

# Von Carl Stumpfs Erkenntnislehre zu modernen Ansätzen der Logik und Künstlichen Intelligenz

Frieder Stolzenburg<sup>1,2</sup> and Stefanie Krause<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Harz, Wernigerode, Germany,  
E-Mail: {fstolzenburg,skrause}@hs-harz.de

<sup>2</sup>Senior Visiting Fellow, University of New South Wales  
(UNSW), School of Computer Science and Engineering,  
Sydney, Australia, E-Mail: f.stolzenburg@unsw.edu.au

## 1 Einleitung

Carl Stumpf (1848–1936) gehört zu den prägenden Gestalten der deutschsprachigen Philosophie an der Schwelle vom 19. zum 20. Jahrhundert. Seine Arbeiten reichen von der Psychologie über die Phänomenologie bis zur Musiktheorie. Ein lebenslangen Projekt war für ihn die Arbeit an seiner *Erkenntnislehre*, an der er fast 10 Jahre bis zu seinem Tod arbeitete. Posthum wurde sie in zwei Bänden von seinem Sohn Felix Stumpf veröffentlicht (Stumpf, 1939, 1940). Charakteristisch für Stumpfs Ansatz ist der Versuch, Erkenntnis nicht rein spekulativ, durch allgemeine Überlegungen, sondern unter Rückgriff auf psychologische und phänomenologische Analysen zu begründen.

Erst im Alter von 80 Jahren fasst Carl Stumpf den Entschluss, „in volkstümlicher Form eine Gesamtdarstellung der Philosophie zu geben in der Auffassung, die sich ihm nach den Erfahrungen eines langen Lebens herausgebildet hatte“, so Felix Stumpf in seinem Vorwort zur *Erkenntnislehre*. Im Laufe der Zeit des Schreibens verlor sich jedoch der populäre Charakter zugunsten einer interdisziplinären Zusammenschau von Erkenntnissen unter anderem aus Philosophie, Mathematik, Psychologie und Musikwissenschaft.

Im Unterschied zur sich zeitgleich entwickelnden mathematischen Logik – etwa bei Frege (1879) – verzichtet Stumpf bemerkenswerterweise jedoch bewusst auf eine strenge Formelsprache. Dennoch thematisiert er zentrale logische Prinzipien und unterscheidet systematisch

zwischen sogenannten *universalen* und *regionalen* (materialen) Axiomen. Diese Unterscheidung erweist sich aus heutiger Sicht als überraschend anschlussfähig an moderne Entwicklungen der Logik und der Künstlichen Intelligenz (KI).

Der vorliegende Aufsatz verfolgt daher das Ziel, ausgehend von Stumpfs *Erkenntnislehre* Bezüge zu gegenwärtigen Ansätzen der formalen Logik – einschließlich nicht-klassischer Logiken – sowie zur modernen KI, insbesondere zu großen Sprachmodellen, herauszuarbeiten. In kurzen Exkursen werden einzelne Spezialthemen etwas vertieft.

## 2 Universale und regionale Axiome

Stumpf versteht Axiome nicht wie in der Mathematik primär als willkürlich gesetzte Anfangssätze eines formalen Systems, sondern als unmittelbar einsichtige Grundlagen der Erkenntnis. Dabei unterscheidet er zwei Klassen:

- *universale Axiome*, die für alle Gegenstandsbereiche gelten,
- *regionale* (oder *materiale*) *Axiome*, die nur für bestimmte Bereiche oder Regionen der Wirklichkeit einschlägig sind.

Beide Arten von Axiomen gehen nach Stumpf auf unterschiedliche Quellen zurück: Universale Axiome wurzeln in allgemeinen Vernunftgesetzen, regionale Axiome hingegen in Tatsachen, insbesondere in der Struktur von Wahrnehmungen und psychischen Gegebenheiten.

### 2.1 Universale Axiome

Zu den *universalen Axiomen* zählt Stumpf insbesondere den *Satz des Einschlusses* (kategorisches Axiom), den *Satz der Kontradiktion* und den *Satz der Alternative*, den *Satz der Determination* sowie verschiedene *Folgerungsaxiome* (z. B. syllogistische Schlüsse). Diese Axiome sind unabhängig vom jeweiligen Gegenstandsbereich gültig. Sie betreffen etwa Identität und Teil-Ganzes-Beziehungen, Ausschluss von Widersprüchen sowie die Struktur deduktiver Schlüsse.

