

Untersuchung der Lernfähigkeit verschiedener Verfahren am Beispiel von Computerspielen

**Abschlussarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science (B.Sc.)**

Thilo Stegemann
s0539757
Angewandte Informatik

6. März 2017



**Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin**

University of Applied Sciences

Erstprüfer: Prof. Dr. Burkhard Messer
Zweitprüferin: Prof. Dr. Adrianna Alexander

Abstrakt

LOREM IPSUM

Todo list

Abkürzungsverzeichnis

bzw. Beziehungsweise

eng. Englische Sprache

ID Identifikator

MDP Markov decision process

MEP Markov Entscheidungsprozess

UI User interface

vgl. Vergleich

vs. Versus, Gegenüberstellung

Abbildungsverzeichnis

2.1	Ein (partieller) Suchbaum vgl. Abbildung 5.1 [RN12, S. 208]	5
2.2	Ein Alpha Beta Suchbaum [RN12, S. 213].	6
2.3	TODO	8
2.4	Drei verschiedene Spielzugsequenzen die alle zum selben Spielzu- stand führen.	9
2.5	Zobrist Hashing von Spielzuständen.	10
2.6	Der Agent und seine Wechselwirkung mit der Umgebung. Die Dar- stellung des Agenten und der Umgebung wird in verschiedenen Fach- büchern, die das verstärkenden Lernen behandeln, sehr ähnlich rea- lisiert [Alp08, S. 398] und [Ert16, S. 290].	12
2.7	Vogelspezies Klassifikation basierend auf vier Eigenschaften	15
3.1	Spielsituationen (Spielzustände oder Stellungen) die während einer Partie (a) Reversi oder (b) Tic Tac Toe auftreten können.	21
3.2	Die Projektproblematik.	22
4.1	Veranschaulichung der vertikalen (a), horizontalen (b) und diagona- len (c, d) Siegesbedingung.	28
4.2	Symmetrie Eigenschaften des vier mal vier Tic Tac Toe Spielfelds. . .	31
4.3	Die Indizes der einzelnen Spielfelder.	32
4.4	Strategie um die Mitte zu kontrollieren.	33
4.5	TicTacToe Angriffsstrategien (aus der Sicht von Bob) und Verteidi- gungsstrategien (aus der Sicht von Alice).	34
4.6	Ausgangssituation einer beginnenden Partie Reversi. Die äußeren weiß hinterlegten Reihen in denen sich Zahlen befinden, dienen da- zu die Positionen der einzelnen Spielfelder genau zu definieren. In der Ausgangsspielsituation befinden sich bereits 2 weiße Spielsteine an den Positionen (3,4) und (4,3) und zwei schwarze Spielsteine an den Positionen (3,3) und (4,4).	35

- 4.7 Zwei möglicherweise nicht in der Praxis auftretende Spielsituationen, die einzig verdeutlichen sollen welche Zugmöglichkeiten der Spieler mit den schwarzen Spielsteinen hat und warum nur diese Züge möglich sind. Die kleinen schwarzen Punkte zeigen die Positionen an denen ein schwarzer Spielstein gesetzt werden darf. (a) Eine Spielsituation mit maximal einem möglichen Anker. (b) Eine Spielsituation mit maximal 3 möglichen Ankern für die Position (3,1). . . 36

Tabellenverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	vii
1 Projektvision	1
1.1 Motivation	1
1.2 Vorläufige Zielsetzung	1
1.3 Nutzen/Zweck des Projektes	2
1.4 Zielgruppe	2
2 Grundlagen	3
2.1 Spiele mit Gegenspieler	3
2.1.1 Minimax	4
2.1.2 Alpha-Beta-Kürzung	5
2.1.3 Iterativ vertiefende Tiefensuche	7
2.1.4 Übergangstabellen	8
2.1.5 Heuristik	10
2.2 Verstärkendes Lernen(Reinforcement Learning)	12
2.2.1 Ein Agent im Labyrinth	13
2.2.2 Überwachtes vs. verstärkendes Lernen	14
2.2.3 Markov Entscheidungsprozess	15
2.2.4 Optimale Taktiken	17
2.2.5 Temporale Differenz Lernen	18
3 Problemanalyse und Anforderungsdefinition	20
3.1 Die Problematik	20
3.2 Existierende Softwarelösungen	23
3.2.1 Samuels Damespiel	23
3.2.2 TD-Gammon	24
3.3 Anforderungen	24
4 Modellierung und Entwurf	27
4.1 Tic Tac Toe	27
4.1.1 Lernen mit Strategieverbesserung	29
4.1.2 Lernen ohne Strategie	35

Inhaltsverzeichnis

4.2	Reversi	35
4.3	Tic Tac Toe Heuristik	37
4.4	Reversi Heuristik	37
4.5	Die Strategiespielumgebungen Tic Tac Toe und Reversi	37
4.6	Agent des Zufalls	37
4.7	Agent ohne Lernen	37
4.8	Agent mit TD-Lernen	39
4.9	Agent mit Q-Lernen	39
5	Implementierung	40
5.1	Tic Tac Toe	40
5.2	Reversi	40
5.3	Suchbaumverfahren	40
5.4	Heuristiken	40
5.5	TD-Q-Lernen	40
6	Validierung	43
6.1	Messbare Testkriterien	43
6.2	Modultests	43
6.2.1	TicTacToe	43
6.2.2	Reversi	43
6.2.3	Lernverfahren 1	43
6.2.4	Lernverfahren 2	43
6.2.5	Persistenz	43
6.3	Systemtest	43
7	Auswertung	44
7.1	Belastbarkeit und Grenzen der Lernverfahren	44
7.2	Optimale Anwendungsspiele für die Lernverfahren	44
7.3	Gegenüberstellung der Lernverfahren	44
7.4	Bewertung der Strategien	44
7.5	Menschlicher oder mechanischer Trainer?	44
A	I am an appendix!	46
A.1	Section in appendix!	46
B	Another appendix? What the heck?	48
B.1	Section in appendix!	48

Projektvision

1.1 Motivation

Sind Sie ein (angehender) Softwareentwickler und programmieren aktuell ein Computerspiel, welches lernfähige Verfahren unterstützen soll? Benötigen Sie innerhalb einer beliebigen Anwendung einen lernfähigen Algorithmus und sie kennen die Schwächen, Stärken, Grenzen und Anwendungsgebiete der Lernverfahren nicht?

Haben Sie sich auch schon mal eine der nachfolgenden Fragen gestellt oder interessieren Sie diese Fragen generell?

Wie lernt ein Programm Strategien? Was sind die elementaren Schritte die ein Programm während des Lernprozesses durchläuft? Wie anwendbar und leistungsfähig sind die Lernverfahren hinsichtlich verschiedener Spielgrundlagen? In wie fern wird ein Lernverfahren von einem Computerspiel ausgereizt? Wenn zwei unterschiedliche Lernverfahren untersucht und verglichen werden, welches Lernverfahren ist dann effizienter, schneller oder besser?

Diese wissenschaftliche Arbeit könnte dann sehr interessant für Sie sein. Innerhalb dieser Arbeit werden bestimmte Lernverfahren, am Beispiel verschiedener Computerspiele, auf Ihre Funktionsweise, Schwächen, Stärken und Grenzen untersucht, implementiert, und getestet.

1.2 Vorläufige Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit ist die Untersuchung des Lernverhaltens, der Grenzen, der Schwächen und der Stärken verschiedener Lernverfahren am Beispiel von mindestens zwei eigens implementierten Computerspielen. Die Lernverfahren sollen trainiert werden und dadurch mehr oder weniger eigenständige Siegesstrategien und Spielzugmuster entwickeln. Die Lernverfahren könnten sich gegenseitig trainieren

oder sie trainieren indem sie gegen einen Menschen spielen. Der Fokus der wissenschaftlichen Arbeit liegt hierbei auf der Untersuchung der verschiedenen Lernverfahren und nicht auf der Implementierung besonders komplexer Computerspiele, daher sollen nur sehr simple Computerspiele implementiert werden. Ein vollständiges Dame Spiel wird zum Beispiel nicht implementiert, aber eine absichtlich verkleinerte Dame Variante mit veränderten Spielregeln, für ein schnelleres Spielende, wäre durchaus möglich. Zudem wären auch ein vier mal vier Tic-Tac-Toe ein Vier Gewinnt oder ein Black Jack Computerspiel

1.3 Nutzen/Zweck des Projektes

1.4 Zielgruppe

Grundlagen

In diesem Kapitel werden verschiedene Konzepte der Spieltheorie Abschnitt 2.1 und des maschinellen Lernens Abschnitt 2.2 genauer erklärt und veranschaulicht. Diese Konzepte sind der Grundbaustein für die spätere Anwendung der lernfähigen Verfahren. Konzepte der Spieltheorie sind z.B. Suchstrategien und deren Optimierungen. Im zweiten Abschnitt "Verstärkendes Lernen" behandeln wir das Konzept eines Agenten der ohne Strategie in einer Welt ausgesetzt wird und in dieser Aktionen ausführt. Wir betrachten insbesondere das Verhalten des Agenten hinsichtlich einer Belohnung für eine durchgeführte Aktion.

2.1 Spiele mit Gegenspieler

Schach, Vier gewinnt, Dame, Tic Tac Toe und Reversi sind strategische Spiele für zwei Personen, die gegeneinander antreten, um nach den Regeln des Spiels, den Gegenspieler zu besiegen. Diese Spiele sind deterministisch weil, dass Spiel nicht vom Zufall abhängt und der gleiche Spielzug führt bei gleichem Ausgangszustand immer zum selben Zustandsübergang. Zudem sind sie überschaubar weil, zu jedem Zeitpunkt des Spiels das Spielfeld und alle Spielzüge einsehbar sind. Ein nichtdeterministisches Spiel mit Gegenspieler ist z.B. Backgammon, denn Würfelergebnisse und somit der Zufall sind Bestandteil des Spiels. Wie kann ein Programm einen Menschen in einem dieser Strategiespiele besiegen? In den nachfolgenden Unterabschnitten werden Konzepte der Spieltheorie erläutert, die versuchen diese Frage zu beantworten.

Nullsummenspiele

Ein Nullsummenspiel ist ein Spiel bei dem der Verlust eines Spielers einen gleich hohen Gewinn für den Gegenspieler bedeutet. Gewinnt ein Spieler eine Partie eines Nullsummenspiels, dann verliert der Gegenspieler automatisch. Der gewinnende Spieler erhält einen Pluspunkt und der verlierende Spieler einen Minuspunkt. Die Summe der beiden Ergebnisse ist Null. Gewinnt beziehungsweise verliert kei-

ner der beiden Spieler, dann erhalten beide Spieler als Spielergebnis eine Null. Die Summe der beiden Ergebnisse ist wiederum Null, so lässt sich der Name Nullsummenspiele"herleiten. Die beiden Spiele Tic Tac Toe und Reversi sind Nullsummenspiele.

2.1.1 Minimax

Ein Spieler wird als MAX bezeichnet und der Gegenspieler als MIN. Spieler MAX versucht einen maximalen Gewinn für sich zu erlangen und Spieler MIN versucht den erreichbaren Gewinn von MAX zu minimieren. Es wäre auch möglich anzunehmen, dass Spieler MIN einfach irgendeinen zufälligen oder dummen Spielzug auswählt und MAX einen einfachen Sieg erlangt. Diese Annahme entspricht jedoch wenig einem realen Spiel, bei dem beide Spieler versuchen das Spiel zu gewinnen.

In Abbildung 2.3 ist der Ablauf einer Minimax-Suche veranschaulicht. Der Minimax-Suchbaum berücksichtigt jeden Zustand indem sich die Spielwelt befinden kann. Im ersten Spielzug könnte Spieler MAX sein Kreuzspielstein in die obere linke Ecke setzen, daraus ergeben sich neue Zustandsmöglichkeiten. Spieler MIN könnte seinen Kreisspielstein ein Feld weiter rechts und in die selbe Reihe wie Spieler MAX setzen. Der Nutzen der einzelnen Züge ist zur Zeit der Ausführung noch nicht bekannt, erst wenn das Tic Tac Toe Spiel einen Endzustand erreicht, werden den Spielern ihre Spielergebnisse mitgeteilt. Der Minmax-Suchbaum ist somit rekursiv zu betrachten. Von seinen Blattknoten ausgehend entscheidet sich MIN für den geringsten Nutzwert und MAX für den höchsten. Die Entscheidungen stehen in direkter Abhängigkeit zur vorherigen Entscheidung des Gegenspielers.

Das größte Problem der Minimax-Suche ist die exponentielle Vergrößerung der Anzahl der Blattknoten des Suchbaums, schon bei sehr einfachen Spielen z.B. einem 3x3 Tic Tac Toe mit Neun Spielfeldern ist der Suchbaum bereits sehr groß ungefähr 362880 Blattknoten mit einem effektiven Verzweigungsfaktor von Neun der sich nach jedem Halbzug um Eins verringert. Erweitern wir die Dimension des Tic Tac Toe Spiels, so erhalten wir ein 4x4 Tic Tac Toe Spiel mit 16 Spielfeldern, einem Verzweigungsfaktor von 16 und ungefähr 20922789888000 Blattknoten. Der effektive Verzweigungsfaktor beim Schach liegt etwa bei 30 bis 35. Bei einem typischen Spiel mit 50 Zügen pro Spieler hat der Suchbaum dann mehr als $30^{100} \approx 10^{148}$ Blattknoten[Ert16, S. 114]. Der Minimax-Algorithmus ist, auf Grund enormer Rechenzeit, in seiner Reinform praktisch nicht anwendbar, daher werden wir Erweiterungen der Minmax-Suche und andere Konzepte kennen lernen.

