

ars digitalis

Ulrich Furbach
Emanuel Kitzelmann
Tilmann Michaeli
Ute Schmid *Hrsg.*

Künstliche Intelligenz für Lehrkräfte

Eine fachliche Einführung mit didaktischen
Hinweisen

 Springer Vieweg

ars digitalis

Reihe herausgegeben von

Peter Klimczak, FG Angewandte Medienwissenschaften, Brandenburgische Technische
Universität, Cottbus, Deutschland

Die Reihe ars digitalis wird herausgegeben von Prof. Dr. Dr. Peter Klimczak.

Sollen technische und kulturelle Dispositionen des Digitalen nicht aus dem Blickfeld der sie Erforschenden, Entwickelnden und Nutzenden geraten, verlangt dies einen Dialog zwischen den IT- und den Kulturwissenschaften. Ausgewählte Themen werden daher jeweils gleichberechtigt aus beiden Blickrichtungen diskutiert. Dieser interdisziplinäre Austausch soll einerseits die Kulturwissenschaften für technische Grundlagen, andererseits Entwickler derselben für kulturwissenschaftliche Perspektiven auf ihre Arbeit sensibilisieren und den Fokus auf gemeinsame Problemfelder schärfen sowie eine gemeinsame ‚Sprache‘ jenseits der Fachbereichsgrenzen fördern. Notwendig ist eine solche interdisziplinäre Auseinandersetzung nicht zuletzt deshalb, um den vielfältigen technischen Herausforderungen an Mensch, Kultur und Gesellschaft ebenso informiert wie reflektiert zu begegnen.

In dieser Reihe finden nicht nur Akteure aus Wissenschaft, Forschung und Studierende aktuelle Themen der Digitalisierung fundiert aufbereitet und begutachtet, auch interessierte Personen aus der Praxis werden durch die interdisziplinäre Herangehensweise angesprochen.

Peter Klimczak, Dr. phil. et Dr. rer. nat. habil., ist außerplanmäßiger Professor an der Brandenburgischen Technischen Universität und IT-Verfahrensverantwortlicher und IT-Infrastrukturverantwortlicher für das Berliner Schulwesen.

Ulrich Furbach • Emanuel Kitzelmann •
Tilman Michaeli • Ute Schmid
Hrsg.

Künstliche Intelligenz für Lehrkräfte

Eine fachliche Einführung mit didaktischen
Hinweisen

Hrsg.

Ulrich Furbach
University of Koblenz
Koblenz, Deutschland

Emanuel Kitzelmann
Technische Hochschule Brandenburg
Brandenburg, Deutschland

Tilman Michaeli
Technische Universität München
München, Deutschland

Ute Schmid
Universität Bamberg
Bamberg, Deutschland

ISSN 2662-5970
ars digitalis

ISSN 2662-5989 (electronic)

ISBN 978-3-658-44247-7

ISBN 978-3-658-44248-4 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-44248-4>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jede Person benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des/der jeweiligen Zeicheninhaber*in sind zu beachten.

Der Verlag, die Autor*innen und die Herausgeber*innen gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autor*innen oder die Herausgeber*innen übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Petra Steinmueller

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Wenn Sie dieses Produkt entsorgen, geben Sie das Papier bitte zum Recycling.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
Ulrich Furbach und Ute Schmid	
Literatur.....	5
Teil I Grundlegende Konzepte der KI	
2 Suche im Problemraum	9
Ute Schmid	
2.1 Methodische Einführung	10
2.1.1 Repräsentation von Problemen.....	11
2.1.2 Blinde Suchverfahren.....	14
2.1.3 Heuristische Suchverfahren	17
2.1.4 Definition einer Heuristik	19
2.2 Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinärität.....	21
2.3 Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	21
2.4 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	22
Literatur.....	22
3 Lernen aus Daten	25
Tilman Michaeli, Emanuel Kitzelmann, Stefan Seegerer und Ralf Romeike	
3.1 Methodische Einführung	27
3.1.1 Überwachtes Lernen.....	27
3.1.2 Unüberwachtes Lernen	31
3.1.3 Verstärkendes Lernen.....	33
3.2 Gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinärität	36
3.3 Vorschläge für den Unterricht	38

4	Schließen aus Wissen	39
	Ulrich Furbach und Christoph Benzmüller	
4.1	Methodische Einführung	40
4.1.1	Logisches Schließen	41
4.1.2	Wissensrepräsentation	44
4.1.3	Beschreibungslogiken	45
4.1.4	Alltagsschließen	46
4.1.5	Menschliches Schließen	47
4.2	Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität	48
4.3	Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	49
4.4	Literatur zum Weiterlesen und Quellen	50
	Literatur	50
Teil II Maschinelles Lernen		
5	Lernen mit Neuronalen Netzen	53
	Emanuel Kitzelmann	
5.1	Methodische Einführung	54
5.1.1	Ein einzelnes künstliches Neuron – das einfache Perzeptron	55
5.1.2	Lernen eines einfachen Perzeptrons aus Daten	58
5.1.3	Lernen in neuronalen Netzen: Gradientenabstieg	59
5.1.4	Mehrschichtige Neuronale Netze und Backpropagation	64
5.2	Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität	66
5.3	Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	66
5.4	Literatur zum Weiterlesen und Quellen	67
	Literatur	67
6	Analytisches vs. konnektionistisches Paradigma	69
	Udo Frese und Uwe Lorenz	
6.1	Methodische Einführung	71
6.1.1	Analytischer Ansatz: Die pq -Formel	71
6.1.2	Konnektionistischer Ansatz: Ein neuronales Netz	72
6.1.3	Trainingsdaten für quadratische Gleichungen	74
6.1.4	Das gelernte Neuronale Netz	74
6.1.5	Diskussion des Vergleiches	77
6.2	Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität	78
6.2.1	Datensatzbias	78
6.2.2	Wichtigkeit der Datensatzannotation	79
6.3	Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	79
	Literatur zum Weiterlesen und Quellen	80

