

## Zur Rolle der Logik bei der Entwicklung Intelligenter Systeme

Ralf Möller, Hamburg University of Technology, moeller@tu-hamburg.de

Seit Beginn der Forschung zur Entwicklung intelligenter Systeme wurden als Grundlage für die Realisierung wissensbasierter Teilaspekte intelligenten Verhaltens verschiedene formale Repräsentationsansätze entwickelt. Zentrale Einsicht dabei war, dass deklarative Repräsentationssprachen es ermöglichen, unter Zuhilfenahme einer formalen Semantik die verwendeten Entscheidungs- und Berechnungsprobleme formal zu definieren, ohne eine konkrete Implementierung angeben zu müssen [1]. Der formalen Logik als deklarative Repräsentationssprache kommt hierbei eine tragende Rolle zu, obwohl in dem Vorteil der Deklarativität auch Probleme liegen, die zum Teil auch zur Ablehnung logikbasierter Formalismen geführt haben. Die Anforderungen an eine deklarative Wissensrepräsentation zum Aufbau von Systemen, die z.B. natürliche Sprache und/oder bildliche Szenen verstehen -- also auf höherer Ebene interpretieren, darüber kommunizieren und für eine Bestimmung von Handlungen zielgerichtet verwenden, stellten sich als sehr anspruchsvoll dar.

Skalierbare Implementierungen können nicht als Prototypen entwickelt werden, und der Aufwand für ein Repräsentations- und Schlussfolgerungssystem kann in jedem Fall mit dem eines Datenbanksystems verglichen werden. Die Forschung zu Datalog (Semantik der minimalen Modelle) zeigt, dass auch im Bereich der Datenbanken Logik zur Entwicklung und Analyse von Anfragesprachen eine tragende Rolle spielte und noch immer spielt [2, 3]. Erweiterungen in der Ausdrucksstärke haben im Bereich der logischen Repräsentationssprachen zu weiterführenden Entwicklungen geführt (z.B. Disjunktives Datalog [4] und Answer-Set-Programming [6]), die eine bedeutende Rolle bei der kombinatorischen Problemlösung spielen (deklarative logische Programmierung), aber auch Aspekte intelligenten Verhaltens modellieren (Schließen über indefinite Informationen, Default-Schließen, usw.).

Die Forschungsarbeiten zu Beschreibungslogiken [6] auf theoretischer und praktischer Ebene haben ebenfalls zu einer großen Steigerung der Akzeptanz von logischen Repräsentationsformalismen geführt, insbesondere im Bereich der deklarativen Modellierung von Begriffssystemen und der ontologiebasierten Anfragebeantwortung über großen Wissensbasen (z.B. [7, 8, 9]). Auch Dienste zur Erklärungsgenerierung für Modellierungsfehler (Inkonsistenzen, unintendierte Subsumptionen), Dienste zur Modularisierung von Formelmengen und weitere sog. Nicht-Standard-Inferenzdienste zeigen die zentrale Rolle der Logik für die gesamte Informatik auf (siehe die entsprechenden Kapitel in [6]).

Logik ermöglicht eine umfassende Analyse von Repräsentationssprachen. Es wurden in theoretischen Untersuchungen z.B. traktable Teilmengen von beschreibungslogischen Repräsentationssprachen identifiziert (siehe [10] und die dort zitierten Arbeiten). Auch Übersetzungen von Beschreibungslogiken in Datalog-Formalismen führten zu wichtigen Erkenntnissen [11]. Eine Abbildung von Beschreibungslogiken auf Datalog wird durch neuere Ergebnisse stark vereinfacht (Datalog+/-, [12]). Die Rolle der Logik besteht darin, zu verdeutlichen, dass Wissensrepräsentations- und Datenbanktechnologie in einem gemeinsamen Licht betrachtet werden können. Kombinationen von Beschreibungslogiken und deklarativer logischer Programmierung (siehe z.B. [13]) werden die Rolle der Logik weiter stärken. Nicht alle theoretisch untersuchten weiterführenden Inferenzprobleme sind allerdings zum jetzigen Zeitpunkt durch (effiziente) Implementationen unterstützt (z.B. Anfragebeantwortung bei

