

Gerhard Roth · Lukas Tuggener ·
Fabian Christoph Roth

Natürliche und künstliche Intelligenz

Ein kritischer Vergleich

SACHBUCH



Springer

Natürliche und künstliche Intelligenz

Gerhard Roth · Lukas Tuggener ·
Fabian Christoph Roth

Natürliche und künstliche Intelligenz

Ein kritischer Vergleich

 Springer

Gerhard Roth
Institut für Hirnforschung, Universität
Bremen
Bremen, Deutschland

Lukas Tuggener
Centre for Artificial Intelligence, Zurich
University of Applied Sciences
Winterthur, Schweiz

Fabian Christoph Roth
Department of Molecular Medicine
University of Oslo
Oslo, Norwegen

ISBN 978-3-662-68400-9 ISBN 978-3-662-68401-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-68401-6>

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-Verlag GmbH, DE, 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 jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber 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.

© Fotonachweis Umschlag: Adobe Stock/a close up of an octopus in a body of water with a lot of bubbles in the water around it.

Planung/Lektorat: Sarah Koch
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recycelbar.

Vorwort

Eine große Faszination geht von den einzigartigen Leistungen des Gehirns aus. Besonderes Interesse gilt vor allem den neurowissenschaftlichen Fragestellungen über die Entstehung von Gedanken und Bewusstsein sowie über die Herkunft und die Grundlagen unseres intelligenten Verhaltens. Die Exklusivität dieser Leistungen für Mensch und Tier scheint allerdings durch die rasanten Entwicklungen im Bereich der „künstlichen Intelligenz“ (KI) in Zweifel gezogen. KI wird schon jetzt in nahezu allen Bereichen der digitalen Informationsverarbeitung eingesetzt und bietet vielfältige Funktionen und Möglichkeiten, die scheinbar alles Bisherige in den Schatten stellen.

Der Einsatz von KI-Systemen ist spätestens mit dem Durchbruch großer Sprachmodelle wie ChatGPT oder Bard auch im Alltag angekommen und hat zuletzt zu einer umfangreichen gesellschaftlichen Debatte geführt. Viele Fragen haben mit der Sicherheit und Zuverlässigkeit der Systeme zu tun, sowohl in Hinblick auf Anwendungen in Form von autonomen Fahrzeugen als auch beim Umgang mit persönlichen oder gar medizinischen Daten. Auch können Aussagen von den sogenannten Chatbots wie ChatGPT von Anwenderinnen und Anwendern bisher nur schwer auf ihre Echtheit und Qualität geprüft werden. Es kommt sogar vor, dass die Entwicklerinnen und Entwickler systembedingt nicht nachvollziehen können, wie es zu einer bestimmten Aussage kommt. Gleichzeitig können diese Aspekte jedoch nicht pauschal auf alle KI-Systeme übertragen werden, da die Bezeichnung „KI-Systeme“ lediglich eine Sammelbezeichnung für höchst unterschiedliche technische Umsetzungen ist. Diese haben sehr verschiedene Aufgaben und Funktionen und können nicht mit gleichen Maßstäben betrachtet werden. Wie sind also diese neuen Entwicklungen einzuordnen, und wie lässt sich das mit dem uns Menschen vertrauten „Denken“ und „Verstehen“ vergleichen?

Hierzu fasst dieses Buch die wissenschaftlichen Grundlagen der natürlichen und künstlichen „Intelligenzsysteme“, also Nervensysteme und KI-Systeme, zusammen und analysiert die Hintergründe dieser hochaktuellen Frage. Statt für bestimmte Standpunkte zu werben, wollen wir die Leserinnen und Leser aus- und weiterbilden und durch Erläuterung der zugrunde liegenden Fakten und Mechanismen zu einem eigenen Verständnis der Materie führen.

Das Buch beginnt mit einer Einführung in die Intelligenzforschung, gefolgt von der Beschreibung menschlicher und tierischer Intelligenz und deren neurobiologischen Grundlagen. Dieser natürlichen Intelligenz stellen wir im nach-

folgenden Teil die KI gegenüber und betrachten die wichtigsten Grundprinzipien und die Entwicklung hin zu heutigen KI-Systemen. Dies beinhaltet auch die wichtige Frage, inwiefern KI-Systeme vom Gehirn und dessen Arbeitsweisen lernen können und ob durch das „Nachbauen“ von Nervenzellverbänden mit den sogenannten neuromorphen Chips vergleichbare Leistungen erreichbar sind oder sein werden. Dieser Ansatz spielt in bekannten KI-Systemen wie ChatGPT tatsächlich bisher kaum eine Rolle; sie basieren auf hoch komplizierten Algorithmen und „konventionellen“ Hochleistungsrechnern.

Besonders wichtig ist uns auch die kritische Betrachtung und Einordnung der Fähigkeiten von KI-Systemen in Hinblick auf Denken und Handeln als eine selbstständige Entscheidungsinstanz. Letzteres wirft Fragen hinsichtlich moralischer Entscheidungen und des möglichen Kontrollverlusts über solche Systeme auf, die zurzeit nicht abschließend beantwortet werden können. Trotzdem ist sicher, dass der Einsatz von KI massiv zunehmen wird und KI-Systeme sowohl in Form von interaktiv nutzbaren Anwendungen sowie unsichtbaren Algorithmen im Hintergrund bei Endgeräten oder Servern den Großteil der Informationsverarbeitung leisten werden. Um diese Entwicklungen in der Gesellschaft kritisch begleiten und hinterfragen zu können, ist unabhängige Forschung, Aufklärung und Interaktion aller Beteiligten gefragt.

Gerhard Roth, Autor und Initiator dieses Buches, ist im April 2023 verstorben. Wie bereits bei vielen gesellschaftsrelevanten Themen zuvor, war es ihm ein wichtiges Anliegen mit Erkenntnissen aus der Neurowissenschaft zur Aufklärung über KI beizutragen. Seine langjährige Arbeit auf diesem Gebiet betrachtete er als notwendigen Beitrag zur Debatte um die KI. Er organisierte und hielt Vorträge und Veranstaltungen zu diesem Thema und initiierte außerdem eine KI-Tagung mit führenden KI-Forschern an der Akademie Hofgeismar. Dieses Buch basiert auf seinem Vorentwurf, den er im Rahmen eines Projekts seines Roth Institut Bremen schrieb. Im Zentrum seiner Arbeit stand von Anfang an die Frage, inwiefern die Leistungen von KI-Systemen sich mit natürlicher Intelligenz von Menschen und Tieren vergleichen und abbilden lassen. Mit diesem Ansatz fügt sich dieses Buch in sein umfangreiches Lebenswerk ein, stets geprägt durch fundierte Recherche, neue interdisziplinäre Ansätze und scharfsinnige Analysen.