Logische Schemata und damit universale Axiome sind in der Regel abstrakt, „leere Hüllen mit Leerstellen, in die bestimmte Denkinhalte eingesetzt werden sollen“ (Stumpf, 1939, S. 128). Sie lassen sich im Unterschied zu Tatsachenbehauptungen nur schwer prüfen oder gar beweisen. So besagen etwa die Sätze der Kontradiktion und der Alternative, dass eine Aussage nur entweder wahr oder falsch sein kann, und implizieren damit eine zweiwertige Logik (*tertium non datur*) wie die Prädikatenlogik. Diese ist zwar universell im Sinne der informatischen Automatentheorie (Turing, 1936), d. h. jede prädikatenlogische Ableitung lässt sich durch eine Computerberechnung simulieren und umgekehrt, aber sie ist angesichts anderer, mehrwertiger Logiken nicht alternativlos und unter anderem deshalb nicht beweisbar.

Auch Instanzen des Satzes des Einschlusses wie „Alle Häuser haben Dächer.“ ließen sich nur durch Überprüfung aller, im Extremfall unendlich vielen Beispiele von möglichen Häusern beweisen. Dies gilt erst recht für den Satz der Determination, dass ein Ding nicht verschiedene Eigenschaften derselben Gattung besitzen kann und, was unter einer Gattung fällt, spezifisch

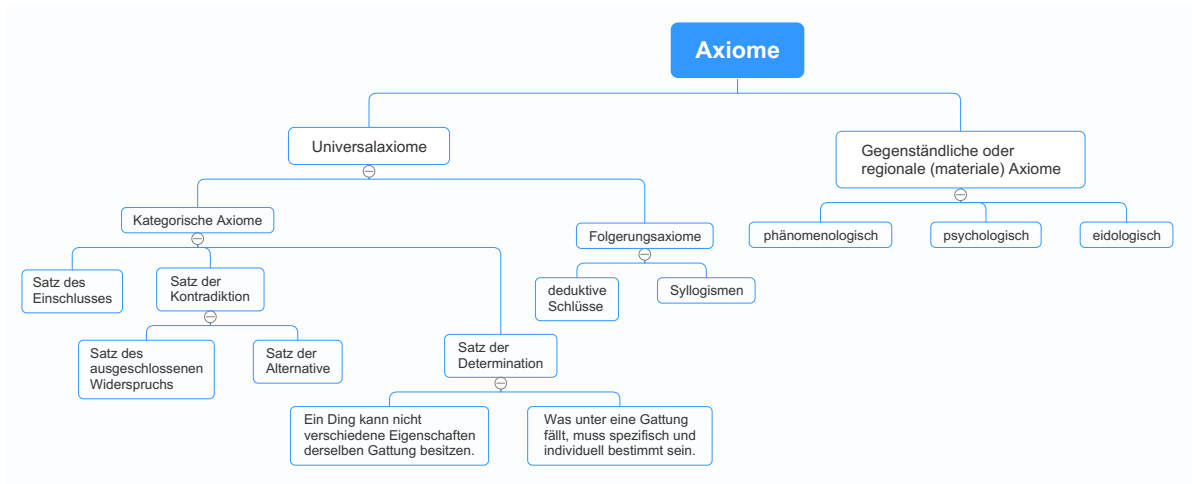


Abbildung 1: Axiomatik gemäß Carl Stumpfs *Erkenntnislehre*

und individuell bestimmt sein muss (Stumpf, 1939, S. 146ff). Voraussetzung ist dabei in jedem Fall, dass Streitigkeiten der Begriffsbildung, z. B. von Farben oder Gemütszuständen, geklärt sind, da sich sonst überhaupt keine formalen, präzisen Aussagen treffen lassen. Abb. 1 zeigt einen Überblick der Axiomatik von Carl Stumpf.

## 2.2 Regionale Axiome

*Regionale* Axiome beziehen sich auf bestimmte Domänen wie Sinneswahrnehmungen, psychische Akte oder Werturteile. Stumpf unterscheidet hier zwischen *phänomenologischen*, *psychologischen* und *eidologischen* Bereichen. Typisch für regionale Axiome ist, dass sie nicht die gleiche Evidenz und Eindeutigkeit aufweisen wie universale Axiome und stärker von empirischen und kulturellen Faktoren abhängen.

Regionale Axiome beziehen sich auf Gegenstände und beschreiben deren Merkmale. Sie sind phänomenologisch, wenn sie Sinnesempfindungen beschreiben. Dabei können die Merkmale mehrere Dimensionen haben, z. B. gibt es drei Raumdimensionen, aber nur je eine für Zeit, Farbenhelligkeit und Tonhöhe. Psychische und eidologische regionale Axiome handeln „von den Strukturverhältnissen elementarer psychischer Funktionen“ und „Gebilde“ (Stumpf, 1939, S. 162f). Sie beschreiben Bewusstseinsinhalte und führen zum Gebiet der Ethik und Normen. Beispiele hierfür sind:

- „Wahrheit ist ein Wert an sich.“
- „Das Wohl der Menschheit ist ein höheres Gut als das eines darin befassten Einzelnen.“