Inkonsistenzen), so dass nicht alle Erwartungen der Nutzer (Entwickler intelligenter Systeme) erfüllt werden. Und selbst wenn zu einem bestimmten Zeitpunkt die Erwartungen bestimmter Nutzer erfüllt werden, stiegen bzw. steigen mit dem Anstieg der Bedeutung der Logik für die Entwicklung von Anwendungen auch recht schnell die Erwartungen. Auf jeden Fall sollte die Rolle der Logik nicht auf die Modellierung von Terminologien und die Lösung von kombinatorischen Problemen beschränkt sein. Es sollte das Ziel bleiben, intelligente Systeme auf logischer Grundlage zu entwickeln.

Während sich indefinites Wissen angemessen mit ausdrucksstarken Logiken ausdrücken lässt, so erweist es sich für viele der oben genannten Problemstellungen im Bereich intelligente Systeme, wie z.B. Computer Vision, als vorteilhaft, die klassischen epistemologischen Festlegungen (true/false/unknown) aufzuweichen und (subjektive) Unsicherheiten bei der Modellierung zu unterstützen. In den von vielen Forschern zu diesem Zweck verwendeten probabilistischen Repräsentationsprachen (z.B. Bayessche Netze, Markov-Netze [14]) spielte die Logik aus meiner Sicht bis vor nicht allzu langer Zeit eine eher untergeordnete Rolle. Es wurden zwar logische Formeln zur Beschreibung von Ereignissen verwendet oder z.B. Horn-Formeln zur Definition von Bayes-Netzen herangezogen [15], logische Inferenzprobleme, gelöst durch Deduktion (vgl. [16]) sind allerdings kaum relevant für die zentralen Probleme, die einer wahrscheinlichkeitstheoretischen Formalisierung intelligenten Verhaltens zugrunde liegen. Eine Axiomatisierung des Wissens wird nicht angestrebt.

Auch bei den jüngst intensiv untersuchten Markov-Logiken [17], in denen Prädikatenlogik verwendet wird, geht es letztendlich um den logikgestützten Aufbau eines (meist endlichen) Markov-Netztes (Knowledge-based Model Construction), und Anfragen an das probabilistische Modellierung werden bzgl. des logischen Anteils als Modellüberprüfungsprobleme (Model-Checking-Problems) gelöst. Die zentrale Idee der logischen Modellierung, die Beschreibung der logischen Modelle durch eine Axiomatisierung, gilt hier nicht für die Beschreibung der Unsicherheiten. In ähnlicher Weise wie bei Standard-Datalog nur ein Modell betrachtet wird, wird bei Ansätzen der Knowledge-based Model Construction durch logische Techniken genau eine Verbundverteilung definiert.

Erst in jüngster Zeit wurden seit langem theoretisch entwickelte axiomatische Repräsentationsansätze zur logisch-probabilistischen Modellierung [18, 19], in denen auch die möglichen Verteilungen durch Axiome nur eingeschränkt werden, wieder näher untersucht. Allerdings sollte man sich bewusst sein, dass gerade in diesem Bereich bei ähnlicher Syntax der logischen Formalismen unterschiedliche Semantiken verwendet werden: die Modellierung von statistischem Wissen (frequentistische Sicht) sowie auch die Modellierung von Überzeugungen durch Verteilungen über mögliche Welten (subjektivistische Sicht). Logik ermöglicht allerdings erst eine klare semantische Analyse der Anforderungen.

Auf eine Kopplung von logischen Repräsentationsformen mit Fuzzy-Set-orientierten Enthaltenseins-Charakteristiken möchte ich nur hinweisen, kann aber die Rolle der Logik aus Platzgründen nicht vertieft analysieren. Gleiches gilt für die Rolle der Logik bei der Modellierung von Aktionen (etwa im Bereich Kognitive Robotik). Zentrale Probleme der logischen Modellierung von Handlungen (Rahmenproblem, Qualifikationsproblem, Ramifikationsproblem), die schon in frühen Lehrbüchern bestechend genau analysiert wurden [1], können mittlerweile in durchaus praktisch überzeugender Weise mit Systemen wie z.B. (Con)Golog [20] behandelt werden. Jedoch ergeben sich aufgrund

unterschiedlicher ontologischer Annahmen auch bei der Aktionsmodellierung unterschiedliche Ansätze [21].