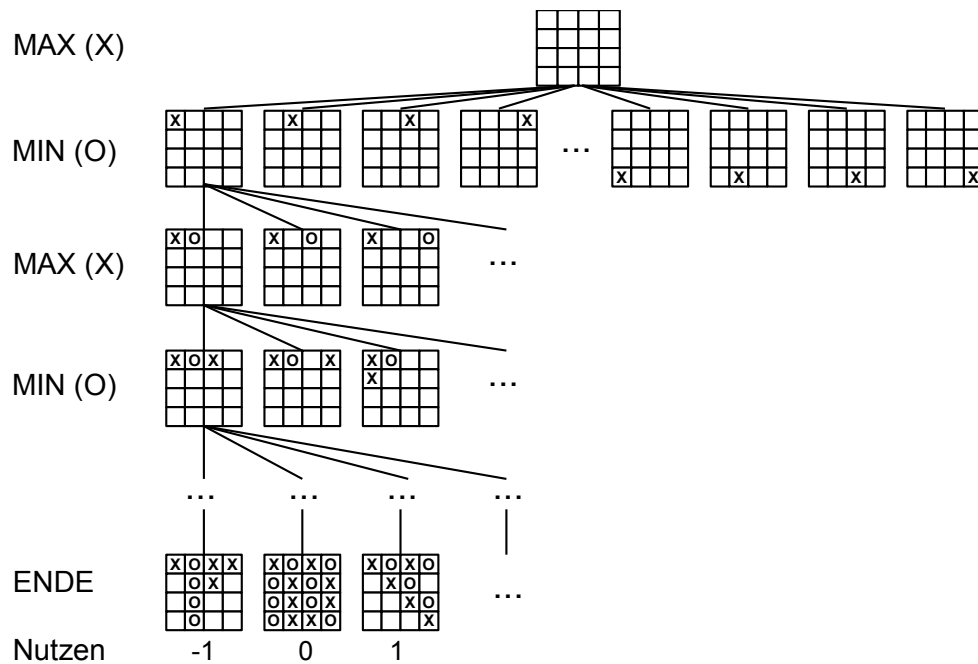


Abbildung 2.1 Ein (partieller) Suchbaum vgl. Abbildung 5.1 [RN12, S. 208]

2.1.2 Alpha-Beta-Kürzung

Eine Möglichkeit die Rechenzeit der Minimax-Suche zu verbessern ist das Kürzen oder Beschneiden des Suchbaums (eng. Pruning). Beim Alpha-Beta-Kürzen wird der Teil des Suchbaums beschnitten, der keinen Effekt auf das Ergebnis der Minimax Suche hat. Der Minimax Algorithmus wird um zwei Parameter Alpha und Beta ergänzt. Die Bewertung erfolgt an jedem Blattknoten des Suchbaums. Alpha enthält den aktuell größten Wert, für jeden Maximum Knoten, der bisher bei der Traversierung des Suchbaums gefunden wurde. In Beta wird für jeden Minimum Knoten der bisher kleinste gefundene Wert gespeichert. Ist Beta an einem Minimum Knoten kleiner oder gleich Alpha ($\beta \leq \alpha$), so kann die Suche unterhalb von diesem Minimum Knoten abgebrochen werden. Ist Alpha an einem Maximum Knoten größer oder gleich Beta ($\alpha \geq \beta$), so kann die Suche unterhalb von diesem Maximum Knoten abgebrochen werden [Ert16, S. 116].

Verdeutlichen wir das Alpha-Beta-Pruning an Hand eines Beispiels aus dem Standardwerk der künstlichen Intelligenz von S. Russell und P. Norvig Abbildung 5.5 [RN12, S. 213]. Ein Dreieck mit der Spitze nach oben ist ein Maximumknoten und ein Dreieck mit der Spitze nach unten ist ein Minimumknoten. Leere Dreiecke ohne einen bezeichnenden Buchstaben und gestrichelter Umrandung sind noch nicht explorierte Knoten. Durchgängige Linien verweisen auf bereits besuchte Pfade und

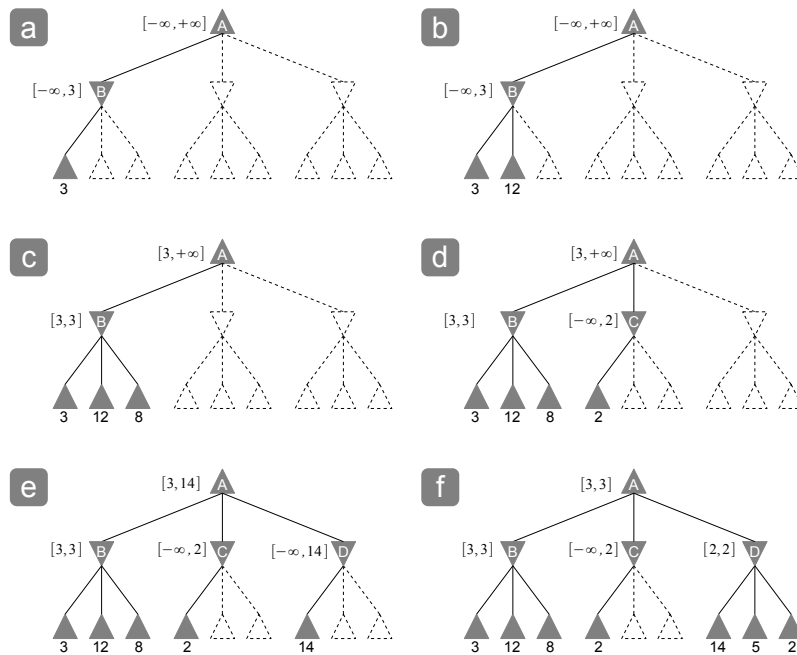


Abbildung 2.2 Ein Alpha Beta Suchbaum [RN12, S. 213].

gestrichelte Linien verweisen auf noch nicht besuchte Pfade. Die Zahlen unterhalb der Blattknoten sind die Nutzwerte die der maximierende Spieler erhält, wenn er den Pfad bis zu diesem Blattknoten durchschreitet.

(a) Minimum Knoten B findet einen Nutzwert 3, da dieser Wert der bisher kleinste gefundene Wert ist wird er in Beta gespeichert.

(b) Der Minimum Knoten B exploriert einen zweiten möglichen Nutzwert 12. Dieser Wert ist höher als der vorher gefundene und in Beta gespeicherte Wert 3, daher wird der minimierende Spieler versuchen diesen Nutzwert für den maximierenden Spieler zu vermeiden. Der neue Wert wird vom Minimum Knoten B ignoriert und Beta bleibt unverändert.

(c) Minimum Knoten B findet den Wert 8, dieser ist genau wie 12 größer als 3 und daher wird Spieler MIN vermeiden, dass Spieler MAX zu diesem Spielergebnis gelangt. Minimum Knoten B hat alle seine nachfolgenden Knoten exploriert. Maximum Knoten A wird vom Minimum Knoten B maximal den Nutzwert 3 erhalten, somit ergibt sich für den Maximum Knoten A, dass dieser mindestens den Nutzwert 3 erreichen kann.

(d) Ein weiterer Minimum Knoten ist C. Der erste Blattknoten von C liefert einen

Nutzwert von 2, weil dieser Wert der erste gefundene Wert unterhalb des Minimum Knotens C ist, wird er in Beta gespeichert. C wird Maximum Knoten A maximal einen Nutzwert 2 liefern. A wiederum kann durch Minimum Knoten B bereits einen minimalen Nutzwert von 3 erhalten und hat diesen in Alpha gespeichert. Es gilt $Beta \leq Alpha$ und es ist nicht notwendig die Knoten unterhalb von C weiter zu explorieren. Selbst wenn ein größerer Nutzwert gefunden werden würde, entscheidet sich der minimierende Spieler trotzdem für den kleineren Wert und würde ein kleinerer Nutzwert als 2 gefunden werden, dann entscheidet sich der maximierende Spieler für den Nutzwert 3, den Minimum Knoten B liefert. Folglich kann der Suchbaum an dieser Stelle abgeschnitten werden, weil weitere gefundene Nutzwerte keinen Einfluss mehr auf das Ergebnis haben.

(e) Der letzte von A zu erreichende Minimum Knoten wird exploriert. Der erste Blattknoten unterhalb des Minimum Knoten D liefert den Nutzwert 14. Dieser Wert wäre für Maximum Knoten A eine starke Verbesserung, weil dieser bisher nur maximal einen Nutzwert von 3 erreichen konnte. Der minimierende Spieler hat noch zwei weitere Möglichkeiten(Knoten) zu explorieren und daher wird er versuchen einen geringeren Nutzwert als 14 zu finden.

(f) Minimum Knoten D findet in den beiden letzten Blattknoten die Nutzwerte 5 und 2. Der minimierende Spieler wählt die Möglichkeit mit dem geringsten Nutzwert 2. Dieser Nutzwert wird zum neuen Beta Wert. Der Suchbaum wird unterhalb vom Minimum Knoten D jedoch nicht abgeschnitten, weil der Nutzwert 2 erst im zuletzt explorierten Knoten gefunden wurde. Theoretisch könnten zwei Pfade unterhalb des Minimum Knoten D abgeschnitten werden, wenn der Blattknoten mit dem Nutzwert 2 zuerst exploriert worden wäre.

2.1.3 Iterativ vertiefende Tiefsuche

Die iterativ vertiefende Suche (eng. Iterative Deepening) ist eine Kombination der Breitensuche und der Tiefsuche. Diese Suchverfahren sind uninformierte (blinde) Suchverfahren. Die Strategien der uninformierten Suchverfahren haben keine zusätzlichen Informationen über Zustände, außer den in der Problemdefinition vorgegebenen. Alles was sie tun können, ist, Nachfolger zu erzeugen und einen Zielzustand von einem Nichtzielzustand zu unterscheiden. Die Reihenfolge der Suche ist entscheidend für die Unterscheidung der einzelnen uninformierten Suchverfahren [RN12, S. 116].

Die Breitensuche expandiert (erweitert oder vergrößert) zu erst alle Nachfolger (Knoten eines Suchbaums) die in derselben Tiefe liegen, beginnend mit dem Wur-

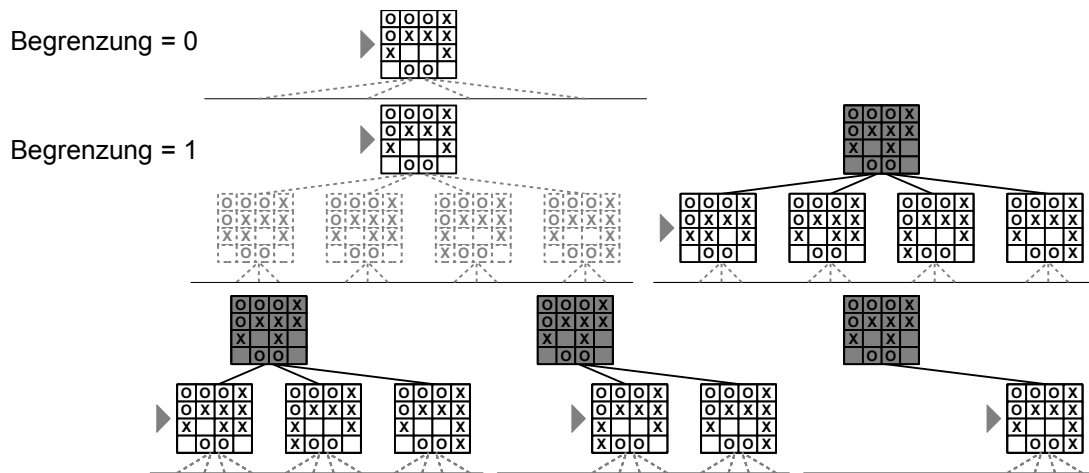


Abbildung 2.3 TODO

zelknoten. Sind alle Nachfolger einer Tiefe expandiert, dann werden deren Nachfolger nacheinander expandiert. Diesen Schritt wiederholt die Breitensuche bis ein gesuchtes Ergebnis gefunden wird.

Die Tiefensuche expandiert zuerst die tiefsten Knoten des Suchbaums (Depth-first). Erreicht die Tiefensuche einen Endknoten der nicht dem gesuchten Ergebnis entspricht, dann werden die alternativen Knoten des letzten expandierten Knotens, der sich eine Tiefenebene höher befindet, expandiert.

Kombinieren wir diese beiden uninformierten Suchverfahren miteinander und mit einer Grenze für die Suchtiefe, erhalten wir die iterative Tiefensuche. Diese expandiert zuerst die Nachfolger des Wurzelknotens der Suchtiefe 1. Sind alle Knoten auf dieser Ebene expandiert, dann wird die Schranke für die aktuelle Suchtiefe um 1 erhöht (Iteration) und die Knoten der Suchtiefe 2 werden expandiert. Diese Schritte wiederholt die Tiefensuche bis ein Ziel gefunden wird.

Anwendung findet die iterative Tiefensuche bei der Zugsortierung für die Verbesserung des Alpha-Beta Suchbaumkürzens.

2.1.4 Übergangstabellen

Eine Übergangstabelle (eng. transition table) ist eine Tabelle in der Spielsituationen mit verschiedenen Attributen gespeichert werden (vgl. [RN12, S. 215 f.]). Übergänge sind der Grund dafür, dass der gleiche Spielzustand durch unterschiedli-

che Spielzugsequenzen auftritt (siehe Abbildung 2.4). Folgende Attribute werden in der Übergangstabelle gespeichert: der Spielzustand, die Alpha-Beta Werte, der bestmögliche Halbzug, der Nutzen und welcher Spieler gerade setzen muss. Alle Attribute beziehen sich auf den gespeicherten Spielzustand z.B. der bestmögliche berechnete Halbzug der für den gespeicherten Spielzustand möglich ist.

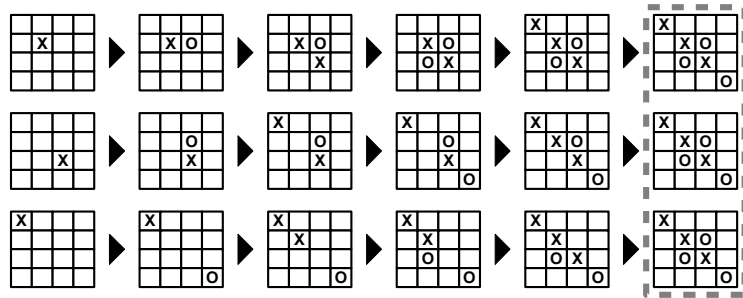


Abbildung 2.4 Drei verschiedene Spielzugsequenzen die alle zum selben Spielzustand führen.

Übergänge innerhalb des Suchbaums verursachen Redundanzen. Für jede dieser Redundanzen wird eine erneute Suche durchgeführt, falls diese nicht durch Alpha-Beta-Kürzung abgeschnitten werden. Sollten diese Übergänge vermieden werden können, dann würde sich die Rechenzeit der Suchverfahren weiter verringern, weil weniger Spielzustände durchsucht bzw. expandiert werden müssen. Wie können wir Spielzustände in einer Übergangstabelle abspeichern?

Zobrist Hash

Wenn ein Computerprogramm einen Gegenstand in einer großen Tabelle speichert, muss die Tabelle zwangsläufig durchsucht werden, um den Gegenstand wiederzuverwenden bzw. zu referenzieren. Dies gilt solange, bis eine Tabellendresse aus dem Gegenstand selbst, in systematischer Weise, berechnet werden kann. Eine Funktion die Gegenstände in Adressen umwandelt ist ein Hash-Algorithmus, und die daraus resultierende Tabelle ist eine Hashtabelle [Zob70, S. 3].