Die Aussagen dieser beiden Axiome stellt Stumpf (1939, S. 164) nicht in Frage. Aber während der erste Satz von den meisten Menschen vermutlich zu allen Zeiten unumstritten akzeptiert werden dürfte, kann der zweite Satz kritischer gesehen werden. Er stellt das Grundprinzip des *Utilitarismus* dar, also einer zweckorientierten Ethik. Obwohl dieses Prinzip grundsätzlich sinnvoll erscheint, kann es jedoch gegen Einzelne ausgenutzt werden und somit gegen die

Menschenwürde verstoßen. Zu Beginn der nationalsozialistischen Herrschaft in Deutschland, als Stumpf die *Erkenntnislehre* schrieb, ist dies sicherlich ein durchaus relevanter Punkt. Klar ist jedenfalls, dass derartige regionale Axiome von vielen Faktoren abhängen, die sich zudem mit der Zeit ändern können, wie jede allgemeine, ethische Norm.

### 3 Bezüge zur modernen formalen Logik

#### 3.1 Vom Syllogismus zur Prädikatenlogik

Syllogismen werden schon seit der Antike betrachtet und bieten auch heute noch ein weites Forschungsfeld (Khemlani und Johnson-Laird, 2012; Ando et al., 2023; Ozeki et al., 2024). Ein Syllogismus besteht aus insgesamt drei Behauptungen, die universell oder existentiell (partikulär) quantifiziert sind und Verneinungen enthalten können. Es stellt sich dann die Frage, ob sich aus den ersten beiden Behauptungen (Prämissen) die dritte Behauptung (Konklusion) folgern lässt. Mithilfe von Logik oder Mengenlehre lässt sich ein Syllogismus leicht in eine formale Darstellung überführen und mit entsprechenden Verfahren die allgemeine Gültigkeit zeigen (z. B. Stolzenburg und Lüderitz, 2017).

Stumpf behandelt Syllogismen ausführlich als paradigmatische Form deduktiver Schlüsse (Stumpf, 1940, S.373ff). Obwohl er keine formale Symbolsprache verwendet, entsprechen viele seiner Überlegungen Strukturen, die heutzutage in der klassischen Prädikatenlogik präzise erfasst werden können, etwa Aussagen der Form:

Aussage: „Alle A sind B.“  $\rightsquigarrow$  In Prädikatenlogik:  $\forall x(A(x) \rightarrow B(x))$

Die moderne Logik erlaubt hier eine exakte formale Analyse, während Stumpf stärker auf begriffliche Klärung und inhaltliche Evidenz setzt. Sein Hinweis, dass logische Schemata „leere Hülsen“ seien (vgl. Abschnitt 2.1), solange die Begriffe ungeklärt bleiben, verweist aber auf ein Problem, das auch in heutigen Formalisierungsversuchen fortbesteht.

Es bleibt jedenfalls fraglich, ob die menschliche Logik tatsächlich der formalen Logik entspricht. Betrachten wir dazu folgenden Syllogismus (vgl. Krause et al., 2025, Tab. 3):

**Prämisse 1:** „Alle Metalle sind flüssig.“

**Prämisse 2:** „Manche Metalle sind Steine.“

**Konklusion:** „Alle Steine sind flüssig.“

In diesem Beispiel widersprechen alle drei Behauptungen unserer Intuition und Sinneswahrnehmung – sie sind inhaltlich falsch. Um zu klären, ob hier eine Abweichung von der formalen Logik vorliegt, können zwei Betrachtungsweisen unterschieden werden:

- **Betrachtung der Gesamt-Implikation (materiale Implikation):** Fragt man, ob der Syllogismus insgesamt formal gültig ist, so lautet die formal-logische Antwort: Ja. Denn nach dem Prinzip *ex falso quod libet* folgt aus einer falschen Aussage jede beliebige Behauptung. Genau hier zeigt sich ein grundlegender Unterschied zur menschlichen Denkweise: Der Mensch verwirft die Argumentation oft schon aufgrund der offensichtlich

falschen Inhalte der einzelnen Behauptungen, während die formale Logik die Implikation aufgrund ihrer leeren Voraussetzung als wahr ausweist.

- **Betrachtung der Schlussfigur (syllogistische Ableitung):** Fragt man dagegen nicht nach der Gültigkeit der Gesamt-Implikation, sondern nach der logischen Zwangsläufigkeit des Schlusses selbst, also ob die Konklusion rein aufgrund der quantorenlogischen Form zwingend aus den Behauptungen folgt, dann lautet die Antwort: Nein. Denn aus einer partikulären Aussage („manche Metalle“) lässt sich keine universelle Aussage („alle Steine“) ableiten.