Lukas Tuggener
Fabian Christoph Roth

Danksagung

Unser großer Dank gilt Gerhard Roth, der uns für dieses Buchprojekt begeistert und die Zusammenarbeit mit seiner großen Erfahrung, fachlichen Kompetenz und unermüdlichen Motivation und Energie geprägt hat. Im Namen aller Autoren danken wir den vielen Kolleginnen und Kollegen, die bereits in den Anfängen der Arbeit zu natürlicher Intelligenz und KI mitgewirkt haben, und denjenigen, die Teile des Manuskripts durch persönliche Gespräche und schriftliche Anmerkungen bereichert haben. Insbesondere danken wir Prof. Dr. Ursula Dicke, sowie Prof. Dr. Dr. h.c. Randolf Menzel (Berlin), Prof. Dr. Christoph von der Malsburg (Frankfurt) und Prof. Dr. Dr. h.c. Frank Kirchner (Bremen).

Winterthur
Oslo
im April 2024

Lukas Tuggener
Fabian C. Roth

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Menschliche Intelligenz	5
2.1	Was ist menschliche Intelligenz, und wie misst man sie?	5
2.2	Gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede?	8
2.3	Der Voraussagewert des IQ	10
2.4	Einflussfaktoren auf die Intelligenz	10
2.5	Die Individualentwicklung menschlicher Intelligenz	11
3	Intelligenzleistungen bei nichtmenschlichen Tieren	17
3.1	Intelligenz und Lernen	23
3.1.1	Formen des Lernens	24
3.2	Kognitive Leistungen unterschiedlicher Tiergruppen	29
3.2.1	Kognitive Leistungen und Intelligenz bei Wirbellosen	31
3.2.2	Kognitive Leistungen und Intelligenz bei Wirbeltieren	35
3.2.3	Emotion und Motivation	60
3.3	Zusammenfassung: Wer hat bei der Intelligenz die Nase vorn?	64
4	Neurobiologische Grundlagen kognitiver Leistungen	69
4.1	Das Gehirn wirbelloser Tiere	70
4.2	Das Gehirn der Wirbeltiere	72
4.2.1	Die Großhirnrinde der Säuger	74
4.3	Verlauf der Hirnentwicklung	79
4.4	Grundaufbau und Grundfunktionen von Nervenzellen	80
4.4.1	Das Ruhemembranpotenzial	82
4.4.2	Das Entstehen des Aktionspotenzials	83
4.4.3	Das Entstehen des postsynaptischen Potenzials	85
4.4.4	Integrative Eigenschaften einer Nervenzelle	87
4.4.5	Impulsfortleitung	88
4.4.6	Neurotransmitter und Neuromodulatoren	89
4.4.7	Die Spezifität der Rezeptoren	91

4.4.8	Prinzipien komplexer Informationsverarbeitung im Gehirn	91
4.4.9	Der Prozess der Transduktion von Sinnesreizen	92
4.5	Neurobiologische Grundlagen von Lernen und Gedächtnisbildung	92
4.5.1	Lernen als Veränderung der synaptischen Übertragung	93
4.5.2	Die Arbeit des Hippocampus	97
4.5.3	Das limbisch-emotionale Gedächtnis.	98
4.6	Die neurobiologischen Grundlagen intelligenter Leistungen	100
4.6.1	Der Zusammenhang von Körpergröße, absoluter und relativer Gehirngröße und Intelligenz.	100
4.6.2	Der Enzephalisationsindex.	105
4.6.3	Oberfläche und Volumen des Cortex	107
4.6.4	Packungsdichte und Anzahl corticaler Neuronen	110
4.6.5	Zahl der Cortexareale und weitere Merkmale des Cortex	112
4.6.6	Besonderheiten des Primatencortex	113
4.6.7	Neurobiologie des Bewusstseins	114
4.6.8	Die neurobiologischen Grundlagen der menschlichen Sprache	120
4.6.9	Die neurobiologischen Grundlagen der Bedeutungserfassung und des Verstehens	123
4.6.10	Die neurobiologischen Grundlagen abstrakter geistiger Leistungen	125
4.7	Was sagt uns dies?	127
5	Künstliche Intelligenz	131
5.1	Wie definiert man künstliche Intelligenz?	131
5.2	Worauf beruhen die KI-Verfahren?	136
5.3	Information und Bedeutung	137
5.4	Logisch-mathematische Grundlagen der KI	140
5.5	Symbolische und subsymbolische, lernende und nichtlernende Datenverarbeitung	145
5.5.1	Wissenssysteme – Expertensysteme	145
5.5.2	Entscheidungssysteme	148
5.5.3	Maschinelles Lernen	149
5.5.4	Künstliche neuronale Netze	155
5.5.5	Fortgeschrittene Diagnostik- und Entscheidungssysteme	167
5.5.6	Text- und Spracherkennung („natural language processing“ – NLP), dialogische Programme	177
5.6	Anwendungsmöglichkeiten von KI-Systemen im Privatleben, in Wirtschaft und Gesellschaft.	185

5.6.1	Emotionserkennung und -simulation durch KI-Systeme.	186
5.6.2	Emotionserkennung anhand der Mimik.	187
5.6.3	„Emotionale Roboter“	190
5.6.4	Gedanken- und Absichtserkennung per Hirnscanner	191
5.6.5	Neuromarketing	193
5.6.6	Autonome Fahrzeuge	194
5.6.7	KI in der Industrierobotik	195
5.7	Wie sieht die nahe Zukunft der KI aus?	196
5.7.1	Quantencomputer	196
5.7.2	„Neuromorphic Computing“	197
5.7.3	Das Problem der Kreativität und Innovation	198
5.7.4	Werden KI-Systeme jemals ein Bewusstsein haben?	199
6	Gehirne und KI – wer übertrifft wen worin?	201
6.1	Die Modellierung des einzelnen Neurons	203
6.2	Die Realisierung der horizontalen und vertikalen Organisation neuronaler Systeme	204
6.3	Kann ein KI-System nicht doch ein Grundprinzip oder eine Bedeutung verstehen?	206
6.4	Der Selbstbewertungsalgorithmus und die „verkörperte KI“	208
6.5	Interaktion mit der Welt – der Weg zu starker KI?	208
6.6	Konstruktion und Prädiktion	209
7	Wie geht unsere Gesellschaft mit den KI-Systemen um?	211
7.1	Das Problem moralischer Entscheidungen	212
7.2	Welche realen Gefahren haben schon jetzt KI-Systeme?	214
8	Zusammenfassung und Ausblick	217
	Literatur	225



Zusammenfassung

Wie einzigartig ist die Intelligenz der Menschen im Vergleich zu Tieren und KI-Systemen? Welche menschlichen Leistungen werden zukünftig KI-Systeme übernehmen können? Um diese und andere Fragen im Verlauf dieses Buches diskutieren und beantworten zu können, werden in diesem Kapitel die Intelligenzbegriffe erklärt und die Grundlagen für eine kritische Betrachtung geschaffen. Die Autoren fassen hierfür die Hintergründe und Anschauungen zu menschlicher und tierischer, also natürlicher Intelligenz (NI), sowie die unterschiedlichen Positionen gegenüber künstlicher Intelligenz (KI) zusammen und gehen auf die zahlreichen Herausforderungen für unsere Gesellschaft ein.

