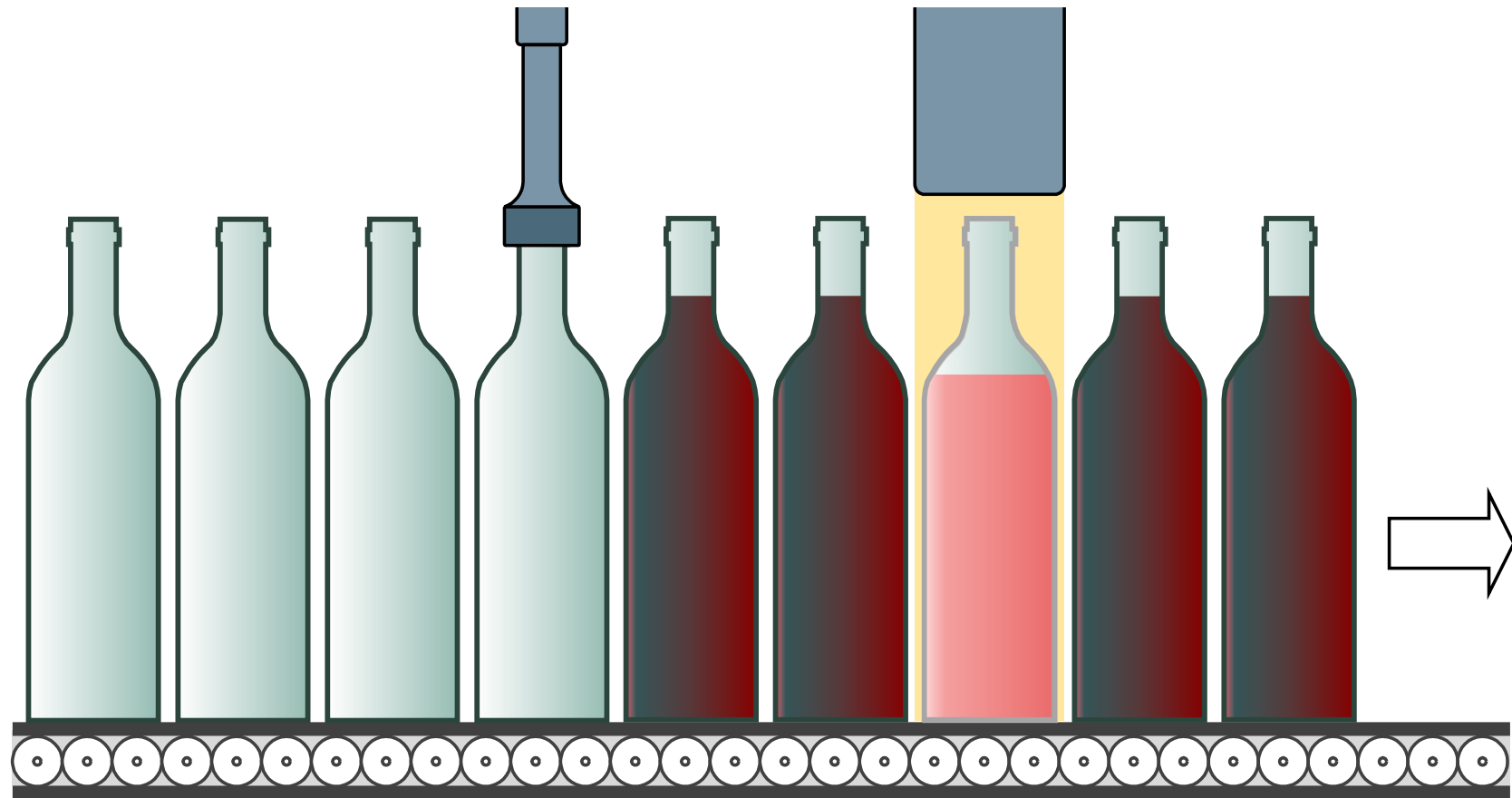
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.20. Regelkreis**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

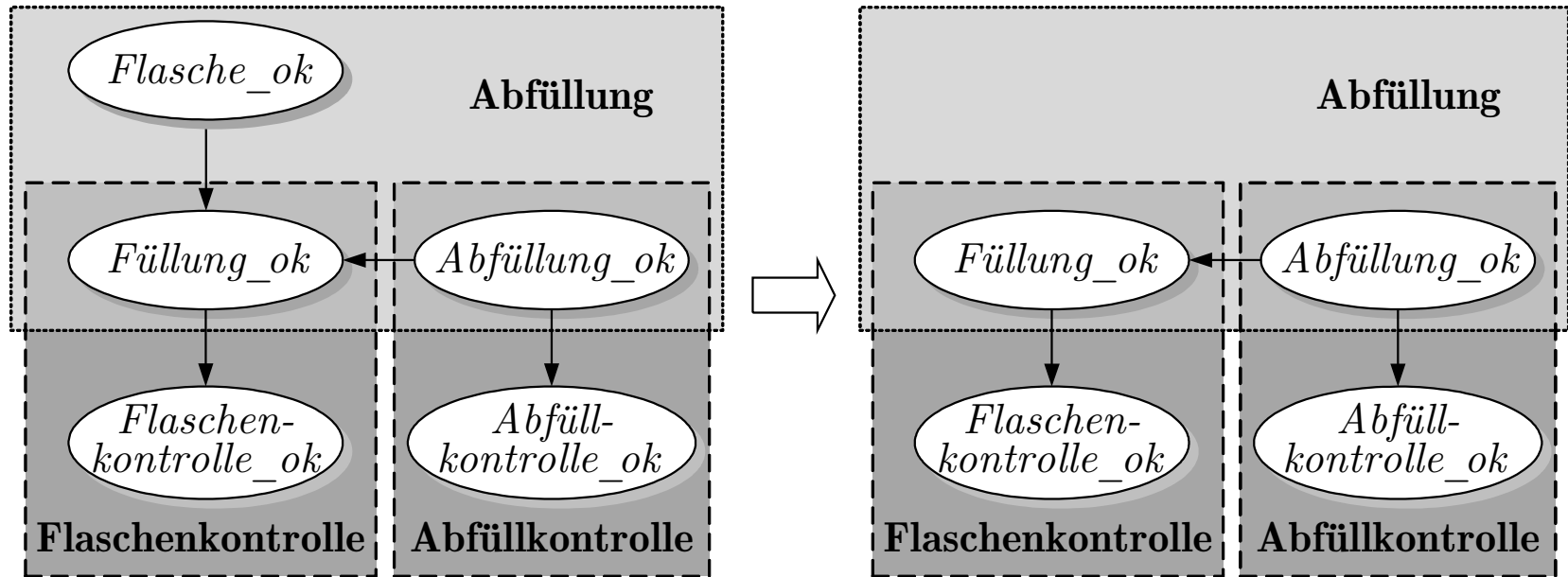
# Abfüllung      Kontrolle



**Abb. 12.21. Flaschenabfüllung**

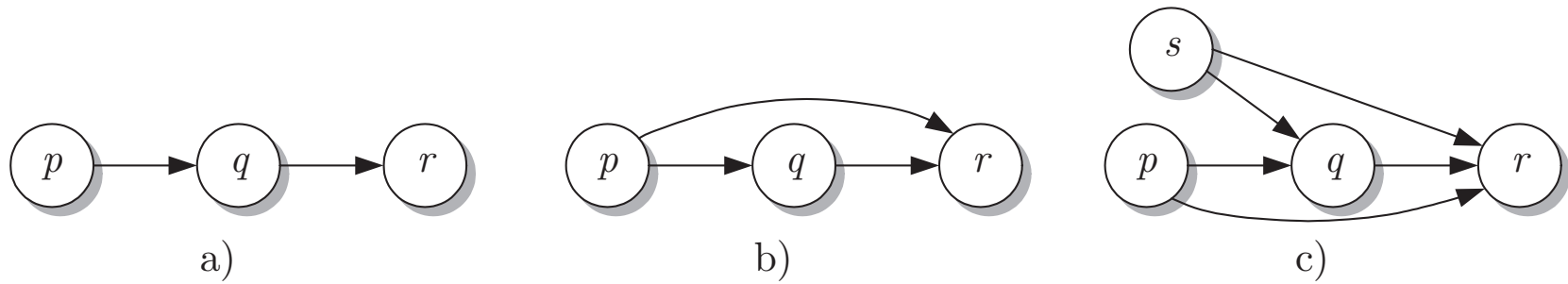
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





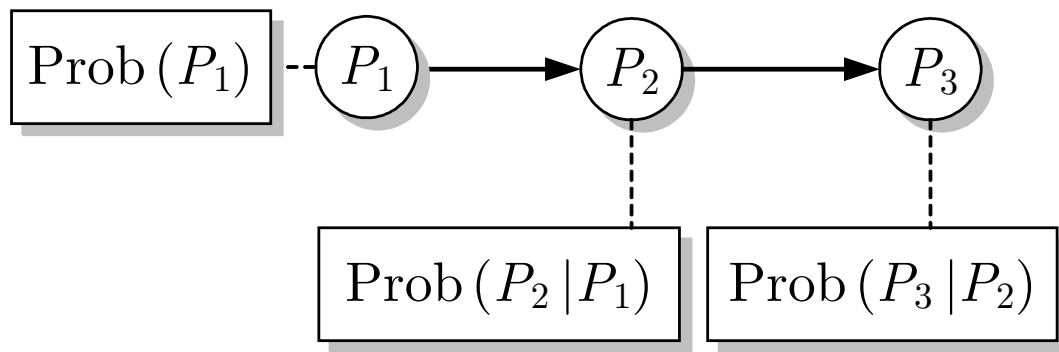
**Abb. 12.22. Bayesnetz für die Flaschenabfüllung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.23. Drei Bayesnetze**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