Intelligentes Verhalten lässt sich nicht durch eine vollständige Axiomatisierung relevanten Wissens und Verwendung eines allgemeinen Problemlösers bzw. allgemeinen Schlussfolgerungsverfahrens erreichen (siehe auch [16]), sondern bedarf dedizierter logischer Repräsentationsformen und einer abgestimmten Systemarchitektur, die verschiedene Formalismen in semantisch wohlverstandener Weise kombiniert.

- [1] M.R. Genesereth, N.J. Nilsson, Logical Foundations for Artificial Intelligence, Morgan Kaufmann, 1987.
- [2] S. Ceri, G. Gottlob, L. Tanca, Logic Programming and Databases, Springer, 1990.
- [3] S. Abiteboul, R. Hull, V. Vianu, Foundations of Databases, Addison-Wesley, 1995.
- [4] N. Leone, G. Pfeifer, W. Faber, Th. Eiter, G. Gottlob, S. Perri, F. Scarcello. The DLV System for Knowledge Representation and Reasoning. ACM Transactions on Computational Logic, 7(3):499-562, 2006.
- [5] M. Gelfond and V. Lifschitz, Classical negation in logic programs and disjunctive databases, New Generation Computing, 1991, pp. 365-385.
- [6] F. Baader, D. Calvanese, D. L. McGuinness, D. Nardi, P. F. Patel-Schneider (Eds.): The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Cambridge University Press 2003.
- [7] D. Tsarkov, I. Horrocks, and P. F. Patel-Schneider. Optimizing Terminological Reasoning for Expressive Description Logics. J. of Automated Reasoning, 39(3):277-316, 2007.
- [8] V. Haarslev and R. Möller. On the Scalability of Description Logic Instance Retrieval. Journal of Automated Reasoning, 41(2):99-142, 2008.
- [9] J. Dolby, A. Fokoue, A. Kalyanpur, A. Kershenbaum, L. Ma, E. Schonberg, K. Srinivas. Scalable semantic retrieval through summarization and refinement. In Proc. AAAI 2007.
- [10] F. Baader, C. Lutz, and A.-Y. Turhan. Small is again Beautiful in Description Logics. KI – Künstliche Intelligenz, 24(1):25-33, April 2010.
- [11] B. Motik and U. Sattler. A Comparison of Reasoning Techniques for Querying Large Description Logic ABoxes. In Miki Hermann and Andrei Voronkov, editors, Proc. of the 13th Int. Conference on Logic for Programming Artificial Intelligence and Reasoning (LPAR 2006), volume 4246 of LNCS, pages 227-241, Phnom Penh, Cambodia, November 13-17 2006. Springer.
- [12] A. Cali, G. Gottlob, and T. Lukasiewicz. A general Datalog-based framework for tractable query answering over ontologies. In Proc. PODS-2009, pp. 77-86, 2009.
- [13] B. Motik and R. Rosati. Reconciling Description Logics and Rules. Journal of the ACM, 57(5):1-62, 2010.

- [14] J. Pearl, Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference, Morgan Kaufmann, 1988.
- [15] D. Poole, Probabilistic Horn abduction and Bayesian networks, Artificial Intelligence, 64(1), 81-129, 1993.
- [16] F. Baader, B. Beckert, T. Nipkow. Deduktion: von der Theorie zur Anwendung. Informatik-Spektrum, 33(5):444–451, 2010.
- [17] P. Domingos, D. Lowd, Markov Logic: An Interface Layer for Artificial Intelligence, Morgan & Claypool, 2009.
- [18] F. Bacchus, Representing and reasoning with Probabilistic Knowledge. A Logical Approach to Probabilities. The MIT Press, 1990.
- [19] N.J. Nilsson, Probabilistic logic, Artificial Intelligence 28(1): 71-87, 1986.
- [20] R. Reiter, Knowledge in Action: Logical Foundations for Specifying and Implementing Dynamical Systems, The MIT Press, 2001.
- [21] E.T.Mueller, Commonsense Reasoning, Morgan Kaufmann, 2006.