Menschliches Schließen entspricht also nicht unbedingt dem formalen, logischen Schließen, zumindest nicht der klassischen Prädikatenlogik. Hinzu kommt, dass Menschen wie im Übrigen auch große Sprachmodelle zwar abstrakte, symbolische Syllogismen am ehesten logisch richtig bewerten (Krause et al., 2025), aber kognitive Wahrnehmungsfehler durch den sogenannten *Atmosphären-Effekt* (Woodworth und Sells, 1935; Khemlani und Johnson-Laird, 2012) entstehen können. Menschen lassen sich von der rein sprachlichen Stimmung oder dem äußeren Erscheinungsbild der Behauptungen zu einer formal ähnlichen Konklusion leiten.

Der Atmosphären-Effekt ist kein Zeichen mangelnder logischer Fähigkeit, sondern ein mentaler Abkürzungsmechanismus. Unser Gehirn ersetzt die aufwendige, formale Begriffssubstitution durch einen schnellen, sprachlichen „Stimmungsabgleich“. Das reduziert Komplexität, führt aber in komplexen oder uneindeutigen Fällen zu logischen Fehlern, und das erklärt, warum selbst logisch geschulte Menschen immer wieder auf diese Falle hereinfallen. Betrachten wir ein konkretes Beispiel für den Atmosphären-Effekt:

**Prämisse 1:** „Alle A sind B.“

**Prämisse 2:** „Alle C sind B.“

Die sprachliche Stimmung ist hier stark universell-bejahend. Der Atmosphären-Effekt verleitet viele Probanden nun zu der **Konklusion:** „Alle A sind C.“ (oder umgekehrt „Alle C sind A“). Dieser Schluss ist jedoch logisch nicht gültig, da der Mittelbegriff B in beiden Prämissen nicht distribuiert ist; es kann sich bei A und C um völlig verschiedene Teilmengen handeln, die zufällig beide in B liegen.

Insofern erscheint es vollkommen richtig, dass Stumpf (1939, 1940) sich nicht auf eine mathematische Formalisierung einlässt. Spätestens seit dem berühmten *Wason Selection Task* (Wason, 1968) ist bekannt, dass es einen erheblichen Unterschied macht, ob Menschen eine abstrakte (formalisierte) oder eine konkrete Denkaufgabe mit konkreten Kategorien lösen müssen. Die These allerdings, dass logische Schemata schwerer zu überprüfen sind als konkrete Tatsachenbehauptungen (vgl. Abschnitt 2.1), scheint vor dem Hintergrund, dass Menschen mit abstrakten Syllogismen am besten klarkommen (s. o.), nicht uneingeschränkt empirisch zu gelten.

## 3.2 Klassische und nicht-klassische Logiken

Es ist allgemein bekannt, dass menschliches Denken nicht vollständig durch klassische logische Systeme wie die Prädikatenlogik erfasst werden kann. Aus diesem Grund werden Logi-

ken, die Standardwerte (*Defaults*) oder Ausnahmen zulassen, wie z. B. das widerlegbare (*defeasible*) (Koons, 2025) oder (allgemeiner) das nichtmonotone Schließen (Strasser und Antonelli, 2019), seit Langem in der Forschung untersucht. Das widerlegbare Schließen (im engen Sinne) beinhaltet in der Regel strikte und widerlegbare Regeln, aus denen Argumente gebildet werden. Um festzustellen, ob eine Behauptung letztendlich als gerechtfertigte Überzeugung akzeptiert werden kann, wird eine rekursive Analyse durchgeführt, bei der Widerlegungsgründe, d. h. Argumente gegen die Akzeptanz der Behauptung, ermittelt werden, wobei die Argumente anhand eines Präferenzkriteriums verglichen werden (Chesñevar et al., 2000; Wirth und Stolzenburg, 2016).

Weitere Forschungsrichtungen zum Schlussfolgern mit Ausnahmen sind die zahlreichen Varianten des nichtmonotonen Schließens (Bochman, 2018; Strasser und Antonelli, 2019), wie z. B. die Antwortmengen-Programmierung (*Answer Set Programming*) (Lifschitz, 2019). Es stellt sich jedoch heraus, dass komplexe Probleme, die Schlussfolgern mit mehreren Ausnahmen erfordern, zwar formalisiert und mithilfe von formalen Methoden auch gelöst werden können, von Menschen aber kaum noch (Sacco et al., 2026). Sprache, insbesondere konkrete, natürliche Sprache ist jedenfalls immer mehrdeutig im Unterschied zu mathematischer Logik. Eine kognitiv adäquate Behandlung von logischen Schließen erfordert daher mindestens nicht-klassische, nichtmonotone Logiken.