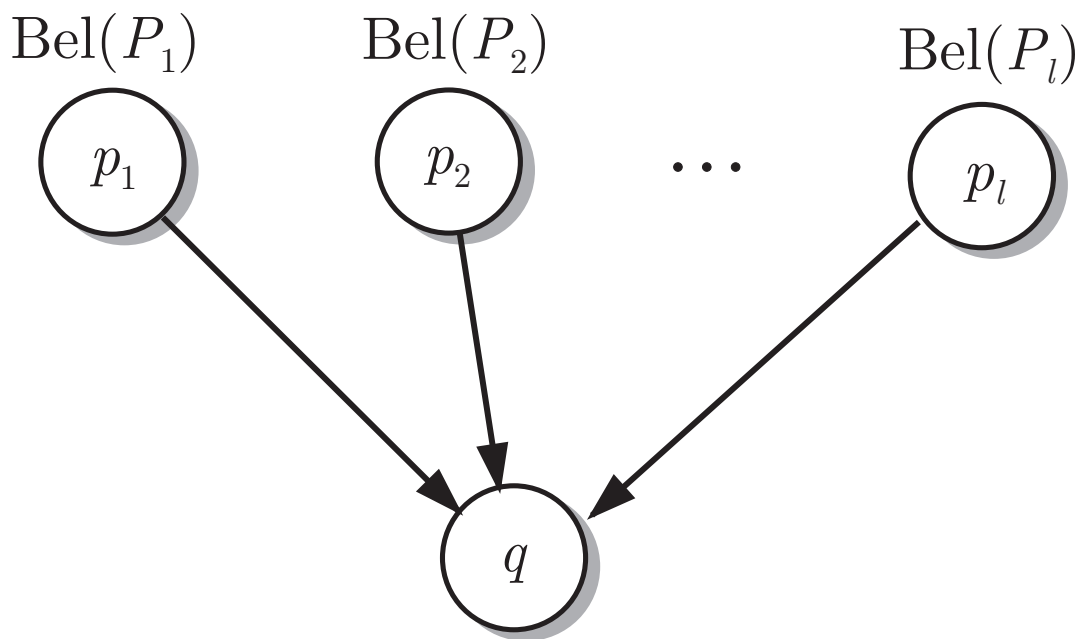


$$\text{Prob}(P_2) = \sum_{P_1} \text{Prob}(P_2 | P_1) \cdot \text{Prob}(P_1)$$

$$\text{Prob}(P_3) = \sum_{P_2} \text{Prob}(P_3 | P_2) \cdot \text{Prob}(P_2)$$

**Abb. 12.24: Schrittweise Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilung  $\text{Prob}(P_3)$**

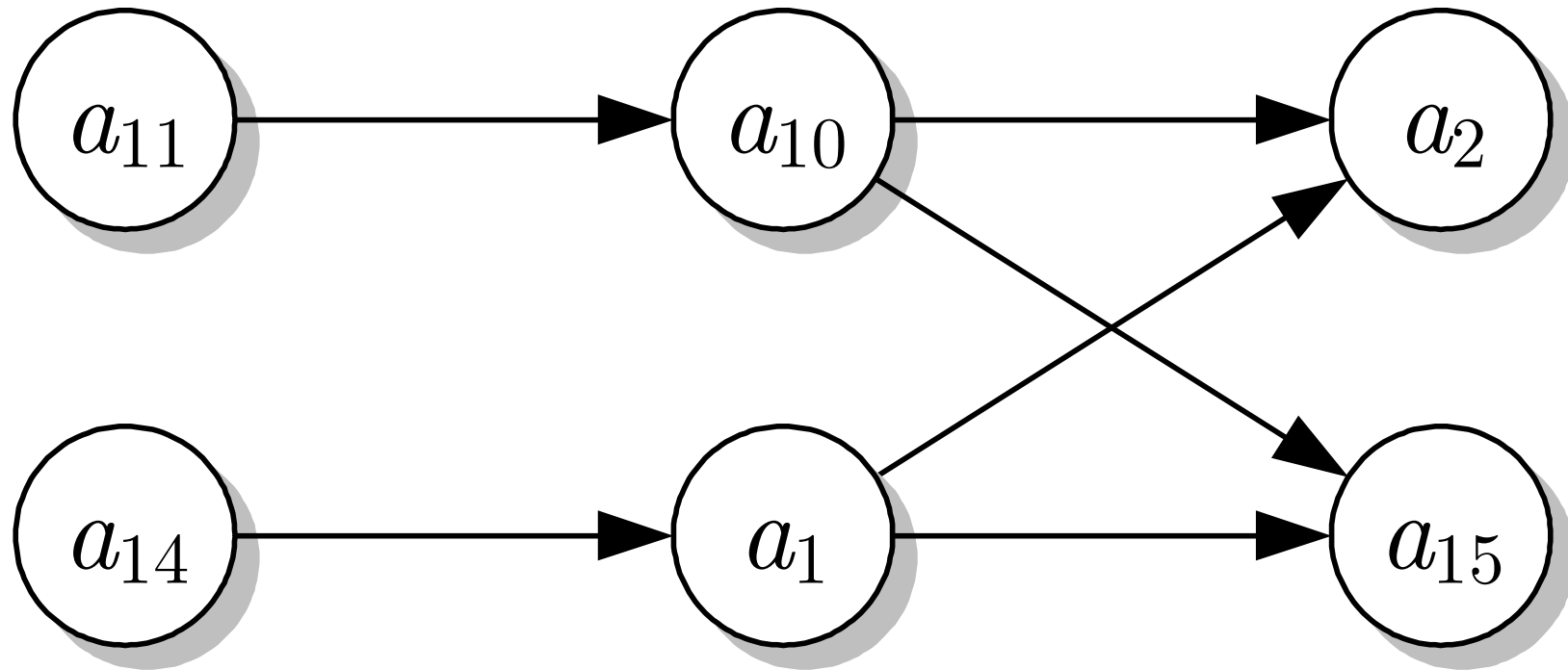
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



$$\text{Bel}(Q) = \sum_{P_1, \dots, P_l} \text{Prob}(Q | P_1, \dots, P_l) \cdot \text{Bel}(P_1) \cdot \dots \cdot \text{Bel}(P_l)$$

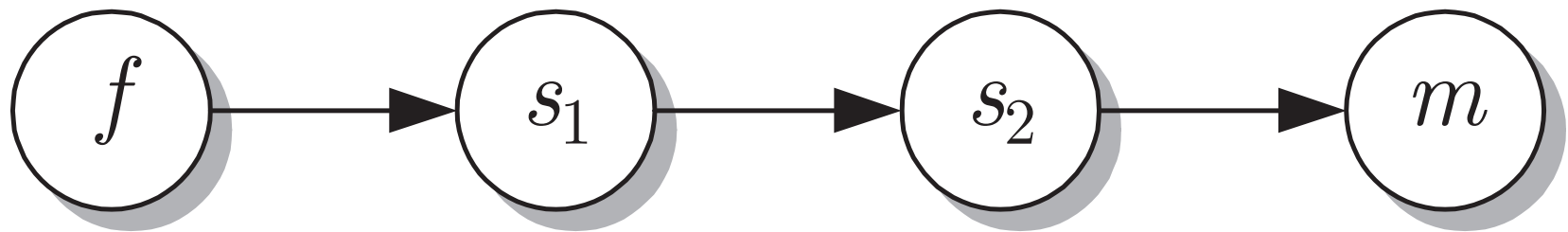
**Abb. 12.25: Veranschaulichung der Abtrennregel für Bayesnetze**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



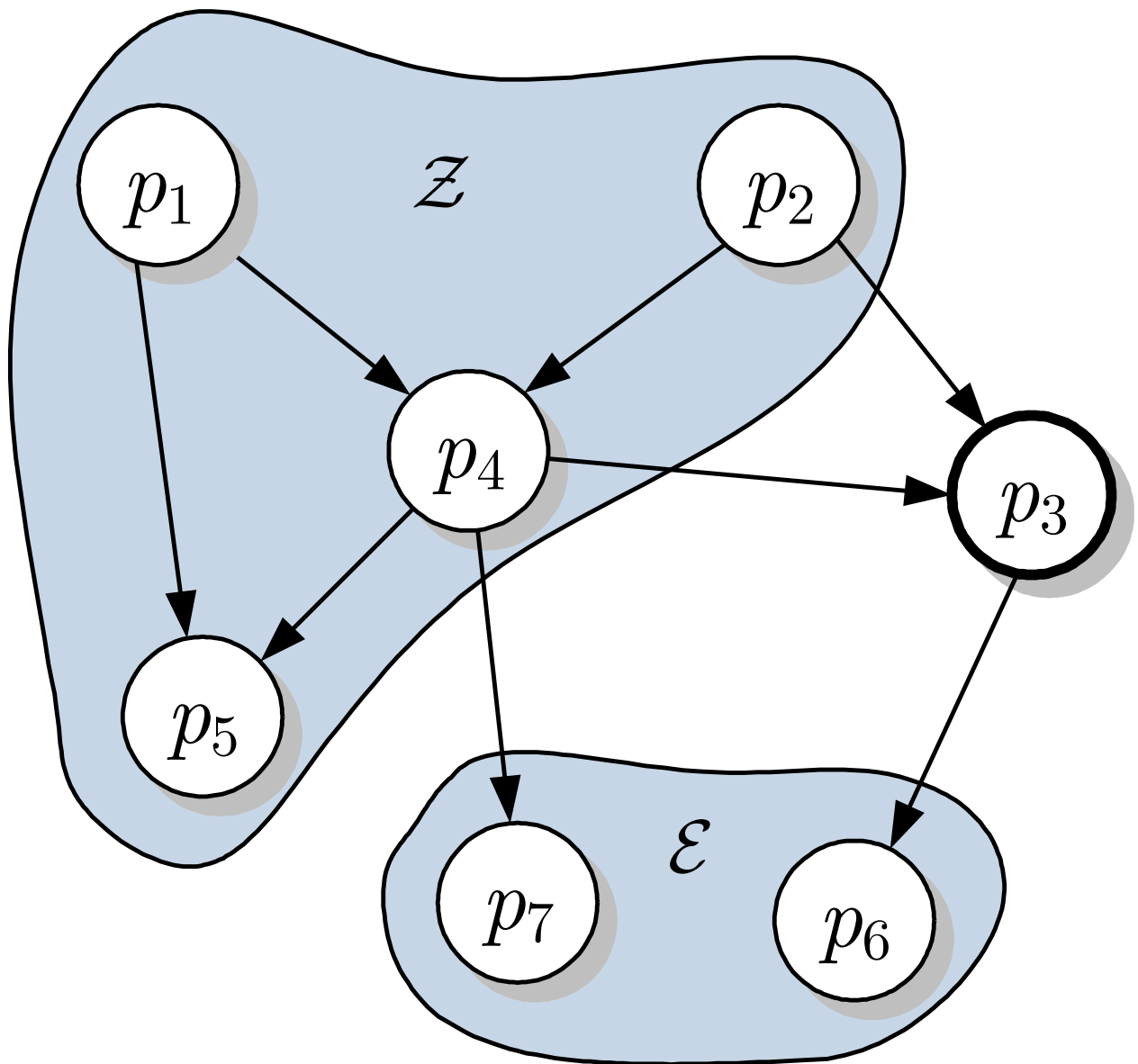
**Abb. 12.26. Bayesnetz für das Wasserversorgungssystem**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



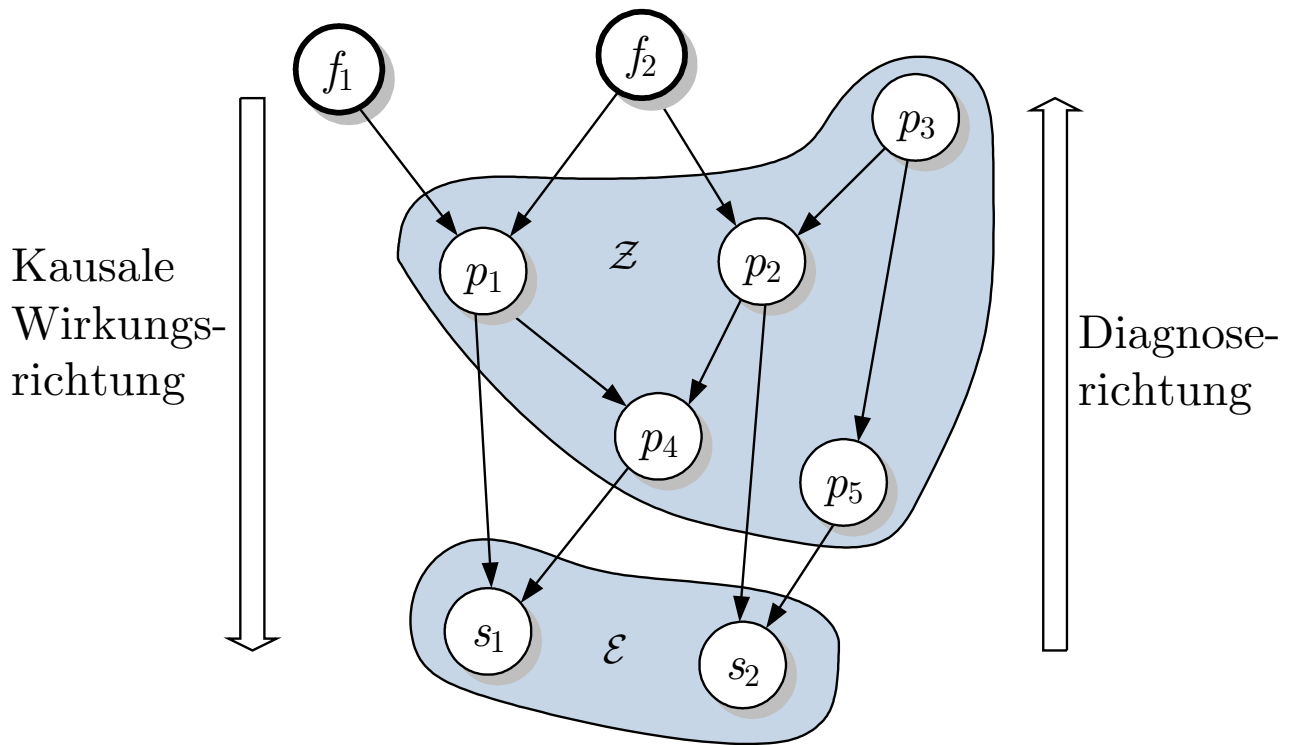
**Abb. 12.27. Bayesnetz für die Analyse des Dieselmotors**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.28: Typische Aufgabenstellung, die mit Bayesianetzen gelöst wird**

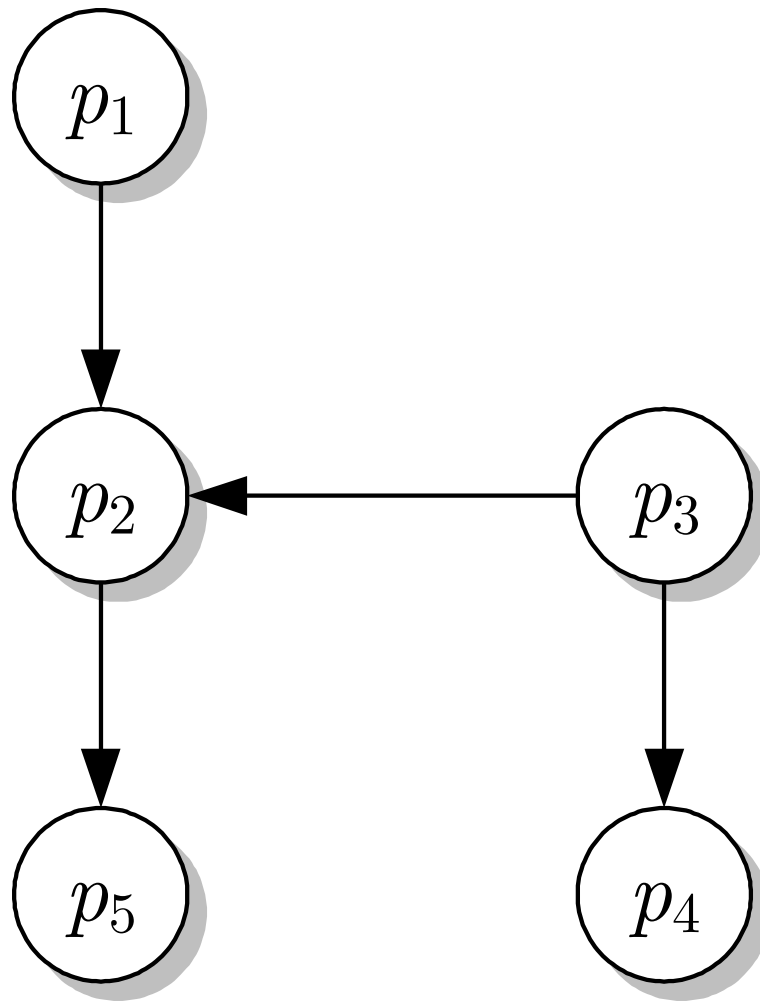
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.29: Diagnose mit kausalem Modell**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

