

# Kapitel 1

## Einleitung

Die Durchdringung von neuartigen Technologien erfolgt keinesfalls linear mit der Dauer ihres zeitlichen Bestehens. Die Rogers Innovation Adaption Curve (siehe Abb. 1.1) ist ein anerkanntes Modell, das den Verlauf der Adaptation neuer Technologien beschreibt. Sie unterteilt die potenziellen Nutzergruppen in Innovators, Early Adopters, Early Majority, Late Majority und Laggards. Der vollständige Verlauf der Durchdringung erfolgt ausschließlich bei erfolgreichen Technologien. Die Methode des *Deep Learning* ist derzeit in aller Munde und wird von großen Unternehmen für verschiedenste Applikationen adaptiert. Die Entwicklung der Basismethode erfolgte bereits in den 1950er-Jahren [Ros58], fand aufgrund der nach damaligen Maßstäben großen notwendigen Rechenleistung jedoch nur wenige Anwendungsfelder. Entwicklungen der Rechnerhardware und des Formalismus [RHW88] ermöglichten im weiteren zeitlichen Verlauf vielfältigere Anwendungen; das volle Spektrum der Potenziale wurde jedoch erst mit der äußerst prominenten Applikation „AlphaGo“ im Jahr 2016 bekannt. In dieser wurde erstmals ein professioneller, menschlicher Spieler in dem als am komplexesten geltenden klassischen Spiel geschlagen [SHM<sup>+</sup>16]. Die Entwicklung des Deep Learnings ist ein Beispiel dafür, dass hochentwickelte, erfolgreiche Applikationen notwendig sind, um die „Kluft“ zwischen Early Adoptern und Early Majority zu überspringen.

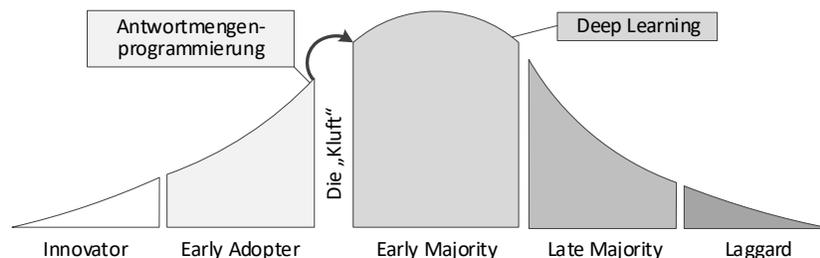


Abb. 1.1 Rogers Innovation Adaption Curve (i. A. a. [Rog83, S. 247])

Die Grundlagen des Paradigmas der *Antwortmengenprogrammierung* wurden bereits in den frühen 1990er-Jahren gelegt [GL88, GL91]. Aufgrund von Entwicklungen der Rechnerhardware und insbesondere von Algorithmen zur effizienten Lösungsfindung erlebt Antwortmengenprogrammierung derzeit einen „Frühling“ mit vielfältiger Beachtung, welche sich allerdings vorwiegend auf Fachpublikum aus der Domäne der künstlichen Intelligenz (KI) beschränkt. Zur weiteren Durchdringung des Paradigmas ist es erforderlich, erfolgreiche und praxisbezogene Applikationen zu schaffen. Zu diesem Zweck ist die Verbindung von Domänenwissen aus dem Bereich der Applikationen (in diesem Fall: Intralogistik) und Wissen zur Anwendung der Antwortmengenprogrammierung vonnöten.

In der vorliegenden Arbeit werden zwei Applikationen entwickelt, welche dem Fortschreiten der Durchdringung der Antwortmengenprogrammierung, insbesondere in der Intralogistik, dienen sollen. Auf Basis der Entwicklung der Applikationen können Rückschlüsse darauf gezogen werden, auf welche Art, in welchen Bereichen und in welchem Ausmaß die Anwendung von Antwortmengenprogrammierung zu weitergehendem Fortschritt in der Intralogistik führen kann.