Stumpf geht grundsätzlich implizit von einer zweiwertigen Logik aus: Aussagen sind entweder wahr oder falsch, Widersprüche ausgeschlossen. Damit steht er im Einklang mit der klassischen Logik. Darüber hinaus eröffnen seine Überlegungen zum Satz der Determination aber Anschlussstellen zu *nicht-klassischen Logiken*:

- *mehrwertige Logiken*, in denen Aussagen Zwischenwerte annehmen können (Marcos et al., 2026),
- *Default-Logiken*, die allgemeine Regeln mit Ausnahmen zulassen (Koons, 2025; Strasser und Antonelli, 2019),
- *Modallogiken*, die Notwendigkeit, Möglichkeit, Zeit oder Normen formal erfassen (Polkowski, 2023).

Gerade der Gedanke, dass Dinge nicht verschiedene Eigenschaften derselben Gattung zugleich besitzen können, lässt sich in formalen Systemen unterschiedlich streng oder flexibel modellieren.

Bemerkenswert ist, was bei Stumpf fehlt, obwohl die betreffenden Veröffentlichungen zum Zeitpunkt der Abfassung der *Erkenntnislehre* bereits vorlagen: Es gibt keinen Bezug auf axiomatische Mengenlehre (Zermelo, 1908; Fraenkel, 1922), keinen Vorgriff auf Gödels Unvollständigkeitssätze (Gödel, 1930, 1931) und keinen Begriff der Berechenbarkeit im Sinne Turings (Turing, 1936). Dennoch thematisiert Stumpf implizit Grenzen formaler Systeme, indem er betont, dass logische Gültigkeit allein keine inhaltliche Wahrheit garantiert.

### 3.3 Von universalen Axiomen zur Wissensrepräsentation

In der symbolischen KI finden sich viele Ideen wieder, die an Stumpfs universale Axiome erinnern. Wissensrepräsentationsformalismen wie Prädikatenlogik, Konzeptsprachen und On-

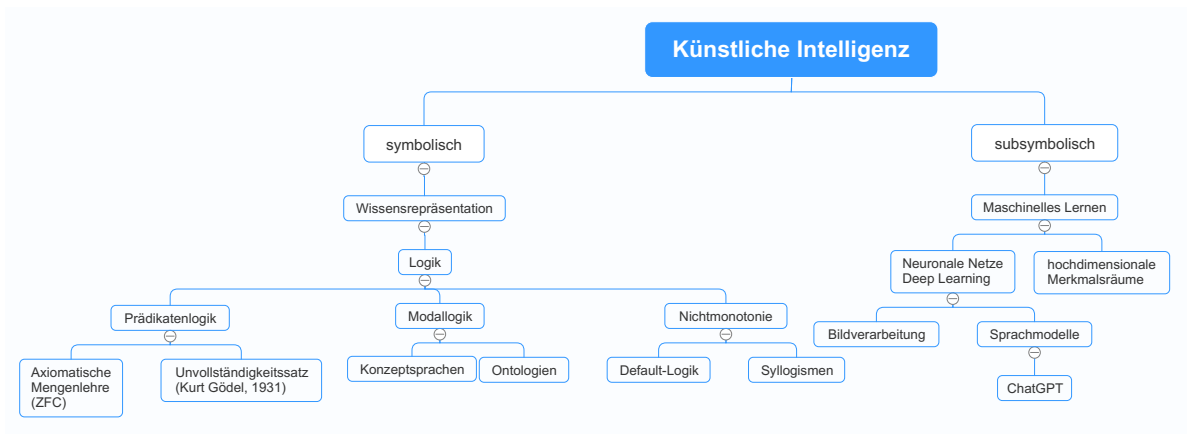


Abbildung 2: Gebiete der Logik und Künstlichen Intelligenz

tologien (*Description Logics*) (Baader et al., 2007) arbeiten mit klar definierten Begriffen, Hierarchien (Teilmenge, Unterklasse) und Inferenzregeln. Abb. 2 zeigt einen Überblick über Gebiete der Logik und Künstlichen Intelligenz.

Formale Ontologien vermeiden Mehrdeutigkeiten natürlicher Sprache, indem sie explizit zwischen Identität, Mitgliedschaft und Teilmengenbeziehungen unterscheiden. Damit greifen sie Stumpfs Forderung auf, Begriffsstreitigkeiten als Voraussetzung jeder Formalisierung zu klären. Schlussfolgern mit formalen Logiken, einschließlich nicht-klassischen, und großen Ontologien wie Cyc (Lenat, 1995) oder Adimen-Sumo (Álvez et al., 2012) stoßen aber an ihre Grenzen (Siebert et al., 2019). Derartige regelbasierte, logische Systeme werden heute in der Regel von modernen KI-Systemen wie den großen Sprachmodellen übertroffen (Krause und Stolzenburg, 2024).

## 4 Regionale Axiome und moderne KI

### 4.1 Hochdimensionale Merkmalsräume

Während symbolische KI stark an universalen Axiomen orientiert ist, operieren moderne lernbasierte Verfahren – insbesondere neuronale Netze – in hochdimensionalen Merkmalsräumen. Kategorien sind hier nicht binär, sondern graduell und vektoriell repräsentiert, d. h. durch Aufzählung von Merkmalen und deren jeweiligen Ausprägungen. Dies entspricht eher dem Charakter regionaler Axiome, die an konkrete Wahrnehmungen und Erfahrungsbereiche gebunden sind.