7 Verstärkendes Lernen	81
Uwe Lorenz	
7.1 Methodische Einführung	82
7.2 Wirkprinzip.....	85
7.2.1 Verhalten: Zweckmäßige Interaktion mit der Umwelt	86
7.2.2 Lernen: Auf der Suche nach optimalem Verhalten.....	87
7.3 Vorschläge für den Unterricht	93
7.4 Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinärität.....	95
7.5 Weiterführende Hinweise.....	96
Literatur.....	97
8 Tiefes Lernen	99
Udo Frese und Uwe Lorenz	
8.1 Methodische Einführung	101
8.1.1 Die Funktion eines Neurons in einem Neuronalen Netz.....	101
8.1.2 Organisation in Schichten	102
8.1.3 Die Konvolutionsschicht	104
8.1.4 Ein Konvolutionsnetz (Convolutional Neural Network, CNN)....	107
8.1.5 Eine Analyse der Merkmale eines bekannten Netzwerkes	110
8.2 Beispiele aus der Lebenswelt, Gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinärität.....	113
8.3 Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	113
8.4 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	116
Literatur.....	116
9 Erklärbarkeit	117
Ute Schmid	
9.1 Methodische Einführung	118
9.1.1 Wichtigkeit von Merkmalen.....	119
9.1.2 Kontrafaktische Erklärungen.....	120
9.1.3 Modelltreue von Erklärungen	121
9.2 Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinärität.....	122
9.3 Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	122
9.4 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	123
Literatur.....	124
10 Generative KI	125
Johannes Langer und Ute Schmid	
10.1 Methodische Einführung	126
10.1.1 Encoder-Decoder Strukturen	126
10.1.2 Verarbeiten von Sequenzen und Texterzeugung.....	127

10.1.3	Random Sampling vs. Greedy Decoding	128
10.1.4	Transformernetzwerke und Attention Mechanismen	130
10.2	Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität.....	131
10.3	Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	133
10.4	Literatur zum Weiterlesen und Quellen	135
	Literatur.....	135
Teil III Schließen und Planen		
11	Logikbasierte Wissensverarbeitung.....	139
	Christoph Benz Müller	
11.1	Methodische Einführung	143
11.1.1	Aussagenlogik	143
11.1.2	Logik erster Stufe.....	153
11.1.3	Logik höherer Stufe	157
11.1.4	Nichtklassische Logiken und Universelles Logisches Schließen..	158
11.2	Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität.....	159
11.3	Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	160
11.4	Literatur zum Weiterlesen und Quellen	160
	Literatur.....	160
12	Schließen im Alltag und unter Unsicherheit	163
	Claudia Schon	
12.1	Methodische Einführung	164
12.1.1	Schlussformen im Alltagsschließen.....	164
12.1.2	Nicht monotone Logiken	166
12.1.3	Answer Set Programming	170
12.1.4	Vages Wissen	173
12.2	Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	175
12.3	Literatur zum Weiterlesen und Quellen	176
	Literatur.....	176
Teil IV Spezielle und vertiefende Themen		
13	Robotik	179
	Diedrich Wolter, Udo Frese und Tilman Michaeli	
13.1	Methodische Einführung	181
13.1.1	Karten für mobile Roboter	181
13.1.2	Wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell der Selbstlokalisierung	183
13.1.3	Beobachtungsmodell	183
13.1.4	Bewegungsmodell	186
13.1.5	Selbstlokalisierung mit Markovmodellen	188

13.2 Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität.....	190
13.3 Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	191
13.4 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	192
Literatur.....	193
Teil V Reflexion	
14 Natürliche und Künstliche Intelligenz	197
Ute Schmid	
14.1 Methodische Einführung	198
14.1.1 Was menschliche Intelligenz ausmacht	198
14.1.2 Menschliches versus maschinelles Lernen	200
14.1.3 Wie man Intelligenz prüfen kann	201
14.2 Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität.....	203
14.3 Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	203
14.4 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	203
Literatur.....	204
15 Wechselwirkungen von KI mit anderen Schulfächern	205
Ulrike Barthelmeß, Ulrich Furbach und Uwe Lorenz	
15.1 Methodische Einführung	206
15.1.1 Biologie	206
15.1.2 Ethik.....	209
15.1.3 Bildende Kunst	213
15.2 Vorschläge für den Unterricht	214
15.3 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	216
Literatur.....	217
16 Verantwortung	219
Lukas Höper, Carsten Schulte und Christoph Benz Müller	
16.1 Methodische Einführung	221
16.1.1 Perspektive der Entwicklung von KI-Systemen.....	221
16.1.2 Perspektive der Interaktion mit KI-Systemen	225
16.1.3 Didaktische Empfehlungen.....	229
16.2 Beispiele aus der Lebenswelt.....	231
16.2.1 Interaktion mit Captchas	231
16.2.2 Interaktion mit Streamingdiensten	232
16.3 Vorschläge für den Unterricht und Anwendungen	232
16.4 Literatur zum Weiterlesen und Quellen	234
Literatur.....	234
Glossar	237

Über die Autoren

Ulrike Barthelmeß ist Germanistin und Romanistin und hat als Gymnasiallehrerin Deutsch und Französisch unterrichtet. Sie beschäftigt sich mit interdisziplinären Fragen zum Thema künstliche Intelligenz, Kultur und Philosophie.

Christoph Benz Müller ist Professor für KI-Systementwicklung an der Universität Bamberg und außerplanmäßiger Professor für Informatik und Mathematik an der Freien Universität Berlin. Benz Müller's Forschung beschäftigt sich mit der Automatisierung rationaler Argumentation und normativen Schließens, beispielsweise zur Kontrolle intelligenter Systeme, sowie mit universeller Logik und universellem Schließen, computergestützter Metaphysik und der Mechanisierung von Grundagentheorien in Mathematik und Philosophie.

Udo Frese ist Professor für multisensorische interaktive Systeme an der Universität Bremen. Er beschäftigt sich mit der algorithmischen Interpretation von Sensordaten. In seiner Arbeitsgruppe ist das sehr erfolgreiche Roboterfußballteam B-Human beheimatet.

Ulrich Furbach ist Professor im Ruhestand für künstliche Intelligenz an der Universität Koblenz. Seine Forschungsgebiete umfassen automatisches Schließen, Agenten und Kognition. Er ist besonders interessiert an fächerübergreifenden und interdisziplinären Aspekten der KI.

Lukas Höper ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Fachgruppe Didaktik der Informatik an der Universität Paderborn. Seine Forschungsinteressen liegen vor allem in der Entwicklung und empirischen Evaluation von Ansätzen zur Bildung über KI, mit einem aktuellen Schwerpunkt auf dem Verstehen und Reflektieren der Rolle von Daten in datengetriebenen Technologien.