In Abbildung 2.5 wird das Zobrist Hash Verfahrens auf den redundanten Spielzustand aus Abbildung 2.4 angewendet. (2.5 a) Wir weisen jedem Spielfeld zwei zufällige ganzzahlige Werte zu im Bereich von 0 bis maximal 1×10^9 . Einen zufälligen Wert für den Kreuzspielstein an dieser Position und einen für den Kreisspielstein. Das 4x4 Tic Tac Toe Spielbrett sollte insgesamt 32 verschiedene Werte erhalten. (2.5 b) Dieser Spielzustand soll in einen Zobrist-Hash umgewandelt werden.

a

X = 660640090 O = 601151343	X = 651080001 O = 550176261	X = 707754336 O = 30179116	X = 240651458 O = 515695098
X = 843817469 O = 625774421	X = 446956442 O = 409234428	X = 888791315 O = 906370688	X = 10057952 O = 962066669
X = 925070678 O = 747101521	X = 179513842 O = 89793577	X = 538866973 O = 222479865	X = 144262103 O = 353844301
X = 595995309 O = 751411292	X = 883501364 O = 531273511	X = 727572818 O = 91717317	X = 7191668 O = 704554166

b

X			
	X	O	
	O	X	
			O

c

$$\begin{aligned}
 &660640090 \wedge 446956442 \wedge 906370688 \wedge \\
 &89793577 \wedge 538866973 \wedge 704554166 \\
 &= \underline{\underline{125309938}}
 \end{aligned}$$

Abbildung 2.5 Zobrist Hashing von Spielzuständen.

(2.5 c) Der Zobrist-Hash berechnet sich wie folgt, ist die aktuelle Position mit einem Kreuzspielstein oder einem Kreisspielstein besetzt, dann wähle den entsprechenden Wert aus (2.5 a). Dies wiederhole für jedes besetzte Spielfeld. Auf den bereits ermittelten Wert und den hinzukommenden Wert wird ein exklusives bitweises Oder (XOR) angewendet. In Python ist das Zeichen für die Funktion des exklusiven bitweisen Oder ein Zirkumflex (siehe Operatoren in der Berechnung 2.5 c). Das Ergebnis ist eine Adresse die exakt den Spielzustand (2.5 b) referenziert.

Spielzustände die gerade expandiert werden, können in die Übergangstabelle eingetragen werden, sollten diese nicht bereits in der Tabelle vorhanden sein. Ist dieser Spielzustand bereits in der Tabelle vorhanden, dann können die vorgeschlagenen besten Halbzüge aus der Tabelle ausgelesen und angewendet werden.

2.1.5 Heuristik

Eine Heuristik oder Bewertungsfunktion berechnet einen Nutzwert für einen gegebenen Spielzustand. Dieser Nutzwert gibt an, wie "wertvoll" diese Spielsituation hinsichtlich eines Sieges ist, sprich sie gibt an ob der Spieler in diesem Spielzustand eher gewinnen oder verlieren könnte. Trotz aller Optimierungen des Minimax Verfahrens (Alpha-Beta, Zugsortierung, Vermeidung von Redundanzen) wäre die Rechenzeit, für den zu durchsuchenden Baum, immer noch enorm hoch. Reale Zeitbeschränkungen z.B. bei Schach Spielen erlauben ein überaus langes Berechnen ohnehin nicht. Die Lösung ist das verwenden einer Heuristik. Der Kompromiss bei einer Heuristik ist: das Ergebnis wird geschätzt und ist nicht mehr sicher, aber die

Suche kann nach einem Zeitkriterium abgebrochen werden und die beste bisher gefundene Lösung wird zurückgegeben. Sollte die Bewertungsfunktion für einen Spielzustand z.B. einen sehr hohen Wert berechnen, dann besagt dieser, der Spieler der diesen Spielzustand erreicht wird wahrscheinlich gewinnen.

Die Qualität einer Heuristik ist ausschlaggebend für die Spielerischen Fähigkeiten eines Programms. Ein Programm welches, durch eine schlechte Stellungsbeurteilung (Heuristik) einen fatalen Spielzug des Gegners übersieht oder ignoriert, würde gegen ein Programm verlieren, welches diese Stellungen (Spielzustände) erkennt und ausnutzt bzw. entsprechend verhindert. Eine Bewertungsfunktion $B(s)$ für ein Schachspiel enthält folgende Elemente, wobei s der Parameter für den Spielzustand ist[Ert16, S. 119]:

$$B(s) = a_1 \times \text{Material} + a_2 \times \text{Bauernstruktur} + a_3 \times \text{Königssicherheit} \\ + a_4 \times \text{Springer im Zentrum} + a_5 \times \text{Läufer Diagonalabdeckung} + \dots,$$

das mit Abstand wichtigste Feature (Merkmal) Material nach der Formel

$$\text{Material} = \text{Material}(\text{eigenes Team}) - \text{Material}(\text{Gegner})$$

$$\text{Material}(\text{Team}) = \text{Anzahl Bauern}(\text{Team}) \times 100 + \text{Anzahl Springer}(\text{Team}) \times 300 \\ + \text{Anzahl Läufer}(\text{Team}) \times 300 + \text{Anzahl Türme}(\text{Team}) \times 500 \\ + \text{Anzahl Damen}(\text{Team}) \times 900$$

Diese Schach Heuristik ist entstanden aus der Zusammenarbeit von Schachexperten und Wissensingenieuren. Die Schachexperten verfügen über Wissen und Erfahrungen bezüglich des Schachspiels, der Strategien, guter Zugstellungen und schlechter Zugstellungen. Der Wissensingenieur hat die meist sehr schwierige Aufgabe dieses Wissen in eine, für ein Programm, anwendbare Form zu bringen (vgl. [Ert16, S. 118]).

Eine Heuristik ist stark Abhängig von ihrer Grundlage, d.h. eine Heuristik die für ein Schachspiel konzipiert wurde, berücksichtigt die Spielfiguren, das Spielfeld und die Spielregeln des Schachspiels. Wir können diese Heuristik nicht direkt auf Reversi oder Tic Tac Toe anwenden, weil eine Schach Heuristik nicht auf andere Spiele angewendet werden kann. Eine Reversi Heuristik kann z.B. auch nicht für das Spielen eines Tic Tac Toe Spiels verwendet werden. Es ist uns jedoch möglich das Konzept, sprich die Essenz der Heuristik Entwicklung, aus dieser Beispielheuristik für Schachspiele zu entnehmen und auf die Heuristik Entwicklung für Reversi und Tic Tac Toe anzuwenden.

Mehr zum Thema Heuristik Entwicklung in Kapitel 4 Modellierung und Entwurf, in diesem Kapitel werden wir ähnlich der gerade vorgestellten Heuristik, eigene Bewertungsfunktionen für Tic Tac Toe und Reversi entwerfen und in Kapitel 5 Implementierung, werden die modellierten Bewertungsfunktionen praktisch angewendet.

2.2 Verstärkendes Lernen(Reinforcement Learning)

Verstärkendes oder auch bestärkendes Lernen beschäftigt sich mit dem Problem, dass ein Entscheidung treffender Agent, innerhalb einer ihm unbekannten Umgebung, Aktionen (Entscheidungen) ausführen muss (Abbildung 2.6). Das Ziel des Agenten ist es, einen numerischen Wert zu maximieren. Dieser Wert wird durch numerische Belohnung oder Bestrafung verändert. Der Agent lernt das Verhältnis zwischen den möglichen Aktionen in einem Zustand und deren numerischer Bewertung. Führt eine Aktion in einem Zustand mehrfach zu wiederholt herausragender positiver Bewertung, dann wird der Agent diese Aktion in diesem Zustand erneut ausführen.

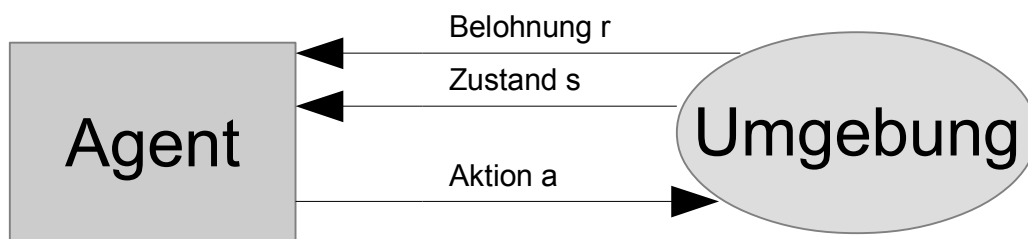


Abbildung 2.6 Der Agent und seine Wechselwirkung mit der Umgebung. Die Darstellung des Agenten und der Umgebung wird in verschiedenen Fachbüchern, die das verstärkenden Lernen behandeln, sehr ähnlich realisiert [Alp08, S. 398] und [Ert16, S. 290].

Wie kann sich der Agent die Bewertungen seiner Aktionen merken und sich daran erinnern? Dies ist möglich, weil der Agent über einen Erfahrungsspeicher verfügt z.B. eine Übergangstabelle. Der Agent schreibt neue Zustände, ausgeführte Aktionen und mögliche Bewertungen der Aktionen in die Tabelle. Vorher prüft der Agent ob der Zustand bereits in der Tabelle eingetragen ist. Existiert dieser Zustand in der Tabelle, hat der Agent Erfahrung in diesem Zustand gesammelt und kann

diese nutzen und anpassen.

Bei realen Problemen, wie dem lernen von Schach oder Reversi, erfolgt eine Belohnung oder Bestrafung nicht direkt nach einer Aktion des Agenten (verspätete Belohnung, eng. *delayed reward*). Erst nach Abschluss einer Partie, also nach einer Sequenz von bestimmten Aktionen, endet das Spiel und der Agent wird für einen Sieg belohnt oder für eine Niederlage bestraft. Eine große Schwierigkeit ist diese verspätete Belohnung am Ende einer Aktionssequenz auf die einzelnen Aktionen des Agenten aufzuteilen. Dieses Problem ist bekannt als Anerkennungszuweisung Problem (eng. *credit assignment problem*).

2.2.1 Ein Agent im Labyrinth

Nehmen wir an es existiere folgender Agent, er kann vier Aktionen ausführen, bewege dich nach oben, unten, rechts oder links und wird in einem ihm unbekannten Labyrinth ausgesetzt. Das Labyrinth ist die Umgebung und die Zustände der Umgebung verändern sich durch die Aktionen des Agenten (Übergänge), das heißt verändert der Agent seine Position innerhalb des Labyrinths, dann wechselt er von einem Ausgangszustand s , durch eine Aktion a , in einen neuen Zustand s' . Eine Aktion a ist immer Element der Menge aller möglichen Aktionen A . Welche Aktionen in einem bestimmten Zustand s möglich sind, wird durch die Funktion $A(s)$ oder $ACTIONS(s)$ bestimmt. Die Menge aller möglichen Zustände einer Umgebung bezeichnen wir als S , d.h. jeder einzelne Zustand s ist Element von S .

Der Agent lernt also, dass die Aktion 'bewege dich nach oben' den Ausgangszustand in einen neuen Zustand transformiert. Der neue Zustand s' wird durch die Übergangsfunktion $\delta(s, a)$ bestimmt. Führt der Agent die Aktion 'bewege dich nach oben' aus, dann ist jedoch die Zustandsveränderung abhängig von der individuellen Umgebung in der sich der Agent befindet, d.h. die Übergangsfunktion δ , wird von der Umgebung festgelegt und nicht vom Agenten. In einem Labyrinth kann der Agent nicht immer alle seiner vier Aktionen ausführen, denn er ist umringt von Mauer die seinen Aktionsradius beschränken. Würde er trotzdem eine unzulässige Aktion ausführen, dann verändert sich der Zustand der Umgebung nicht, denn der Agent würde sprichwörtlich "gegen die Wand laufen".

Nach einer endlichen Sequenz von Aktionen (Zustandsfolge oder Umgebungsverlauf) gelingt es dem Agenten den Ausgang des Labyrinths zu erreichen und er erhält eine numerische Belohnung (eng. *reward*), die Belohnung kann auch als Verstärkung (eng. *reinforcement*) oder Gewinn bezeichnet werden. Eine Gewinnfunktion $R(s)$ gibt die direkte Belohnung an, die der Agent erhält wenn er einen

Zustand s erreicht.

Die Aktionen die der Agent bei Erreichen des Ausgangs ausgeführt hat, werden im ersten Versuch und vielleicht in den nachfolgenden Versuchen wahrscheinlich nicht optimal sein. Nicht optimal in dem Sinne, dass die Aktionssequenz nicht die kürzeste sein wird. Der Agent kann den Wert für die numerische Belohnung maximieren, indem er eine optimale Strategie entwickelt, die den kürzesten Pfad findet. Eine optimale Strategie die für jeden möglichen Zustand eindeutig definiert, welche Aktion er durchführen muss, um so wenig wie möglich Aktionen zu verwenden und den Ausgang zu erreichen. Eine genauere Beschreibung der optimalen Strategie wird in den nachfolgenden Abschnitten gegeben.

2.2.2 Überwachtes vs. verstärkendes Lernen

Im Gegensatz zu den Lernverfahren beim überwachten Lernen fehlt dem Agenten beim verstärkenden Lernen ein Lehrer der dem Agenten genau sagt ob seine Aktion richtig oder falsch ist. Zudem wäre ein Lehrer, der dem Agenten für jeden Zustand genau sagt welches die richtige Aktion ist, sehr kostspielig. Oftmals ist für einen Zustand gar keine optimale Aktion möglich, erst die Aneinanderreihung von Aktionen und Zustandsübergängen kann optimal sein oder optimiert werden[Alp08, vgl. 397].

Ein überwachtes Lernverfahren wird zuerst mittels eines Trainingssets kontrolliert belehrt. Das Trainingsset für ein überwachtes Lernverfahren besteht aus verschiedenen Eigenschaften (Features) und einer den Eigenschaften zugeordneten Klasse beziehungsweise Zielvariable (Target Variable). Die Qualität der Zielwerte kann mittels Testsets ermittelt werden. Ein Testset ist ein Datenset bestehend aus Eigenschaften ohne die dazugehörigen Klassen. Abbildung 2.7 zeigt, wie ein Trainingsset aussehen könnte[Har12, S. 8]. Die Spalten Gewicht, Flügelspanne, Schwimmhäute und Rückenfarbe sind die Eigenschaften und die Spalte Spezies beinhaltet die Zielvariablen. Das überwachte Lernverfahren lernt mittels des Trainingsdatensets die Beziehungen zwischen den Eigenschaften und der Klassen.

Verstärktes Lernen umfasst die Probleme, bei denen in der Regel kein solches Trainingsdatenset vorliegt, welches genau festlegt ob eine Aktion in einem Zustand korrekt oder falsch ist. Bezogen auf ein Testdatenset wäre eine Aktion des Agenten, dass nennen einer Klasse hinsichtlich der gelernten Zusammenhänge aus den Trainingsdaten. Teilt man die Anzahl der korrekten Vorschläge durch die Anzahl aller Versuche, dann erhält man eine Kennzahl für die Qualität der Vorhersage. Sind alle Klassen der Testinstanzen richtig vorhergesagt, dann ist die Kennzahl genau Eins.

