

Soziale Roboter und soziale Räume: Eine Affordanz-basierte Konzeption zum rücksichtsvollen Handeln

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)
an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Informatik
der Universität Hamburg

vorgelegt von Felix Lindner

Hamburg, 2015

Gutachter:

Prof. Dr. Christopher Habel

Prof. Dr. Norbert Krüger

Tag der Disputation: 13. Juli 2015

Zusammenfassung

Wenn autonome Akteure wie Menschen und Roboter im realen Raum Handeln, dann können unterschiedliche Typen räumlicher Konflikte entstehen, die daraus resultieren, dass Handlungen Raum besetzen. Um Konflikte dieser Art zu verhindern, müssen soziale Roboter die Fähigkeit besitzen, Rücksicht auf die Handlungen von Menschen und von anderen Robotern zu nehmen.

Es wird eine Konzeption vorgelegt, nach der soziale Roboter Wissen über die räumlichen Bedürfnisse ihrer Handlungen sowie der Handlungen anderer Akteure repräsentieren. Diese Repräsentationen können unter Verwendung von Wissensverarbeitungsverfahren genutzt werden, um autonom Handlungen unter Rücksichtnahme auf die Bedürfnisse anderer Akteure, insbesondere Menschen, zu planen. Soziale Roboter werden auf diese Weise zusätzlich in die Lage versetzt, ihre Handlungen in transparenter Form Menschen gegenüber zu begründen.

Aufbauend auf sozial-wissenschaftlichen Modelle sozialer Interaktion zwischen Menschen werden vier Typen sozialer Räume, der persönliche Raum, der Aktivitätsraum, das Territorium und der soziale Affordanzraum, einheitlich formalisiert. Als gemeinsames Fundament dient die Struktur des funktionalen Affordanzraumes, der die räumlichen Voraussetzungen zur Ausführung von Handlungen abbildet. Der soziale Affordanzraum als funktionaler Affordanzraum, dessen Nutzung erwartbar ist, wird im Rahmen dieser Arbeit erstmals für die soziale Robotik beschrieben.

Methodisch bedient sich die Arbeit eines klassischen Ansatzes der Künstlichen Intelligenz, indem ein Inventar von Konzepten und Relationen identifiziert wird, das verwendet werden kann, um sozio-räumliche Umgebungen formal zu beschreiben. Zur Modellierung der sozialen Aspekte des rücksichtsvollen räumlichen Handelns werden Prinzipien formuliert, durch die die Vor- und Nachteile von Handlungsalternativen explizit werden, so dass Abwägungen getroffen und Begründungen und Entschuldigungen formuliert werden können. Das Problem, eine Handlung in sozialen Räumen zu platzieren, wird auf ein bipolares, qualitatives Entscheidungsproblem reduziert und gelöst.

Die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume wird anhand von Studien aus der Mensch-Roboter-Interaktion evaluiert. Die Evaluation demonstriert, dass die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume den Kontext der Studien adäquat reformulieren kann und so soziale Roboter befähigt, autonom in Einklang mit empirischen Resultaten über sozio-räumliche Aspekte der Platzierungsplanung zu rasonieren und entsprechend zu agieren.

Abstract

If autonomous agents like humans and robots act in physical space, several types of conflicts can occur that result from the fact that actions occupy space. To avoid such conflicts, social robots must have the capacity to consider the actions taken by other robots and by humans.

This thesis proposes a conceptual framework which can be used to specify knowledge about spatial needs of activities thus enabling social robots to represent and reason about the spatial needs of their own activities as well as of the activities of others. This kind of knowledge can be processed by knowledge processing procedures like symbolic planning. Moreover, it enables social robots to transparently explain their choice of actions to humans.

Based on models from social sciences describing how human activities shape space, four types of social spaces, viz. »personal space«, »activity space«, »territory« and »social affordance space« are formalized. Among these types of social space, social affordance space is a new type of social space which has not gained attention in social robotics until this work. As a common ground to modeling social spaces, the concept of a functional affordance space is proposed which represents the spatial preconditions for the placement of activities.