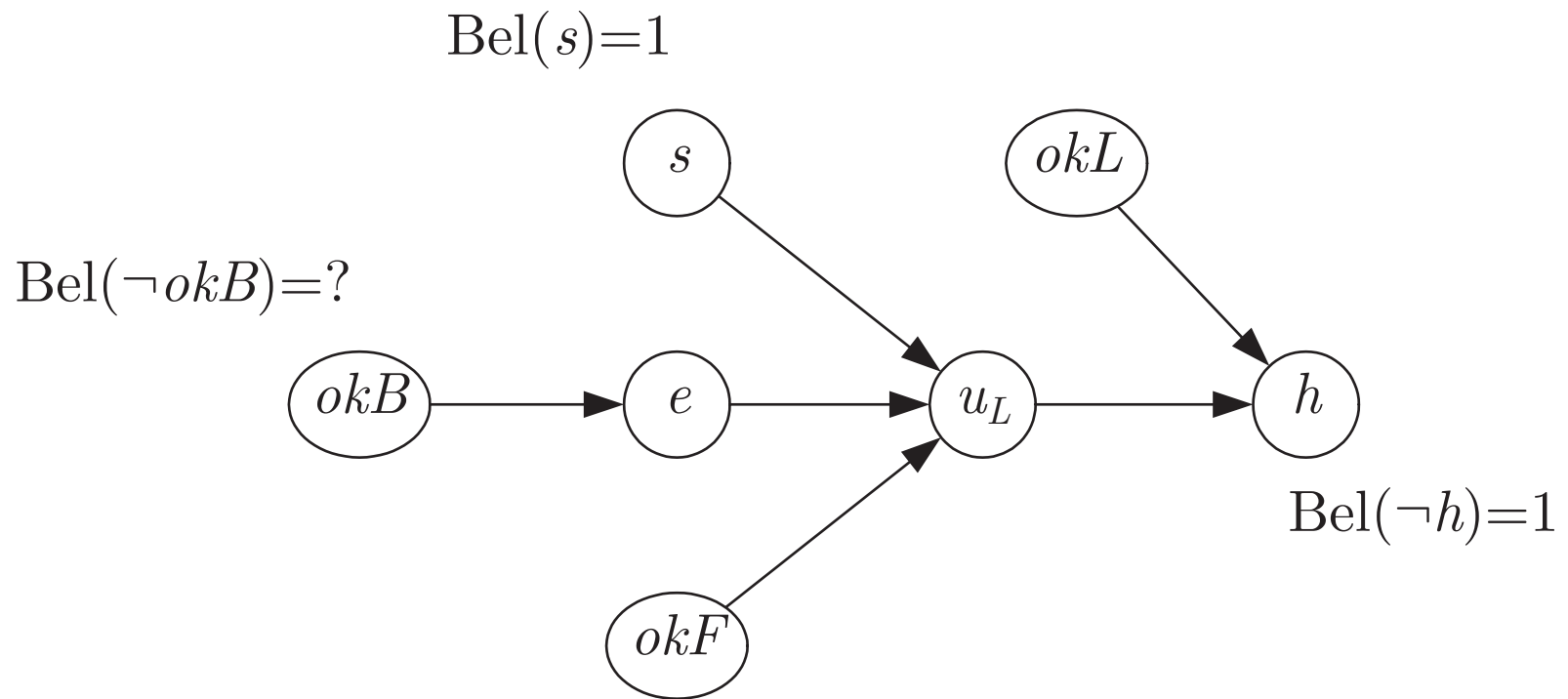




$$\text{Bel}(P_5 = \text{F}) = 1 \quad \text{Bel}(P_4 = \text{T}) = 1$$

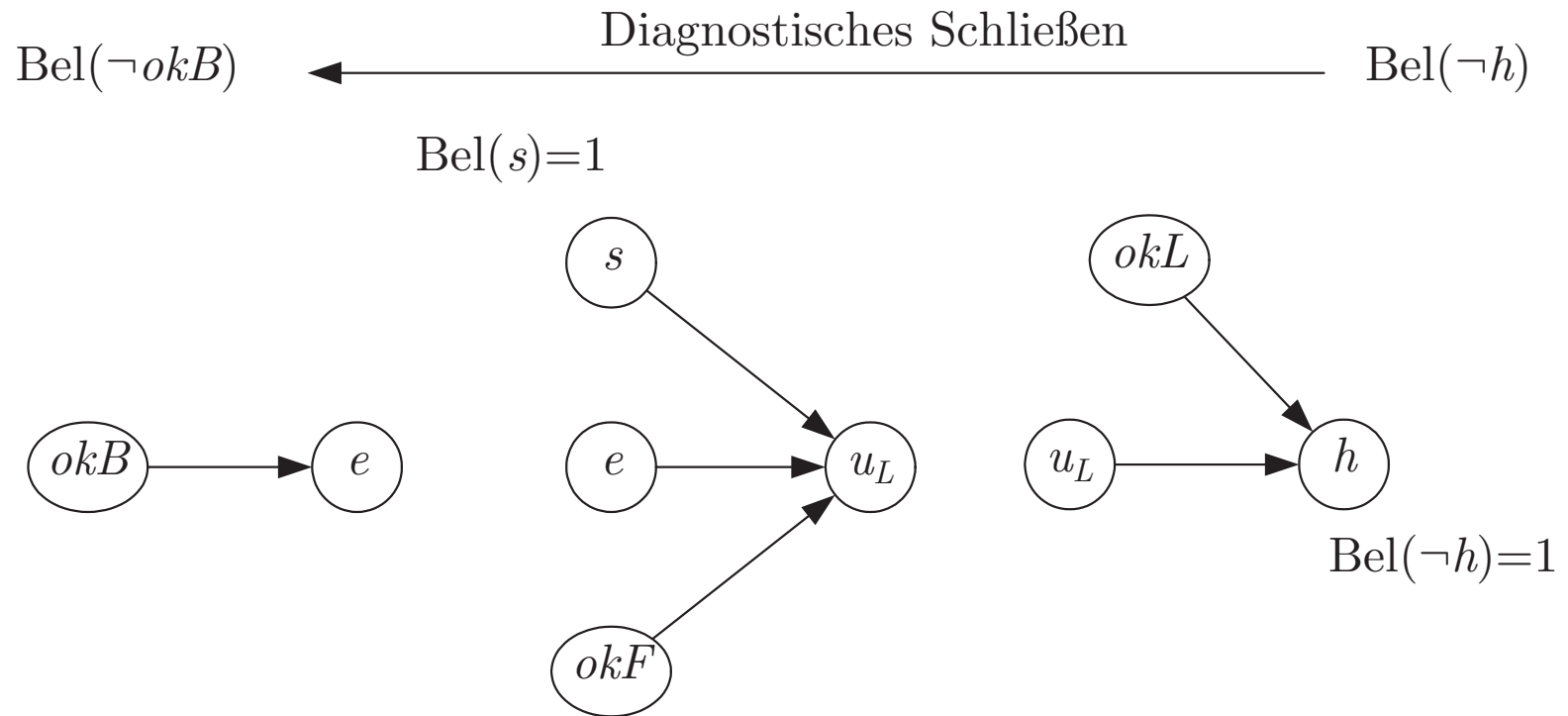
**Abb. 12.30: Bayesnetz der Flaschenabfüllanlage**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



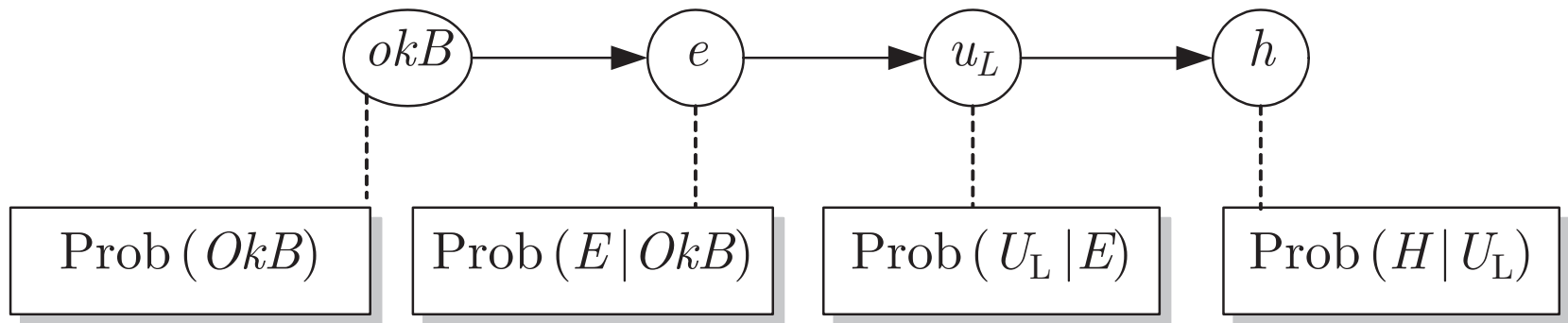
**Abb. 12.31. Diagnoseaufgabe**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



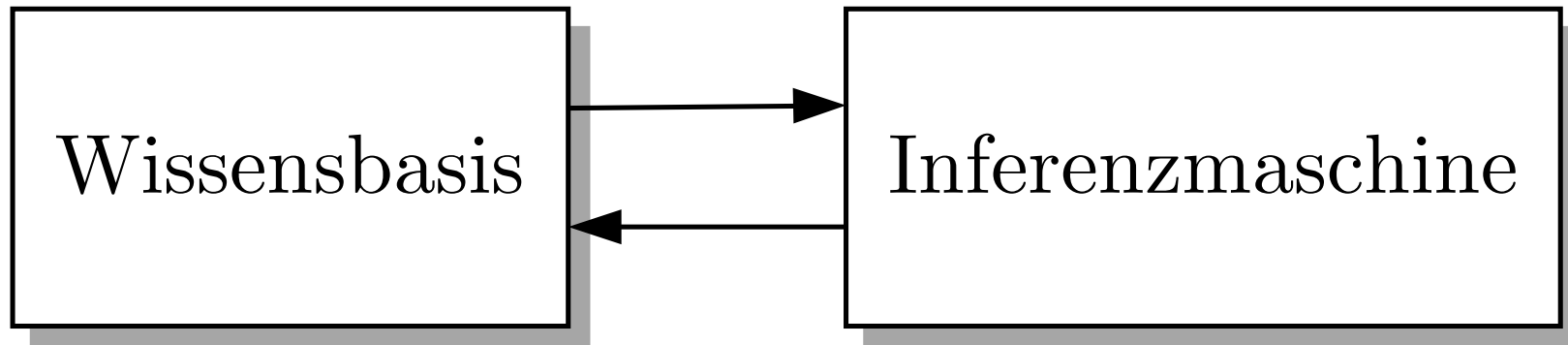
**Abb. 12.32. Schrittweise Lösung der Diagnoseaufgabe**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. 12.33. Vereinfachtes Bayesnetz**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

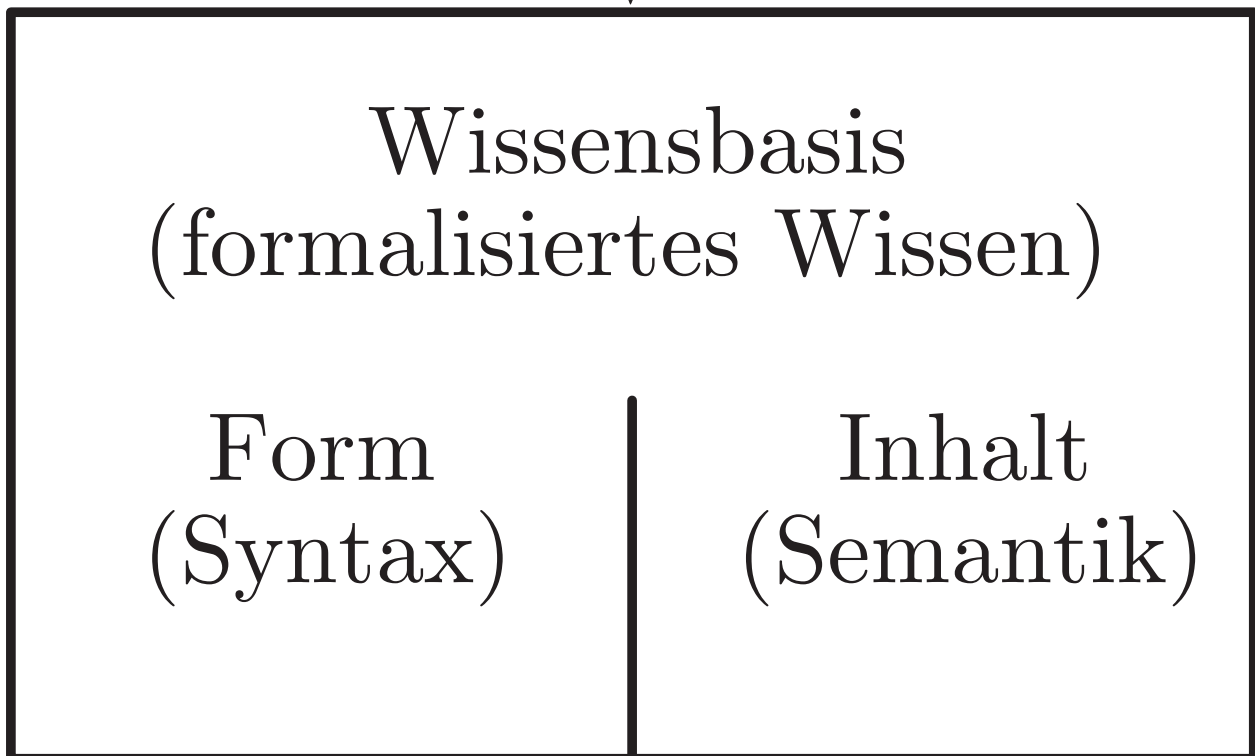


**Abb. 14.1. Trennung von Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

Diskursbereich  
(informelles Wissen)