Emanuel Kitzelmann ist Professor für Angewandte Künstliche Intelligenz an der TH Brandenburg. Zuvor war er Lehrer für Informatik und Mathematik am Berufskolleg Ratingen und hat dort das Berufliche Gymnasium für Informatik geleitet. Sein Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Induktiven Programmsynthese – einem Gebiet im Schnittbereich von Maschinellem Lernen und Programmiersprachen.

Johannes Langer ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kognitive Systeme der Universität Bamberg. In seiner Forschung beschäftigt er sich mit hybrider KI und menschlicher Interaktion mit Systemen für Maschinelles Lernen.

Uwe Lorenz ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Didaktik der Informatik der Freien Universität Berlin und hat als Gymnasiallehrer Informatik und Mathematik unterrichtet. In seiner aktuellen Forschung beschäftigt er sich mit Inhalten und Methoden KI-bezogener informatischer Bildung in der allgemeinen Lehrkräftebildung.

Tilman Michaeli ist Professor für Didaktik der Informatik an der Technischen Universität München. Ziel seiner Arbeit ist es, Informatik nicht nur zu erklären, sondern jede und jeden zu befähigen, die digitale Welt aktiv und kreativ mitzugestalten.

Ralf Romeike ist Professor für Didaktik der Informatik an der Freien Universität Berlin, wo er fächerübergreifende Perspektiven, Grundlagen und Gestaltungsmöglichkeiten informatischer Bildung (u. a. zu Künstlicher Intelligenz, Data Literacy, agilen Methoden) erforscht.

Claudia Schon ist Professorin für Künstliche Intelligenz an der Hochschule Trier. Ihre Forschungsinteressen liegen im Bereich der Wissensrepräsentation und der Kombination von symbolischer und subsymbolischer künstlicher Intelligenz.

Ute Schmid ist Professorin für Kognitive Systeme an der Universität Bamberg. Seit mehr als 20 Jahren lehrt und forscht sie im Bereich Künstliche Intelligenz. Seit vielen Jahren engagiert sie sich in der Vermittlung von Informatikkompetenzen, speziell auch KI-Kompetenzen für Schülerinnen und Schüler und bietet Fortbildungen für Lehrkräfte an. Zentrale Forschungsthemen sind interpretierbares maschinelles Lernen, hybride KI, erklärbares maschinelles Lernen, Intelligente Tutorsysteme und Kognition.

Carsten Schulte ist Professor für Didaktik der Informatik an der Universität Paderborn. Seine Forschungsinteressen sind: Philosophie der informatischen Bildung, Bildung über KI, empirische Erforschung von Lehr- und Lernprozessen (einschließlich Augenbewegungsforschung).

Stefan Seegerer arbeitet bei einem Quantencomputing-Startup und ist assoziierter Wissenschaftler an der FU Berlin. Als Informatikdidaktiker hat er zahlreiche Lehr- und Lernmaterialien u. a. im Bereich Quantencomputer und Künstliche Intelligenz entwickelt. Im Jahr 2021 wurde er von der Deutschen Gesellschaft für Informatik und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung als KI-Newcomer ausgezeichnet, 2022 erhielt er den Helmut und Heide Balzert-Preis für innovative Lehr- und Lernkonzepte in der Informatik.

Diedrich Wolter ist Professor für hybride künstliche Intelligenz an der Universität zu Lübeck. In seiner Forschung befasst er sich insbesondere mit dem Handeln intelligenten Agenten und der Verarbeitung von Information über Raum und Zeit.



Ulrich Furbach und Ute Schmid

Künstliche Intelligenz (kurz KI) ist ein Teilgebiet der Informatik, das sich mit der Entwicklung von Computer-Algorithmen und Programmen zur Lösung von Problemen befasst, die Menschen aktuell noch besser lösen können [5]. Der Begriff ‚Artificial Intelligence‘ wurde 1956 vom Informatik-Pioneer John McCarthy geprägt [3]. Die deutsche Übersetzung ‚Künstliche Intelligenz‘ wird teilweise als problematisch gesehen, da die Bezeichnung suggeriert, dass es bei diesem Forschungsgebiet um die Entwicklung von Computerprogrammen geht, die einer allgemeinen, menschenähnlichen Intelligenz entsprechen. Allerdings ist der größte Teil der KI-Forschung damit befasst, spezielle Algorithmen und Ansätze für spezifische Problembereiche zu entwickeln, etwa das Erkennen von Objekten in Bildern oder das automatische Ziehen von Schlussfolgerungen aus gegebenen Fakten und Regeln.

Bei der Vermittlung von KI-Kompetenzen im Kontext des Informatikunterrichts sollte herausgestellt werden, in welchen Fällen KI-Methoden sinnvoll eingesetzt werden können. Dies ist immer dann der Fall, wenn Standard-Ansätze der Informatik nicht ausreichen. Dies ist insbesondere aus drei Gründen der Fall. (1) Das Problem ist zu komplex, um effizient berechnet werden zu können: In diesem Fall werden heuristische Algorithmen verwendet, um sich einer Lösung anzunähern, jedoch ohne Garantie, dass diese Lösung optimal ist oder in einigen Fällen sogar eine Lösung gefunden wird. Typische Beispiele

U. Furbach (✉)
Uni Koblenz, Koblenz, Deutschland
E-Mail: uli@uni-koblenz.de

U. Schmid
Kognitive Systeme, Uni Bamberg, Bamberg, Deutschland
E-Mail: ute.schmid@uni-bamberg.de

sind Planungs- und Routing-Probleme. (2) Das zu lösende Problem beinhaltet komplexes Fachwissen und Schlussfolgerungen, weshalb Standarddatenstrukturen und -algorithmen nicht ausreichen. Typische Beispiele hierfür sind ontologische Schlussfolgerungen und Handlungsplanung. Das Wissen über ein bestimmtes medizinisches Gebiet kann beispielsweise in einer logikbasierten Wissensrepräsentationssprache dargestellt werden, die die Beantwortung spezifischer Fragen ermöglicht. (3) Das gegebene Problem kann nicht oder nicht vollständig explizit spezifiziert werden. Dies ist zum Beispiel bei den meisten Wahrnehmungsproblemen, sogenanntem perzeptuellen Wissen, der Fall, das bei Menschen überwiegend nur implizit vorhanden ist. So ist es beispielsweise nicht möglich, dass das Wissen, das notwendig ist, um eine Katze zu erkennen, vollständig durch Regeln beschrieben wird. Ähnlich verhält es sich auch für Expertenwissen. So kann auch die Klassifikation einer Hautveränderung als Melanom oder die Beurteilung, ob eine Schweißnaht korrekt gesetzt ist, nicht vollständig explizit beschrieben werden. In diesen Fällen wird maschinelles Lernen eingesetzt. Algorithmen des maschinellen Lernens ermöglichen die Inferenz eines Modells aus Trainingsdaten durch Verallgemeinerung von in den Daten identifizierten komplexen Mustern. Das gelernte Modell ersetzt hier ein händisch erstelltes Programm.