Methodologically, the approach embraces classical Artificial Intelligence by identifying and formally specifying an inventory of concepts and relations to be used to formally describe socio-spatial environments. To model the social constraints of considered activity placement in social spaces, principles of social spatial behaviour are proposed. These principles reflect the positive and the negative aspects of the possibilities for action available in a situation. The social activity-placement problem, i.e., the problem of choosing the most socially adequate placement for an activity, is solved by reduction to the bipolar, qualitative decision problem known in decision theory.

The affordance-based conceptualization of social spaces is evaluated by demonstrating that studies in the field of human-robot interaction can be adequately reformulated enabling social robots to autonomously deliberate and act in accordance to empirical findings.

Danksagung

Zum Gelingen meines Promotionsvorhabens haben allen voran Christopher Habel und Carola Eschenbach beigetragen, die meine Arbeit von Anfang an unterstützten und kritisch begleiteten. Ich habe von den regelmäßigen Diskussionen sehr profitiert und ich bin davon überzeugt, dass die vorliegende Arbeit in keinem anderen Forschungsumfeld auf diese Weise möglich gewesen wäre. Norbert Krüger danke ich für die Erstellung des zweiten Gutachtens zu dieser Dissertation sowie für seine wertvollen Anmerkungen zu meiner Arbeit aus der Perspektive eines Robotikers.

Meine Teilnahme an den internationalen Kooperationsinitiativen »Making Space – The Ontology of Social Interaction«, »Friends By Design – Formal Models of Human-Robot Interaction« und – als assoziierter Doktorand – an der Graduiertenschule »CINACS – Crossmodal Interaction in Natural and Artificial Cognitive Systems« haben mir eine interdisziplinäre Perspektive auf meine Forschung eröffnet. Ich danke in dieser Hinsicht insbesondere Johanna Seibt, Klaus Robering und Martin Mose Bentzen für Anregungen zur Metaphysik sozialer Räume und zur Formalisierung deontischer Konzepte.

Mein Dank gilt außerdem all jenen, die das Umfeld am Arbeitsbereich WSV ausmachten. Neben den bereits genannten Personen sind das Hildegard Westermann, Isabelle Streicher, Kris Lohmann, Junlei Yu, Özge Alaçam, Matthias Kerzel, Arne und Christine Köhn. Kim-Antonia Reichert und Tobias Staron waren als studentische Hilfskräfte bei der Literaturlauswertung und bei der Implementierung eine tatkräftige Unterstützung.

Für das Korrekturlesen von Teilen der Dissertation danke ich Isabelle Streicher, Sascha Jockel, Christiane Richter und in besonderem Maße Marie-Hélène Adam, die die gesamte Arbeit gelesen und aus geisteswissenschaftlicher Sicht kommentiert hat.

Felix Lindner
Juli 2015

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	1
1.1. Das soziale Handlungsplatzierungsproblem	3
1.2. Einordnung der Handlungsplatzierung in die (soziale) Robotik	4
1.2.1. Teilprobleme der autonomen Navigation	4
1.2.2. Funktionale Aspekte der Handlungsplatzierung	5
1.2.3. Soziale Aspekte der Handlungsplatzierung	6
1.3. Soziale Räume	11
1.3.1. Persönlicher Raum	11
1.3.2. Aktivitätsraum und F-Formation	13
1.3.3. Sozialer Affordanzraum	14
1.3.4. Territorium	16
1.4. Methodischer Ansatz: Spezifikation wissensbasierter Systeme .	17
1.5. Beitrag und Aufbau der Arbeit	19
1.5.1. Hauptresultate	19
1.5.2. Struktur der Arbeit	21
 2. Modellierungen sozialer Räume in der Robotik	 23
2.1. Modellierungen persönlicher Räume	24
2.1.1. Geometrische Modelle	24
2.1.2. Persönlicher Raum als Potentialfeld	27
2.1.3. Bewertung	31
2.2. Modellierungen von Aktivitätsräumen und F-Formationen . . .	32
2.3. Modellierungen von Territorien	35
2.4. Modellierungen von Affordanzräumen	36
2.4.1. Funktionale Perspektive auf Affordanzräume	36
2.4.2. Soziale Perspektive auf Affordanzräume	37
2.4.3. Bewertung	38
2.5. Qualitative Modellierungen sozialer Räume	39
2.6. Zwischenfazit	44