Menschen sind seit jeher stolz auf ihre Intelligenz, sie fühlen sich in ihren geistigen Leistungen den nichtmenschlichen Tieren weit überlegen. An diese geistige Sonderstellung des Menschen glauben nicht nur die meisten geistes- und sozialwissenschaftlich orientierten Wissenschaftler, sondern auch viele Naturwissenschaftler einschließlich nicht weniger Neurobiologen. Allerdings gibt es spätestens seit dem Alterswerk von Charles Darwin, „Die Abstammung des Menschen“ (1871), Zweifel an dieser Sonderstellung. Es gehört inzwischen zum Allgemeinwissen gebildeter Menschen, dass manche nichtmenschlichen Tiere wie etwa Affen (Primaten) und Rabenvögel erstaunliche Intelligenzleistungen vollbringen – fast jede Woche wird darüber in den Medien berichtet. Dennoch hält sich weiterhin die Ansicht, nur der Mensch besitze „höhere“ geistige Leistungen wie abstrakt-logisches Denken, sprachliche Kommunikation, ein Kausalverständnis der Welt und ein Selbstbewusstsein – der Mensch sei also in geistiger Hinsicht tatsächlich *einzigartig*.

Nun kommt – seit Jahrzehnten eher kaum bemerkt und seit wenigen Jahren für alle spürbar – eine Bedrohung dieser Anschauung von einer ganz anderen Seite, nämlich von der „künstlichen Intelligenz“ (KI). Während man anfangs die Behauptungen von KI-Anhängern belächelte, irgendwann einmal könnten Computer so intelligent sein wie Menschen und sie vielleicht sogar übertreffen, ist man sich spätestens seit der Veröffentlichung des textbasierten Dialogsystems ChatGPT Ende 2022 darin nicht mehr so sicher.

Die inzwischen rasante Entwicklung der KI wird nicht nur in vielen Wissenschaftsdisziplinen, sondern auch in der öffentlichen Meinung, in vielen Bereichen der Politik und in der Wirtschaft immer kontroverser diskutiert. Zum einen fordern viele Politiker sowie Wirtschaftsvertreter für unser Land einen massiven Ausbau der KI, die ihnen als Allheilmittel gegen den wirtschaftlichen und sozialen Stillstand erscheint, der tatsächlich oder vermeintlich in Deutschland herrscht. Bei der überwiegenden Mehrheit der Bevölkerung hingegen sind die Befürchtungen groß, ein solcher massiver Ausbau könnte zur dramatischen Verschärfung der bereits im Rahmen von „Arbeit 4.0“, „agilem Arbeiten“ usw. vorgesehenen Umwälzungen der Arbeitswelt und einem ebenfalls dramatischen Verlust von Arbeitsplätzen führen. Inzwischen sind Schulen, Lehrer und Bildungsbehörden durch die tatsächlichen oder vermeintlichen Leistungen von ChatGPT aufgeschreckt, wissen aber gar nicht, wie sie sich verhalten sollen. Philosophen, Naturwissenschaftler und auch manche KI-Theoretiker sehen in der KI gar eine „Selbstentmündigung des Menschen“ und eine „Bedrohung der Menschheit“ (S. Hawking), und man ruft dazu auf, Barrieren dagegen einzurichten.

Auch unter führenden KI-Experten gibt es unterschiedliche Meinungen über die gegenwärtige oder behauptete Leistungsfähigkeit und die davon ausgehenden Gefahren. Die einen vertreten die Auffassung, die verbreitete Furcht vor der KI sei ungerechtfertigt, denn was heute an KI-Verfahren angewandt bzw. in Kürze verfügbar sein wird, verdiene das Attribut „Intelligenz“ im Sinne „höherer geistiger Leistungen“ nicht. Was an menschlichen Leistungen tatsächlich bedroht sei, gehöre zu Tätigkeiten, die geistig eher anspruchslos seien. In absehbarer Zeit werde die KI niemals die Leistungsfähigkeit menschlicher Intelligenz erlangen und deshalb diese auch nicht ersetzen können. Es seien aber ganz andere Dinge schon jetzt oder bald zu befürchten, nämlich der Einsatz von KI-Verfahren etwa zur gesellschaftlich-politischen Entscheidungsfindung, die nicht mehr von den Betroffenen, aber auch oft nicht mehr von den Anwendern zu kontrollieren seien, der Einsatz „autonom“, d. h. sich selbst steuernder und entscheidender, Waffen oder die absolute Meinungskontrolle.

Andere Experten hingegen sehen ganz konkret die Möglichkeit, dass KI-Systeme schon bald den Menschen auch in geistig-intellektueller Hinsicht überflügeln – mit all den Konsequenzen, die dies gerade für die geistig Tätigen in unserer Gesellschaft bedeuten könnte. Es könnte also die Situation eintreffen, dass diejenigen, welche die KI erfunden bzw. weiterentwickelt haben, die Ersten sein werden, die von ihr abgeschafft werden.

Eine wissenschaftlich fundierte Einschätzung dieser Situation ist eine schwierige Angelegenheit, muss sie doch hinreichend tief in Wissensbereiche eindringen, die ihrerseits sehr komplex sind. Dazu gehört erst einmal die Grundfrage, worin natürliche Intelligenz (NI) und KI sich unterscheiden bzw. sich gleichen. Dazu müssen wir uns fragen, worin NI, d. h. bei Menschen und Tieren vorhandene Intelligenz, besteht, und ob es hier, wie oft behauptet, fundamentale Unterschiede zwischen menschlicher und tierischer Intelligenz gibt. Dies wird uns im ersten Teil des Buches beschäftigen. Diese Untersuchungen sind notwendig, um für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit der KI überhaupt eine Vergleichsgröße zu haben. Vielleicht gibt es Leistungen tierischer Intelligenz, welche die KI erreichen könnte, während sie bei einigen Leistungen menschlicher Intelligenz scheitert.

Um dies abzuklären, werden wir uns dann genauer mit denjenigen Systemen beschäftigen, welche die NI hervorbringen, nämlich den Gehirnen von Tieren und des Menschen. Was in ihren Gehirnen macht manche Tiere und Menschen intelligent? Ist es die Größe des Gehirns, die Zahl der darin insgesamt oder in nachweislichen Intelligenzzentren enthaltenen Nervenzellen, deren Verknüpfungsstruktur und Interaktionsweisen, oder sind es eher Merkmale auf zellulärer oder subzellulärer Ebene? Für die Beantwortung dieser Fragen müssen wir uns an die Front der aktuellen Hirnforschung begeben.

Danach werden wir uns vertieft mit den Grundlagen der KI, ihrer praktischen Realisierung und ihren derzeitigen und zu erwartenden Anwendungen beschäftigen. Dabei ist interessant, dass sich viele KI-Ansätze von den Arbeitsweisen der Gehirne – soweit jeweils bekannt – inspirieren lassen und lassen, insbesondere in Form der sogenannten künstlichen neuronalen Netze (KNN). Es besteht bei vielen KI-Experten die Hoffnung, dass gerade solche Kenntnisse den KI-Systemen den großen Sprung in die Bereiche von Intelligenz ermöglichen, welche ihren Namen wirklich verdient. Dazu gehören Fähigkeiten wie das kreative Verarbeiten und Anwenden von Wissen, autonome Entscheidungsfindung, das Führen sinnhafter und bedeutungsvoller Kommunikation, die autonome Herstellung von Produkten und die Steuerung wichtiger Prozesse in der Wirtschaft und Gesellschaft und schließlich das eigenständige und kreative Erkunden der Welt.