## 1.1 Ausgangssituation

Die Logistik und die Intralogistik sind als Forschungsdisziplinen vergleichsweise jung, insbesondere wenn Disziplinen wie die Mathematik oder Philosophie als Vergleichsbasis herangezogen werden. Ein Indiz hierfür ist das Jahr der erstmaligen Betriebsaufnahme eines Logistikstudiengangs, welche auf das Jahr 1998 datiert wird [Leh15]. Immer kürzer werdende Produktlebenszyklen und gesteigerte Transportmöglichkeiten bei verringerten Transportkosten führen zu einem stetig beschleunigten und globalisierten Markt. Aufgrund derartiger Mechanismen vergrößert sich der Stellenwert der (Intra)Logistik als Kernelement zur Befähigung flexibler und stark vernetzter industrieller Strukturen zunehmend.

Vor dem Hintergrund des aufkommenden Trends „Industrie 4.0“ steigt die Bedeutung intelligenter und flexibler informationstechnischer Systeme [SGG<sup>+</sup>13, S. 6]. Als klassische interdisziplinäre Domäne ist es in der Intralogistik üblich und von großem Nutzen, in verwandten Disziplinen aufkommende oder erprobte Methoden<sup>1</sup> zu adaptieren und zu übernehmen. In der Vergangenheit wurden insbesondere Ansätze aus dem Bereich der Informatik und Elektrotechnik transferiert, um immer leistungsfähigere IT- und Steuerungssysteme für die Intralogistik zu schaffen (siehe bspw. [ERB<sup>+</sup>12] oder [SF14]).

Ein vielversprechendes Werkzeug, das bislang keine nennenswerte Anwendung in der Intralogistik findet, ist die Antwortmengenprogrammierung (ASP, aus d. engl. answer set programming). Diese ist ein Werkzeug mit Ursprüngen aus den Bereichen des logischen Programmierens und des nichtmonotonen Schließens, basierend auf stabilen Modellen nach der Definition von Gelfond und Lifschitz [GL88, GL91].

---

<sup>1</sup> Die folgend verwendete Abgrenzung der Begriffe „Werkzeug“ und „Methode“ folgt der Definition nach Estefan [Est08, S. 3].

Die Antwortmengensemantik erweitert die Semantik stabiler Modelle um eine weiterführende Art der Negation [CDP02], welche die Modellierung von Unsicherheit und Unwissen auf effiziente Art erlaubt. Ein weiterer Kernpunkt von ASP ist die Möglichkeit, das zugrunde liegende *Problem* direkt zu beschreiben, anstatt wie beim klassischen, imperativen Programmieren praktiziert das *Vorgehen der Lösungsfindung* durch ein Programm zu definieren. Dieser Ansatz wird auch als deklarative Programmierung bezeichnet [Geb13]. Somit wird der Lösungsvorgang an eine künstliche Intelligenz übergeben, während der menschliche Entscheider in der Lage ist, sich auf das Problem zu fokussieren. Weitere Vorteile ergeben sich aus der intuitiven Modellierung, der hohen Leistungsfähigkeit verfügbarer Lösungsalgorithmen und der guten Visualisier- und Validierbarkeit [AKKI13, CDP02, Geb13]. Als weiterführende Möglichkeiten wurden in der jüngeren Vergangenheit das reaktive ASP [GKK<sup>+</sup>11] und hybride Solver [GKK<sup>+</sup>14a] entwickelt.

Die Ursprünge von ASP sind in der logischen Programmierung zu finden. Der Fokus der Entwicklung liegt seit jeher auf der Problemlösung aus dem Bereich der Wissensrepräsentation und Schlussfolgerung [Geb13]. Häufig wird die Verwendung von PROLOG<sup>2</sup> fälschlicherweise mit logischer Programmierung gleichgesetzt. Aus Anwendersicht sind weniger die unterschiedlichen Lösungsmechanismen als vielmehr deren Auswirkung auf die Modellierung von Interesse. PROLOG ist, im Gegensatz zu ASP, nicht vollständig deklarativ [BET11]. Mit anderen Worten wird das Vorgehen der Lösungssuche durch die Reihenfolge der Regeln in PROLOG beeinflusst. Diese Möglichkeit der Kontrolle erhöht die Ausdrucksstärke der Sprache, durch den nicht-deklarativen Charakter aber auch die Komplexität der Modellierung. Es ist in PROLOG außerdem nicht möglich, strikte Negation zu modellieren. Als Vorteil von ASP kann dessen Robustheit gegenüber Reihenfolgeänderungen sowohl innerhalb des Regelrumpfes als auch zwischen unterschiedlichen Regeln herausgestellt werden [BET11].