2.6.1.	Missing Link: Grundlegendes Prinzip der Modellierung sozialer Räume	44
2.6.2.	Entscheiden und Begründen	46
3.	Affordanzen in der Psychologie und in der Robotik	49
3.1.	Die Entwicklung des Affordanzbegriffes durch Gibson	50
3.2.	Affordanzen in der Psychologie	51
3.2.1.	Ontologische Unterscheidungen	51
3.2.2.	Epistemologische Unterscheidung	54
3.3.	Modellierung von Affordanzen in der Robotik	55
3.3.1.	Sensori-motorische Kopplung	56
3.3.2.	Planungsoperatoren	57
3.3.3.	Mensch-Roboter-Interaktion	60
3.4.	Fazit	61
4.	Affordanz: Eine formale Charakterisierung	63
4.1.	Die Fundamental-Ontologie Dolce-Core	64
4.2.	Affordanz und Fähigkeit als Eigenschaften	69
4.3.	Realisierung von Affordanzen durch transitive Handlungen . .	73
4.4.	Anwendung: Affordanzen bei der Aktionsplanung	76
5.	Affordanzraum	81
5.1.	Donnellys Basic-Place-Theory	82
5.1.1.	Zeit-abhängige Relationen zwischen Regionen	83
5.1.2.	Referenzobjekte und relativ fixierte Regionen	84
5.1.3.	Zeit-unabhängige Relationen zwischen Regionen	85
5.2.	Charakterisierung von Affordanzräumen	86
5.2.1.	Räumliche Struktur von Affordanzräumen	88
5.2.2.	Produktion und Nutzung von Affordanzräumen	90
5.2.3.	Räumliche Fähigkeiten	92
5.3.	Platz-Kandidaten für transitive Handlungen	93
5.4.	Konflikte zwischen Affordanzräumen	95
5.5.	Anwendung für die funktionale Handlungsplatzierung	97
6.	Soziale Räume als Affordanzräume	103
6.1.	Definitionen sozialer Räume	105
6.1.1.	Aktivitätsräume	105
6.1.2.	Soziale Affordanzräume	107
6.1.3.	Territorien	109
6.1.4.	Persönliche Räume	113

6.2. Fazit	119
7. Prinzipien der sozialen Handlungsplatzierung	121
7.1. Entscheiden mit qualitativen, bipolaren Gründen	121
7.1.1. Allgemeines Rahmenwerk	123
7.1.2. Levelwise-Tallying	124
7.2. Rechtfertigende und erklärende Gründe	125
7.3. Sozio-räumliche Gründe	127
7.3.1. Charakterisierung von sozio-räumlichen Gründen	127
7.3.2. Sieben Arten sozio-räumlicher Gründe	129
7.4. Gründe-basierte Bewertung von Platz-Kandidaten	131
7.4.1. Vermeidung von Störungen laufender Handlungen	132
7.4.2. Wahrung von Handlungsmöglichkeiten Anderer	135
7.4.3. Erwartungskonforme Platzierung	138
7.4.4. Platzierung von Handlungen in eigene Territorien	140
7.4.5. Meidung von unbefugter Platzierung von Handlungen in fremde Territorien	143
7.4.6. Meidung von unbefugtem Betreten von Territorien	145
7.4.7. Berücksichtigung persönlicher Räume bei fokussierter Interaktion	146
7.4.8. Berücksichtigung persönlicher Räume bei unfokussierter Interaktion	149
8. Anwendung der Affordanz-basierten Konzeption bei der Platzierung von Interaktionen zwischen Mensch und Roboter	153
8.1. Wissensbasierte softwaretechnische Realisierung	153
8.2. Nachbildung von Studien zur Proxemik in der Mensch-Roboter- Interaktion	157
8.2.1. Platzierung eines Roboters zur verbalen Interaktion mit einem Menschen nach Torta und Kollegen (2012)	157
8.2.2. Platzierung eines Roboters zur verbalen Interaktion mit einem Menschen in einem komplexen sozialen Kontext	164
8.2.3. Proxemik und soziale Beziehungen zwischen Mensch und Roboter nach Kim & Mutlu (2014)	172
9. Schlussbetrachtung	181
9.1. Zusammenfassung	181
9.2. Diskussion und Ausblick	184
A. Index zur Literaturstudie	189