Im letzten Teil des Buches werden wir uns die Frage stellen, was der gegenwärtige Leistungsstand der KI ist und ob sie tatsächlich schon jetzt einen bedrohlichen Entwicklungsstand in Hinblick auf uns Menschen und unsere individuellen und gesellschaftlichen Bedürfnisse, Tätigkeiten und Ziele erreicht hat. Wird alles tatsächlich auf eine „Entmündigung des Menschen und der Gesellschaft“ hinauslaufen, welche diejenige in vergangenen und gegenwärtigen Diktaturen weit in den Schatten stellen wird, oder wird ganz im Gegenteil die KI eine segensreiche technische Revolution erzeugen?

Welche auch immer die Erkenntnisse sein werden, zu denen wir in unserem Buch kommen, sie werden unser Selbstverständnis des Menschen als ein einzigartig intelligentes Wesen zutiefst berühren.



Zusammenfassung

Was macht die menschliche Intelligenz aus? Dieses Kapitel beschreibt den Ursprung des Intelligenzbegriffs sowie die „Messung“ von Intelligenz durch die gängigen IQ-Tests und deren Aussagekraft. Ist Intelligenz eine einheitliche Fähigkeit oder setzt sie sich aus verschiedensten einzelnen zusammen? Viele Fragen wie diese werden mit Daten aus der Intelligenzforschung diskutiert und erläutert. Außerdem werden die verschiedenen Einflussfaktoren und die Entwicklung von Intelligenz beim Menschen ausführlich dargestellt, um so eine solide Grundlage für den später folgenden Vergleich zu tierischer und künstlicher Intelligenz zu schaffen.

Wir wollen uns im ersten Teil des Buches mit der Frage nach der menschlichen Intelligenz beschäftigen, da diese bis heute als Maßstab sowohl für Untersuchungen tierischer Intelligenz als auch für die Einschätzungen der Leistungsfähigkeit der künstlichen Intelligenz (KI) dient.

2.1 Was ist menschliche Intelligenz, und wie misst man sie?

In der europäischen Antike bedeutet der lateinische Begriff „*intelligentia*“ das Vermögen, zwischen Dingen und Handlungsalternativen auszuwählen. Dieser Begriff wird bereits von antiken Philosophen wie Cicero parallel zum Begriff „*ratio*“ (Verstand, Vernunft) als ein „höheres Seelenvermögen“ angesehen, insbesondere als die Fähigkeit, tiefere und genauere geistige Erkenntnisse zu gewinnen. Es kann aber auch das Produkt, die Erkenntnis selbst, bezeichnen. Diese Auffassung

von Intelligenz als „Vernunfttätigkeit“ oder „Verständnis“ wurde prägend für die mittelalterliche und neuzeitliche Verwendung des Begriffs, häufig in Hinblick auf das Verstehen der Welt und ihrer Vorgänge, wie sie von Gott bestimmt werden. Im Laufe des 19. Jahrhunderts „verweltlichte“ dann der Begriff der Intelligenz hin zu „Urteilsfähigkeit eines Menschen“. Die damals aufkommende Soziologie verband diesen Begriff dann mit klassenspezifischen geistigen Fähigkeiten, etwa der politischen Führungsschicht, der Verwaltung, allgemein der gebildeten Schicht oder der „klassenbewussten“ Arbeiterschaft. Zugleich erhielt die Bezeichnung „Intellektueller“ eine teils positive, teils abwertende Bedeutung.

Die Wende zu einer modernen Verwendung des Begriffs der Intelligenz als einer psychischen Funktion erfolgte gegen Ende des 19. Jahrhunderts durch Autoren wie H. Spencer, F. Galton und A. Binet, die versuchten, eine verlässliche psychologische Methode zum Erfassen von Unterschieden kognitiver Leistungen zu entwickeln. Am bedeutendsten war hier William Louis Stern (1871–1938), geboren in Deutschland als Ludwig Wilhelm Stern und vor den Nationalsozialisten in die USA geflohen. Er ist der Begründer der „Differenziellen Psychologie“, d. h. des Bemühens, die individuellen Eigenschaften eines Menschen, ihre Persönlichkeit, zu erfassen. Intelligenz galt für ihn als „allgemeine geistige Anpassungsfähigkeit an neue Aufgaben und Lebensbedingungen“. Stern entwickelte auch als Erster ein Verfahren zur Bestimmung des Intelligenzquotienten (IQ).

Dies gründete auf der Auffassung, dass Intelligenz aus mindestens 3 Bereichsfähigkeiten besteht, nämlich aus Sprachverständnis-Wortflüssigkeit, numerischem Verständnis und logischem Verständnis – eine Unterscheidung, die auch heute noch gängig ist. Entsprechend geht es bei einem Intelligenztest um das Lösen derartiger bereichsspezifischer Aufgaben. Die Mehrzahl der Experten hält es dabei für sinnvoll, den Begriff der Intelligenz auf kognitive Fähigkeiten wie Denken, Vorstellen, Problemlösen, Verstehen, Beurteilen und damit verbundene sprachliche Kompetenzen zu beschränken, denn nur solche Fähigkeiten seien mit einem Test gut zu messen (Rost 2013; Myers 2014; Neyer und Asendorpf 2018).

Einige Intelligenzforscher wie Howard Gardner gehen hingegen von einer Vielzahl von unterschiedlichen Intelligenzen einschließlich einer „spirituellen Intelligenz“ aus (Gardner 1993). Da es sich aber als schwierig erwiesen hat, brauchbare Tests für all diese „Intelligenzen“ zu entwickeln, ist man in der seriösen Intelligenzforschung vom Gardner’schen Ansatz wieder abgekommen. Populär geworden ist durch den Psychologen und Wissenschaftsjournalisten Daniel Goleman der Begriff der „emotionalen Intelligenz“ (Goleman 1997), aber auch dieser Ansatz stößt bei Experten auf Ablehnung mit dem Hinweis darauf, dass der Begriff „emotionale Intelligenz“ ein buntes Gemisch von sehr unterschiedlichen Vermögen umfasse, von der Fähigkeit, seine eigenen Emotionen zu erkennen, sich in andere hineinzusetzen, bis hin zu Empathie und Mitleid, und es hat sich auch hier als unmöglich erwiesen, aussagekräftige Tests zu entwickeln.