	Gewicht (g)	Flügelspanne (cm)	Füße mit Schwimmhäuten?	Rückenfarbe	Spezies
1	1000,1	125,0	Nein	Braun	Buteo jamaicensis
2	3000,7	200,0	Nein	Grau	Sagittarius serpentarius
3	3300,0	220,3	Nein	Grau	Sagittarius serpentarius
4	4100,0	136,0	Ja	Schwarz	Gavia immer
5	3,0	11,0	Nein	Grün	Calothorax lucifer
6	570,0	75,0	Nein	Schwarz	Campephilus principalis

Abbildung 2.7 Vogelspezies Klassifikation basierend auf vier Eigenschaften

Jede Zeile eines Testsets und jede Zeile eines Trainingssets ohne die Zielvariablen ist eine Instanz. Verstärkendes Lernen kann trotzdem vom überwachten Lernen profitieren, denn es ist möglich den Agenten in der Anfangsphase des verstärkten Lernens explizit zu programmieren und ihn dadurch auf bestimmte Auffälligkeiten oder Muster aufmerksam zu machen. Ist es zu kompliziert dies explizit zu programmieren, dann kann auch ein Mensch dem Agenten die richtigen Aktionen vorgeben.

Sehr nützlich werden diese beiden Unterstützungen der Anfangsphase des verstärkten Lernens, sobald die Dimensionen der Umwelt oder des Agenten eine bestimmte Größe überschreiten. Eine Aktionsdimension kann sehr wenige Aktionen beinhalten zum Beispiel die vier Aktionen bewege dich nach oben, unten, rechts oder links. Roboter die dem Menschen nachempfunden sind verfügen über bis zu 50 verschiedene Motoren für die einzelnen Gelenke. Diese müssen gleichzeitig angesteuert werden, was zu einem 50-dimensionalen Zustandsraum und einem 50-dimensionalen Aktionsraum führt[Ert16, vgl. 305 f.]. Bei solch großen Dimensionen können die Laufzeiten einiger verstärkender Lernverfahren massiv ansteigen, bis sie praktisch nicht mehr anwendbar sind. Gerade in der Anfangsphase des verstärkten Lernens kann darum ein Eingriff mittels überwachtem Lernen sehr Laufzeit schonend sein.

2.2.3 Markov Entscheidungsprozess

Der Markov Entscheidungsprozess (MEP) oder MDP (engl. Markov decision process) nach Russell und Norvig [RN12, S. 752 ff.] ist ein sequentielles Entscheidungsproblem für eine vollständige beobachtbare, stochastische Umgebung mit einem Markov-Übergangsmodell und additiven Gewinnen. Der MEP besteht aus einem Satz von Zuständen (mit einem Anfangszustand s_0), einem Satz Actions(s) von Aktionen in jedem Zustand, einem Übergangsmodell $P(s' | s, a)$ und einer Gewinnfunktion $R(s)$.

Ein sequentielles Entscheidungsproblem ist ein wichtiges Anwendungsgebiet des verstärkenden Lernens. Bei diesen Problemen ist dem Agenten der direkte Nutzen des Aktionsergebnisses nicht bekannt. Erst nach einer Folge von Aktionen wird dem Agenten eine Belohnung zugeteilt, z.B. ein Agent der das Schachspielen lernen soll, erhält keine direkte Belohnung nach den einzelnen Zügen. Erst am Ende einer Partie, wenn der König geschlagen ist, wird dem Agenten eine positive Verstärkung für einen Sieg oder eine negative Verstärkung für eine Niederlage zugeteilt (verspätet Belohnung).

Vollständig beobachtbare Spiele sind z.B. Schach, Reversi, Tic Tac Toe, 4-Gewinnt und Dame, denn jeder Spieler kennt immer den kompletten Spielzustand. Vollständig beobachtbare Spiele werden auch als Spiele mit vollständiger Information bezeichnet. Viele Kartenspiele wie zum Beispiel Skat, sind nur teilweise beobachtbar, denn der Spieler kennt die Karten des Gegners nicht oder nur teilweise [Ert16, S. 114].

Ein stochastischer Übergang ist nur in einer nicht deterministischen Umgebung möglich. Reversi, Tic Tac Toe und Schach sind deterministische Strategiespiele, d.h. jeder Nachfolgezustand ist eindeutig definiert, eine Aktionssequenz führt also immer zum selben Ergebnis. Backgammon ist ein nichtdeterministisches Strategiespiel, in diesem werden stochastische Übergänge durch ein Würfelergebnis bestimmt, es ist also vorher nicht eindeutig welcher Nachfolgezustand durch eine Aktion eintreten wird.

Das Übergangsmodell beschreibt das Ergebnis jeder Aktion in jedem Zustand. Ist das Ergebnis stochastisch, bezeichnet $P(s' | s, a)$ die Wahrscheinlichkeit, den Zustand s' zu erreichen, wenn die Aktion a im Zustand s ausgeführt wird. Handelt es sich um einen Markov-Übergang, dann ist die Wahrscheinlichkeit s' von s zu erreichen, nur von s abhängig und nicht vom Verlauf der vorherigen Zustände. Ganz ähnlich definiert Wolfgang Ertel die Markov-Entscheidungsprozesse [Ert16, S. 291]. Seine Agenten bzw. die Strategien der Agenten verwenden für die Bestimmung des nächsten Zustandes s_{t+1} nur Informationen über den aktuellen Zustand s_t und nicht über die Vorgeschichte. Dies ist gerechtfertigt, wenn die Belohnung einer Aktion nur von aktuellem Zustand und aktueller Aktion abhängt.

Additive Gewinne nach Russell und Norvig [RN12, S. 756] bestimmen über das zukunftsbezogene Verhalten des Agenten. Verwendet der Agent Additive Gewinne, dann bedeutet das für den Agenten, jeder Nutzen eines Zustandes in einer gewählten Zustandsfolge ist gleich Wertvoll. Zudem ist die Summe der Zustandsnutzen endlich, deshalb auch Modell des endlichen Horizonts. Der Nutzen einer

Zustandsfolge ist wie folgt definiert:

$$U_h([s_0, s_1, s_2 \dots]) = R(s_0) + R(s_1) + R(s_2) + \dots$$

Additive Gewinne können nur bei Spielen verwendet werden, die früher oder später immer in einem Endzustand terminieren. Spiele die unter Umständen nicht immer einen Endzustand erreichen haben keinen endlichen Horizont, sondern einen unendlichen Horizont, für diese Spiele ist ein Modell mit einem endlichen Horizont unangemessen, denn wir wissen nicht wie Lang die Lebensdauer des Agenten ist [KLM96, S. 250]. Das Modell des endlichen Horizonts oder **verminderte Gewinne** unterscheiden sich von den Additiven Gewinnen durch einen Vermeidungsfaktor γ . Der Verminderungsfaktor schwächt Zustände in der Zukunft immer weiter ab, d.h. je weiter ein Zustand in der Zukunft liegt, desto mehr wird er abgeschwächt. Der Nutzen für den ersten Zustand der Zustandsfolge wird nicht abgeschwächt. Ist γ gleich 1, sind die verminderten Gewinne gleich den additiven Gewinnen, die additiven Gewinne sind also ein Sonderfall der verminderten Gewinne.

$$U_h([s_0, s_1, s_2 \dots]) = R(s_0) + \gamma R(s_1) + \gamma^2 R(s_2) + \dots$$

Halten wir fest: die Nutzen einer gegebenen Zustandsfolge sind die Summe der verminderten Gewinne, die während der Folge erhalten werden.

Anwendung des MEP auf Reversi und Tic Tac Toe. Beide Strategiespiele sind sequentielle Entscheidungsprobleme, denn die einzelnen Züge werden nicht direkt Belohnt, erst am Spielende wird ein Gewinner und ein Verlierer oder ein Unentschieden verkündet und der Agent erhält eine verspätete Belohnung die er auf die Spielzugsequenz aufteilen muss (siehe nächster Abschnitt 2.2.5). Wie bereits erwähnt sind die beiden Strategiespiele vollständig beobachtbar und nicht stochastisch, somit sind sie deterministisch. Ein Übergangsmodell für die Wahrscheinlichkeiten der Zustandsübergänge ist für Reversi und Tic Tac Toe nicht sinnvoll, da beide Spiele nicht vom Zufall abhängen und für jede Aktion in jedem Zustand nur ein einziger Zustandsübergang möglich ist. Wir werden in dieser Arbeit ausschließlich additive Gewinne für Reversi und Tic Tac Toe verwenden, da diese nach einer endlichen Anzahl von Aktionen immer in einem Endzustand terminieren.

2.2.4 Optimale Taktiken

Nach Russell und Norvig [RN12, S. 757 f.] beeinflusst eine Taktik oder Strategie das Verhalten des Agenten, d.h. sie empfiehlt welche Aktion der Agent in jedem Zustand ausführen soll. Aus Tradition wird beim verstärkenden Lernen eine Taktik mit dem Symbol π gekennzeichnet. Die Abbildung der Zustände auf Aktionen ist

folgendermaßen definiert $\pi : S \rightarrow A$ oder $\pi(s) = a$. Abhängig von den Dimensionen der Umgebung existieren unterschiedlich viele Taktiken. Eine optimale Taktik wird bestimmt durch den erwarteten Nutzen bei Ausführung der Taktik π beginnend in einem Startzustand s :

$$U^\pi(s) = E \left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(S_t) \right]. \quad (2.1)$$

Eine optimale Taktik hat im Vergleich zu allen anderen möglichen Taktiken einen gleich hohen oder höheren erwarteten Nutzen. Eine solche optimale Taktik wird gekennzeichnet durch π_s^* :

$$\pi_s^* = \operatorname{argmax}_{\pi} U^\pi(s). \quad (2.2)$$

Es ist möglich, dass mehrere optimale Taktiken für ein Problem existieren. Russell und Norvig erklären, dass für eine optimale Strategie π_s^* , auch π^* geschrieben werden kann, denn wenn Taktik π_a^* optimal beim Beginn in a und Taktik π_b^* optimal beim Start in b sind und sie einen dritten Zustand c erreichen, gibt es keinen vernünftigen Grund, dass sie untereinander oder mit π_c^* nicht übereinkommen.

Mit diesen Definitionen ist der wahre Nutzen eines Zustands einfach $U^{\pi^*}(s)$ – d.h. die erwartete Summe verminderter Gewinne, wenn der Agent eine optimale Taktik ausführt. Wir schreiben dies als $U(s)$. Russell und Norvig unterstreichen den Sachverhalt, dass die Funktionen $U(s)$ und $R(s)$ ganz unterschiedliche Quantitäten sind, denn $R(s)$ gibt den "kurzfristigen" Gewinn, sich in s zu befinden an, wohingegen $U(s)$ den "langfristigen" Gesamtgewinn ab s angibt.

2.2.5 Temporale Differenz Lernen

Bei dieser Lernmethode werden die Nutzen der beobachteten Zustände an die beobachteten Übergänge angepasst, sodass sie mit den Bedingungsgleichungen (siehe Bellman-Gleichung) übereinstimmen. Allgemeiner können wir sagen, wenn ein Übergang vom Zustand s in den Zustand s' stattfindet, wenden wir die folgende Aktualisierung mit $U^\pi(s)$ an:

$$U^\pi(s) \leftarrow U^\pi(s) + \alpha(R(s) + \gamma U^\pi(s') - U^\pi(s)). \quad (2.3)$$

Hier ist α der Lernratenparameter. Weil diese Aktualisierungsregel die Differenz der Nutzen aufeinanderfolgender Zustände verwendet, wird sie auch häufig als TD-Gleichung (Temporale Differenz) bezeichnet [RN12, S. 966 f.]. Der Lernratenparameter α gibt an, wie stark neue Nutzwerte die derzeitige Bewertungsfunktion anpassen können.

Die Bellman-Gleichung für Nutzen, nach Russell und Norvig [RN12, S. 759]. Wir haben bisher festgestellt, dass, der Nutzen in einem Zustand die erwartete Summe von verminderten Gewinnen von diesem Punkt an ist. Daraus folgt, dass es eine direkte Beziehung zwischen dem Nutzen eines Zustandes und dem Nutzen seiner Nachbarn gibt: Der Nutzen eines Zustandes ist der unmittelbare Gewinn für diesen Zustand plus dem erwarteten verminderten Gewinn des nächsten Zustandes, vorausgesetzt, der Agent wählt die optimale Aktion. Das bedeutet, der Nutzen eines Zustandes ist gegeben durch:

$$U(s) = R(s) + \gamma \max_{a \in A(s)} \sum_{s'} P(s'|s, a) U(s'). \quad (2.4)$$

Diese Gleichung wird als Bellman-Gleichung bezeichnet, nach Richard Bellman(1957). Die Nutzen der Zustände - durch Gleichung 2.1 als die erwarteten Nutzen nachfolgender Zustandsfolgen definiert - sind Lösungen der Menge der Bellman-Gleichungen.

Anwendung des TD-Lernens

Samuels Damespiel Abschnitt 3.2.1 TD-Gammon Abschnitt 3.2.2

Verallgemeinerung beim verstärkenden Lernen

Problemanalyse und Anforderungsdefinition

» *Das Spiel ist die höchste Form der Forschung.* «
(Albert Einstein)

In diesem Kapitel werden folgende Aspekte behandelt: genauere Analyse der Aufgabenstellung, theoretische Anwendung der verschiedenen Lösungsansätze aus dem Grundlagenkapitel auf die beiden Strategiespiele Reversi und Tic Tac Toe, Einführung der Agentenmodelle, Beschreibung zweier bedeutender geschichtlicher Entwicklungen bezüglich dem lernen von Spielstrategien und definieren der Softwareziele in Anforderungen.

3.1 Die Problematik

Das Thema der Arbeit ist Untersuchung der Lernfähigkeit verschiedener Verfahren am Beispiel von Computerspielen. Bevor die Lernfähigkeit der Verfahren untersucht werden kann, müssen wir die Computerspiele festlegen und analysieren. Wie bereits erwähnt werden wir die Lernfähigkeit der Verfahren am Beispiel der Strategiespiele Reversi und Tic Tac Toe untersuchen (siehe Abbildung 3.1). Eine genaue Beschreibung der Spielregeln, der Siegesbedingungen und möglicher Strategien bezüglich Heuristiken, wird in Kapitel 4 Modellierung und Entwurf erfolgen. Die zentrale Frage ist: wie kann ein Programm lernen ein Computerspiel erfolgreich zu spielen?

Die Spieltheorie aus Abschnitt 2.1 liefert gleich mehrere Ansätze diese Frage zu beantworten. Die kombinatorische Suche (Abschnitt 2.1.1 Minimax) probiert einfach alle Möglichkeiten aus und liefert die beste gefundene Möglichkeit zurück. Die reine kombinatorische Minimax Suche ist praktisch jedoch nicht anwendbar,

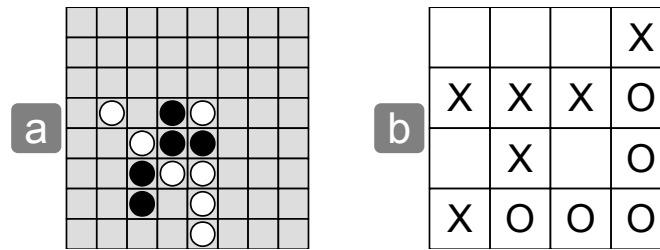


Abbildung 3.1 Spielsituationen (Spielzustände oder Stellungen) die während einer Partie (a) Reversi oder (b) Tic Tac Toe auftreten können.

da, wie bereits im Abschnitt Minimax beschrieben wurde, die Anzahl der Kombinationsmöglichkeiten mit der Komplexität des Ausgangsproblems exponentiell ansteigt.