Standardsoftwaresysteme ohne KI-Komponenten sind vollständig inspizierbar. Der Code kann von Menschen gelesen und systematisch getestet werden. Wichtige Eigenschaften, wie Korrektheit (das Programm liefert für eine Eingabe die gewünschte Ausgabe) und Vollständigkeit (das Programm deckt alle möglichen Eingaben ab) können geprüft oder sogar bewiesen werden. Dies ist vor allem bei sicherheitskritischem Code, zum Beispiel bei einer Airbag-Steuerung, wichtig. Im Gegensatz dazu gibt es in allen oben genannten drei Bereichen des Einsatzes von KI-Methoden keine Garantie für Vollständigkeit und Korrektheit. KI-Methoden liefern uns also mächtige Werkzeuge zur computerbasierten Lösung von komplexen Problemen, sollten aber mit Bedacht eingesetzt werden.

Das Thema Künstliche Intelligenz erhitzt die Gemüter. Fluch oder Segen der Menschheit? Wie jede einschneidende technologische Erneuerung wird sie kontrovers diskutiert. Unabhängig davon hat sie in wichtigen Bereichen unseres Lebens bereits Fuß gefasst. Künstliche Intelligenz ist zu einem unverzichtbaren Wirtschaftsfaktor geworden. Quer durch alle Branchen setzen große, aber auch kleinere Unternehmen KI ein. Sie sei bahnbrechender als die Erfindung der Elektrizität, so Kai Fu Lee [2]. Ihre Rolle in der Industrie spiegelt sich im Begriff Industrie 4.0 [9], eine Andeutung auf eine vierte industrielle Revolution. Aber auch in diversen Wissenschaftszweigen gewinnt KI immer mehr an Bedeutung. Zum Beispiel werden in der Mathematik neue Theoreme in Interaktion zwischen Mathematiker und KI-Systemen bewiesen, in der Biologie wird die 3D-Faltung von Proteinen mittels KI bestimmt, in der Archäologie hilft die KI, verborgene Schätze zu heben. Kurz: Wirtschaft und Wissenschaft kommen an KI nicht mehr vorbei.

Das war nicht immer so. In den 1950er-Jahren war man zunächst recht optimistisch und glaubte, mit logischen symbolischen Verfahren Probleme wie maschinelles Übersetzen, Bild- und Textverstehen oder Robotersteuerung innerhalb weniger Jahrzehnte lösen zu können. Doch dann musste man diese anfänglichen Vorstellungen nachjustieren.

In den 1980er-Jahren waren Expertensysteme angesagt. Ihr Ziel war es, Wissen von spezialisierten Experten in einem KI-System verfügbar zu machen. Im Mittelpunkt dieser Entwicklungen stand formalisiertes Wissen, das von menschlichen Experten bereitgestellt werden musste.

Die großen Hoffnungen, die in Expertensysteme gesetzt wurden, konnten letztlich nur teilweise erfüllt werden. Das lag insbesondere daran, dass menschliches Wissen nur in Teilen explizit verfügbar ist und damit schwer formal repräsentiert werden kann – das sogenannte **Knowledge Engineering Bottleneck**. Große Bereiche menschlichen Wissens, vor allem perzeptuelles Wissen und verinnerlichte Handlungsrouninen, sind implizit und können nicht oder nur unzureichend mit Methoden der Wissensakquisition, wie sie Expertensystemen zugrunde liegen, erfasst werden.

Darauf folgte eine Phase der Ernüchterung, der sogenannte KI-Winter. Die öffentlichen Forschungsgelder wurden zurückgefahren, viele der großen Projekte, so etwa das japanische 5th Generation Project oder das europäische ESPRIT Programm wurden nicht weiterverfolgt.

Tauwetter setzte erst wieder ein, als 1997 ein Computer den damals amtierenden Schachweltmeister besiegte und 2011 das IBM-System Watson in der Quizshow Jeopardy gegen menschliche Champions gewann. 2017 schlug ein KI-System in einem spektakulären Wettkampf einen Weltklasse-Go-Spieler. Die Robotik ist mittlerweile in unserem Alltag angekommen, in Form von Staubsaugern, autonomen Fahrzeugen im Straßenverkehr oder intelligenten Waffensystemen auf den Kriegsschauplätzen dieser Welt. KI wird omnipräsent: Wir sprechen mit Siri, Alexa und ähnlichen Assistenten, die automatische Sprachübersetzung hat es zu beachtlicher Reife gebracht, Bilder und Videos werden automatisch ausgewertet.

Im Mittelpunkt dieser beeindruckenden Erfolge stehen Verfahren, die direkt aus großen Mengen von Daten lernen. Hierzu benutzt man sogenannte **künstliche neuronale Netze**, die in der Lage sind, aus Daten, die ihnen zu Trainingszwecken präsentiert werden, zu lernen. Man kann hierbei auf explizit formalisiertes Wissen verzichten, das KI-System lernt – es extrahiert aus den Trainingsdaten Wissen.

Diese Verfahren eignen sich besonders im Bereich der Bilderkennung zur Identifikation von Personen und Objekten. Man setzt sie zum Beispiel in autonomen Fahrzeugen ein oder nutzt sie zur Überwachung des öffentlichen Raums. Die statistischen Fehlerquoten sind dabei relativ gering. Allerdings sind sie kein Garant für plausible Ergebnisse, in vielen Fällen sind darüber hinaus Erklärungen notwendig. Das gilt vor allem beim Einsatz von KI in kritischen Situationen, im Straßenverkehr, in der Medizin, bei der Kreditvergabe. Verlässliche Algorithmen sind hier wichtig, die einer Überprüfung standhalten können.