Modellbildung



**Abb. 14.2: Wissensrepräsentation**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



Beispiel:

logikbasiertes Modell

Resolutionssystem

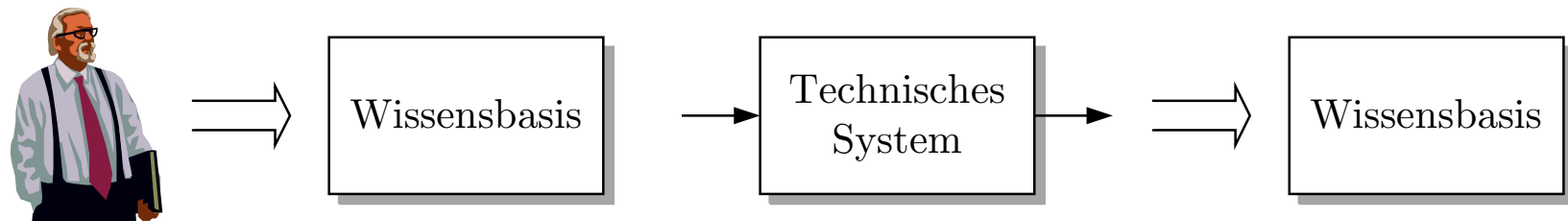
PROLOG

**Abb. 14.3. Vom Wissensrepräsentationsmodell zur Wissensrepräsentationssprache**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*

Phänomenologische Modellbildung

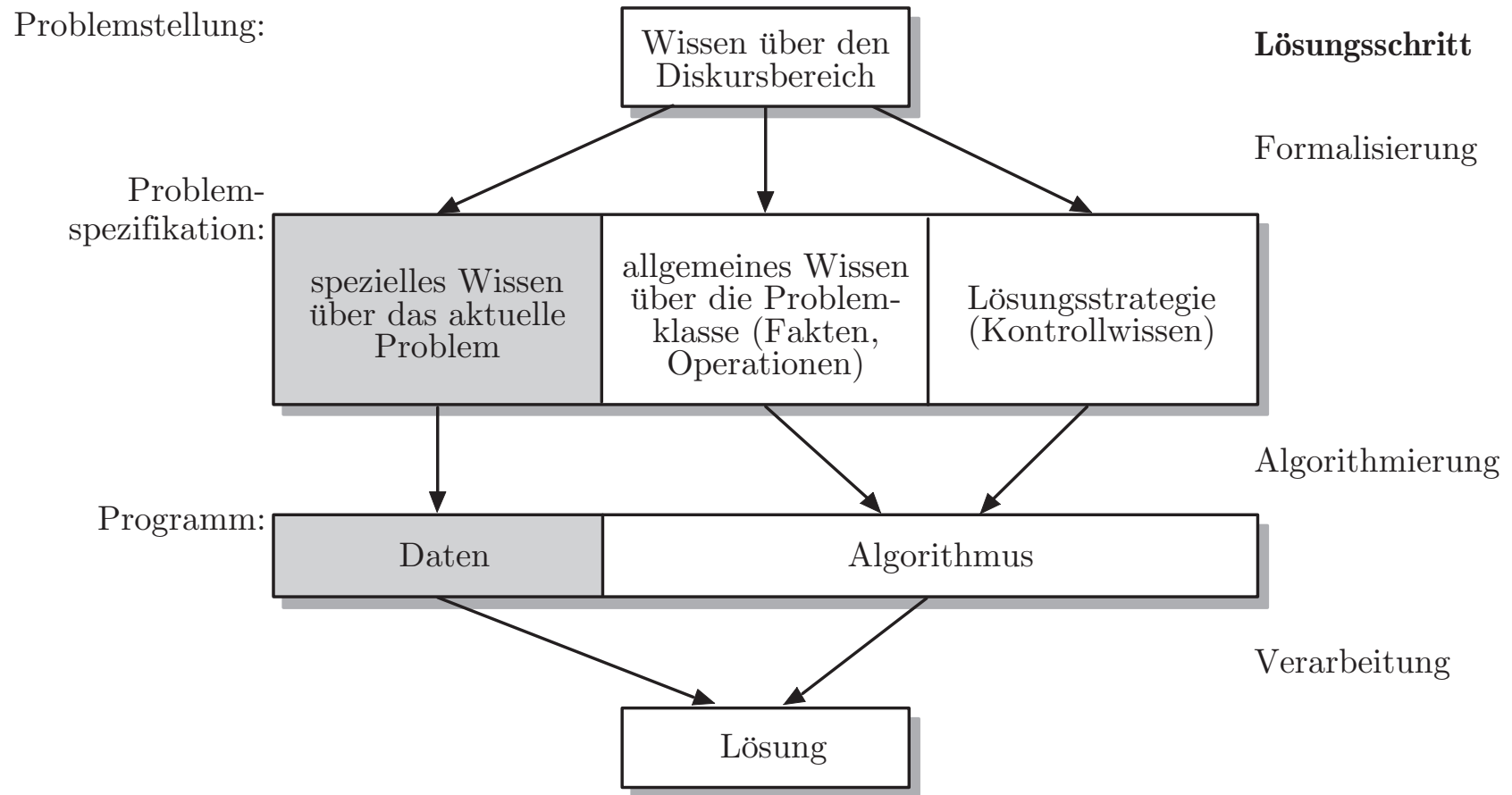
Kausale Modellbildung



**Abb. 14.4. Phänomenologische und kausale Modellbildung**

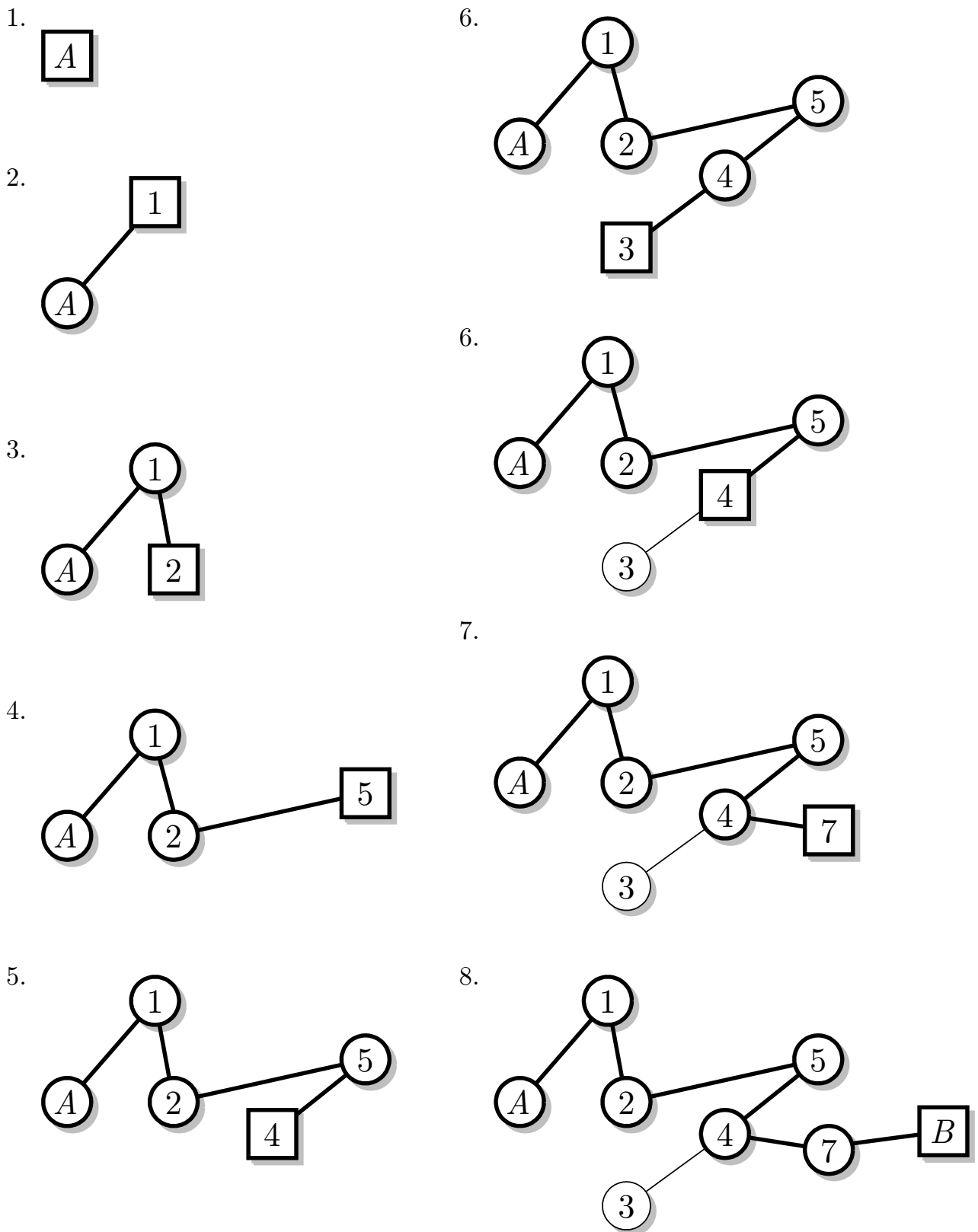
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





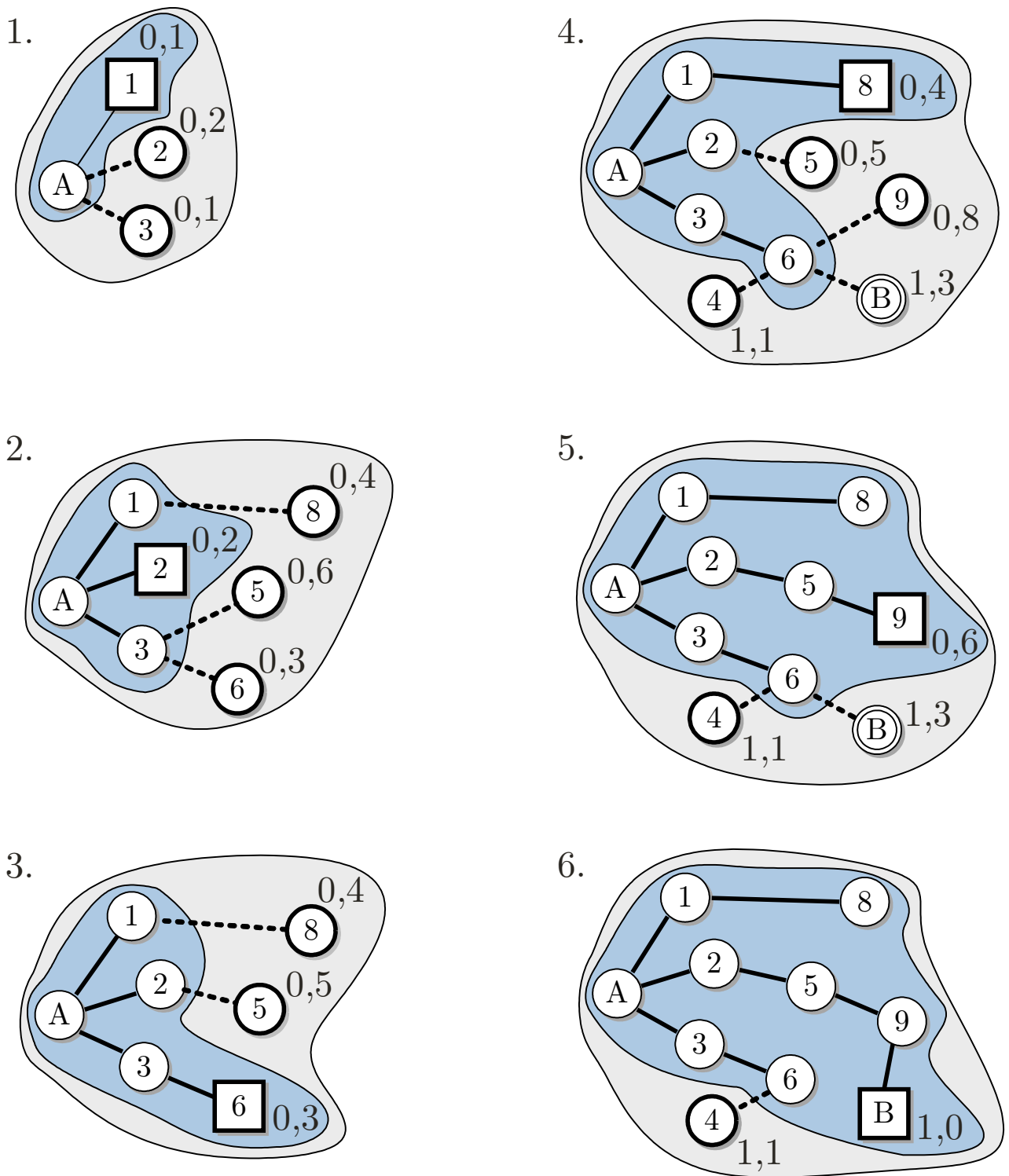
**Abb. 14.5. Bearbeitungsweg einer Problemstellung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