Selbst mit einer Kürzung von ganzen Unterbäumen des Suchbaums, ist die Rechenzeit für realistische Probleme nicht handhabbar (siehe Abschnitt 2.1.2 Alpha-Beta-Kürzung). Das Kürzen des Suchbaums kann unter Umständen mit einer iterativ vertiefenden Tiefensuche verbessert werden (siehe Abschnitt 2.1.3 Iterativ vertiefende Tiefensuche). Die iterativ vertiefende Suche könnte Züge, z.B. in einer Tiefe von 2, sortieren. Vielversprechende Spielzüge könnten zu erst ausprobiert werden und das Alpha-Beta Verfahren könnte einen größeren Teil des Suchbaums kürzen.

Eine weitere Möglichkeit die Suche nach dem optimalen Spielzug in jeder Spielsituation zu verbessern, ist das Vermeiden von Übergängen. Ein Übergang oder Transition ist ein Spielzustand der mehrfach, an verschiedenen Stellen, in einem Suchbaum auftreten kann. Übergangstabellen und Transitions sind ausführlich in Abschnitt 2.1.4 Übergangstabellen erläutert. Eine Vermeidung dieser Übergänge könnte eine weitere Rechenzeitverringerung bewirken.

Die Heuristik oder Bewertungsfunktion ist wohl der wichtigste Leistungsfaktor aus den Verfahren der Spieltheorie (siehe Abschnitt 2.1.5 Heuristik). Eine Heuristik kann jeden Knoten des Suchbaums bewerten (Nutzwert) und nicht nur die Blätter. Dies ermöglicht es die Suche nach einer bestimmten Zeitspanne oder iterierten Tiefe abubrechen und den Spielzustand mit der besten Bewertung zurück zu geben.

Die Vorteile einer Heuristik sind die Limitierung der Zeit, die für eine Suche benötigt wird und dass das bisher beste gefundene Ergebnis zurück gegeben wird. Der große Nachteil einer Bewertungsfunktion ist, ein ermittelter Nutzwert für einen Spielzustand kann falsch sein. Die Qualität einer Heuristik ist also ausschlaggebend für die Spielstärke des Programms. Heuristiken sind zudem stark abhängig von ihrer Spielgrundlage, d.h. sowohl Reversi als auch Tic Tac Toe benötigen eigene

Heuristiken, die individuell den Nutzen der Stellungen bewerten.

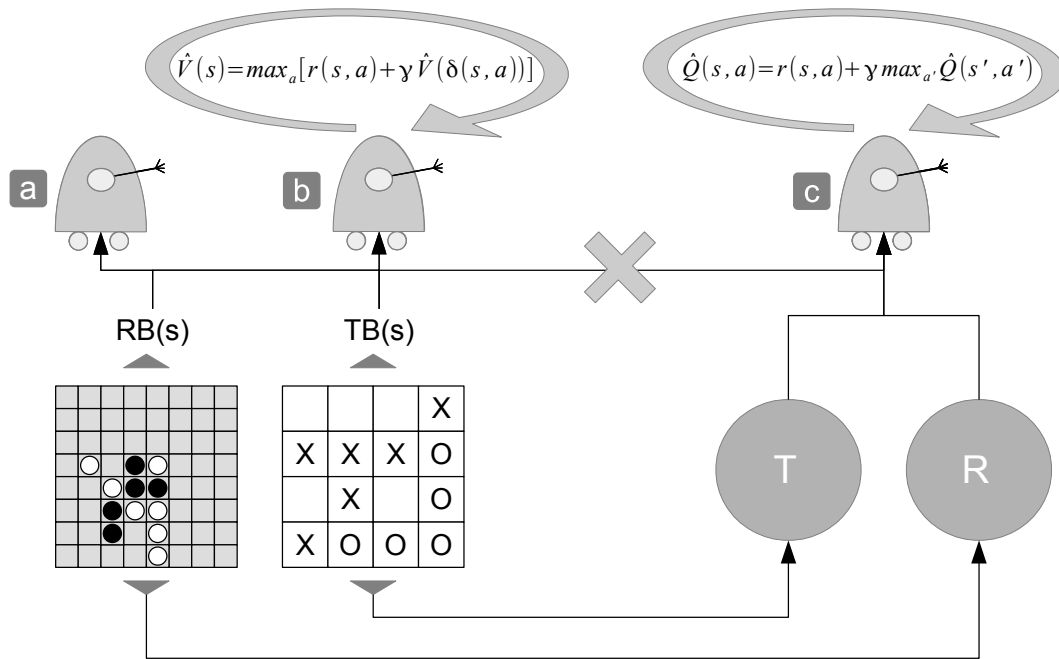


Abbildung 3.2 Die Projektproblematik.

Die drei Agenten aus Abbildung 3.2 repräsentieren drei Programme, die mit unterschiedlichen Verfahren, die selbe Aufgabe lösen. Die Aufgabe lautet: für jeden Spielzustand der Strategiespiele Reversi und Tic Tac Toe sollen die Agenten (a), (b) und (c) einen optimalen Spielzug (eine Aktion) vorschlagen, d.h. die Agenten müssen eine optimale Strategie anwenden. Eine optimale Strategie verwendet für jeden Möglichen Spielzustand immer den bestmöglichen Spielzug.

Agent (a) ist ein nicht lernender Agent, der Verfahren aus der Spieltheorie anwendet und dem die Bewertungsfunktionen $RB(s)$ und $TB(s)$ zur Verfügung stehen. $RB(s)$ ist die Reversi Bewertungsfunktion, mit einem Reversi Spielzustand s als Eingabeparameter. $TB(s)$ ist die Tic Tac Toe Bewertungsfunktion, mit einem Tic Tac Toe Spielzustand s als Eingabeparameter.

Agent (b) ist ein lernender Agent, der dem Agenten (a) sehr ähnlich ist, mit dem Unterschied, dass er die Gewichtungen (Faktoren a_x) der Bewertungsfunktionen mittels Spielerfahrung lernt. Agent (b) spielt eine festgelegte Anzahl von Spielen z.B. gegen sich selbst und verwendet eine Aktualisierungsfunktion $\hat{V}(s, a)$. Diese

Funktion wurde bereits in Abschnitt ?? Wert-Iteration und Dynamische Programmierung behandelt. Zusammengefasst ist diese Funktion eine Iterationsvorschrift, die mit der Bellman-Rekursionsgleichung die Gewichtungen der Heuristik so lange anpasst, bis diese sich nicht weiter verändern lassen und gegen eine optimale Strategie konvergieren.

Agent (c) ist ein lernender Agent, der im Gegensatz zu den Agenten (a) und (b) über kein Modell der Spielwelt verfügt, also ist ihm nicht bekannt in welchen Spielzustand ihn seine Aktionen führen. Er erhält auch keine Bewertungsfunktionen $RB(s)$ und $TB(s)$ für Spielzustände s . Alles was der Agent erhält sind zwei Mengen T und R . Menge T enthält alle möglichen Aktionen die der Agent in einer bestimmten Tic Tac Toe Spielsituation ausführen darf, äquivalent dazu enthält Menge R alle möglichen Aktionen die der Agent in einer bestimmten Reversi Spielsituation ausführen darf. Nach einer bestimmten Anzahl von Aktionen erhält der Agent verspätet unterschiedliche Belohnungen für einen Sieg, eine Niederlage oder ein Unentschieden des Spiels. Der Agent verwendet das Lernverfahren $\hat{Q}(s, a)$ aus Abschnitt ??, um eine optimale Strategie zu lernen.

Sind alle Agenten implementiert, können wir beginnen die Lernfähigkeit der Agenten zu vergleichen. Wie werden die beiden lernenden Agenten gegen den nicht lernenden Agenten abschneiden? Welcher Agent wird der, der am meisten gewinnt und welcher Agent wird am meisten Verlieren? Wie viel Zeit benötigen die Agenten für die Berechnung der optimalen Strategie für die beiden Strategiespiele (Training)? Diese Fragen werden in Kapitel ?? Auswertung beantwortet.

3.2 Existierende Softwarelösungen

Wir werden in diesem Teilabschnitt kurz einige der bekanntesten Softwarelösungen vorstellen. Dabei konzentrieren wir uns besonders auf die Konzepte, die die Programmierer angewendet haben, um Starke Computergegner zu realisieren. Alle hier vorgestellten Programme haben folgendes gemeinsam: sie sind gegen sehr gut menschliche Spieler getestet worden und es sind Anwendungen für 2-Spieler Strategiespiele. Ein großer Unterschied ist, dass Samuels Damespiel deterministisch und TD Gammon nichtdeterministische Spiele als Programmgrundlage haben.

3.2.1 Samuels Damespiel

Arthur L. Samuel schrieb 1955 ein Programm, dass Dame spielen konnte und mit einem einfachen Lernverfahren seine Parameter verbessern konnte. Sein Programm hatte dabei jedoch Zugriff auf eine große Zahl von archivierten Spielen, bei denen

jeder einzelne Zug von Experten bewertet war. Damit verbesserte das Programm seine Bewertungsfunktion. Um eine noch weitere Verbesserung zu erreichen, ließ Samuel sein Programm gegen sich selbst spielen. Das Credit Assignment löste er auf einfache Weise. Für jede einzelne Stellung während eines Spiels vergleicht er die Bewertung durch die Funktion $B(s)$ mit der durch Alpha-Beta-Pruning berechneten Bewertung und verändert $B(s)$ entsprechend. 1961 besiegte sein Dame-Programm den viertbesten Damespieler der USA. Mit dieser bahnbrechenden Arbeit war Samuel seiner Zeit um fast dreißig Jahre voraus [Ert16, S. 120 f.].

3.2.2 TD-Gammon

Das TD-Lernen zusammen mit einem Backpropagation-Netz mit 40 bis 80 verdeckten Neuronen wurde sehr erfolgreich angewendet in TD-Gammon, einem Programm zum Spielen von Backgammon, programmiert vom Entwickler Gerald Tesauro im Jahr 1992. Die einzige direkte Belohnung für das Programm ist das Ergebnis am Ende eines Spiels. Eine optimierte Version des Programms mit einer 2-Züge-Vorausschau wurde mit 1,5 Millionen Spielen gegen sich selbst trainiert. Es besiegte damit Weltklasseten Spieler und spielt so gut wie die drei besten menschlichen Spieler [Ert16, S. 304].

Sind Lernverfahren überhaupt Sinnvoll?

3.3 Anforderungen

Die nachfolgend definierten Anforderungen bilden die Grundlage des zu programmierenden Prototypen. Sie legen fest welche Funktionalitäten der Prototyp anbieten sollte und somit definieren sie die zu realisierenden Softwareziele des Projekts. Die Fett gedruckten Wörter sind die Bezeichnungen der Anforderungen. Die Zahlen vor den Bezeichnungen sind die Identifikatoren und der anschließende Text ist eine genauere Beschreibung der Anforderungen.

1. **Programmieren des Strategiespiels Tic Tac Toe:**

Das Programm soll die Tic Tac Toe Regeln anwenden, die Spielzustände sinnvoll realisieren und für Menschen lesbar darstellen können, eine Funktion beinhalten die einen Spielzug nach den Regeln durchführt und den Spielzustand dementsprechend anpasst, ein 4x4 Spielbrett mit 16 Spielfeldern bereitstellen und kein 3x3 Spielbrett wie bei dem klassischen Tic Tac Toe, den Spielzustand zurück geben können und Funktionen anbieten die einen Sieger bzw. Verlierer ermittelt. Ein beliebiger Spielzustand ist eine Repräsentation einer

beliebigen Spielsteinstellung die während eines Spiels auftritt, sie beinhaltet alle sich noch auf den Spielfeldern befindenden Spielsteine, deren genaue Positionen und die Zugehörigkeit der Spielsteine zu den einzelnen Spielern.

2. Programmieren des Strategiespiels Reversi:

Dieses Programm soll die gleichen Funktionalitäten anbieten wie das Tic Tac Toe Spiel, mit folgenden Ausnahmen: die Spielregeln sollen Reversi(Othello) Spielregeln sein und das Spielbrett besteht aus 8x8, also 64 Spielfeldern.

3. Funktionstest der Strategiespiele:

Die Funktionen der programmierten Strategiespiele aus 1. und 2. sollen mit Unittests überprüft werden, um die Korrektheit der Programmlogik sicherzustellen.

4. Heuristiken für beide Strategiespiele entwerfen:

Im Abschnitt 2.1.5 Heuristik haben wir bereits eine Schach Bewertungsfunktion $B(s)$ gesehen. Diese erhält einen Spielzustand s als Parameter und evaluiert diese Stellung hinsichtlich der in der Bewertungsfunktion enthaltenen Merkmale und den dazugehörigen Gewichtungen a_x . Für die beiden Strategiespiele aus Anforderung 1 und 2 sollen ebenfalls Heuristiken mit angepassten Merkmalen entworfen werden.

5. Entwickeln eines Agenten ohne Lernen:

Der Agent soll die Konzepte aus Abschnitt 2.1 Spiele mit Gegner anwenden. Besonders die Alpha-Beta-Suche, eine 2-Halbzüge Vorausschau und eine feste Heuristik. Dieser Agent bekommt eine Heuristik übergeben und es ist ihm nicht erlaubt diese zu verändern bzw. die Gewichtungen der Merkmale der Heuristik. Der Agent spielt Tic Tac Toe und Reversi ohne Lernen aber mit einer festen Stellungsbewertungsfunktion (Heuristik).

6. Entwickeln eines Agenten der Heuristiken lernen:

Ein Agent der ebenfalls die Konzepte aus Abschnitt 2.1 Spiele mit Gegner realisieren soll. Der Unterschied zwischen diesem Agenten und dem Agenten aus Anforderung 5 ist, dieser Agent lernt die Gewichtungen der Heuristik-Merkmale auf Basis von Erfahrung, die er beim Spielen des Strategiespiels erhält.

7. Entwickeln eines Agenten der ohne zusätzliches Wissen lernt:

Dieser Agent unterscheidet sich stark von den Agenten die in den Anforderungen 5 und 6 definiert wurden, denn ihm wird kein zusätzliches Wissen, in Form einer Heuristik, mitgeteilt. Er soll auch keinen Minimax- oder Alpha-Beta-Suchbaum erstellen und durchsuchen. Vielmehr verfügt der Agent über

eine eigene Lernstrategie (siehe Abschnitt 2.2 Verstärkendes Lernen), die Aktionen auswählt bis ein Spielergebnis feststeht und dann die Auswahl der Aktionen je nach Spielergebnis anpasst. Erfahrung sammelt der Agent im Spiel gegen sich selbst.

8. Auswerten der Agentenqualität:

Die Agenten sollen gegeneinander Spielen und die Spielergebnisse sollen erfasst werden. Die Auswertung dieser Ergebnisse soll zeigen welcher Agent wie oft gegen welchen Agenten verloren, gewonnen oder unentschieden gespielt hat.