Letzteres gilt insbesondere für Chatbots wie ChatGPT (Generative Pre-trained Transformer), die sehr viel Aufmerksamkeit in der breiten Öffentlichkeit erfahren. Es handelt sich dabei um KI-Systeme, die mit ihrem Nutzer über textbasierte Nachrichten kommunizieren und dabei moderne maschinelle Lerntechnologie benutzen, um Antworten zu generieren, die erstaunlich natürlich klingen und für das Gespräch relevant sind. Auch hierbei wird immer wieder deutlich, dass diese Systeme nicht immer Antworten generieren,

die auf Fakten beruhen – man spricht schon davon, dass solche Systeme halluzinieren. Wenn dies nicht vom Benutzer erkannt wird, kann dies unter Umständen schwerwiegende Folgen haben. Gerade hier sind Überprüfbarkeit und Erklärbarkeit oberstes Gebot!

Aus diesem Grund wird zunehmend das Thema Vertrauenswürdigkeit von KI-Systemen diskutiert. Damit ein KI-System vertrauenswürdig ist, muss es klassische Anforderungen an Software-Systeme, insbesondere Sicherheit sowie Schutz privater Daten, erfüllen. Dazu kommen Anforderungen der Robustheit, der Nachvollziehbarkeit und der Korrigierbarkeit von KI-Systemen [8].

Entsprechend werden in der aktuellen KI-Forschung neue Ansätze entwickelt, die dazu beitragen sollen, vertrauenswürdige KI-Systeme zu entwickeln. Dazu gehören Methoden, die erkennen, ob neue Eingaben überhaupt sinnvoll bearbeitet werden können, Methoden, um KI-Systeme, insbesondere gelernte Modelle, transparent und nachvollziehbar zu machen (sogenannte erklärbare KI, explainable AI, kurz XAI), und Ansätze des interaktiven maschinellen Lernens.

Nachdem in letzter Zeit ein fast ausschließlicher Fokus auf Methoden des maschinellen Lernens, insbesondere neuer Ansätze des Lernens mit neuronalen Netzen, lag, wird zunehmend erkannt, dass für den Einsatz in der Praxis eine Kombination von wissensbasierten Methoden und datengetriebenen Ansätzen sinnvoll ist. Man spricht von hybriden KI-Systemen oder neuro-symbolischen Systemen.

Daher wollen wir in unserem Buch in die gesamte Breite des KI-Spektrums einführen. Es sollen sowohl symbolische, wissensbasierte Verfahren als auch non-symbolische, auf neuronalen Netzen basierte Lernverfahren präsentiert werden. Wir wenden uns dabei an Informatiklehrkräfte, die sich einen ersten Überblick über das Gebiet verschaffen wollen. Dazu sind die einzelnen Beiträge möglichst informell gehalten; sie sollen in die Thematik einführen und Lust auf mehr in der weiterführenden Literatur machen. Zum Beispiel wird an Universitäten häufig das Lehrbuch ‚Artificial Intelligence – A Modern Approach‘ [6], das die Themengebiete und Methoden der KI in sehr großer Breite und Tiefe einführt, eingesetzt. Es ist auch in deutscher Übersetzung erhältlich [7] und bietet online viele Materialien. Ein älteres Lehrbuch mit Fokus auf logischen Grundlagen stammt von Poole, Machworth und Goebel [4]. Das deutschsprachige Handbuch der Künstlichen Intelligenz [1] gibt ebenfalls einen umfassenden Einblick in Themen und Methoden der KI mit Beiträgen von KI-Forschenden aus dem deutschsprachigen Raum.

Das vorliegende Buch ist in verschiedene Teile aufgeteilt:

Im Abschnitt I werden grundlegende Konzepte der KI, wie die Suche in abstrakten Problemräumen sowie Lernen aus Daten und Schließen aus Wissen, behandelt.

Im Abschnitt II stehen Methoden des maschinellen Lernens im Mittelpunkt: Lernen mit neuronalen Netzen, Reinforcement Lernen, tiefes Lernen und Generative KI. Zudem werden konnektionistische Verfahren mit analytischen Verfahren verglichen und das Thema Erklärbarkeit von neuronalen Netzen besprochen.

Abschnitt III über Schließen und Planen beschäftigt sich in zwei Kapiteln mit Verfahren der symbolischen KI, der logikbasierten Wissensverarbeitung und dem Schließen im

Alltag. Weitere Kapitel über automatische Handlungsplanung, Multiagenten-Systeme und Constraints sind in Planung.

Abschnitt IV zu speziellen und vertiefenden Themen enthält in der vorliegenden Auflage nur ein Kapitel über Robotik, weitere Kapitel über Spiele und Sprachverarbeitung sind in Planung.

Abschnitt V mit dem Thema Reflexion behandelt den Begriff der Intelligenz, zeigt Wechselwirkung mit anderen Schulfächern auf und thematisiert schließlich den Bereich der Data Literacy.

Die einzelnen Kapitel in diesen fünf Abschnitten folgen dem gleichen Aufbau: Nach einer methodischen Einführung in das jeweilige Thema werden Beispiele aus der Lebenswelt, gesellschaftliche Bezüge und Interdisziplinarität behandelt. Schließlich werden auch Vorschläge für den Unterricht gemacht und Hinweise auf weiterführende Literatur gegeben.

Danksagung Die ersten Ideen zu Inhalt und Struktur dieses Buches entstanden bei einem Forschungstreffen des Arbeitskreises Künstliche Intelligenz in Schulen des Fachbereichs KI der Gesellschaft für Informatik auf Schloss Dagstuhl mit Kerstin Bach, Ulrike Barthelmeß, Christoph Benzmüller, Ulrich Furbach, Emanuel Kitzelmann, Tilman Michaeli, Ralf Romeike, Ute Schmid und Ingo Timm.

Literatur

1. Günther Görz, Ute Schmid und Tanya Braun. **Handbuch der Künstlichen Intelligenz (6. Auflage)**. De Gruyter, 2021.
2. Kai-Fu Lee. **AI superpowers : China, Silicon Valley, and the new world order**. Boston : Houghton Mifflin Harcourt, 2018.
3. Nils J Nilsson. **Die Suche nach künstlicher Intelligenz: Eine Geschichte von Ideen und Erfolgen**. IOS Press, 2014.
4. David I Poole, Randy G Goebel und Alan K Mackworth. **Computational Intelligence: A Logical Approach**. Oxford University Press, 1998.
5. Elaine Rich. **Artificial Intelligence**. McGraw-Hill, 1983.
6. Stuart Russell und Peter Norvig. **Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th Edition)**. Pearson, 2020. URL: <http://aima.cs.berkeley.edu/>.
7. Stuart Russell und Peter Norvig. **Künstliche Intelligenz: Ein moderner Ansatz**. 3. Aufl. Pearson, 2012.
8. Ute Schmid. „Trustworthy Artificial Intelligence - Comprehensible, Transparent, Correctable“. In: **Introduction to Digital Humanism**. Hrsg. von H. Werthner und C. Ghezzi u. a. Springer, 2023.
9. Wikipedia. **Industrie 4.0–Wikipedia, Die freie Enzyklopädie**. [Online; Stand 11. April 2021]. 2021. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Industrie_4.0.