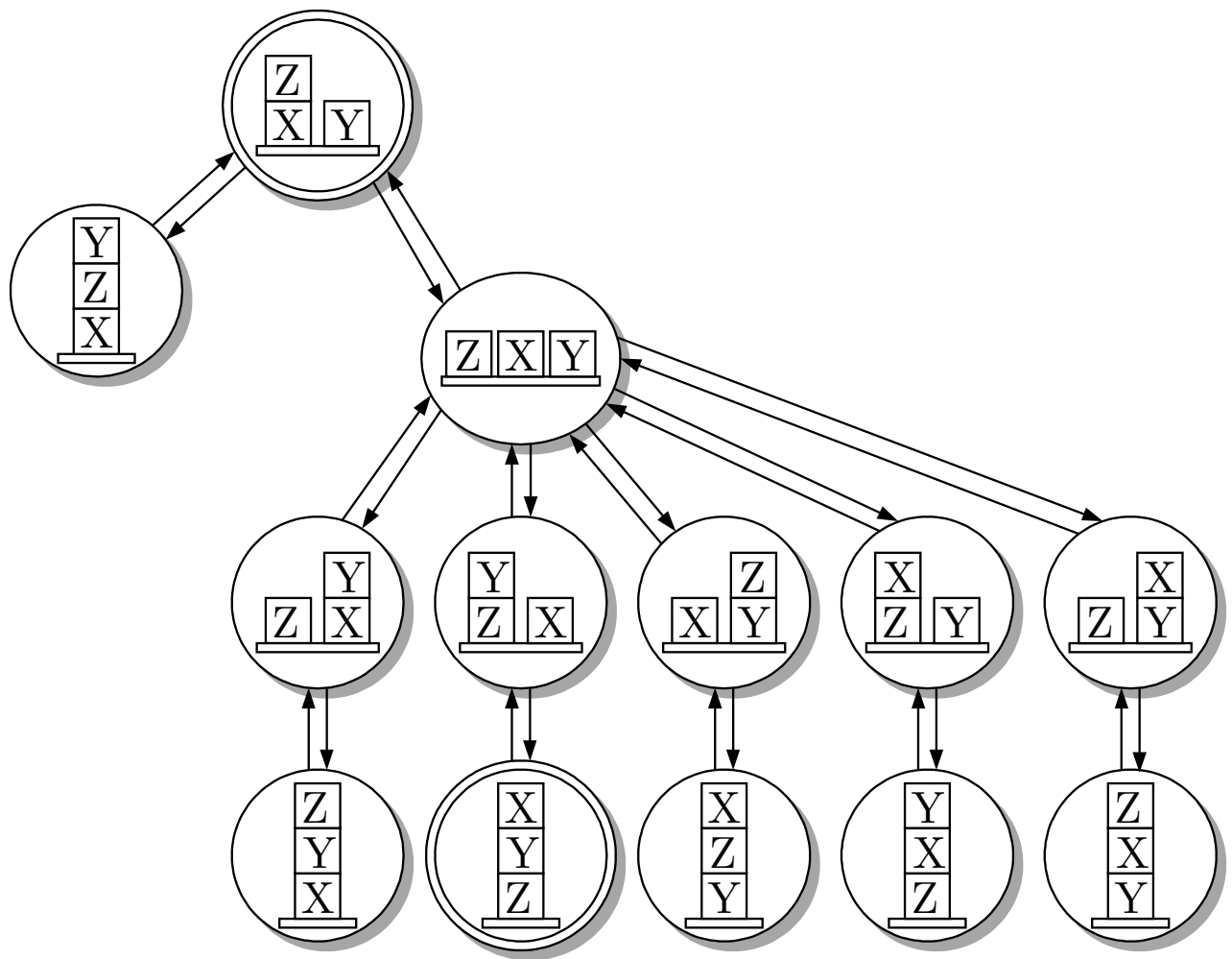
**Abb. A1.1: Zwischenergebnisse der Tiefe-zuerst-Suche**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



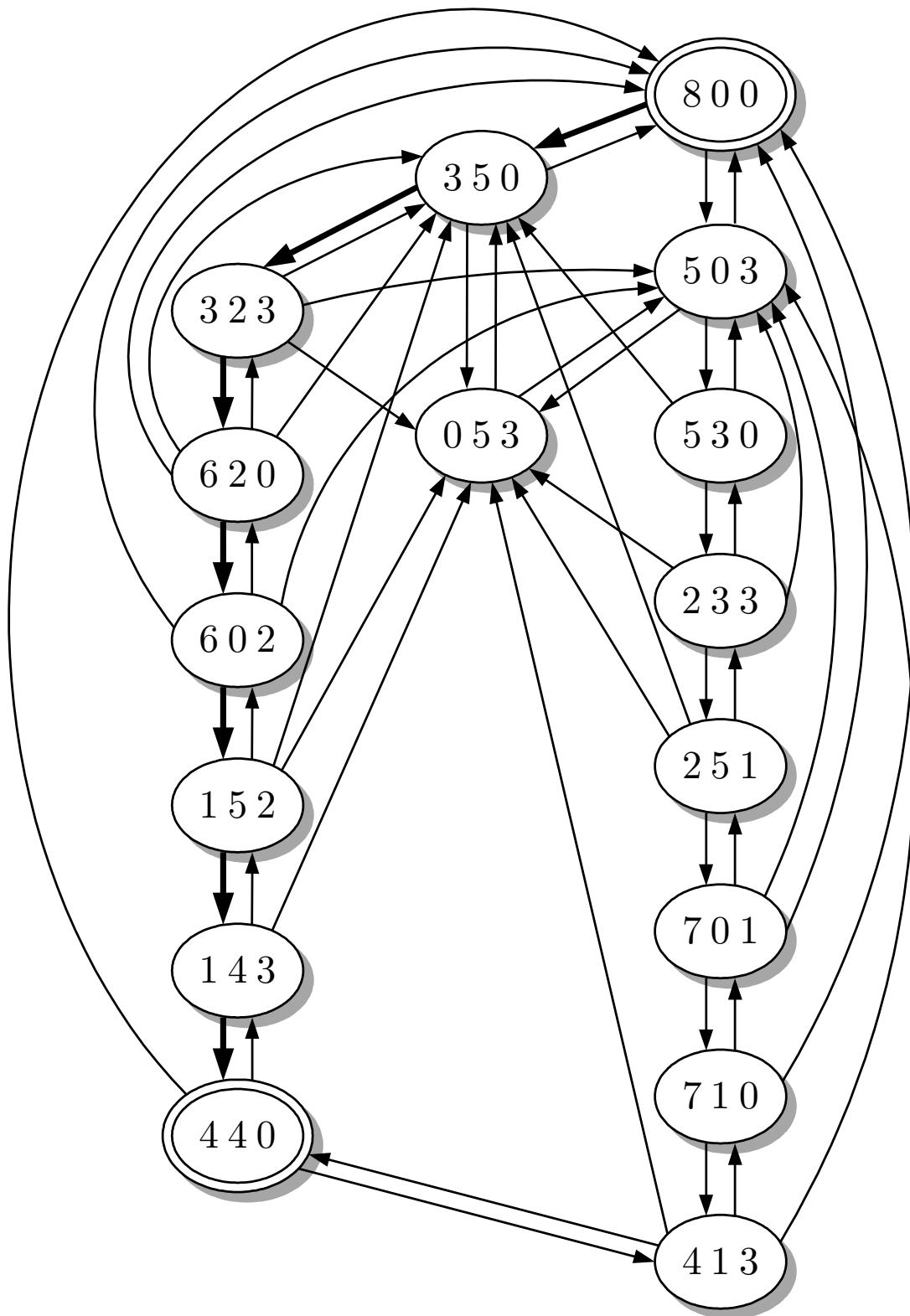
**Abb. A1.2: Bestimmung eines optimalen Pfades mit dem Dijkstra-Algorithmus**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



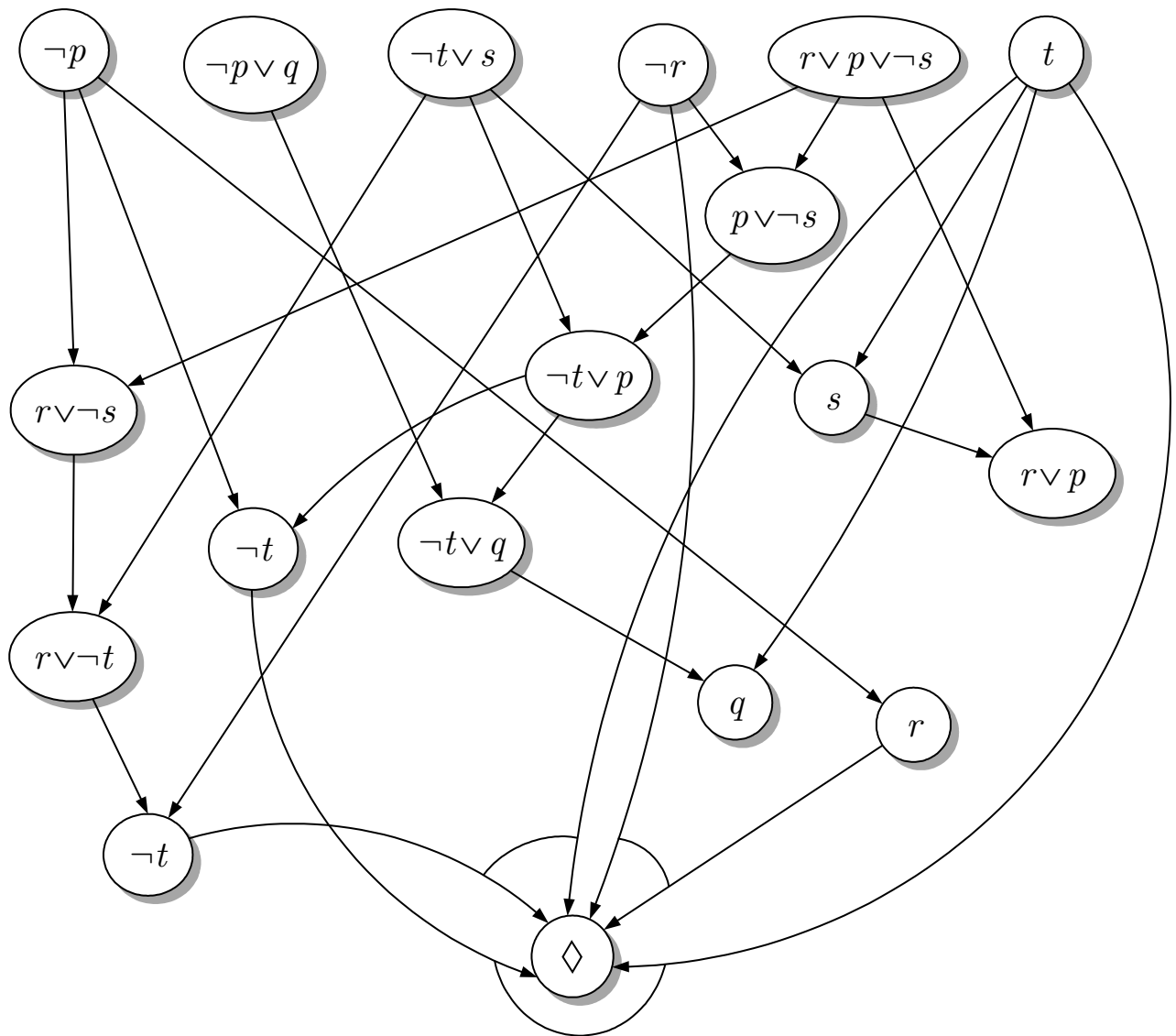
**Abb. A1.3: Zustandsraum der Klötzchenwelt**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