### 4.2 Sprachmodelle und das Induktionsproblem

Große Sprachmodelle wie ChatGPT (OpenAI et al., 2024) kommen weitgehend ohne explizite Formalisierung aus. Sie lernen aus enormen Datenmengen statistische Regularitäten und erzeugen Texte, die logisch plausibel wirken, ohne dass ihnen explizite logische Axiome vorgegeben sind. Dabei stellt sich erneut das klassische Induktionsproblem: Wie gelangt man

vom Besonderen zum Allgemeinen? Ist Sprache und Logik nur ein Spiel wie bei Wittgenstein (1953)? Stumpfs *Erkenntnislehre* liefert hierfür keine technische Lösung, wohl aber einen begrifflichen Rahmen, um die Spannung zwischen formaler Regelmäßigkeit und inhaltlicher Erfahrung zu reflektieren.

### 4.3 Erklären ohne formale Beweise

Ein zentrales Problem moderner KI ist die mangelnde Erklärbarkeit neuronaler Modelle. Ansätze der post-hoc *Explainable AI* (Holzinger, 2018) versuchen, nachträglich verständliche Begründungen zu liefern. Auch hier zeigt sich eine Parallele zu Stumpf: Er betont, dass Erkenntnis nicht nur in korrekten Schlüssen, sondern auch in Einsicht und Verständlichkeit besteht.

Die frühen KI-Systeme arbeiteten mit formal-logischen Regeln und symbolischen Wissensmodellen. Sie sollten komplexe Zusammenhänge erklären und allgemeine Probleme lösen. Diese Erwartungen konnten sie jedoch nur teilweise erfüllen. Demgegenüber haben insbesondere moderne große Sprachmodelle in vielen Anwendungsbereichen erhebliche Fortschritte erzielt. Sie funktionieren aber grundlegend anders. Diese Systeme beruhen gerade nicht auf expliziten formalen Modellen der Welt oder logischen Kalkülen, sondern auf neuronalen Netzen. Ihr Verhalten geht aus der statistischen Modellierung sprachlicher und anderer Daten hervor.

Die Weiterentwicklung großer Sprachmodelle ist rasant. Es gibt mittlerweile sogenannte „denkende“ (*reasoning*) Modelle. Ihr entscheidendes Merkmal ist, dass sie komplexe Probleme nicht in einem einzigen Schritt lösen, sondern einen mehrschrittigen Denkprozess durchlaufen. Studien zeigen, dass dieser mehrschrittige Denkprozess die Modelle dazu bringt, Informationen ähnlich wie Menschen zu verarbeiten und zu Entscheidungen zu gelangen (de Varda et al., 2025). Allerdings führen diese *Reasoning Models* ihre Schlussfolgerungen nicht durch die Anwendung expliziter formaler Logik aus; vielmehr entstehen Fähigkeiten zum Schlussfolgern implizit aus der Optimierung probabilistischer Vorhersagen. Explizite Erklärungen oder formale Rekonstruktionen der zugrunde liegenden Prozesse lassen sich – sofern überhaupt möglich – häufig erst nachträglich formulieren (Krause et al., 2024). In diesem Sinne beruht der Erfolg moderner KI-Systeme eher auf der Verarbeitung sprachlicher Regelmäßigkeiten als auf der unmittelbaren Anwendung formaler Regeln.

## 5 Schlussbemerkungen

Carl Stumpf entwickelt in seiner *Erkenntnislehre* keine formale Logik im modernen Sinne. Dennoch antizipiert er mit der Unterscheidung von universalen und regionalen Axiomen zentrale Probleme, die heute Logik und KI gleichermaßen beschäftigen: die Reichweite formaler Systeme, die Rolle von Begriffsklärung, die Spannung zwischen Allgemeinheit und Besonderheit sowie die Grenzen deduktiver Verfahren.

Gerade im Vergleich mit aktuellen KI-Systemen wird deutlich, wie modern Stumpfs Fragestellungen sind. Seine *Erkenntnislehre* bietet keinen technischen Bauplan, wohl aber ein philosophisches Orientierungswissen, das hilft, die Möglichkeiten und Grenzen von Logik

und KI kritisch zu reflektieren. Stumpf (1939, 1940) erkennt durch seine Unterscheidung von universalen und regionalen Axiomen Probleme und Grenzen der Erkenntnis. Das ist wiederum modern.