Teil I

Grundlegende Konzepte der KI



Erstellt mit Dall-E, May 2023



Ute Schmid

Auch wenn uns oft gar nicht auffällt, wir Menschen lösen täglich zahlreiche Probleme: Wir finden einen günstigen Weg von Zuhause zur Wohnung eines Freundes, wir flicken den kaputten Schlauch beim Fahrrad, wir backen einen Kuchen. Manche von uns lösen gern Solitärspiele wie Rubics Würfel oder spielen Tetris. So verschieden diese Probleme sind, allen ist gemeinsam: Wir befinden uns aktuell in einer bestimmten Situation und haben das Ziel, eine andere Situation zu erreichen: Aktuell ist der Fahrradreifen platt und wir hätten gerne wieder einen aufgepumpten Reifen. Um dieses Ziel zu erreichen, stehen uns Aktionen zur Verfügung: Wir können im Keller das Flickzeug holen, den Reifen abnehmen, den Mantel vom Schlauch trennen, die schadhafte Stelle im Schlauch finden und so weiter. Wenn ein Roboter sich um die Reparatur des Reifens kümmern soll, wäre es wenig hilfreich, wenn wir dafür alle Schritte haarklein beschreiben müssten – auf der Ebene von grundlegenden Bewegungen, etwa um eine Schraube zu lösen. Stattdessen beschreibt man Probleme zunächst abstrakt – in Form von Zuständen (wie „Der Schlauch ist vom Mantel gelöst“) und Aktionen (wie „Löse den Schlauch von der Felge“). Solche abstrakten Beschreibungen ermöglichen es, algorithmisch nach einer Problemlösung zu suchen.

Grundlegende Algorithmen, um Probleme wie die genannten automatisch zu lösen, basieren auf der Idee der Suche in einem Problemraum. Ein Problemraum ist eine abstrakte Darstellung der Situationen in der Welt als Zustände. Die Situation in der Welt umfasst sehr viele Details, die für die Problemlösung unwichtig sind – zum Beispiel die Farbe des Fahrrads. Bei der Übersetzung der Situation in der Welt in einen Zustand, der im

U. Schmid (✉)
Kognitive Systeme, Uni Bamberg, Bamberg, Deutschland
E-Mail: ute.schmid@uni-bamberg.de

Computer repräsentiert werden kann, lässt man möglichst alles weg, was für das Finden einer Problemlösung irrelevant ist. Im Problemraum gibt man außerdem an, von welchem Zustand man durch eine Aktion einen anderen Zustand (Folgezustand) erreichen kann. Um ein Problem durch einen Computer lösen zu lassen, nutzt man spezielle Algorithmen, nämlich Suchverfahren, die die im Problemraum gegebene Information nutzen. Spezielle KI-Suchverfahren sind dafür gemacht, einen möglichst geschickten Weg zu finden, der vom gegebenen Anfangszustand zu einem Zustand führt, in dem das Problemlöseziel erreicht ist.

Wie bereits in Kap. 1 eingeführt, besteht eine KI-Methode aus der Repräsentation des Wissens über die Welt – in diesem Fall dem Problemraum – und einem Inferenzalgorithmus – in diesem Fall einem Suchverfahren. Manche Probleme eignen sich besser für Lösung durch Suchverfahren als andere. Will man eine Abfolge von Aktionen für Rubics Würfel vom Computer finden lassen, so ist das einfacher, als eine Lösung dafür, eine gute Note zu schreiben oder ein passendes Geschenk für eine Person zu finden. Rubics Würfel ist ein sogenanntes geschlossenes Problem. Die beiden anderen Probleme sind offene Probleme. Bei geschlossenen Problemen ist das Problemlöseziel klar definiert und die Aktionen, die man ausführen kann, sind bekannt. Bei offenen Problem ist dies nicht der Fall.

Kompetenzziele

- Den Bezug zwischen Datenstruktur Graph und Problemraum herstellen.
- Für ein Problem eine geeignete Abstraktionsebene finden, um es als Problemraum zu beschreiben.
- Unterschiede von Tiefensuche und Breitensuche nachvollziehen können.
- Tiefen- und Breitensuche nach ihrem Aufwand bewerten können.
- Unterschied zwischen blinden und heuristischen Suchverfahren erklären.
- Hill Climbing und A* als wichtige heuristische Suchverfahren beschreiben können.
- Eigenständig eine heuristische Funktion für ein einfaches Solitärspiel definieren können.
- Heuristische Suche als grundlegenden Ansatz in anderen Bereichen der KI identifizieren können.

2.1 Methodische Einführung

Um Probleme automatisch vom Computer lösen zu lassen, müssen wir sie in Form von Zuständen beschreiben. Hierzu müssen wir von der komplexen Welt abstrahieren. Wie man ein Problem durch Zustände und Aktionen definiert wird im Abschn. 2.1.1 – **Repräsentation von Problemen** – dargestellt. Bei geschlossenen Problemen kann eine Problemlösung Suche nach einem Lösungsweg vom Anfangszustand zum Problemlöseziel aufgefasst werden. Bei Problemen, bei denen die Anzahl möglicher Zustände nicht allzu groß ist, können hier Tiefen- oder Breitensuche als systematische Suchverfahren verwendet werden

(siehe Abschn. 2.1.2 – **Blinde Suchverfahren**). Für komplexe Probleme, so wie sie in der KI üblicherweise behandelt werden, werden speziell **heuristische Suchverfahren** genutzt. Die dabei verwendeten Heuristiken helfen, Möglichkeiten, die vermutlich weniger vielversprechend sind, auszusparen. Ob mit heuristischen Verfahren eine gute Lösung oder auch überhaupt eine Lösung gefunden werden kann, hängt davon ab, wie geschickt die Heuristik definiert ist (siehe Abschn. 2.1.3 – **Definition einer Heuristik**).