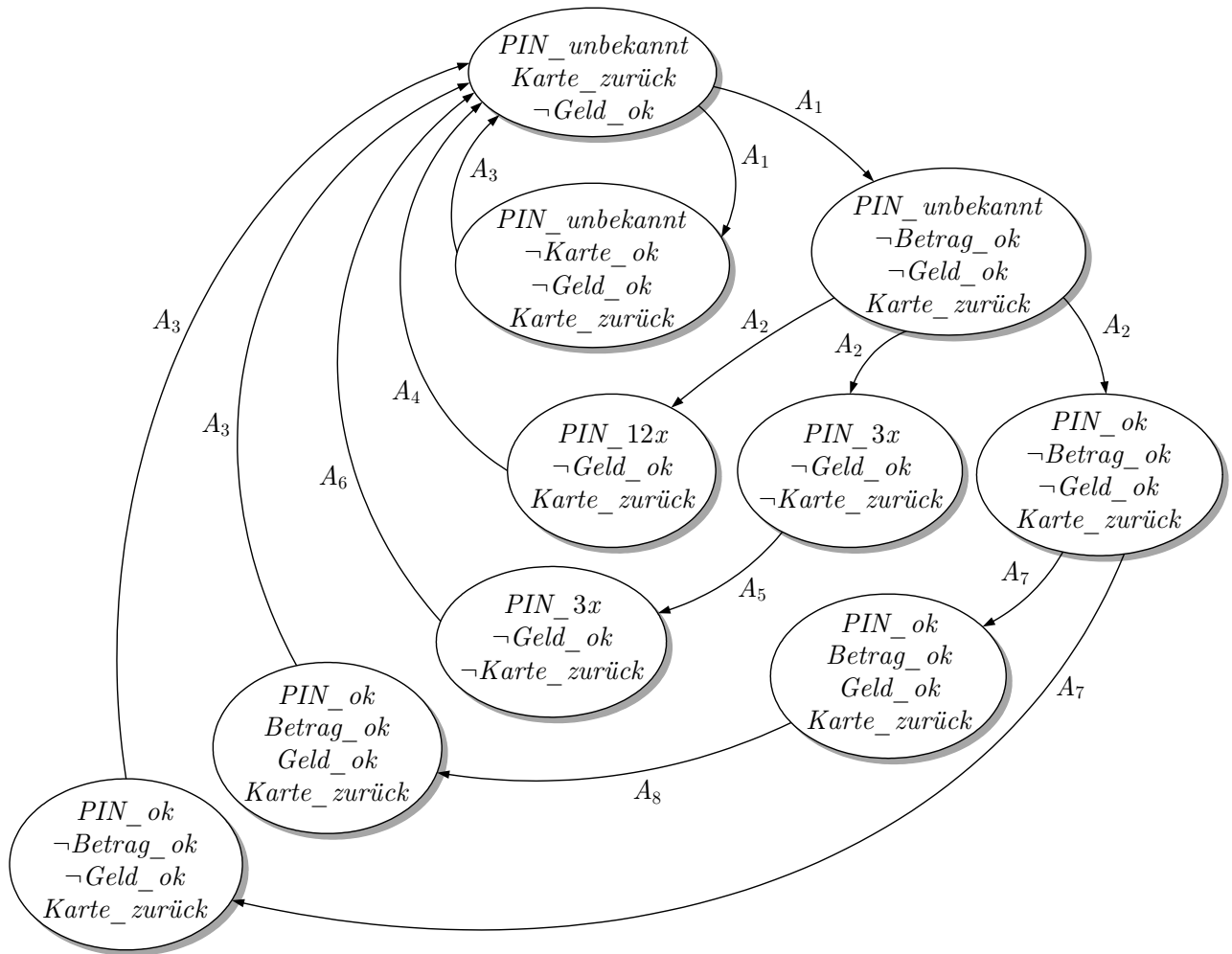
**Abb. A1.4. Zustandsraum des Dosierproblems**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



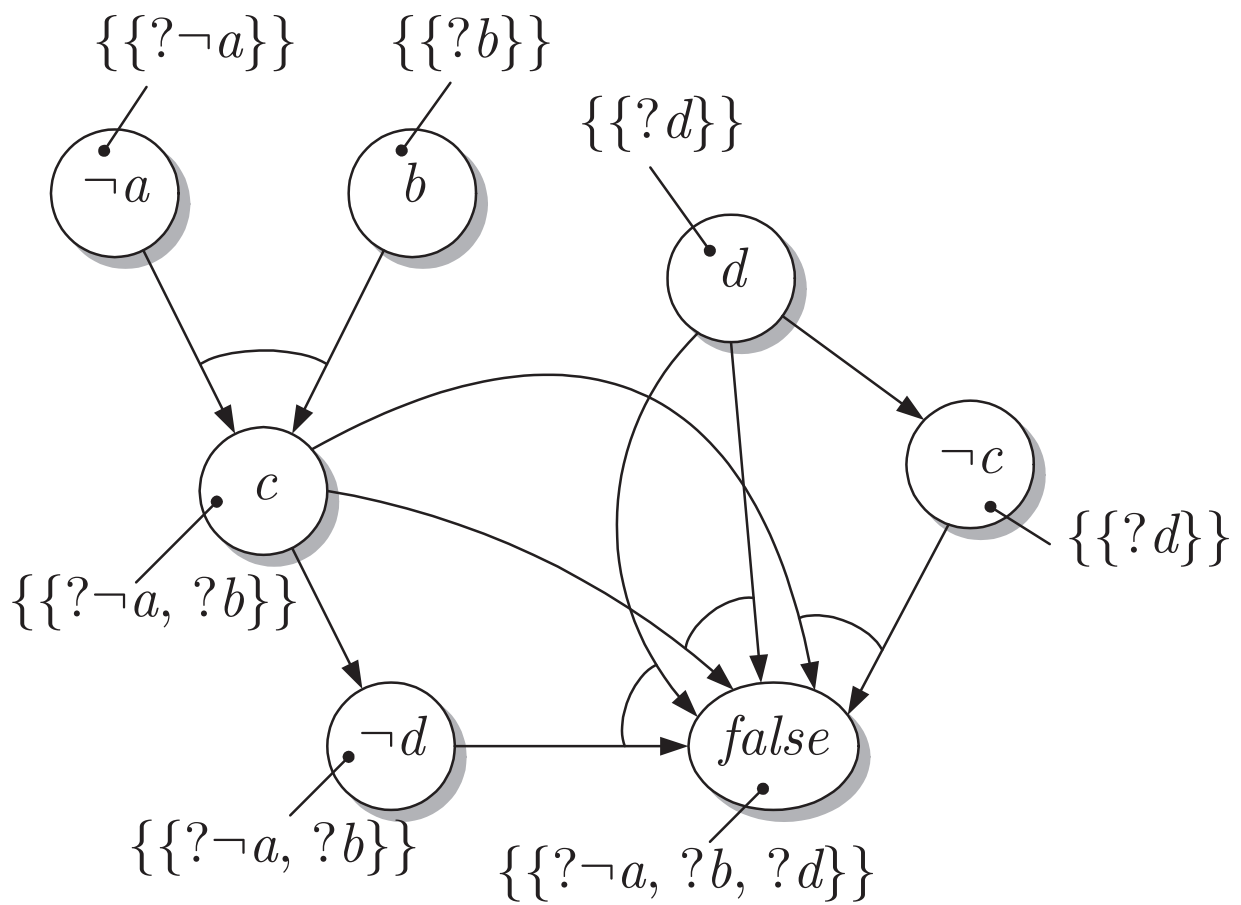
**Abb. A1.5: Ableitungsgraph für die Aufgabe 7.15**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. A1.6: Zustandsgraph des Geldautomaten**

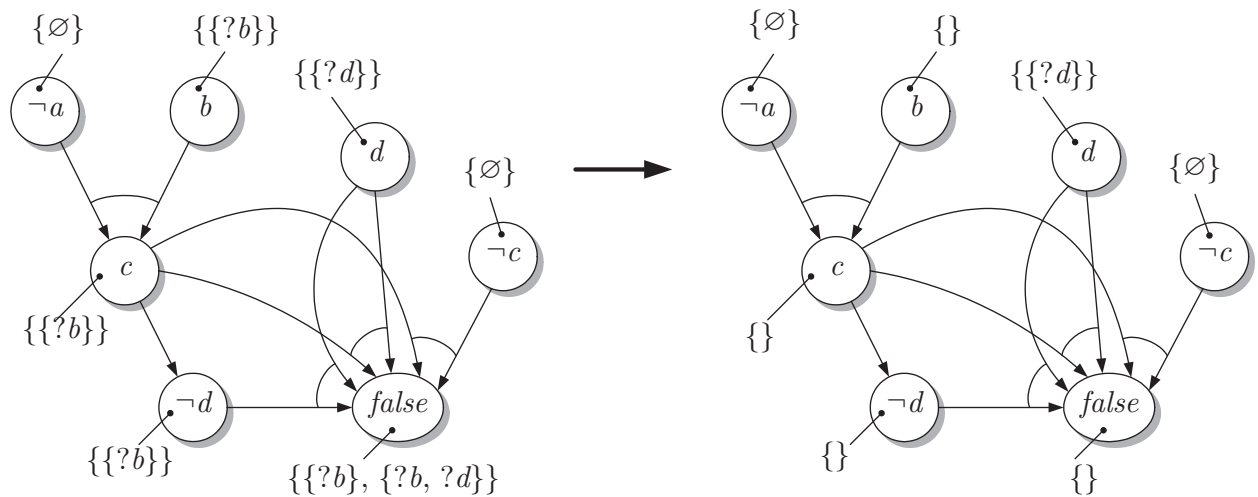
J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016



**Abb. A1.7: ATMS-Graph für das Tanksystem**

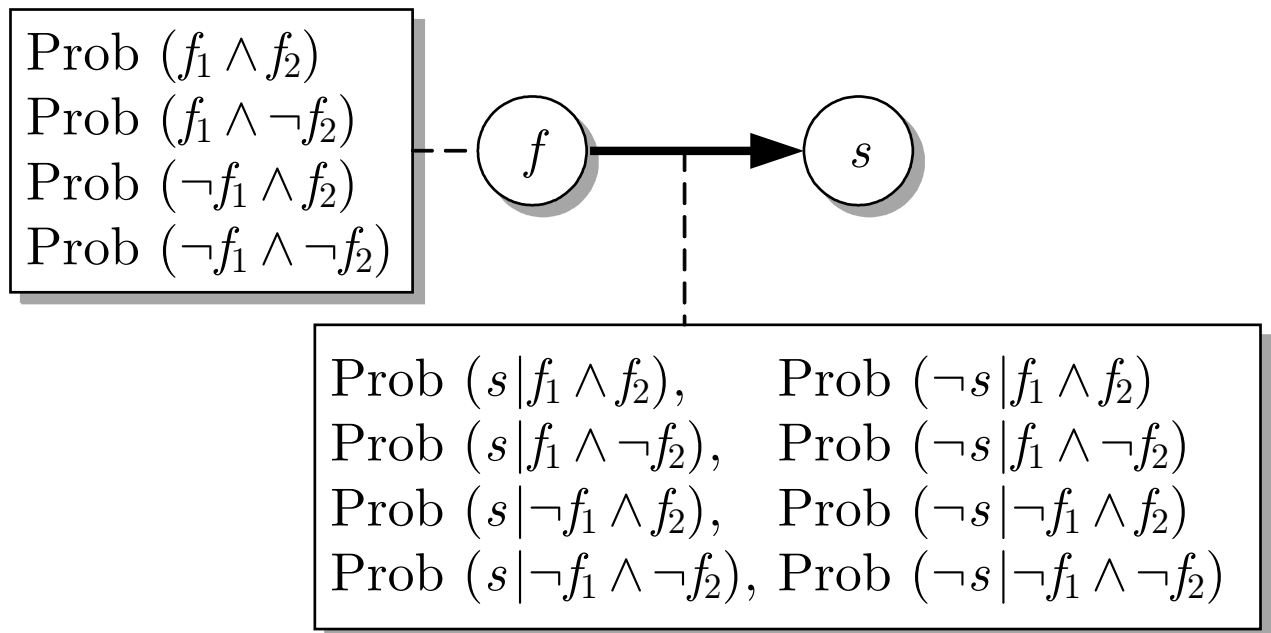
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