Modellierung und Entwurf

In diesem Kapitel werden die funktionalen Anforderungen aus dem Abschnitt ?? spezifiziert. Modelle für die einzelnen funktionalen Anforderungen sollen entwickelt werden. Die Modelle veranschaulichen das geforderte funktionale Verhalten der Software. Voraussetzung für die Entwicklung der Modelle ist die Konkretisierung der funktionalen Anforderungen. Diese Konkretisierung beinhaltet die Festlegung der Bestandteile die für eine Implementierung der funktionalen Anforderung benötigt werden. Ziel des Kapitels ist es, die wichtigsten Bestandteile einer funktionalen Anwendung herauszubilden, dieses Bestandteile zu definieren und zu veranschaulichen.

4.1 Tic Tac Toe

Tic Tac Toe ist ein Spiel, welches mit genau zwei Spielern gespielt wird. Während eines gesamten Spiels darf ein Spieler nur Kreuze setzen und der andere Spieler nur Kreise. Ein Spieler der während einer Partie nur Kreuze setzen darf wird als Kreuzspieler und sein Gegner als Kreisspieler bezeichnet. Wir können uns die Kreuze und Kreise als Spielsteine vorstellen, die sobald sie auf das Spielfeld gesetzt wurden, nicht mehr verändert oder verschoben werden können. Das Spielbrett ist eine 4×4 große Matrix, also können maximal 16 Spielsteine in diese Matrix gesetzt werden. Der Kreuzspieler muss immer als erster beginnen. Im ersten Spielzug stehen dem Kreuzspieler 16 mögliche Positionen zur Verfügung. Die Anzahl der möglichen Positionen reduziert sich jede Runde um 1, weil jede Runde genau ein gesetzter Spielstein ein Spielfeld besetzt. Folglich ist die maximale Länge einer Spielzugsequenz bei einem 4×4 Spielfeld gleich 16. Es ist auch möglich, dass das Spiel bereits vor der 16. Runde beendet wird.

Spielzüge jeder Spieler setzt abwechselnd entweder ein Kreuz oder einen Kreis in ein Spielfeld des Spielbretts. Ein Spielstein kann in jedes der 16 Spielfelder ge-

setzt werden, außer dieses ist bereits mit einem anderen Spielstein besetzt, dann muss der Spieler ein anderes Spielfeld auswählen. Die Spieler führen solange Ihre Spielzüge aus, bis eine Siegesformation eines Spielsteintyps erreicht ist oder alle Spielfelder besetzt sind.

Ziel des Spiels ist es vier Kreuze oder vier Kreise in einer bestimmten Position anzuordnen. Es existieren mehrere unterschiedliche Anordnungen von Spielsteinen, die das Spiel beenden und einen Sieg herbeiführen. Bei einem 4×4 Spielfeld existieren vier vertikale, vier horizontale und zwei diagonale Anordnungen der Spielfiguren, welche einen Sieg herbeiführen würden. Insgesamt zehn verschiedene Siegesanordnungen für beide Spieler. Sind alle Spielfelder besetzt und für keinen der Spieler ist eine Siegesformation aufgetreten, dann gewinnt beziehungsweise verliert keiner der beiden Spieler und es entsteht ein Unentschieden. Gewinnt ein Spieler mit einer Siegesanordnung seiner Spielsteine, dann verliert der andere Spieler dadurch automatisch in gleicher Höhe (Nullsummenspiel).

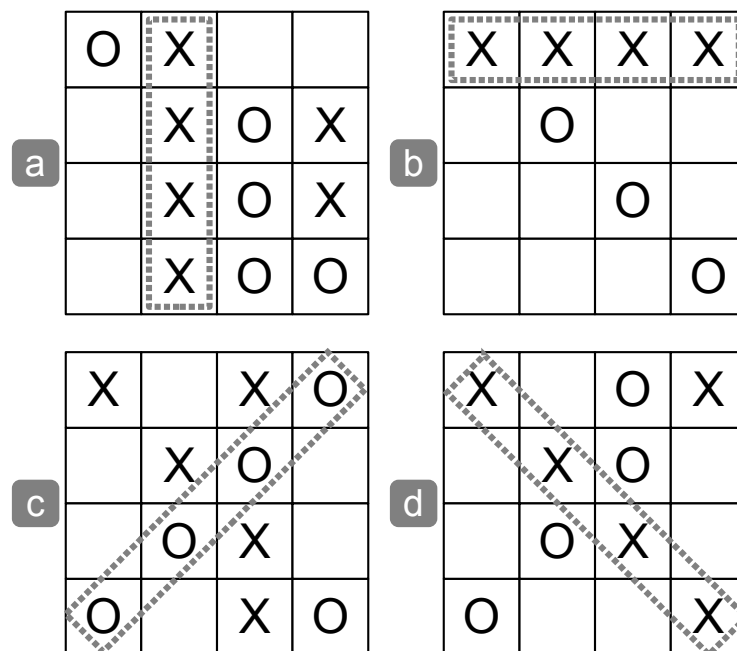


Abbildung 4.1 Veranschaulichung der vertikalen (a), horizontalen (b) und diagonalen (c, d) Siegesbedingung.

Vier mögliche Siegesformationen sind in Abbildung 4.1 dargestellt. (a) Der Kreuz-

spieler gewinnt knapp gegen seinen Kontrahenten mit einer ununterbrochenen vertikalen Anordnung seiner Spielsteine. Der Kreisspieler hätte fast eine diagonale Reihe aus Kreisen verbunden, diese wurde jedoch vom Kreuzspieler mit einem Spielstein unterbrochen. Zudem hätte der Kreisspieler auch fast eine vertikale Reihe ohne Unterbrechungen vervollständigt, aber der Sieg des Kreuzspielers hat die Partie vorher beendet. (b) Der Kreuzspieler erreicht eine horizontale Siegesanordnung, vier Kreuzsteine in einer horizontalen Zeile angeordnet. (c) Der Kreisspieler besiegt den Kreuzspieler mit einer diagonalen Siegesanordnung. (d) Der Kreuzspieler gewinnt ebenfalls durch eine diagonale Siegesformation seiner Spielsteine.

4.1.1 Lernen mit Strategieverbesserung

Die nachfolgend aufgestellte Strategie ist keine optimale Strategie, das heißt es ist nicht möglich mit dieser Strategie immer zu gewinnen oder mindestens ein Unentschieden zu erreichen. Das Ziel des Lernverfahrens ist es, diese nicht optimale Strategie in eine optimale Strategie oder zumindest eine annähernd optimale Strategie zu transformieren. Eine optimale Strategie würde gegen unaufmerksame oder unerfahrene Gegner verhältnismäßig oft Gewinnen und nicht gegen diese Verlieren, Unentschieden können trotzdem vorkommen. Ist der Gegner ein perfekter TicTacToe Algorithmus oder ein TicTacToe Großmeister, dann sollte die optimale Strategie überwiegend Unentschieden hervorbringen. Eine optimale Strategie sollte in 100 Spielen gegen einen Großmeister oder eine andere optimale Strategie (dieselbe optimale Strategie oder möglicherweise eine andere) 100 Unentschieden erringen. Siege sind theoretisch höherwertiger als Unentschieden, aber innerhalb der TicTacToe Spielwelt sind diese gegen einen Großmeister oder einen perfekten Algorithmus äußerst unwahrscheinlich.

Unser Lernalgorithmus oder im Kontext des verstärkenden Lernens unser Agent, erhält eine Belohnung von +1 wenn er eine Party (eine komplette Spielzugsequenz bis ein Spielergebnis feststeht) TicTacToe gewinnt. Verliert er eine Party, dann wird er bestraft mit dem numerischen Wert -1. Bei einem Unentschieden wird der Agent ebenfalls belohnt, aber die Belohnung ist nicht so hoch wie bei einem Sieg, denn wir wollen das Verhalten des Lernverfahrens so trainieren, dass es eher einen Sieg erlangen wird als ein Unentschieden, aber auf jeden Fall eine Niederlage vermeidet. Der Agent soll immer versuchen diesen numerischen Wert zu maximieren, darum wird er eine Niederlage vermeiden. Der Agenten könnte auch so trainiert werden, dass er immer absichtlich verlieren würde, dafür müsste jeder, vom Agenten ausgeführte, Spielzug (egal welcher Spielzug) eine hohe negative numerische Bestrafung hervorbringen. Das Ziel des Agenten wäre dann, schnellstmöglich ein Ende des Spiels zu provozieren und weil verlieren sicherer und kürzer ist als gewinnen oder ein Unentschieden, würde der Agent lernen absichtlich zu verlieren.

Interessant wäre das Spielergebnis, wenn zwei Agenten gegeneinander antreten würden, die immer schnellstmöglich verlieren wollen, dann entstünden theoretisch ausschließlich Unentschieden.

Kombination von überwachtem und verstärkenden Lernen

Dem Lernverfahren eine Strategie vorzugeben, welche für jeden Zustand festlegt welche Aktion ausgeführt werden soll, ähnelt stark dem überwachten Lernen. Bei einem überwachten Lernverfahren würde der Agent eine Liste von Zuständen und Aktionen als Eingabeparameter bekommen, in dieser Liste sind den Zuständen Aktionen zugeordnet. Der Agent lernt die Liste von Zustand-Aktions-Paaren und dadurch lernt er, bei welcher Spielfiguren Anordnung (Zustand), welche Position mit seiner Spielfigur belegt werden sollte (Aktion). Die Zustände wären in diesem Trainingsset Eigenschaften (Features) und die Aktionen wären Zielvariablen (Target Values). In der Theorie wird überwachtes Lernen mit verstärkendem Lernen kombiniert, um ein schnell konvergierendes Lernverfahren zu erhalten. Die Konvergenz bezieht sich auf die Strategie, welche das Lernverfahren optimieren soll. Der Agent versucht diese nicht optimale Strategie schrittweise in eine optimale Strategie umzuwandeln und wenn ihm dies gelingt, dann hat die verbesserte nicht optimale Strategie eine Konvergenz mit der optimalen Strategie erreicht, dass bedeutet die Ausgangsstrategie wurde zu einer optimalen Strategie weiterentwickelt.

Warum eigentlich kein reines überwachtes oder verstärkendes Verfahren? Eine optimale Strategie nur durch überwachtes Lernen zu erstellen, würde ein Trainingsset voraussetzen, indem jeder Zustand der Spielwelt erfasst ist und jeder dieser Zustände müsste genau eine optimale Aktion abbilden. Bei komplexeren Probleme kann das sehr hohe Kosten verursachen oder es ist überhaupt nicht möglich, denn für viele Zustände ist die optimale Aktion nicht bekannt. Das vier mal vier TicTacToe ist noch ein recht simpler Vertreter der Strategiespiele und soll dazu dienen, die Anwendung und Modellierung der Lernverfahren und der Strategien zu veranschaulichen. Ob ein Strategiespiel im Kontext der Lernverfahren simpler oder komplexer ist, hängt von seinen Zustands- und Aktionsdimensionen ab. Die Größe des Spielfelds, die Anzahl verschiedener Aktionen pro Spielsituation und die durchschnittliche Anzahl der Spielzüge, entscheiden über die Komplexität des Strategiespiels. Wenn das überwachte Lernen einer optimalen Strategie aufgrund größerer Dimensionen nicht möglich ist, können wir dann nicht ein verstärkendes Lernverfahren implementieren?

Unterabschnitt 4.1.2 behandelt die Thematik des reinen verstärkenden Lernens. Daher werden die Vor- und Nachteile des reinen verstärkenden Lernens jetzt nicht weiter analysiert. Wir konzentrieren uns in diesem Abschnitt darauf, welche Strate-

gien entwickelt, wie diese Strategien praktisch angewendet und wie die angewendeten Strategien optimiert werden können. Bei der Entwicklung der Strategie muss besonders darauf geachtet werden, worauf der Agent aufmerksam gemacht werden soll. Unter Umständen ist es besonders Wahrscheinlich zu gewinnen, wenn eine besondere Spielstellung erreicht wurde oder einzelne Spielfelder erleichtern einen Sieg und sollten daher eher besetzt werden als andere möglicherweise unwichtigerer Spielfelder. Die Ausgangsstrategie ist also ein wichtiger Faktor für die Konvergenz-Geschwindigkeit.

Das Spielfeld

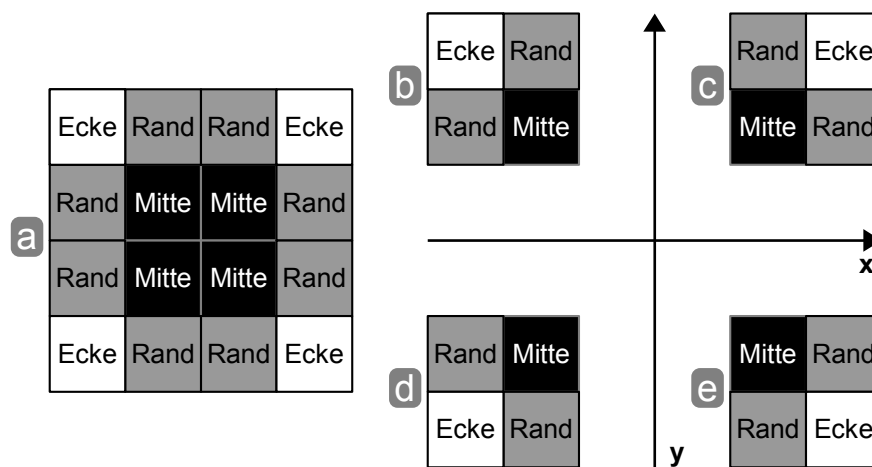


Abbildung 4.2 Symmetrie Eigenschaften des vier mal vier Tic Tac Toe Spielfelds.

Um eine Strategie zu entwickeln werden wir uns zuerst das Spielfeld ansehen und dieses analysieren. Das vier mal vier Tic Tac Toe Spielfeld hat 16 Spielfelder, vier Eckfeldern, vier Mittelfeldern und acht Randfeldern (siehe Abbildung 4.2 a). Ziehen wir eine horizontale und eine vertikale Achse durch das Spielfeld, dann sind bestimmte Symmetrieeigenschaften zu erkennen, Abbildung 4.2 zeigt b und c, sowie d und e sind symmetrisch zur y-Achse, b und d, sowie c und e sind symmetrisch zur x-Achse und b und e, sowie d und c sind symmetrisch, wenn man sie an der x-Achse und der y-Achse spiegelt. Diese Symmetrieeigenschaften sind wichtig für die Reduktion der Strategien, das heißt wenn eine Strategie auf b angewendet werden kann, dann auch auf c, d und e.

Kontrolliere die Mitte

Um über bestimmte Spielfelder reden zu können, müssen wir eine konkrete Identifikation der einzelnen Spielfelder vornehmen. In Abbildung 4.3 wird daher jedem der Spielfelder ein Index zugewiesen.