2.1.1 Repräsentation von Problemen

Um Probleme geeignet für automatisches Problemlösen zu repräsentieren, müssen wir analysieren, welche Information zur Lösung des Problems relevant ist und welche nicht. Wenn wir zum Beispiel das Problem lösen wollen, einen günstigen Weg von Zuhause zu einem Freund zu finden, können wir uns auf die Orte beschränken, an denen wir Entscheidungen treffen. Welche Orte das sind, hängt davon ab, ob wir den Weg zu Fuß, mit dem Fahrrad oder mit dem Bus zurücklegen wollen. Wenn wir den Platten am Fahrrad reparieren wollen, ist es wichtig, dass wir das passende Werkzeug haben, aber nicht, welche Farbe das Fahrrad hat.

Betrachten wir als Beispiel einen Saugroboter, der zwei Zimmer – Wohnzimmer und Arbeitszimmer – saugen soll.¹ Um die möglichen **Zustände** eines Problems zu erfassen, werden folgende Informationen benötigt:

- Aufenthaltsort des Roboters: Wohnzimmer oder Arbeitszimmer,
- Zustand des Bodens in jedem der Zimmer: sauber oder schmutzig.

Wir verzichten auf Informationen darüber, was für eine Art Bodenbelag in jedem Zimmer vorhanden ist, um welchen Wochentag es sich handelt, wem die Wohnung gehört und so weiter. Einige dieser Informationen könnten in einer konkreten Anwendung durchaus relevant sein. Für unsere Zwecke sind wir aber mit den oben genannten Aspekten zufrieden. Daraus ergeben sich acht mögliche Zustände: Der Roboter ist in einem von zwei Zimmern, in jedem der Zimmer kann Schmutz liegen oder nicht:

$$\text{Zustandszahl} : 2 \times 2 \times 2 = 8.$$

Allgemein gilt bei n Zimmern $n \times 2^n$: der Roboter ist in einem von n Zimmern und jedes der n Zimmer befindet sich in einem von zwei Sauberkeitszuständen (siehe Abb. 2.1).

Außerdem muss definiert werden, welche **Aktionen** der Saugroboter ausführen kann. Wir nehmen an, dass er ins Wohnzimmer oder ins Arbeitszimmer fahren kann und dass er Schmutz einsaugen kann. Weitere Aktionen wie Aufladen oder Schmutzbehälter

¹ Das Beispiel ist angelehnt an die ‚vacuum world‘ aus [9].

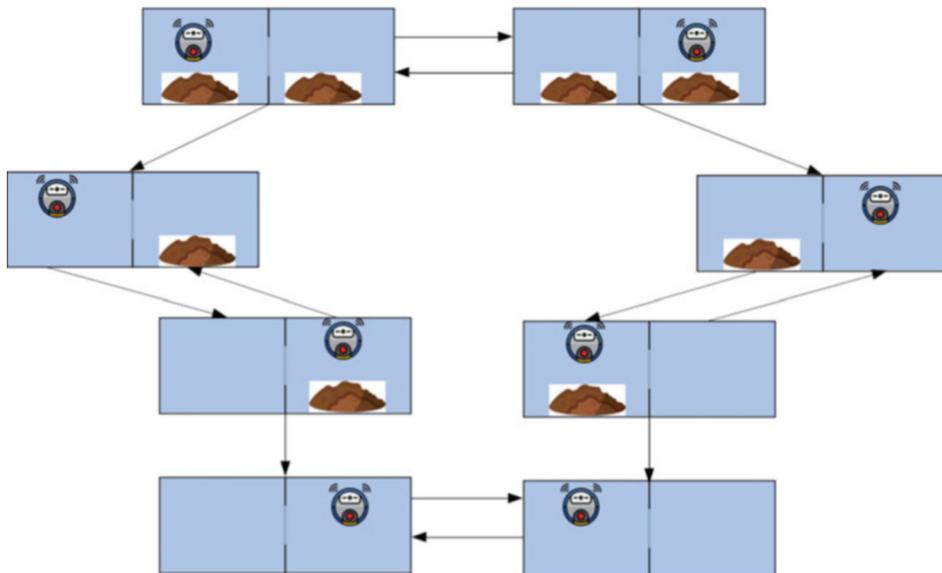


Abb. 2.1 Problemraum für das Saugroboter-Problem. Der Roboter kann sich im linken oder rechten Raum befinden. In jedem der beiden Räume kann Schmutz sein oder nicht. Daraus ergeben sich 8 mögliche Zustände. Kanten geben an, aus welchem Zustand man durch eine Aktion in welchen anderen kommen kann. Im Beispiel zeigen wir aus Gründen der Übersichtlichkeit ein Problem mit nur zwei Räumen. Die beschriebenen Methoden funktionieren natürlich auch für eine viel größere Zahl an Räumen oder mehrere Saugroboter

leeren, berücksichtigen wir nicht. Die Information über Ladezustand und Füllgrad des Schmutzbehälters sowie Positionen von Ladestation und Schmutzdepot haben wir ja auch nicht bei der Beschreibung der Zustände berücksichtigt.

Zum Nachdenken:

Wie viele Zustände hätte das Saugroboter-Problem, wenn der Ladezustand als ‚muss geladen werden ja/nein‘ mit berücksichtigt würde? Die Ladestation sei im Wohnzimmer. Der Roboter kann an der Ladestation angedockt sein oder nicht. ◀

Wenn der Roboter eine Aktion ausführt, dann ändert sich der Zustand, in dem sich das Problem befindet. Wenn zum Beispiel aktuell Schmutz im Wohnzimmer ist und der Roboter dort saugt, dann ändert sich der Zustand des Zimmers von ‚schmutzig‘ zu ‚sauber‘. Die Anwendung einer Aktion resultiert also in einer **Zustandstransformation**. Die meisten Aktionen können nur unter bestimmten Bedingungen ausgeführt werden. Der Roboter kann nur dann den Wohnzimmerboden saugen, wenn er auch dort ist. Die Überprüfung von Anwendungsbedingungen für eine Aktion und die Berechnung des

Folgezustands können auf verschiedene Art umgesetzt werden. Im Folgenden nehmen wir an, dass ein Zustandsübergangsmodell gegeben ist, in dem definiert wird, von welchem Zustand man mit welcher Aktion in welchen Folgezustand gelangt.² Im Problemraum werden Aktionen als gerichtete Kanten angegeben, die von einem Zustand zum aus der Aktion resultierenden Zustand führen (siehe Abb. 2.1).