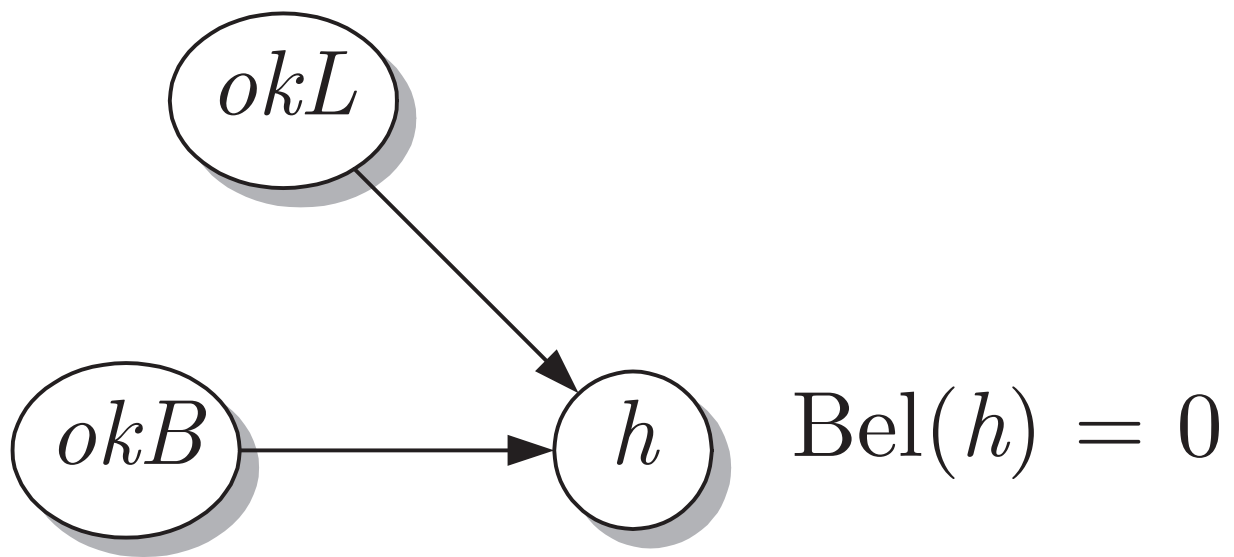
**Abb. A1.8: ATMS-Graph bei Beobachtung der Fakten  $\neg a$  und  $\neg c$**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



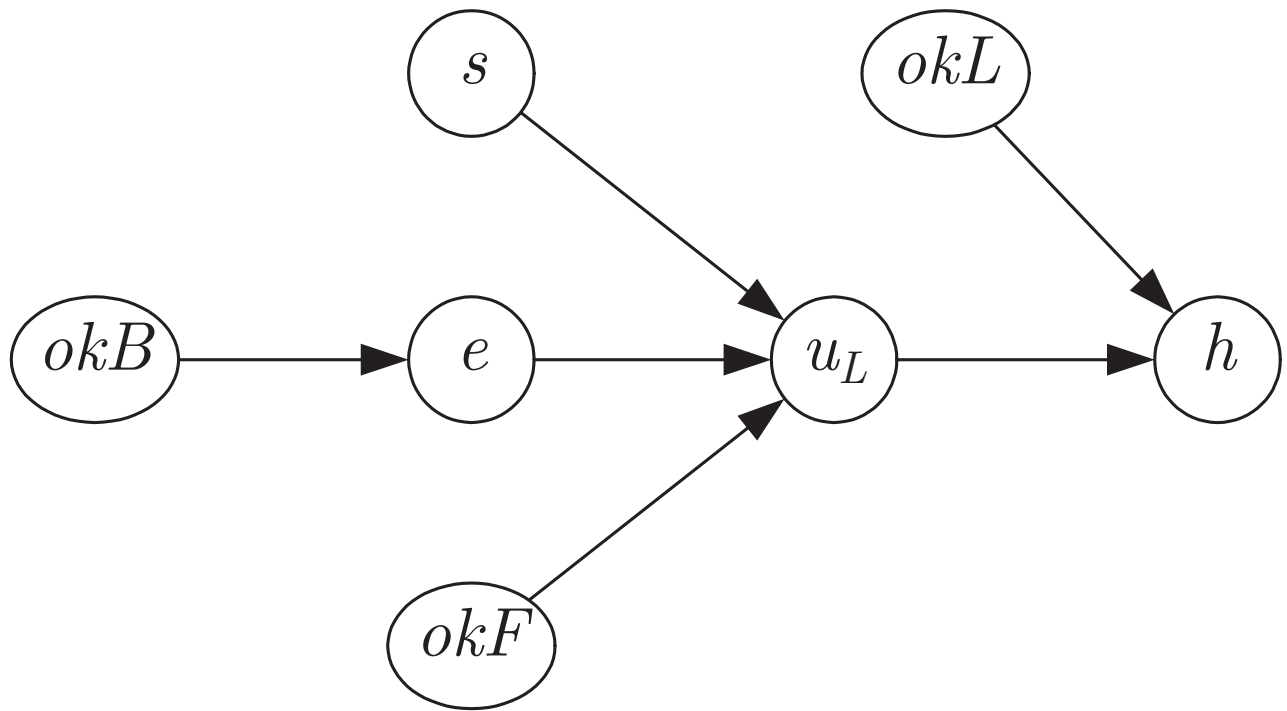
**Abb. A1.9: Diagnose des Fahrradreifens**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



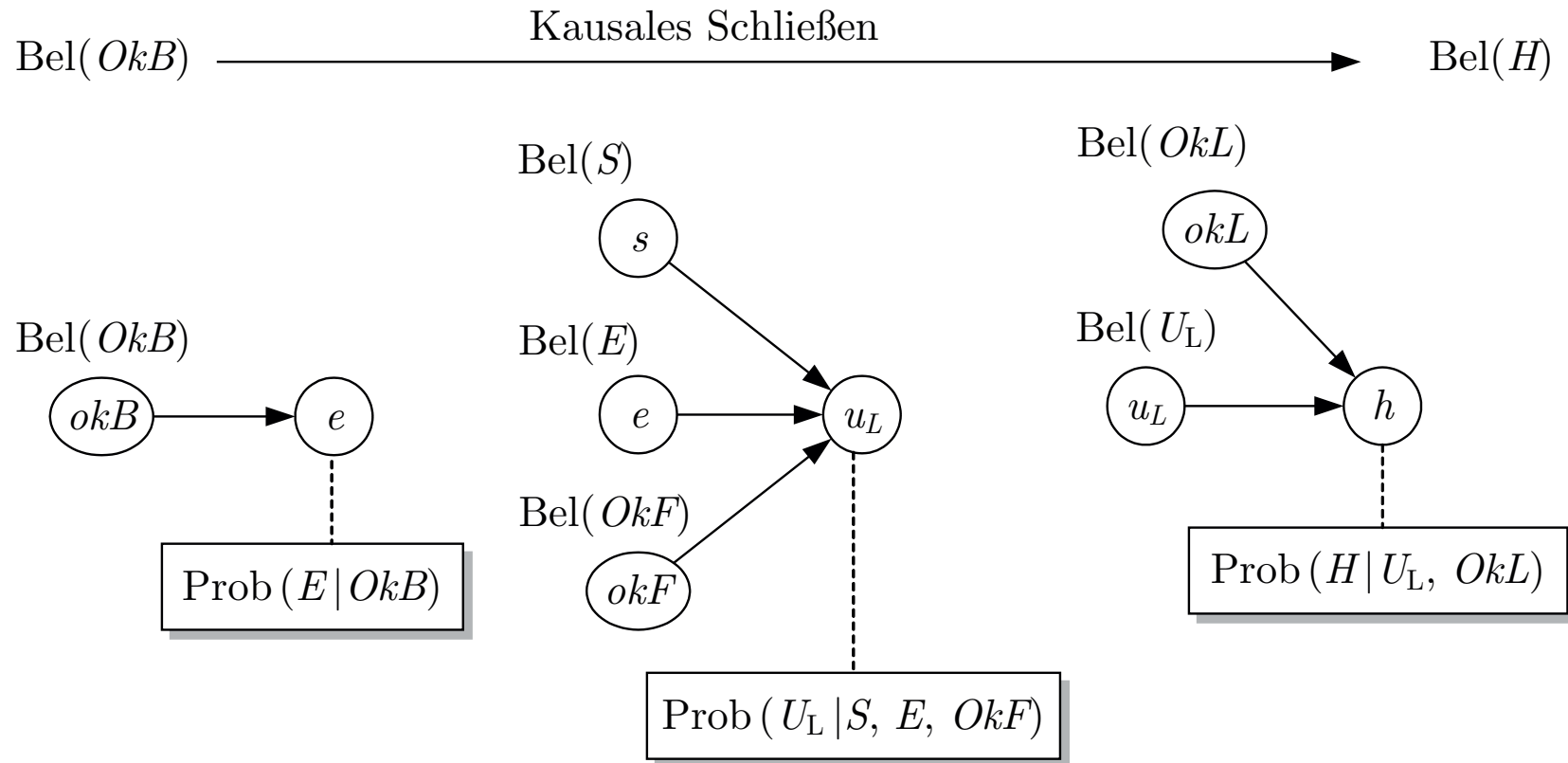
**Abb. A1.10: Probabilistisches Modell der Heckleuchte**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



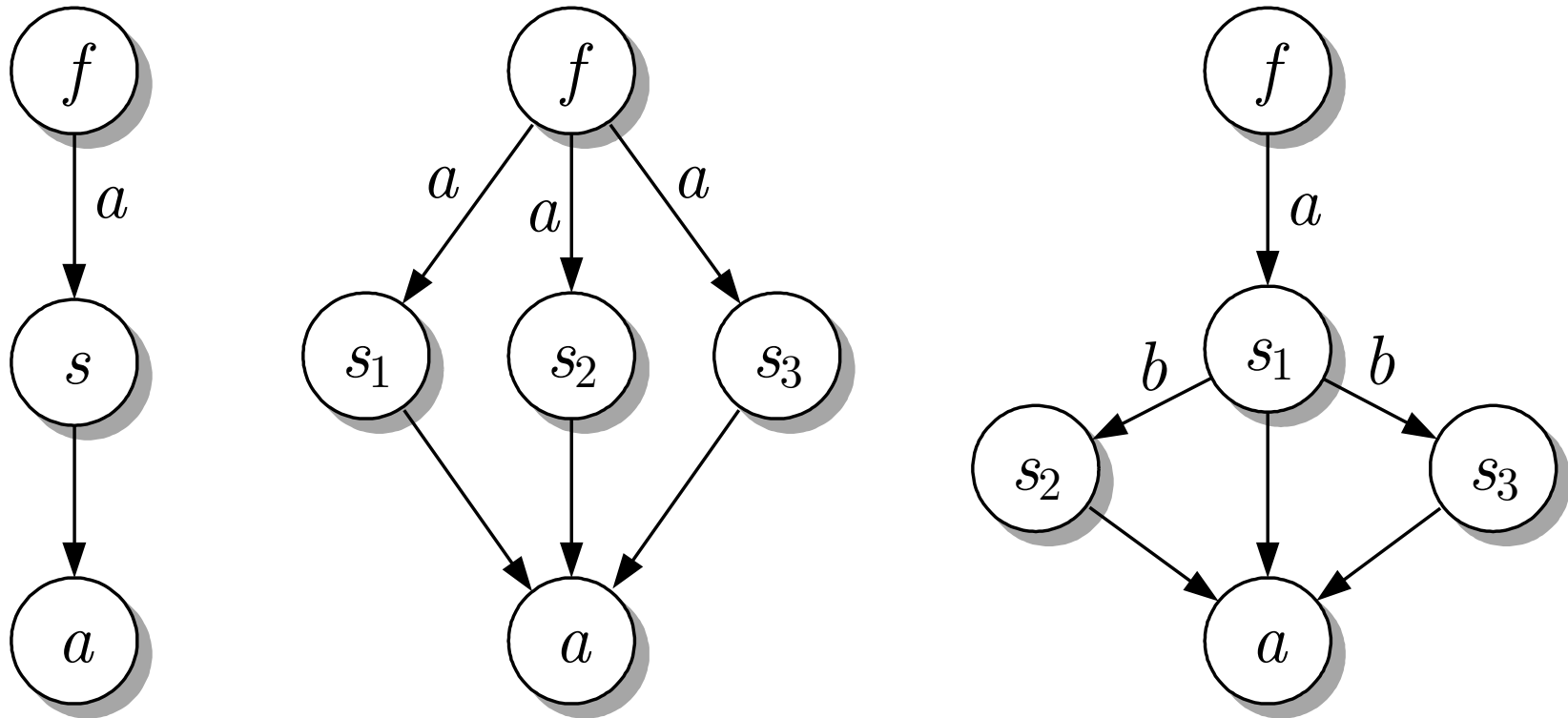
**Abb. A1.11: Bayesnetz der Heckleuchte**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