Bisherige praktische Applikationen von ASP sind auf in hohem Maß abgeschlossene, vergleichsweise einfache Problemstellungen fokussiert, die wenig allgemeinen Aussagecharakter aufweisen. Insbesondere sind die bisherigen Applikationen im Bereich der (Intra)Logistik in hohem Maß theoretisch und bilden die Möglichkeit eines Einsatzes in der Praxis nur unzureichend ab. In dieser Arbeit wird erstmalig eine systematische Untersuchung der Potenziale und Möglichkeiten eines industriellen Einsatzes von ASP in intralogistischen Problemstellungen vorgenommen. Insbesondere werden auch die beschriebenen Applikationen erstmalig entwickelt und erweitern den Stand der Forschung und Technik.

## 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Die zugrunde liegende Forschungsmethodik folgt einem induktiven Ansatz. Spezifische Applikationen, die ASP als Werkzeug nutzen, werden für einzelne Anwen-

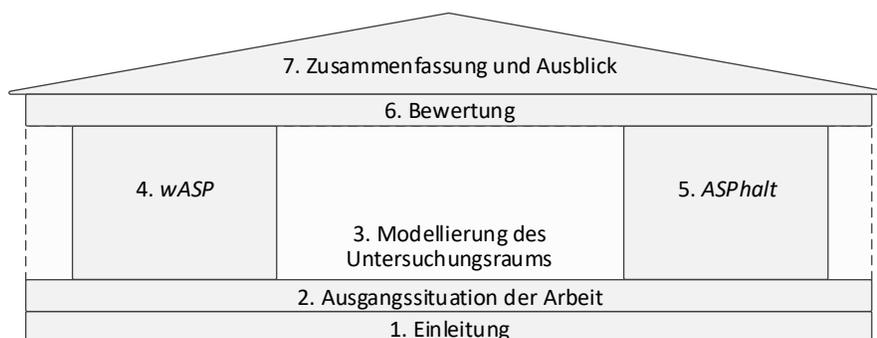
---

<sup>2</sup> Einer vergleichsweise bekannten Sprache zur logischen Programmierung.

dungsfelder (respektive Aufgabentypen) entwickelt. Aufgrund der Charakteristika der jeweiligen Anwendungsfelder können Aussagen über die Nutzenpotenziale von ASP für verschiedene Problemtypen der Intralogistik getroffen werden. Die Verknüpfung der Anwendungsfelder findet durch ein integriertes Modell innerhalb der OMG Systems Modeling Language<sup>TM</sup> [Obj12] statt. Das entwickelte Modell stellt ein abstraktes Abbild des vorhandenen Untersuchungsraums bereit und unterstützt die Wiederverwendbarkeit der entwickelten Ergebnisse.

Als Anwendungsfelder wurden die Planung von Intralogistiksystemen (Lagerplanung) und die Online-Planung in Kommissioniersystemen mit autonomen Fahrzeugen identifiziert. Die Planung von Intralogistiksystemen ist durch einen hohen Stellenwert von Expertenwissen gekennzeichnet [WS14] und erfährt bis dato keine ausreichende EDV-technische Unterstützung [EH12]. Der Erkenntnisgewinn bisheriger Forschung in diesem Bereich lässt darauf schließen, dass eine Automatisierung der Planung nicht zielführend oder möglich ist (siehe u. a. [YWB<sup>+</sup>14]). Vielmehr soll an dieser Stelle ein Entscheidungsunterstützungssystem geschaffen werden, das die „kritische Komponente“, den Planer, unterstützt, entlastet und somit breiter verfügbar macht. Dabei soll der iterative und hochflexible Charakter intralogistischer Planung nicht eingeschränkt werden. Die Auswahl dieser Aufgabenstellung für die Anwendung von ASP erfolgt aufgrund der dargestellten vorhandenen Forschungslücke und der positiven Eigenschaften von ASP, welche die bislang auftretenden Probleme adressieren.