## Danksagung

Der Erstautor dankt der *Carl Stumpf Gesellschaft* für die Gelegenheit, bei den Jahrestagungen in Dortmund und Wiesentheid, dem Geburtsort von Carl Stumpf, gleich zweimal zum Thema *Erkenntnislehre* und Künstliche Intelligenz vortragen zu dürfen. Die dort erhaltenen Anregungen und Rückmeldungen bildeten einen wesentlichen Impuls für den vorliegenden Aufsatz.

## Literatur

- Álvez, J., Lucio, P., und Rigau, G. (2012). Adimen-SUMO: Reengineering an ontology for first-order reasoning. *International Journal on Semantic Web Information Systems*, 8(4):80–116. URL: <https://doi.org/10.4018/jswis.2012100105>.
- Ando, R., Morishita, T., Abe, H., Mineshima, K., und Okada, M. (2023). Evaluating large language models with NeuBAROCO: Syllogistic reasoning ability and human-like biases. In Chatzikyriakidis, S. und de Paiva, V., editors, *Proceedings of the 4th Natural Logic Meets Machine Learning Workshop*, pages 1–11, Nancy, France. Association for Computational Linguistics. URL: <https://aclanthology.org/2023.naloma-1.1/>.
- Baader, F., McGuinness, D., Nardi, D., und Patel-Schneider, P. (2007). *The description logic handbook*, volume 2. Cambridge university press Cambridge. URL: [https://www.academia.edu/download/89947099/9780521876254\\_frontmatter.pdf](https://www.academia.edu/download/89947099/9780521876254_frontmatter.pdf).
- Bochman, A. (2018). Nonmonotonic reasoning. In Hansson, S. O. und Hendricks, V. F., editors, *Introduction to Formal Philosophy*, pages 93–104. Springer International Publishing. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-77434-3\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-77434-3_4).
- Chesñevar, C. I., Maguitman, A., und Loui, R. (2000). Logical models of argument. *ACM Computing Surveys*, 32(4):337–383. URL: <https://doi.org/10.1145/371578.371581>.
- de Varda, A. G., D’Elia, F. P., Kean, H., Lampinen, A., und Fedorenko, E. (2025). The cost of thinking is similar between large reasoning models and humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(47):e2520077122. URL: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2520077122>.
- Fraenkel, A. A. (1922). Zu den Grundlagen der Cantor-Zermeloschen Mengenlehre. *Mathematische Annalen*, 86:230–237. URL: [https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN235181684\\_0086](https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN235181684_0086).

- Frege, G. (1879). *Begriffsschrift, eine der arithmetischen nachgebildete Formelsprache des reinen Denkens*. Nebert, Halle. URL: <https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN538957069>.
- Gödel, K. (1930). Die Vollständigkeit der Axiome des logischen Funktionenkalküls. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 37:349–360. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01696781>.
- Gödel, K. (1931). Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte für Mathematik und Physik*, 38:173–198. URL: <https://doi.org/10.1007/BF01700692>.
- Holzinger, A. (2018). Explainable AI (ex-AI). *Informatik Spektrum*, 41(2):138–143. Aktuelles Schlagwort, in German. URL: <http://doi.org/10.1007/s00287-018-1102-5>.
- Khemlani, S. und Johnson-Laird, P. N. (2012). Theories of the syllogism: A meta-analysis. *Psychological Bulletin*, 138(3):427–457. URL: <https://doi.org/10.1037/a0026841>.
- Koons, R. (2025). Defeasible reasoning. In Zalta, E. N., editor, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/fall2021/entries/reasoning-defeasible/>.
- Krause, S., Henk, A.-L., und Stolzenburg, F. (2024). Selecting an educational robot: A comprehensive guideline. In Balogh, R., Obdržálek, D., und Fislake, M., editors, *Robotics in Education*, LNNS 1084, pages 263–274. Springer Nature Switzerland. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-67059-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-67059-6_23).
- Krause, S., Henk, A.-L., und Stolzenburg, F. (2025). Cognitive biases in syllogistic reasoning: A comparative study of humans and large language models. In *ECAI 2025 International Workshops*, Bologna, Italy. URL: <https://artint.hs-harz.de/fstolzenburg/papers/KHS25.pdf>.
- Krause, S. und Stolzenburg, F. (2024). Commonsense reasoning and explainable artificial intelligence using large language models. In Nowaczyk, S., Biecek, P., Chung, N. C., Vallati, M., Skruch, P., Jaworek-Korjakowska, J., Parkinson, S., Nikitas, A., Atzmüller, M., Kliegr, T., Schmid, U., Bobek, S., Lavrac, N., Peeters, M., van Dierendonck, R., Robben, S., Mercier-Laurent, E., Kayakutlu, G., Owoc, M. L., Mason, K., Wahid, A., Bruno, P., Calimeri, F., Cauteruccio, F., Terracina, G., Wolter, D., Leidner, J. L., Kohlhase, M., und Dimitrova, V., editors, *ECAI 2023 International Workshops*, CCIS 1947, pages 302–319. Springer Nature Switzerland. Part 1. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-50396-2\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-50396-2_17).
- Lenat, D. B. (1995). CYC: A large-scale investment in knowledge infrastructure. *Communications of the ACM*, 38(11):33–38. URL: <https://doi.org/10.1145/219717.219745>.
- Lifschitz, V. (2019). *Answer Set Programming*. Springer. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24658-7>.