Bis heute umstritten ist auch die Antwort auf die Frage, ob es sich bei der Intelligenz um ein einheitliches Vermögen oder um eine Kombination ganz unterschiedlicher Vermögen handelt, die rein summativ zu einer kognitiven Intelligenz zusammengefasst werden. Die zuerst von C. Spearman (1863–1954) vertretene

und heute weithin akzeptierte Auffassung lautet hingegen, dass es zumindest beim Menschen eine „allgemeine Intelligenz“ oder „Basisintelligenz“ gibt – von Spearman „g-Faktor“ genannt – auf welche bestimmte spezifischere kognitiv-sprachliche Einzelfertigkeiten („s-Faktoren“) aufbauen. Spearman nahm an, dass es aufgrund einer allgemeinen Intelligenzfähigkeit zu einer positiven statistischen Korrelation zwischen Einzelfertigkeiten kommt (d. h., wer im sprachlichen Bereich gut ist, ist es auch im numerischen Bereich), während viele andere Autoren zwar die Existenz einer allgemeinen Intelligenz akzeptieren, jedoch nicht eine durchweg positive Korrelation zwischen Einzelfertigkeiten.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung des Spearman-Schülers Raymond Cattell zwischen „fluider“ und „kristalliner“ Intelligenz (Cattell 1963). Die fluide Intelligenz korrespondiert mit der grundlegenden Schnelligkeit und Effektivität der Informationsverarbeitung im Gehirn, die bereichsspezifische oder kristalline Intelligenz mit dem Sachwissen in ganz unterschiedlichen Bereichen und seiner Verfügbarkeit, oft auch Expertenwissen genannt. Jemand muss schnell denken und Probleme schnell identifizieren können – das ist die fluide Intelligenz –, aber er muss auch ein bestimmtes bereichsspezifisches Wissen haben, um mit den Problemen fertig werden zu können – das ist die kristalline Intelligenz. Die heutigen gängigen IQ-Tests prüfen sowohl die allgemeine Intelligenz als auch die „bereichsspezifischen Intelligenzen“.

Die üblichen Angaben eines IQ beziehen sich auf einen Durchschnitt unterschiedlicher Begabungen bei einer Person, wobei der IQ auf eine lebensaltersabhängige Durchschnittsintelligenz normiert ist (Neyer und Asendorpf 2018). Das heißt, dass niemand an und für sich intelligent ist, sondern immer nur im Vergleich zu seiner Altersstufe. Für bestimmte Altersstufen gibt es dementsprechend eine durchschnittliche Intelligenz, die definitionsgemäß bei 100 liegt. IQ über 100 zeigen entsprechend eine überdurchschnittliche, unter 100 eine unterdurchschnittliche Intelligenz an.

Die Intelligenz einer Altersstufe ist normal- bzw. Gauß-verteilt; dies bedeutet, dass statistisch knapp 70 % aller Menschen einen IQ relativ eng um den Mittelwert im Abstand einer normierten Standardabweichung aufweisen, genauer innerhalb des Intervalls zwischen 85 und 115 (Abb. 2.1). Menschen mit einem IQ unter 85 machen einen etwas „minderbemittelten“ Eindruck und solche mit einem IQ über 115 einen deutlich intelligenten Eindruck. Hochbegabte haben in der Regel einen IQ von 135 oder mehr und umfassen ca. 1 % ihrer Altersgruppe, allerdings sehen manche Autoren eine Hochbegabung bereits bei einem IQ von 125 als vorhanden an.

IQ-Tests wie der bekannte Hamburg-Wechsler-Intelligenztest für Erwachsene (*HAWIE-R*, ab 2013 *WAIS-IV*; gültig für Personen im Alter von 16–74 Jahren) beziehen sich in der gegenwärtigen Form auf 4 „Aufgabengruppen“, nämlich Sprachverständnis, wahrnehmungsgebundenes logisches Denken, Arbeitsgedächtnis und Verarbeitungsgeschwindigkeit (Petermann 2012). Beim Test wechseln sich die Aufgaben der 4 Bereiche ab. Die Testergebnisse werden altersspezifisch normiert, und es wird ein Profil erstellt, das über die Einzelbegabungen Aufschluss gibt, und schließlich wird ein Gesamt-IQ ermittelt. Daraus ergeben sich Erkennt-

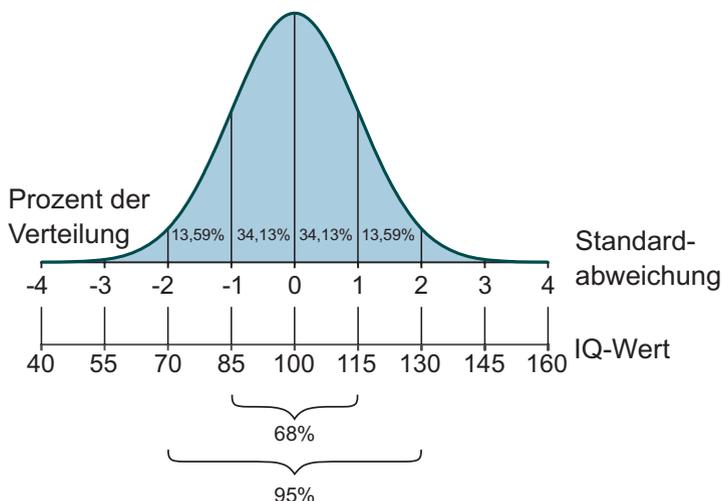


Abb. 2.1 Normal-(Gauß-)Verteilung des Intelligenzquotienten (IQ) in der Bevölkerung. Ein IQ von 100 repräsentiert den statistischen Durchschnitt. Im Bereich von 85–115 (± 1 Standardabweichung) liegen rund 68 % der gemessenen IQ; dieser repräsentiert den Normalbereich der mit einem Intelligenztest (IQ-Test) gemessenen Intelligenz. Im Bereich von 70–130 (± 2 Standardabweichungen) befinden sich 95 % der IQ-Werte. Personen mit einem IQ unter 70 gelten als deutlich minderbegabt, solche mit einem IQ über 130 als deutlich hochbegabt. Beide Gruppen umfassen jeweils 2 % der Bevölkerung.

nisse über individuelle Begabungen, die für die Schul- und Berufswahl genutzt werden können, aber auch Aufschluss über spezifische Leistungsabfälle bei älteren Menschen liefern.

Es zeigt sich, dass bei den gängigen IQ-Tests sowohl die allgemeine Schnelligkeit der „Informationsverarbeitung“ als auch bereichsspezifische Begabungen oder Defizite ausschlaggebend sind. Die Tatsache, dass Menschen unterschiedlich begabt sind, entspricht auch der Alltagserfahrung, denn der eine kann gut reden und schreiben, hat aber Probleme mit der räumlichen Orientierung oder dem Rechnen, beim anderen ist es genau umgekehrt. Jedoch gilt, dass ein intelligenter Mensch in vielen Bereichen begabt ist; das unterscheidet ihn von einem Menschen mit einer sogenannten „Inselbegabung“, bei dem nur in einem Bereich wie Mathematik oder Gedächtnisleistungen außerordentliche Fähigkeiten vorliegen, oft zusammen mit Defiziten in anderen Bereichen.

2.2 Gibt es geschlechtsspezifische Unterschiede?

Eine brisante Frage ist diejenige nach Intelligenz- und Begabungsunterschieden zwischen Jungen und Mädchen bzw. Männern und Frauen. Einige Autoren gehen von einem kleinen, aber statistisch robusten Unterschied von 4–5 IQ-Punkten

zugunsten der Jungen im Vergleich zu den Mädchen aus, was bedeuten würde, dass Jungen im Durchschnitt ein wenig intelligenter sind als Mädchen (Neubauer und Stern 2013). Andere Autoren zitieren hingegen Untersuchungen, die nur einen Unterschied von weniger als einem IQ-Punkt ergaben (vgl. Rost 2013). Eine seriöse Beantwortung der Frage nach einem Intelligenzunterschied zwischen den Geschlechtern wird dadurch erschwert, dass inzwischen viele Auswahlverfahren, die sich am IQ orientieren, so lange verändert werden (z. B. durch die problematische Hinzunahme „emotionaler bzw. sozialer Intelligenz“), bis eine Gleichheit im IQ erreicht ist – ob zu Recht oder Unrecht, muss derzeit als unentschieden betrachtet werden. In jedem Fall sind mögliche Unterschiede stets gering und nehmen immer weiter ab.