(0,0)	(0,1)	(0,2)	(0,3)
(1,0)	(1,1)	(1,2)	(1,3)
(2,0)	(2,1)	(2,2)	(2,3)
(3,0)	(3,1)	(3,2)	(3,3)

Abbildung 4.3 Die Indizes der einzelnen Spielfelder.

Die Eröffnungsstrategie konzentriert sich auf die Kontrolle der Mittelfelder. Hat der Agent beziehungsweise das Lernverfahren das Recht auf den ersten Zug befindet er sich immer in Zustand s_0 . In diesem Zustand sind alle Spielfelder leer und der Agent kann durch Zufall eines der vier mittleren Felder wählen. Der Agent trifft diese Entscheidung zufällig, weil zu diesem Zeitpunkt und in diesem Zustand alle vier Mittelfelder die gleiche positive numerische Belohnung erbringen (siehe Abbildung 4.4 1). Die Rand- und Eckfelder haben keine numerische Belohnung, aber auch keine numerische Bestrafung für den Agenten, so wird sichergestellt, dass das Lernverfahren sich für ein mittleres Spielfeld entscheidet. Nachdem der gegnerische Spieler seine Spielfigur gesetzt hat, soll der Agent die zweite Spielfigur ebenfalls auf ein mittleres Feld setzen, jedoch eher auf ein mittleres Spielfeld, welches sich in einer Reihe ohne eine gegnerische Spielfigur befindet.

Von jetzt an betrachten wir die beiden Kontrahenten Alice (Spielfiguren X) und Bob (Spielfiguren O) als zwei Instanzen des selben Lernverfahrens, dass heißt der Agent spielt gegen einen anderen Agenten mit exakt dem selben Verhalten. In Abbildung 4.4 (2a) setzt Alice ihre Spielfigur auf das Feld (2,1) und Bob auf (1,2). Die Strategie der Mittelfeld Kontrolle offenbart unserer Agentin Alice zwei Aktionsmöglichkeiten mit positiver Belohnung. Setzt Agentin Alice ihre Spielfigur auf die Mittelfelder (1,1) oder (2,2), dann erhält sie eine numerische Belohnung von +0,5. Alice entscheidet durch Zufall welches der beiden Felder mit der gleichgroßen größtmöglichen Belohnung sie auswählt. Alice entscheidet sich durch Zufall für das Spielfeld (1,1) und Bob, der ebenfalls der Strategie der Mittelfeld Kontrolle folgt, entscheidet sich für das letzte nicht besetzte Mittelfeld (Abbildung 4.4 3a).

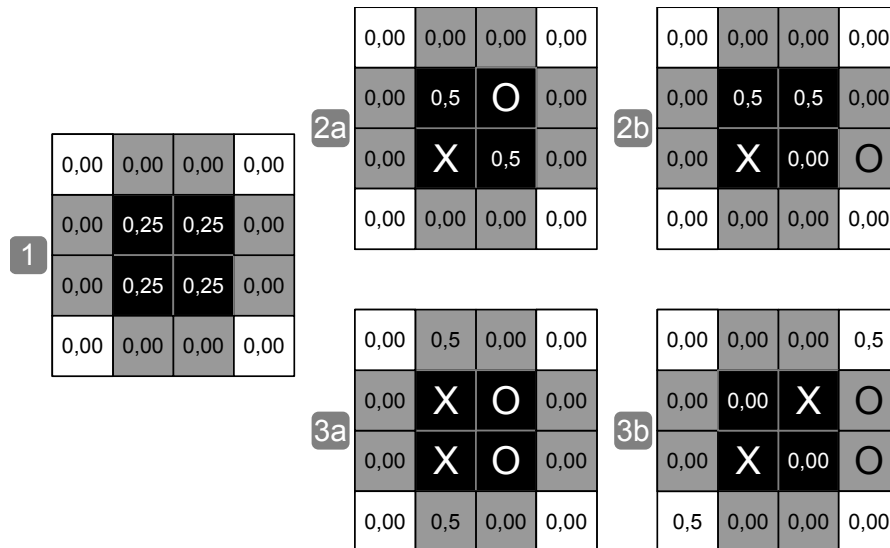


Abbildung 4.4 Strategie um die Mitte zu kontrollieren.

Sollte Agent Bob eine andere gelernte Strategie verfolgen und zum Beispiel ein Randfeld besetzen, dann werden Agentin Alice andere Aktionen von ihrer Strategie vorgeschlagen. In einem alternativen Spielverlauf (Abbildung 4.4 2b) setzt Agent Bob seine Spielfigur nicht auf das Spielfeld (1,2), sondern auf das Spielfeld (2,3). Die Strategie der Kontrolle der Mittelfelder bevorzugt Mittelfelder, die in einer leeren vertikalen, horizontalen oder diagonalen Reihe sind, bezogen auf die bereits gesetzte Spielfigur. Das Mittelfeld (2,2) wird uninteressant für die Strategie von Alice, weil eine mögliche horizontale Reihe aus vier gleichen Spielsteinen bereits nicht mehr möglich ist. Dahingegen schlägt die Strategie die Mittelfelder (1,1) und (1,2) mit einer numerischen Belohnung von +0,5 vor. Setzt Alice ihre Spielfigur auf das Mittelfeld (1,1), dann ist eine vertikale Verbindung von vier gleichen Spielfiguren möglich und setzt Alice ihre Spielfigur auf das Mittelfeld (1,2), dann ist eine diagonale Verbindung von vier gleichen Spielfiguren möglich.

Agentin Alice entscheidet durch Zufall ihre Spielfigur auf das Mittelfeld (1,2) zu setzen, denn der Agent soll durch Zufall entscheiden, wenn für mehrere Aktionen in einem Zustand die gleich Hohe größtmögliche Belohnung vergeben wird. Agent Bob setzt daraufhin seine Spielfigur auf das Randfeld (1,3). Ein neue Spielsituation (Zustand) entsteht (Abbildung 4.4 3b). Alice erhält von der Strategie der Mittelfeld Kontrolle die Aktionsoptionen (0,3) und (3,0). Beide Aktionsoptionen werden mit +0,5 belohnt. Diese Strategie berücksichtigt nicht, dass Agent Bob bereits zwei Spielsteine in einer ungestörten vertikalen Verbindung positioniert hat. Daher kann Alice durch Zufall entscheiden welche Aktion sie ausführt. Eine bessere Strategie würde Alice in diesem Zustand diese Option nicht lassen, denn das Eckfeld (0,3)

ist in dieser Spielsituation attraktiver als das Eckfeld (3,0). Eckfeld (0,3) erweitert die diagonale ungestörte Verbindung von Agentin Alice auf eine Länge von drei und gleichzeitig würde die vertikale ungestörte Verbindung von Agent Bob gestört werden. Eine optimale Strategie würde Alice mit einer Belohnung von +0,75 das Eckfeld (0,3) empfehlen.

Bevor wir Alice und Bob die Möglichkeit geben die Strategie selber zu verbessern beziehungsweise eigenständig zu entwickeln und solche Auffälligkeiten und Muster in die Strategie zu integrieren, werden wir die Ausgangsstrategie noch um eine Teilstrategie erweitern.

Verteidigung ist der beste Angriff

Diese Strategie konzentriert sich darauf, gegnerische Stellungen zu erkennen und dahingehend Gegenmaßnahmen einzuleiten. Abbildung 4.5 verdeutlicht gefährliche Spielsituationen, in denen die Strategie Gegenmaßnahmen vorschlagen sollte. Horizontale Verbindungsmöglichkeiten (1a - 1d)

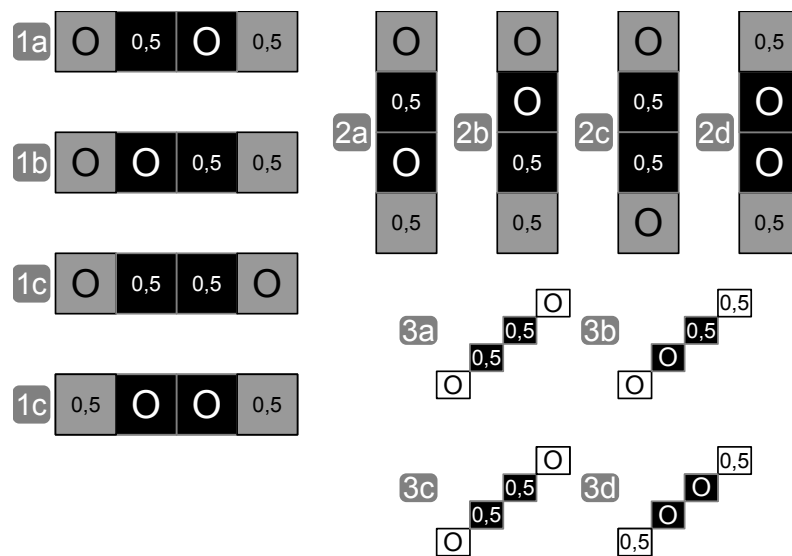


Abbildung 4.5 TicTacToe Angriffsstrategien (aus der Sicht von Bob) und Verteidigungsstrategien (aus der Sicht von Alice).

4.1.2 Lernen ohne Strategie

4.2 Reversi

Das Spiel Reversi oder auch Othello genannt, wird auf einem 8x8 Spielbrett gespielt. Es ist ein Spiel für zwei Personen die gegeneinander antreten. Eine Person setzt weiße runde Spielsteine und die andere Person schwarze runde Spielsteine. Jede neue Partie Reversie beginnt im selben Ausgangszustand (siehe Abbildung 4.6). Die Spieler setzen nacheinander in ihren Spielzügen genau einen Spielstein. Wie beim klassischen Tic Tac Toe aus Abschnitt 4.1 behalten die Spieler während des gesamten Spiels ihre Spielsteinfarbe und einmal gesetzte Spielsteine können ihre Position nicht mehr verändern.

	0	1	2	3	4	5	6	7
0								
1								
2								
3				●	○			
4				○	●			
5								
6								
7								

Abbildung 4.6 Ausgangssituation einer beginnenden Partie Reversi. Die äußeren weiß hinterlegten Reihen in denen sich Zahlen befinden, dienen dazu die Positionen der einzelnen Spielfelder genau zu definieren. In der Ausgangssituation befinden sich bereits 2 weiße Spielsteine an den Positionen (3,4) und (4,3) und zwei schwarze Spielsteine an den Positionen (3,3) und (4,4).

Eine Besonderheit von Reversi ist, dass gesetzte Spielsteine ihre Farbe ändern können. Werden z.B. zwei weiße Spielsteine von zwei schwarzen in einer horizontalen Linie eingeschlossen, dann werden die weißen Spielsteine in schwarze umgewandelt beziehungsweise umgedreht. Das Erobern der gegnerischen Spielsteine ist vom aktuell gesetzten Spielstein abhängig. Die Siegesbedingung von Reversi ist es, am Ende des Spiels, mehr Spielsteine seiner eigenen Farbe zu haben als der Gegner Spielsteine in seiner Farbe hat. Das Spiel endet, wenn keiner der beiden Spieler mehr einen Spielstein, nach den Regeln des Spiels, auf das Spielbrett setzen kann.

Spielzüge sind bei Reversi nicht beliebig, sie unterliegen bestimmten Regelungen. Eine Regel für das Setzen eines Spielsteins ist, nur wenn mindestens ein geg-

nerischer Spielstein erobert wird, darf ein Spielstein an diese Stelle gesetzt werden. Weiterhin darf ein Spielstein nur dann gesetzt werden wenn, ein anderer Spielstein (Anker), mit der gleichen Farbe, in einer diagonalen, vertikalen oder horizontalen Linie, existiert. Es dürfen auch keine freien Felder zwischen dem zu setzenden Stein und dem Anker liegen. Ein Anker ist ein Spielstein mit der selben Farbe wie der zu setzende Spielstein. Ein zu setzender Spielstein kann mehrere Anker haben, aber er muss mindestens einen und kann maximal acht Anker haben.

Der Anker in Abbildung 4.7 ist der schwarze Spielstein an der Stelle (3,3). (a) In diesem Beispiel soll schwarz am Zug sein und einen Spielstein platzieren. Die Positionen (3,1) und (3,6) ermöglichen eine horizontale, (5,3) ermöglicht eine vertikale und (5,1), (0,6) und (7,7) ermöglichen eine diagonale Verbindung mit dem Anker auf Position (3,3). Die meisten gegnerischen Spielsteine könnte schwarz erobern, indem er seinen Spielstein auf das Spielfeld (7,7) setzt. (b) Setzt der Spieler seinen schwarzen Spielstein an die Position (3,1), dann hat dieser 3 Anker. Einen vertikalen Anker (0,1), einen horizontalen Anker (3,3) und einen diagonalen Anker (0,4). Insgesamt würden 5 weiße Spielsteine erobert werden, also 2 mehr als in (a) maximal möglich wären.

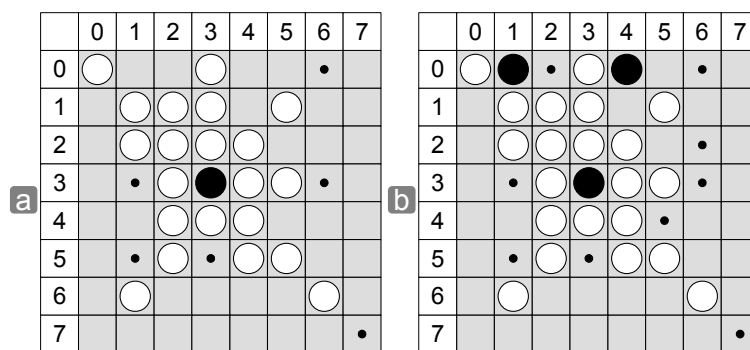


Abbildung 4.7 Zwei möglicherweise nicht in der Praxis auftretende Spielsituationen, die einzig verdeutlichen sollen welche Zugmöglichkeiten der Spieler mit den schwarzen Spielsteinen hat und warum nur diese Züge möglich sind. Die kleinen schwarzen Punkte zeigen die Positionen an denen ein schwarzer Spielstein gesetzt werden darf. (a) Eine Spielsituation mit maximal einem möglichen Anker. (b) Eine Spielsituation mit maximal 3 möglichen Ankern für die Position (3,1).

4.3 Tic Tac Toe Heuristik

4.4 Reversi Heuristik

4.5 Die Strategiespielumgebungen Tic Tac Toe und Reversi

getPossibleActions()

Berechnen eine Liste von Positionskoordinaten in der Form:

$[Tupel(X_aKoordinate, Y_bKoordinate), \dots]$.

Diese Koordinaten geben die Spielfelder an, welche in einem korrekten Spielzug, von dem aktuellen Spieler, belegt werden können. Aus dieser Liste von Aktionen wählt der Spieler oder der Agent eine mögliche Aktion aus.