In Gegenwart zunehmend komplexer werdender Systeme soll weiterhin die Möglichkeit, ASP für die Online-Planung in aus intelligenten Entitäten bestehenden Umgebungen zu nutzen, untersucht werden. Dies soll exemplarisch anhand eines Kommissioniersystems mit autonomen Fahrzeugagenten (der Zellularen Fördertechnik (ZFT) des Fraunhofer IML [Hom06, KSK<sup>+</sup>12]) erfolgen. Anhand dessen können Aussagen über die Nutzenpotenziale von ASP für stark vernetzte und intelligente Multiagentensysteme, wie sie entsprechend der Vision „Industrie 4.0“ zukünftig vielfältig auftreten [Lie14], getroffen werden. Insbesondere der Trend, Komplexität durch Dezentralität zu bewältigen, weist an dieser Stelle Potenzial zur Erforschung des Einsatzes von ASP in verschiedenen Multiagentensystem-Architekturen auf. Die



**Abb. 1.2** Aufbau der Arbeit

**Zentrale Ergebnisse und Forschungsfragen:**

1. Aussage über Art, Umfeld und Stärke der Verbesserung durch ASP
2. System zur Grob-/Konzeptplanung intralogistischer Systeme
  - a. Wie kann Expertenwissen im computerbasierten Planungsprozess genutzt werden?
  - b. Wie kann das Wissen strukturiert werden, um möglicherweise vorhandene kombinatorische Strukturen zu nutzen?
  - c. ...
3. System zur Planungsunterstützung autonomer Förder- und Kommissioniersysteme
  - a. Welche Komplexität wird durch verschiedene MAS-Architekturen in der Planung aufgeworfen?
  - b. Welche Strategien eignen sich zur echtzeitfähigen Bewältigung dieser Komplexität?
  - c. ...

auf Basis der Entwicklung der Applikation gewonnenen Erkenntnisse können zur Online-Planung beliebiger logistischer Systeme erweitert werden.

Die gewählten Anwendungsfälle repräsentieren Aufgaben der strategischen (Lagerplanung) und operativen (Online-Planung) Ebene. Probleme der taktischen Planungsebene werden aufgrund des geringen Deckungsgrads der positiven Eigenschaften von ASP und der Problemcharakteristika [SKIH15] nicht untersucht. In diesem Bereich haben sich bereits Modelle des Operations Research als hocheffizient erwiesen, da eine ausreichende Zeit zur Lösungsermittlung vorliegt, bei vergleichsweise geringer Komplexität des Problems (bspw. Transport- und Nachschubplanung).

Als zentrales Ergebnis werden Aussagen über die Nutzenpotenziale von ASP in der Intralogistik entwickelt. Weitere zentrale Ergebnisse sind die entwickelten Applikationen, welche die Verwendung von ASP in der Logistik erweitern und Potenziale sowohl offenlegen als auch nutzen. Zur Entwicklung dieser Applikationen müssen weitere, untergeordnete Fragestellungen beantwortet werden.

Der zur Erreichung der beschriebenen Zielstellung und Beantwortung der Forschungsfragen entwickelte Aufbau der Arbeit ist in Abb. 1.2 dargestellt. Die Beschreibung der Motivation, der Vorgehensweise und der relevanten Grundlagen bilden das Fundament der Ausführungen. Die darauf folgende Modellierung des Untersuchungsraums schafft das Umfeld für die Bearbeitung der identifizierten Aufgaben, welche mit den Tools *wASP* (strategische Planung) und *ASPhalt* (operative Planung) umgesetzt werden. Aufbauend auf den entwickelten Methoden und ihren Ergebnissen kann eine Aussage über die Nutzenpotenziale von ASP getroffen werden. Zuletzt werden die Ergebnisse und das Vorgehen zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere Forschungsmöglichkeiten gegeben.