Als gesichert gilt hingegen die Tatsache, dass sich in seriösen Untersuchungen wenige, aber deutliche Unterschiede in einigen Intelligenz- bzw. Begabungsbereichen zwischen den Geschlechtern finden lassen: Während die Jungen im Handlungsteil der IQ-Tests, insbesondere bei Aufgaben zur Raumvorstellung (z. B. mentale Rotation) und zur Mathematik deutlich besser abschneiden, werden sie von den Mädchen im Verbalteil der IQ-Tests, also bei Aufgaben, die Wahrnehmungsgeschwindigkeit, Wortfindung, verbale Flüssigkeit und verbales Benennen, episodisches Gedächtnis, visuelles Kurzzeitgedächtnis testen, aber auch bei Feinmotorik, übertroffen. Interessanterweise werden keine Unterschiede beim verbalen und nichtverbalen Schlussfolgern gefunden. Allerdings scheinen die jeweiligen „Gewinne“ der Jungen etwas größer zu sein als die der Mädchen, was den geringfügig höheren IQ-Durchschnitt in manchen Studien erklären könnte.

Auch zeigt sich, dass bei der Intelligenzverteilung der Jungen die Streuung (die Varianz) signifikant größer, die Gauß-Kurve also flacher und damit breiter ist als die der Mädchen (Deary et al. 2003; Rost 2009). Während es im Durchschnittsbereich der Intelligenz (also bei einem IQ zwischen 90 und 115) ein kleines Übergewicht der Frauen von 2 % gibt, liegt im unteren und oberen Extrembereich eine deutliche Dominanz der Jungen von 17,2 bzw. 15,4 % vor. Dies besagt, dass es unter den Jungen mehr Minderbegabte und mehr Hochbegabte gibt. Ab einem IQ von 145, also bei „Höchstbegabten“ erreicht das Verhältnis von Jungen zu Mädchen 8:1 (Rost 2013).

Die Gründe hierfür sind unklar. Genannt werden hormonale Einflüsse. So wird darauf hingewiesen, dass das männliche Sexualhormon Testosteron typisch männliche kognitive Leistungen wie räumliche Orientierung befördert, während verbale Fähigkeiten mit dem weiblichen Sexualhormon Östrogen bzw. Östradiol in Zusammenhang gebracht werden. Einige Untersuchungen ergaben, dass sich bei Frauen auf dem Höhepunkt des Monatszyklus die Unterschiede in den kognitiven Leistungen zu den Männern erhöhen und sich auf dessen Tiefpunkt die Frauen den kognitiven Leistungen der Männer (z. B. bei mentaler Rotation) annähern.

2.3 Der Voraussagewert des IQ

Eine wichtige Frage lautet, welchen Voraussagewert der IQ für den schulischen, akademischen und beruflichen Erfolg hat. Untersuchungen zeigen, dass der Faktor „Intelligenz“ zu rund einem Drittel in den Schulerfolg eingeht (Rost 2013). Das erscheint unerwartet niedrig zu sein, aber wir müssen dabei bedenken, dass die schulische Leistung neben der Intelligenz von 2 weiteren Hauptfaktoren abhängt, nämlich Motivation und Fleiß (Roth 2021). Bei einem einigermaßen erfolgreichen Schüler kann es sich um jemanden handeln, der sehr intelligent, aber nur mäßig motiviert und nur mäßig fleißig ist, oder einen, der nur durchschnittlich intelligent, aber sehr motiviert und sehr fleißig ist. Motivation, Fleiß und Intelligenz können sich gegenseitig kompensieren!

Hinsichtlich des Erfolgs bei höheren Ausbildungsstufen wie der Universität sinkt die Vorhersagekraft des IQ und auch des Durchschnitts der Abiturnoten auf 20–30 %, schneidet aber von allen Faktoren immer noch am besten ab. Mit zunehmendem Alter steigt bei ungefähr gleichbleibendem IQ der Einfluss des Wissenserwerbs und der Erfahrung auf den Berufserfolg – es häuft sich eben mehr Fachwissen an. Und selbst wenn zum höheren Alter hin der IQ altersbedingt absinkt – wenngleich in individuell höchst unterschiedlichem Maße –, so kann dies über lange Zeit durch weiteren Wissenserwerb und Erfahrung kompensiert werden.

2.4 Einflussfaktoren auf die Intelligenz

Bis vor Kurzem herrschten 2 entgegengesetzte Auffassungen, nämlich dass Intelligenz überwiegend genetisch bedingt sei oder dass sie überwiegend durch Umwelteinflüsse bestimmt werde. Inzwischen geht man von einer engen Wechselwirkung von 5 Haupteinflussfaktoren aus: 1) Gene, 2) epigenetische Kontrollmechanismen der Gen-Expression, 3) vorgeburtliche Umweltfaktoren, in der Regel vermittelt vom Körper und Gehirn der werdenden Mutter, 4) frühkindliche Einflussfaktoren, meist vonseiten der Eltern, und 5) später wirkende Faktoren (Kindergarten, Schule, weitere Ausbildung, eigene Erfahrungen). Man nimmt an, dass die ersten 3 Faktoren, die bis zur Geburt auf die Entwicklung des Gehirns einwirken, 30–50 % der menschlichen Intelligenzunterschiede (der „Varianz“) bestimmen, weitere 30 % werden durch frühkindliche Umweltfaktoren und der Rest (20–30 %) durch später wirkende Faktoren festgelegt. Die oben definierte allgemeine Intelligenz eines Menschen stabilisiert sich sehr schnell und scheint mit 12–14 Jahren zum größeren Teil ausgebildet zu sein (Neyer und Asendorpf 2018). Die weitere Steigerung des IQ geht auf Vermehrung von Erfahrung und Wissen zurück. Eine Steigerung der allgemeinen Intelligenz im Erwachsenenalter ist meist nur im Bereich von 5 IQ-Punkten möglich, wobei der Effekt eines intensiven Trainings nur für kurze Zeit anhält. Was tatsächlich hilft, ist ein lang andauerndes Intelligenztraining (Rost 2013).

2.5 Die Individualentwicklung menschlicher Intelligenz

Wie bereits erwähnt, geschieht die Bestimmung menschlicher Intelligenz altersspezifisch, und deshalb gilt es als unzulässig, die Intelligenz eines Kindes mit der eines Erwachsenen zu vergleichen. Der Gedanke, dass Intelligenz ebenso wie andere psychisch-geistige Merkmale und Fähigkeiten des Menschen sich wie der Körper entwickeln, ist uns selbstverständlich, und deshalb betrachten wir die geistigen Leistungen eines Kindes als „noch nicht voll entwickelt“ und sprechen bei Minderleistungen in der Schule von „Entwicklungsstörungen“. Über lange Zeit beachtete man dabei nur den Übergang von einem kindlichen und damit unlogisch-unvernünftigen Zustand zum logisch-vernünftigen Erwachsenenzustand als wichtig, und dieser Übergang vollzog sich offenbar erst im Zusammenhang mit der Pubertät, wenn ein junger Mensch die Jugendtorheiten ablegt und „zur Vernunft kommt“. Mit wenigen Ausnahmen übersah man dabei die Tatsache, dass Kinder bereits in einem Alter von 4–5 Jahren zu erstaunlichen geistig-gedanklichen Leistungen fähig sind.