4.6 Agent des Zufalls

Der Agent des Zufalls ist der womöglich schlechteste Spieler. Seine Entscheidungen werden durch Suchverfahren, Heuristiken oder Lernverfahren beeinflusst. Theoretisch sollte dieser Agent im Vergleich zu den anderen Agenten am meisten verlieren und am wenigsten gewinnen, denn er wird Strategielos eine zufällige Aktion aus einer Menge von möglichen Aktionen in einem Spielzustand auswählen. Die Menge von möglichen Aktionen wird von den Spielumgebungen Tic Tac Toe und Reversi bereitgestellt (siehe Funktion `getPossibleActions()`). Der Zufallsagent selbst benötigt lediglich eine Funktion:

getRandomAction(possibleActionList).

Diese Funktion erhält eine Liste von möglichen Aktionen und liefert eine zufällig ausgewählte Aktion aus dieser Liste zurück.

4.7 Agent ohne Lernen

Der Agent ohne Lernen bedient sich diverser Spieltheoretischer Verfahren aus dem Grundlagenkapitel 2.1 Spiele mit Gegner. Auf der Basis des alpha-beta gekürzten

Minimax Suchbaumverfahrens versucht der Agent bis zu einer festgelegten Suchtiefe ein optimales Ergebnis zu finden. Die festgelegte Suchtiefe wurde aus dem Abschnitt 2.1.3 Iterativ vertiefende Tiefensuche in den Algorithmus des nicht lernenden Agenten übernommen. Diese maximale Suchtiefe begrenzt die Rechenzeit des Agenten, sodass der Agent beim explorieren und expandieren des Suchbaums irgendwann abbricht und das bisher beste gefundene Ergebnis zurück gibt.

Diese Rechenzeitverbesserung ist nur durch die Verwendung einer Heuristik möglich. Wie bereits in Abschnitt 2.1.5 Heuristik erklärt, ermöglicht es die Heuristik oder Bewertungsfunktion auch nicht Blattknoten des Suchbaums zu evaluieren, sprich den Nutzen von nicht Endzuständen und Endzuständen zu berechnen. Die Qualität der Heuristik ist ausschlaggebend für die Qualität (Spielstärke) dieses nicht lernenden Agenten. Der nicht lernende Agent hat keine Möglichkeit diese Heuristik anzupassen. Dahingegen kann der Agent mit TD-Lernen die Parameter der Ausgangsheuristik, anhand seiner Spielerfahrung, anpassen. Der Agent ohne Lernen bietet folgende Funktionalitäten:

getStrategicTicTacToeAction(ticTacToeGameState)

Der Input dieser Funktion ist ein Tic Tac Toe Objekt, welches den aktuellen Spielstatus repräsentiert. Wie bereits erklärt sucht diese Funktion mittels Alpha-Beta-Suche bis zu einer begrenzten Suchtiefe nach dem bestmöglichen Zustandsnutzen. Dieser Zustandsnutzen wird durch die in Abschnitt 4.3 entworfene Tic Tac Toe Heuristik berechnet. Der zurückgegebene Wert ist die Aktion, welche die erste Aktion des Pfades (Aktionssequenz) zum gefundenen bestmöglichen Zustandsnutzen ist.

getStrategicReversiAction(reversiGameState)

Diese Funktion ist der Funktion getStrategicTicTacToeAction(ticTacToeGameState) sehr ähnlich, nur dass diese auf die Reversi Strategiespielwelt angewendet wird. Der Input der Funktion ist somit ein Reversi Objekt und die verwendete Heuristik ist ebenfalls auf Reversi zugeschnitten(siehe Abschnitt 4.4). Der Output ist die vorgeschlagene bestmögliche Aktion, im aktuellen Spielzustand, hinsichtlich der abgeschnittenen Suche und der Reversi Bewertungsfunktion.

Alternative Realisierung wäre z.B. die Aufteilung des Agenten ohne Lernen in zwei Agentenklassen. Ein Agent für Tic Tac Toe und ein Agent für Reversi. Beide Agenten ohne Lernen würden dann über eine Funktion getStrategicAction(gameState) verfügen. Eine andere alternative wäre die Übergabe der Heuristiken an die Funktionen. In einer Programmiersprache in der Funktionen einer höheren Ordnung (Higher-order functions) erlaubt sind, könnten die Heuristiken für Reversi und Tic Tac Toe als Eingabeparameter übergeben werden. Auf diese Weise müsste nur ein

nicht lernender Agent und eine Funktion `getStrategicAction(gameState, heuristic-Function)` implementiert werden. Wir wollen die funktionale Programmierung in dieser Arbeit jedoch nicht anwenden, sondern nur eine mögliche alternative Implementierung aufzeigen. Diese beiden alternativen Realisierungen können auch auf die lernenden Agentenmodelle übertragen werden.

4.8 Agent mit TD-Lernen

Die Aufgabe des Agenten mit TD-Lernen ist, dass verbessern einer gegebenen Heuristik. Unter Verwendung dieser möglicherweise verbesserten Heuristik, soll der Agent eine möglichst optimale Aktion auswählen. Der Agent verbessert die Bewertungsfunktion durch Aktualisierung bzw. Anpassung der Parameter $\theta = \theta_1, \dots, \theta_n$.

$$\hat{U}_\theta(s) = \theta_1 f_1(s) + \theta_2 f_2(s) + \dots + \theta_n f_n(s)$$

4.9 Agent mit Q-Lernen

Implementierung

In diesem Kapitel: //TODO Einführung in das Kapitel

5.1 Tic Tac Toe

5.2 Reversi

5.3 Suchbaumverfahren

5.4 Heuristiken

5.5 TD-Q-Lernen

Listing 5.1 TD-Q-Lernen Algorithmus

```
1 def Q-Lernen(s', r',  $\alpha$ ,  $\gamma$ ):
2     if istTerminalzustand(s):
3          $Q[s, \text{None}] \leftarrow r'$ 
4     if s ist nicht None:
5         inkrementiere  $N_{sa}[s, a]$ 
6          $Q[s, a] \leftarrow Q[s, a] + \alpha(N_{sa}\{s, a\})$ 
               $\quad \cdot (r + \gamma \max_{a'} Q[s', a'] - Q[s, a])$ 
7      $s, a, r \leftarrow s', \text{argmax}_{a'}, f(Q[s', a'], N_{sa}), r'$ 
8     return a
```

Der in Listing 5.1 skizzierte Algorithmus ist, leicht abgewandelt, im Lehrbuch für künstliche Intelligenz von Russell und Norvig [RN12, S. 974] zu finden. Dieser ist bereits leicht modifiziert in seiner Notation und nachdem wir die Einzelheiten des Algorithmus geklärt haben, wird die Notation weiter angepasst, bis sie dem Quell-

code des Prototypen entspricht.

Der Q-Lernen Algorithmus verwendet einige persistente (d.h. beständige oder dauerhafte) Variablen und Entitäten. Persistent deshalb, weil sie die einzelnen Funktionsaufrufe überdauern:

- **Q** ist eine Tabelle mit Aktionswerten, indiziert nach Zustand und Aktion. Der Aufruf $Q[s, a]$ liefert z.B. einen Aktionswert (Q-Wert) für eine Aktion a in einem Zustand s . Zu Beginn des Lernprozesses sind alle Werte dieser Tabelle leer.
- N_{sa} ist eine Tabelle mit Häufigkeiten für Zustand / Aktions-Paare. Diese ist wie Q anfangs leer. Jedes mal wenn ein Zustand / Aktions-Paar durchlaufen wird, welches bereits durchlaufen wurde, dann wird der Tabelleneintrag $N_{sa}[s, a]$ inkrementiert d.h. um den Wert 1 erhöht.
- **s** ist der vorhergehende Spielzustand, anfangs leer. Berücksichtigen wir den Zeitlichen Aspekt, dann wäre s zu einem Zeitpunkt t geschrieben s_t und ein darauffolgender Spielzustand wäre $s_t + 1$. Der direkt auf s folgende Spielzustand wird auch als s' (s Prime) bezeichnet.
- **a** ist die vorhergehende Aktion, anfangs leer. Wird die Aktion a im Zustand s ausgeführt, dann wird der Zustand s' bzw. s_{t+1} erreicht. Eine Aktion die in s' ausgeführt werden kann bezeichnen wir als a' oder a_{t+1} .
- **r** ist die Belohnung die dem Agenten von der Umgebung zugeteilt wird, anfangs leer, wenn der Agent eine Aktion a in einem Zustand s ausführt. Wir können eine Funktion $r(s, a)$ definieren. Die Funktion $r(s, a)$ wird für die meisten Spielzustände $s \in S$ den Wert 0 liefern. Für Endzustände der jeweiligen Strategiespiele wird die Funktion $r(s, a)$ andere Werte liefern. Ist r die Belohnung dafür Aktion a in Zustand s auszuführen, dann ist r' (r Prime) die Belohnung dafür Nachfolgeaktion a' in Nachfolgezustand s' auszuführen.

Der Q-Lernen Algorithmus bekommt folgende Eingabeparameter übergeben:

- **s'** ist der aktuelle Spielzustand und gleichzusetzen mit der aktuellen Wahrnehmung des Agenten. Wie bereits erklärt ist s' der Nachfolgezustand von s .
- **r'** ist das Belohnungssignal, welches der Agent erhält, wenn er eine Aktion a' im Zustand s' ausführt.
- α aaa
- γ aaa

Was ist jedoch der Unterschied zwischen einer Funktion $r(s, a)$ und einer Funktion $Q(s, a)$? Die Funktion $r(s, a)$ ist von der Umgebung definiert und kann vom Agenten nicht beeinflusst werden. Sollte diese Funktion dem Agenten eine numerische Bestrafung von -0,5 zuweisen, dann kann der Agent dies nicht ändern. Der Agent soll versuchen die Zusammenhänge der Zustands/Aktions-Paare zu lernen und Entscheidungen basierend auf seinen Lernerfahrungen zu treffen. Dies bezeichnen wir dann als Q-Lernen. Die vom Agenten gelernten Zusammenhänge werden in Q-Werten gespeichert. Folglich wird in $Q(s, a)$ oder $Q[s, a]$ die gelernte Erfahrung des Agenten, für ein Zustand/Aktions-Paar, gespeichert.

Konzentrieren wir uns nachfolgend auf die Aktualisierung dieser Q-Werte.

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha(R(s) + \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)) \quad (5.1)$$

Validierung

In diesem Kapitel: //TODO Einführung in das Kapitel

6.1 Messbare Testkriterien

6.2 Modultests

6.2.1 TicTacToe

6.2.2 Reversi

6.2.3 Lernverfahren 1

Empirisches Protokoll

6.2.4 Lernverfahren 2

Empirisches Protokoll

6.2.5 Persistenz

6.3 Systemtest

Auswertung

In diesem Kapitel: //TODO Einführung in das Kapitel

7.1 Belastbarkeit und Grenzen der Lernverfahren

7.2 Optimale Anwendungsspiele für die Lernverfahren

7.3 Gegenüberstellung der Lernverfahren

7.4 Bewertung der Strategien

7.5 Menschlicher oder mechanischer Trainer?

Literatur

- [Alp08] Ethem Alpaydin. *Maschinelles Lernen*. 1. Aufl. Oldenbourg, 2008.
- [Bei14] Christoph Beierle. *Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 5. Aufl. Springer, 2014.
- [Ert16] Wolfgang Ertel. *Grundkurs Künstliche Intelligenz: Eine praktische Einführung*. 4. Aufl. Springer, 2016.
- [Har12] Peter Harrington. *Machine Learning: IN ACTION*. 1. Aufl. Manning, 2012.
- [KLM96] Leslie Pack Kaelbling, Michael L. Littman und Andrew W. Moore. „Reinforcement Learning: A Survey“. In: *Jornal of Artificial Intelligence Research* 4 (1996), S. 237–285.
- [Lö93] Jan Löschner. *Künstliche Intelligenz: Ein Handwörterbuch für Ingenieure*. 1. Aufl. VDI, 1993.
- [Ras16] Sebastian Raschka. *Machine Learning mit Python*. 1. Aufl. MIT Press, 2016.
- [RN12] Stuart Russel und Peter Norvig. *Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz*. 3. Aufl. Pearson, 2012.
- [Zob70] Albert L. Zobrist. „A new hashing method with application for game playing“. In: *Technical Report 88* (1970), S. 1–12.

I am an appendix!

Far far away, behind the word mountains, far from the countries Vokalia and Consonantia, there live the blind texts. Separated they live in Bookmarksgrove right at the coast of the Semantics, a large language ocean. A small river named Duden flows by their place and supplies it with the necessary regelialia. It is a paradisiatic country, in which roasted parts of sentences fly into your mouth. Even the all-powerful Pointing has no control about the blind texts it is an almost unorthographic life One day however a small line of blind text by the name of Lorem Ipsum decided to leave for the far World of Grammar. The Big Oxmox advised her not to do so, because there were thousands of bad Commas, wild Question Marks and devious Semikoli, but the Little Blind Text didn't listen. She packed her seven versalia, put her initial into the belt and made herself on the way. When she reached the first hills of the Italic Mountains, she had a last view back on the skyline of her hometown Bookmarksgrove, the headline of Alphabet Village and the subline of her own road, the Line Lane. Pityful a rethoric question ran over her cheek, then

A.1 Section in appendix!

Far far away, behind the word mountains, far from the countries Vokalia and Consonantia, there live the blind texts. Separated they live in Bookmarksgrove right at the coast of the Semantics, a large language ocean. A small river named Duden flows by their place and supplies it with the necessary regelialia. It is a paradisiatic country, in which roasted parts of sentences fly into your mouth. Even the all-powerful Pointing has no control about the blind texts it is an almost unorthographic life One day however a small line of blind text by the name of Lorem Ipsum decided to leave for the far World of Grammar. The Big Oxmox advised her not to do so, because there were thousands of bad Commas, wild Question Marks and devious Semikoli, but the Little Blind Text didn't listen. She packed her seven versalia, put her initial into the belt and made herself on the way. When she reached the first hills of the Italic Mountains, she had a last view back on the skyline of her

Anhang A: I am an appendix!

hometown Bookmarksgrove, the headline of Alphabet Village and the subline of her own road, the Line Lane. Pityful a rethoric question ran over her cheek, then

Another appendix? What the heck?

B.1 Section in appendix!

Far far away, behind the word mountains, far from the countries Vokalia and Consonantia, there live the blind texts. Separated they live in Bookmarksgrove right at the coast of the Semantics, a large language ocean. A small river named Duden flows by their place and supplies it with the necessary regalia. It is a paradisiacal country, in which roasted parts of sentences fly into your mouth. Even the all-powerful Pointing has no control about the blind texts it is an almost unorthographic life. One day however a small line of blind text by the name of Lorem Ipsum decided to leave for the far World of Grammar. The Big Oxmox advised her not to do so, because there were thousands of bad Commas, wild Question Marks and devious Semikoli, but the Little Blind Text didn't listen. She packed her seven versalia, put her initial into the belt and made herself on the way. When she reached the first hills of the Italic Mountains, she had a last view back on the skyline of her hometown Bookmarksgrove, the headline of Alphabet Village and the subline of her own road, the Line Lane. Pityful a rethoric question ran over her cheek, then

Acknowledgements

Acknowledgements go to the back!