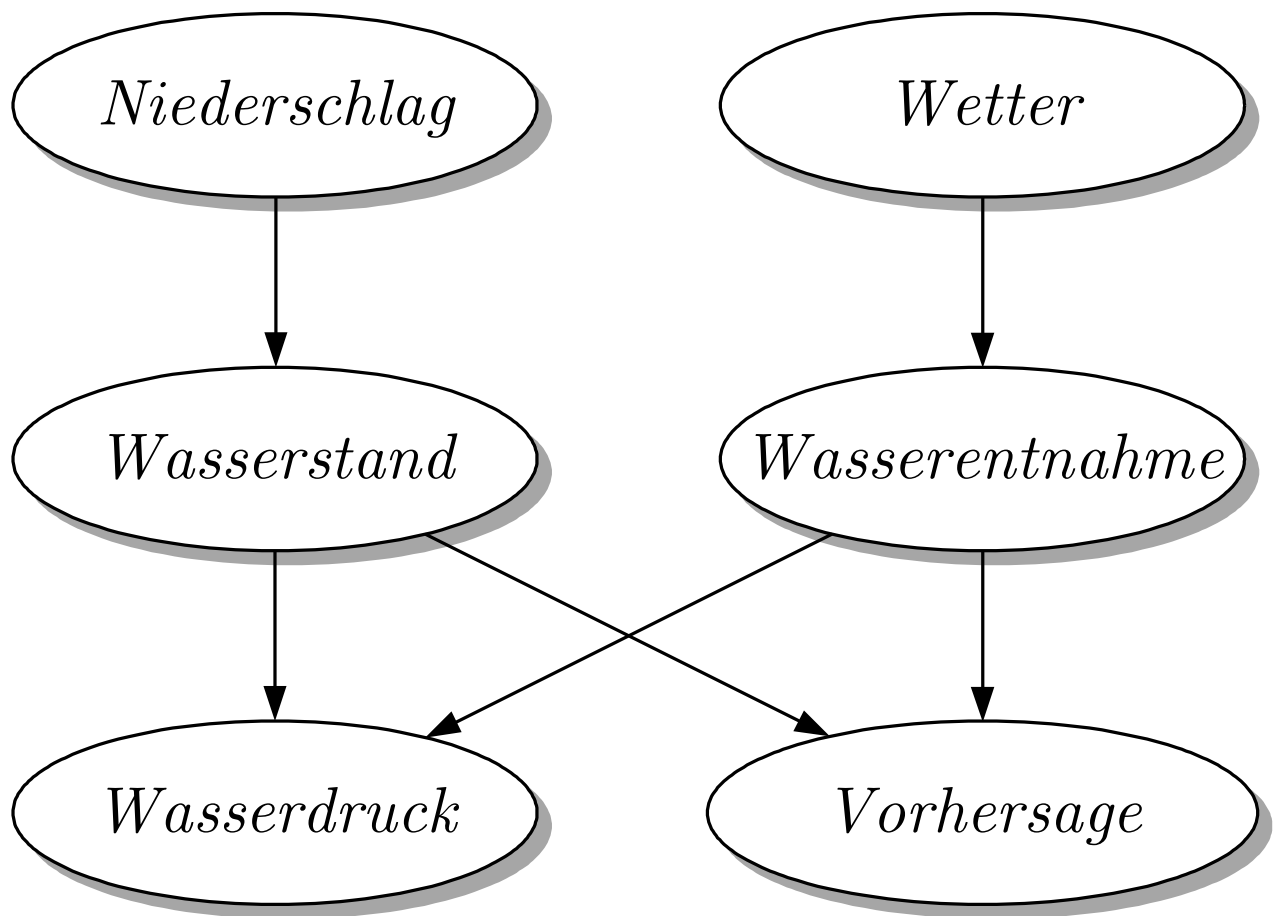
**Abb. A1.12. Kausales Schließen zur Verhaltensanalyse der Heckleuchte**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



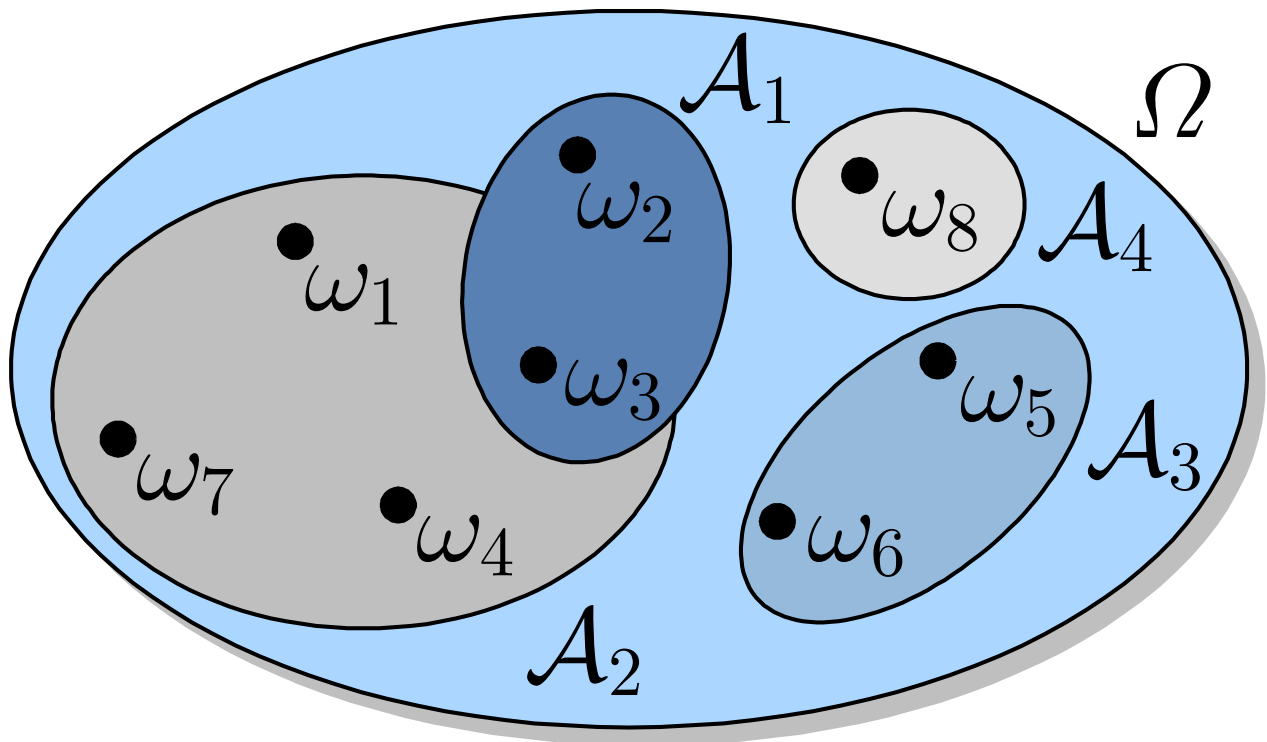
**Abb. A1.13. Bayesnetze der Sicherheitsüberwachung**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. A1.14: Bayesnetz zur Beschreibung des Wasserversorgungssystems**

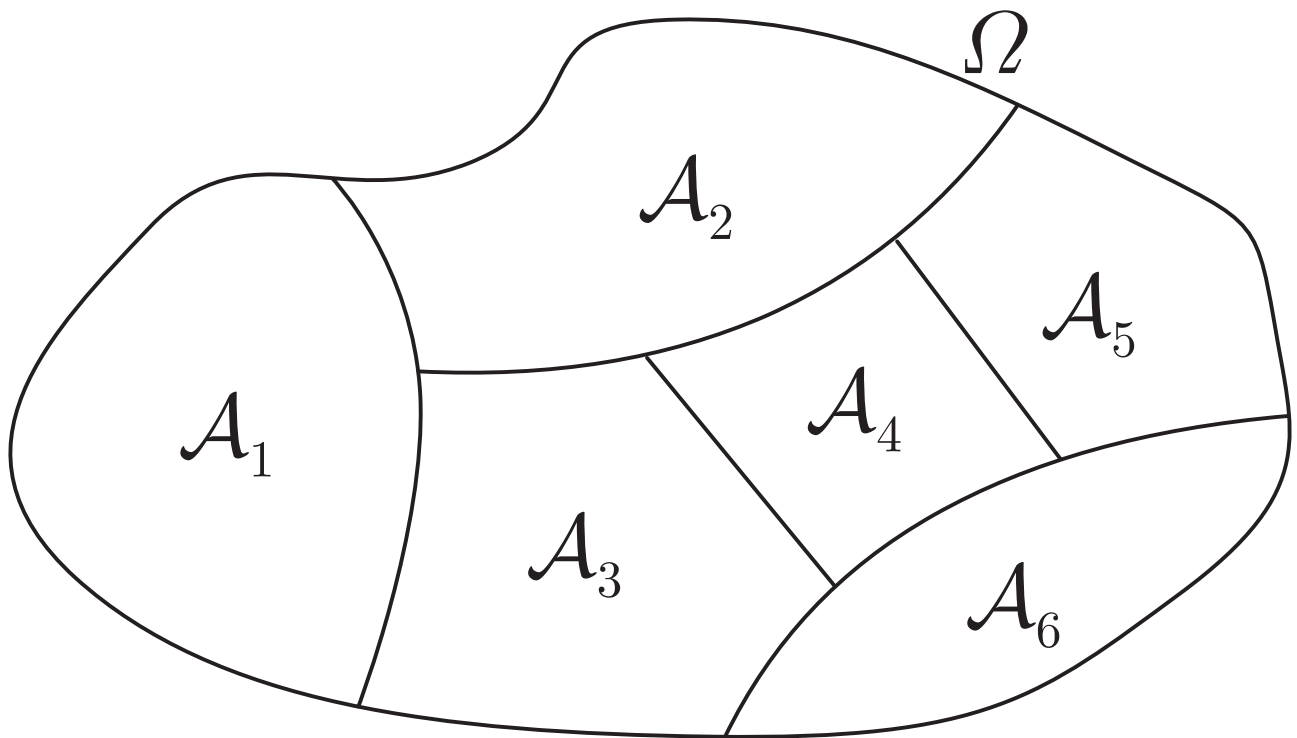
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. A2.1: Zufällige Ereignisse  $A_i$**

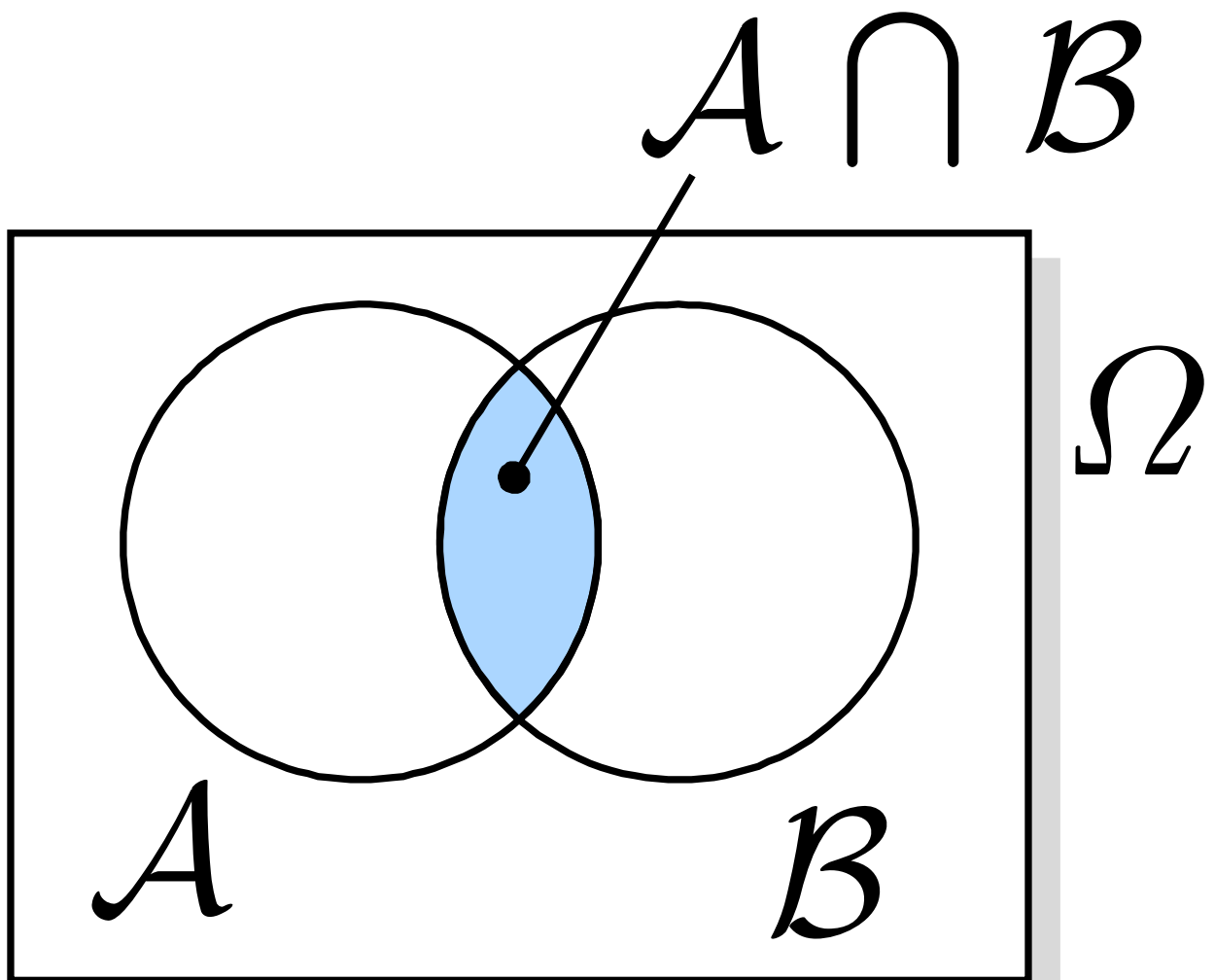
*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*





**Abb. A2.2: Vollständiges System unvereinbarer Ereignisse**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*



**Abb. A2.3: Zur Definition der bedingten  
Wahrscheinlichkeit**

*J. Lunze: Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Oldenbourg-Verlag 2016*