Wie sich ab der Geburt im Kindesalter der menschliche Geist entwickelt, wurde erst spät ein Gegenstand der Wissenschaft und ist untrennbar mit dem Werk des Schweizer Biologen und Entwicklungspsychologen Jean Piaget (1896–1980) verbunden (vgl. Piaget und Inhelder 1977). Im Grundsatz entwickeln sich nach Piaget Geist und Intelligenz in einem für alle Menschen gültigen stufenförmigen Entwicklungsprozess, der ab der Geburt durch ein Zusammenspiel von biologischen Reifungsprozessen, aktivem Erfahrungserwerb und sozialer Prägung gekennzeichnet ist und mit rund 15 Jahren zu einem gewissen Abschluss kommt.

Piaget setzt sich damit zum einen von einer „nativistischen“ Auffassung der Intelligenzentwicklung ab, die davon ausgeht, dass wesentliche Teile von Intelligenzleistungen angeboren sind und sich im Laufe von Kindheit und Jugend aus sich heraus weiterentwickeln. Zum anderen lehnt er einen rein sensualistisch-behavioristischen Ansatz ab, der kognitive Leistungen als Ergebnis eines Versuch-und-Irrtums-Lernens beim Umgang mit sinnlichen Erfahrungen ansieht. Vielmehr bilden sich für Piaget durch den aktiven Umgang des Kindes mit seiner Umwelt besondere Operationen aus, welche die Sinneserfahrungen formen, erweitern, umdeuten und schließlich zu Vorstellungen und Gedanken ohne Bezug auf sie führen. Es wird also jeweils eine neue Stufe der geistigen Entwicklung erklommen, die nicht einfach eine Fortsetzung früherer Stufen ist.

Alle nachfolgenden entwicklungspsychologischen Untersuchungen haben Piagets Vorstellungen zumindest im Grundsatz bestätigt. Für das Thema unseres Buches sind diese entwicklungspsychologischen Erkenntnisse deshalb interessant, weil viele Untersuchungen der geistigen Fähigkeiten nichtmenschlicher Tiere erstaunliche Parallelen zu den Entwicklungsstufen kognitiver Leistungen des Menschen aufweisen, wie wir zeigen werden.

Ausgangspunkt der Entwicklungstheorie (einer „genetischen Theorie“) des menschlichen Geistes bei Piaget ist der Begriff von „Schemata“ als Grundbausteinen von Wissen, die der Mensch auf seine Umwelt anwendet und sein

Verhalten danach ausrichtet. Diese Schemata entwickeln sich nachgeburtlich (eventuell mit vorgeburtlichen Vorstufen) in 4 Phasen, nämlich einer sensomotorischen Phase, einer präoperativen Phase, einer Phase konkreter Operationen und einer Phase formaler Operationen. Hinzu kommen 2 Basisprozesse der Entwicklung von Schemata, nämlich zum einen die Bestätigung und Erweiterung vorhandener Schemata durch neue Erfahrung, von Piaget Assimilation genannt, und zum anderen die Korrektur vorhandener und offenbar unzulänglicher Schemata durch neue, abweichende Erfahrungen, Akkommodation genannt (Piaget und Inhelder 1977).

Die sensomotorische Phase (0–2 Jahre) ist gekennzeichnet durch das Sammeln sensomotorischer Erfahrungen, vornehmlich bei der Perfektion der Bewegungssteuerung (besonders der Greifbewegung) und der adäquaten Reaktion auf Sinnesreize. Hierbei werden angeborene Reflexmechanismen immer mehr durch erfahrungsbasierte Abläufe erweitert bzw. ersetzt und bilden somit Gewohnheiten. Während für das Neugeborene ein Gegenstand nicht mehr existiert, wenn er länger als 5 s nicht mehr sichtbar wird, lernt das Kleinkind, dass nicht sichtbare Gegenstände dennoch weiterexistieren. Es bildet sich im 2. Lebensjahr langsam Objektpermanenz aus, jedoch noch ohne „innere“ Repräsentation. Ebenso tritt die Unterscheidung von unbelebten Objekten und belebten Wesen anhand von Unterschieden in ihrer Bewegungsweise ein, insbesondere anhand der Zielorientierung von Bewegungen bei Tieren und Menschen.

Die präoperationale Phase (2–7 Jahre) ist nach Piaget durch verinnerlichte geistige Aktivitäten, z. B. in Bild und in Worten, gekennzeichnet, allerdings noch sehr nahe am direkt Erlebten. Diese Phase ist durch typisch „irrationales Denken“ gekennzeichnet, z. B., dass Jungen sich in Mädchen verwandeln können, wenn sie mit den Spielsachen des anderen Geschlechts spielen, oder durch Vermenschlichung von Dingen („böser“ Tisch, weil man sich an ihm gestoßen hat). Es herrscht ein „magisches Denken“ vor, d. h. die Auffassung, Dinge und Geschehnisse könnten durch Wünsche beeinflusst werden. Es gibt noch keinen Begriff konstanter Mengen beim Umfüllen, es dominiert subjektives Denken, d. h., Dinge werden so verstanden, wie sie dem Kind erscheinen. Ebenso herrscht eine egozentrische Grundhaltung vor, z. B. bei der Schwierigkeit, sich in die Sichtweise der Anderen hineinzusetzen. Es gibt nur eine Sichtweise – die eigene.

In der Phase der konkreten Operationen (7–12 Jahre) kann das Kind mit Vorstellungen bekannter Objekte und Abläufe gedanklich operieren. Dies zeigt sich in zunehmend erfolgreichen Übergang von der „reinen“ Wahrnehmung zu logischer Schlussfolgerung. Konstanz- und Invarianzgesetze werden erlernt, aber immer im Zusammenhang konkreter Anlässe. Es entwickeln sich die Fähigkeit zur Klassifikation von Objekten anhand von Merkmalen und die Fähigkeit, Dinge anhand ihrer Merkmalsunterschiede anzuordnen (Seriation) und schließlich die Bildung von Ober- und Unterbegriffen (hierarchische Klassifikation).

Während der Phase der formalen Operationen (12–15 Jahre) gehen Kinder dazu über, Probleme durch Nachdenken zu lösen. Sie operieren mit abstrakten Entitäten und sind dazu fähig, Sachverhalte anhand von logischen Schlussfolgerungen zu erörtern. Hinzu kommt die Fähigkeit, hypothetische Fragen zu formulieren, um

mehrere alternative Lösungsszenarien „durchzuspielen“, um z. B. unrealistische Möglichkeiten auszuschließen.