- Marcos, J., Přenosil, A., und Egré, P. (2026). Many-valued logic. In *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University. URL: <https://seop.illc.uva.nl/entries/logic-manyvalued/>.
- OpenAI, Achiam, J., et al. (2024). GPT-4 technical report. Technical Report 2303.08774, arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/2303.08774>.
- Ozeki, K., Ando, R., Morishita, T., Abe, H., Mineshima, K., und Okada, M. (2024). Exploring reasoning biases in large language models through syllogism: Insights from the NeuBARO-CO dataset. In Ku, L.-W., Martins, A., und Srikumar, V., editors, *Findings of the Association for Computational Linguistics: ACL 2024*, pages 16063–16077. Association for Computational Linguistics. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2024.findings-acl.950>.
- Polkowski, L. T. (2023). *Modal and Intuitionistic Logics*, pages 179–229. Springer Nature Switzerland, Cham. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-42034-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-031-42034-4_4).
- Sacco, G., Krause, S., Bozzato, L., Stolzenburg, F., und Kutz, O. (2026). Formal and human reasoning with exceptions. In Sabou, M., Blomqvist, E., Di Caro, L., Rapp, A., und Ilkhou, E., editors, *25th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management (EKAW 2026)*, Turin, Italy. Springer. To appear.
- Siebert, S., Schon, C., und Stolzenburg, F. (2019). Commonsense reasoning using theorem proving and machine learning. In Holzinger, A., Kieseberg, P., Tjoa, A. M., und Weippl, E., editors, *Machine Learning and Knowledge Extraction – 3rd IFIP TC 5, TC 12, WG 8.4, WG 8.9, WG 12.9 International Cross-Domain Conference, CD-MAKE 2019*, LNCS 11713, pages 395–413, Canterbury, UK. Springer Nature Switzerland. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-29726-8\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-29726-8_25).
- Stolzenburg, F. und Lüderitz, R. (2017). Syllogistic reasoning in seven spaces. In Beierle, C., Kern-Isberner, G., Ragni, M., und Stolzenburg, F., editors, *Proceedings of KI 2017 Workshop on Formal and Cognitive Reasoning – 6th Workshop on Dynamics of Knowledge and Belief (DKB-2017) and 5th Workshop KI & Kognition (KIK-2017)*, CEUR Workshop Proceedings 1928, pages 77–88, Dortmund. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-1928/paper7.pdf>.
- Strasser, C. und Antonelli, G. A. (2019). Non-monotonic Logic. In Zalta, E. N., editor, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University, Summer 2019 edition. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2019/entries/logic-nonmonotonic/>.
- Stumpf, C. (1939). *Erkenntnislehre – Band 1*. Johann Ambrosius Barth, Leipzig. Reprint by Pabst Science Publishers, Lengerich, 2011. URL: <https://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/references?id=lit8454>.
- Stumpf, C. (1940). *Erkenntnislehre – Band 2*. Johann Ambrosius Barth, Leipzig. Reprint by Pabst Science Publishers, Lengerich, 2011. URL: <https://vlp.mpiwg-berlin.mpg.de/references?id=lit39741>.

- Turing, A. M. (1936). On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 42(1):230–265. URL: <https://doi.org/10.1112/plms/s2-42.1.230>.
- Wason, P. C. (1968). Reasoning about a rule. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20(3):273–281. URL: <https://doi.org/10.1080/14640746808400161>.
- Wirth, C.-P. und Stolzenburg, F. (2016). A series of revisions of David Poole’s specificity. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 78(3):205–258. Special issue on Belief Change and Argumentation in Multi-Agent Scenarios. Issue editors: Jürgen Dix, Sven Ove Hansson, Gabriele Kern-Isberner, Guillermo Simari. URL: <https://doi.org/10.1007/s10472-015-9471-9>.
- Wittgenstein, L. (1953). *Philosophische Untersuchungen*. Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main. URL: <https://www.isbn.de/buch/9783518223727/philosophische-untersuchungen>.
- Woodworth, R. S. und Sells, S. B. (1935). An atmosphere effect in formal syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology*, 18(4):451–460. URL: <https://doi.org/10.1037/h0060520>.
- Zermelo, E. (1908). Untersuchungen über die Grundlagen der Mengenlehre. *Mathematische Annalen*, 65:261–281. URL: [https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN235181684\\_0065](https://gdz.sub.uni-goettingen.de/id/PPN235181684_0065).