Aktionen können unterschiedliche **Kosten** verursachen. Dabei sind Kosten nicht unbedingt Geldbeträge, sondern zum Beispiel auch unterschiedlicher Zeit- oder Energiebedarf. Allgemein erfassen Kosten den Aufwand einer Aktion. Im Abschn. 2.1.3 (Heuristische Suchverfahren) werden wir sehen, wie man Lösungswege ermitteln kann, die möglichst wenig Kosten verursachen. Für das Saugroboter-Problem setzen wir Saugen und Fahren mit gleichen Kosten an. Jede Aktion hat Kosten von 1.

Problemlöseziel für das Saugroboter-Problem ist es, dass alle Zimmer sauber sind. Betrachten wir den Problemraum in Abb. 2.1 so gibt es zwei Zustände, die diese Bedingung erfüllen – einmal ist der Roboter dabei im Wohnzimmer, einmal im Arbeitszimmer. Im allgemeinen kann es bei einer Problemlösung verschieden viele **Zielzustände** geben. Gibt es gar keinen Zielzustand oder vom gegebenen Zustand aus keinen Weg dorthin, so ist das Problem nicht lösbar. Gibt es genau einen Weg zum Ziel so entspricht diese Lösung auch der besten – kürzesten oder kostengünstigsten – Lösung. Ein möglicher **Anfangszustand** könnte sein, dass beide Böden schmutzig sind und der Roboter sich im Wohnzimmer befindet. In den nächsten Unterkapiteln wird dargestellt, wie mithilfe eines Suchverfahrens eine **Problemlösung als Folge von Aktionen von einem Anfangszustand zu einem Zielzustand** ermittelt werden kann.

Allgemein gilt, dass ein **Problem** definiert wird durch Anfangszustand, Problemlöseziel und Aktionen. Diese Bestandteile genügen, um den **Problemraum** aufzuspannen. Wie in Abb. 2.1 gezeigt, besteht ein Problemraum aus den Zuständen eines Problems als Knoten und den Aktionen als gerichteten Kanten. Man spricht auch von Zustandsraum oder Zustandsraum-Graph.³

Wie man ein Problem geeignet als Problemraum definiert, muss man für jedes Problem neu überlegen. Bei Solitärspielen werden die Spielzustände als Knoten repräsentiert. Die Kanten entsprechend Spielzügen. Ein Problem mit einem besonders ästhetischen Problemraum ist der **Turm von Hanoi** (siehe [search.ipynb](#) Abb. 2.2). Ziel des Solitärspiels ist es, einen Turm aus verschieden großen Scheiben von einem Stab zu einem anderen zu versetzen. Ein dritter Stab darf als Zwischenablage genutzt werden. Dabei darf eine Scheibe immer nur auf eine größere Scheibe oder einen leeren Stab gesetzt werden. Eine Scheibe darf nur bewegt werden, wenn keine andere Scheibe auf ihr liegt.

² Hinweis für den Informatikunterricht: Das Zustandsübergangsmodell entspricht der Zustandsüberföhrungsfunktion wie sie bei endlichen Automaten eingeföhrt wird.

³ Hinweis für den Informatikunterricht: Ein Problemraum kann mit der Datenstruktur Graph umgesetzt werden mit einer Menge von Knoten K und einer Menge von gerichteten Kanten $V \subseteq K \times K$.

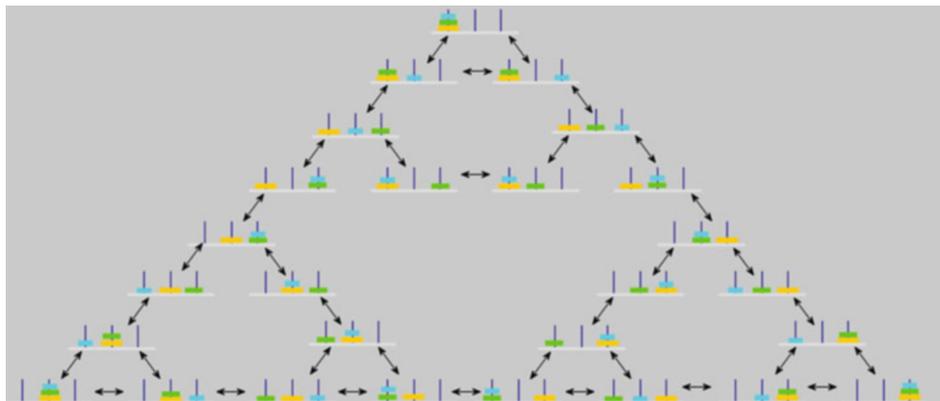


Abb. 2.2 Das Turm von Hanoi Problem: Startzustand ist an der Spitze des Dreiecks. Zielzustand ist in der unteren rechten Ecke. Der Problemraum ist selbstähnlich: Der Problemraum des Dreischeiben-Problems ist aus drei Problemräumen für Zweischeiben-Probleme zusammengesetzt

Das Drei-Scheiben-Problem hat 27 mögliche Zustände. Dies ergibt sich kombinatorisch, da jede Scheibe auf jedem der drei Stäbe liegen kann, also gilt: 3^n . Der Legende nach sind Mönche in Hanoi seit Jahrhunderten damit beschäftigt, einen Turm aus 64 Scheiben von einer Position auf eine andere zu versetzen. Die Welt soll untergehen, wenn der Turm komplett versetzt ist.

Zum Nachdenken:

Wie viele Zustände hat das Turm von Hanoi Problem mit 64-Scheiben? ◀

Probleme, bei denen die Anzahl der Zustände durch einen Ausdruck errechnet wird, bei dem die variable Anzahl – Zimmer beim Saugroboter oder Scheibenzahl beim Turm von Hanoi – im Exponenten steht, verlangen geschickte Suchalgorithmen. Der zeitliche Aufwand, alle möglichen Zustände abzusuchen, ist exponentiell.

2.1.2 Blinde Suchverfahren

Um für ein gegebenes Problem eine Lösung zu ermitteln, kann, ausgehend vom Anfangszustand nach einer Folge von Aktionen gesucht werden, die zu einem Zielzustand führen. Im Folgenden werden verschiedene Suchverfahren eingeführt. Diese sind allgemein für Probleme definiert, die als Problemraum definiert werden können. In diesem und dem nächsten Unterkapitel abstrahieren wir von einem konkreten Problem und nutzen den in Abb. 2.3 gegebenen generischen Problemraum. Die Zustände sind durch Buchstaben gegeben. Dabei soll S dem Anfangszustand entsprechend und Z dem Zielzustand. Für die