Die Entwicklungspsychologie nach Piaget (vgl. Pauen 2016; Myers 2014) hat zwar Piaget im Grundsatz bestätigt, jedoch hat sie mithilfe des Einsatzes neuer Registriermethoden nachweisen können, dass die meisten der von Piaget genannten Leistungen deutlich früher auftreten, als er angenommen hatte. Dies liegt vornehmlich daran, dass ihm Standardtechniken der heutigen experimentellen Säuglingsforschung nicht zur Verfügung standen. Hierzu gehört das automatisierte Registrieren von Augenbewegungen, Greifbewegungen und der Intensität des Schnullersaugens, aber auch physiologische Parameter wie Herzfrequenz, Hautleitfähigkeit und Hirnaktivität vermittels der „Nahinfrarotspektroskopie“, die bereits bei Säuglingen und Kleinkindern problemlos anwendbar ist (vgl. Taga et al. 2003).

Heutige Verfahren der Säuglingsforschung sind 1) die Präferenzmethode bzw. visuelles Präferenzverfahren, bei der/dem zwei visuelle Reize gleichzeitig dargeboten werden und dabei registriert wird, welchen Reiz Säuglinge länger anschauen, 2) die Habituations-Dishabituations-Methode, bei der ein Reiz mehrfach dargeboten und dann mit einem zweiten anderen Reiz zusammen präsentiert wird. Schauen die Säuglinge den neuen Reiz im Mittel signifikant länger dann, so folgert man daraus, dass sie diesen als neu wahrnehmen (Neuigkeitspräferenz) und den Habituationsreiz wiedererkennen. 3) Das Paradigma der Erwartungsverletzung, bei dem Säuglingen eine Situation dargeboten wird, in der die oben genannten „protophysikalischen“ Erwartungen wie die Gesetze der Schwerkraft außer Kraft gesetzt sind (z. B. Flasche schwebt neben einem Tisch in der Luft). Säuglinge betrachten diese physikalische Unmöglichkeit länger als ein vergleichbares, mögliches Ereignis, z. B., wenn die Flasche auf dem Tisch steht.

Nach den mithilfe dieser Techniken und Methoden gewonnenen Erkenntnissen ist die nonverbale Kommunikation mit der primären Bezugsperson, meist (aber nicht notwendig) der Mutter, nach wenigen Wochen vorhanden („primäre Inter-subjektivität“), und damit die Reaktion auf Gesichter, Lächeln und die menschliche Stimme. Nach 8–9 Monaten ist der Säugling in der Lage, dem Blick oder der Zeigebewegung der Mutter mit seinem Blick zu folgen und so über eine triadische Aufmerksamkeit (Säugling, Mutter, Objekt) eine „sekundäre Intersubjektivität“ herzustellen. Parallel bildet sich bei Handlungen und beim Umgang mit Gegenständen eine Berücksichtigung der Gefühle nahestehender Personen über deren Gesichtsausdruck aus. Dies ist dann gepaart mit dem bekannten Fremdeln.

Früher als von Piaget angenommen tritt die Wahrnehmung subjektiver (illusionärer) Konturen auf. Die Objektpermanenz tritt bereits mit 8–12 Monaten auf, also im Laufe des 1. Lebensjahres. Auch können Kinder in diesem Alter das „Umverstecken“ von Gegenständen korrekt nachverfolgen. Erstaunlicherweise besitzen sie schon in diesem Alter Vorstellungen über physikalisch mögliche und unmögliche Situationen und Abläufe, also eine Art „Protophysik“, welche die Grundbegriffe über die Undurchdringlichkeit von Objekten, Schwerkraft, unterschiedliche Wechselwirkungen zwischen unbelebten und belebten Objekten, kausale Wirkungszusammenhänge, plötzliches Verschwinden usw. enthält. Die Klein-

kinder sind überrascht bei Verletzung solcher protophysikalischen Erwartungen. Sie können also Kategorien bilden, bevor sie sprechen können. Unterscheidungen zwischen beliebigen Objekten und Lebewesen treten mit 11 Monaten und bei ihnen bekannten Objekten und Lebewesen bereits mit 9 Monaten auf, die Unterscheidung zwischen Menschen und „Tieren“ mit 7 Monaten. In diesem Alter zeigt sich das Erkennen selbst initiiertes zweckhafter (intentionaler) Bewegungen wie Greifen, Zeigen und Blicken. Die Kinder können nun kleinere Mengen (bis 3) und größere Mengen unterscheiden, und zwar umso besser, je größer der numerische Abstand ist.

Die amerikanische Entwicklungspsychologin Elisabeth Spelke entwickelte eine wichtige Theorie von (derzeit) 5 voneinander relativ unabhängig bestehenden Basiskonzepten, die zusammen ein „Kernwissen“ über grundlegende Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten der Lebenswelt von Menschen, das bereits in der frühen Kindheit sichtbar wird und vermutlich evolutionäre Wurzeln hat (vgl. Spelke und Kinzler 2007). Das bei Babys und Kleinkindern bereits vorhandene Basiswissen umfasst folgende Inhalte:

Objektrepräsentation („object representation“): Objekte sind für das Kleinkind umgrenzte und undurchdringliche Einheiten mit einem gemeinsamen Schicksal („cohesion“, „solidity“), die aufgrund einer intuitiv erfassten Trägheit sich auch zusammen auf einem gemeinsamen Pfad bewegen, z. B. fallen („continuity“) und nur per physischem Kontakt miteinander wechselwirken. Das Kleinkind hat danach bereits einen intuitiven Begriff der Schwerkraft. Dieses Basiskonzept schließt amorphe Entitäten wie Futter, Sand oder Flüssigkeiten aus, aber auch selbstbewegende, also belebte Dinge. Es wird zur Grundlage der bereits erwähnten schnell sich entwickelnden Vorstellung einer Objektpermanenz und eines kausalen Zusammenhangs.

Agenten und Aktionen („agents and actions“): Auffälliges Merkmal belebter Entitäten ist ihre Zielgerichtetheit („goal-directedness“), deren selbsterzeugte Bewegung nicht kohärent sein muss. Ihre Wirkungen müssen nicht durch direkten Kontakt erfolgen wie bei unbelebten Objekten, sondern können durch soziale Signale wie Blicke und Zeigebewegungen verursacht sein, woraus sich soziale Interaktionen ergeben.

Basales Zahlensystem („core number system“): Kleinkinder verfügen über ein numerisches Verständnis, das bei Situationen von 2–3 Objekten einigermaßen präzise ist und bei höheren Objektzahlen immer unpräziser wird – es sei denn, die numerischen Unterschiede sind sehr groß. Insgesamt wird zwischen einem Objekt, wenigen und vielen Objekten gut unterschieden. Auch die Fähigkeit zu Addition und Subtraktion scheint sehr früh vorzuliegen.

Geometrie der Umwelt („geometry of environment“): Bei der Raumwahrnehmung dominieren der Abstand und Winkel von Objekten und die Oberflächenbeschaffenheit, auf der Objekte angeordnet sind. Erst später entwickelt sich eine Orientierung an Landmarken, d. h. auffälligen Objekten.

Soziale Interaktionen („social interactions“): Bereits im Mutterleib erlernt das Ungeborene die Stimme der Mutter und den Geruch ihrer Haut über das Fruchtwasser. Ein wenige Wochen altes Baby kann menschliche Gesichter von nicht-