B. Konzept- und Relationeninventar	191
C. Vollständige Domänenbeschreibungen	201
C.1. Zur Exemplifizierung der acht Prinzipien	201
C.1.1. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.1	201
C.1.2. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.2	203
C.1.3. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.3	203
C.1.4. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.4 und zu Ab- schnitt 7.4.5	203
C.1.5. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.7	205
C.1.6. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.8	207
C.2. Domänenbeschreibungen zur Studie von Torta und Kollegen .	209
C.2.1. Originalszenario	209
C.2.2. Erweitertes Szenario	211
C.3. Domänenbeschreibungen zur Studie von Kim und Mutlu . . .	214
D. Planungsdomäne und Planungsproblem zu Abschnitt 4.4	217
D.1. Spezifikation der Planungsdomäne	217
D.2. Spezifikation des Planungsproblems	219
Literaturverzeichnis	221

KAPITEL 1

Einführung

Handeln geht damit einher, Raum zu beanspruchen. Jeder kennt die Situationen, in denen sich Gruppen für ein Foto aufstellen und man als Passant höflich wartend stehen bleibt, um nicht durch das Foto zu laufen. Raum ist eine Ressource, die von Handlungen genutzt wird und die selbst eine Voraussetzung dafür ist, dass Handlungen überhaupt gelingen können. Wie das Beispiel des Fotografen zeigt, gibt es Handlungen, die sowohl Raum für den Handelnden (den Fotografen) besetzen, Raum für die Dinge, die von der Handlung betroffen sind (die Fotografierten), und auch Raum dazwischen, der während der laufenden Handlungen von Anderen nicht betreten werden sollte.

Abbildung 1.1 zeigt alltägliche Beispiele dafür, wie durch Handeln, hier das Abstellen von Gegenständen, Handlungsmöglichkeiten Anderer blockiert werden können. In der Sprache des Psychologen James J. Gibson (1977, 1986) heißen die Handlungsmöglichkeiten, die die Umwelt ihren Akteuren anbietet, *Affordanzen*. Durch das Abstellen des Fahrrades vor den Briefkästen in Abbildung 1.1a ist die Affordanz, die die Briefkästen Menschen anbieten, das heißt, die Möglichkeit, Briefe hineinzulegen oder herauszuholen, versperrt. Das ist eine direkte Konsequenz der Tatsache, dass der Raum, der von Menschen für Handlungen dieser Art genutzt werden könnte, bereits besetzt ist. Solche Räume, die dafür genutzt werden können, um die durch Affordanzen angebotenen Handlungsmöglichkeiten zu realisieren, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit als *Affordanzraum* bezeichnet.

Der Affordanzraum ist grundlegend, so die These, für viele räumliche Phänomene des sozialen Miteinanders. Der Fokus liegt hier auf sozialen und unstrukturierten Umgebungen. Eine Umgebung ist sozial, wenn in ihr mehrere (oft sehr unterschiedliche) Akteure handeln und es für den einzelnen Akteur



Abbildung 1.1.: Alltägliche Verletzungen von sozialen Affordanzräumen: (a) Fahrrad versperrt Briefkasten, (b) Fahrrad versperrt Türöffner, (c) Kisten versperren Türdurchgang.

relevant ist, auch die anderen Akteure und ihre Handlungen zu berücksichtigen (vgl. Fong, Nourbakhsh & Dautenhahn, 2003). Eine Umgebung ist unstrukturiert, wenn nicht für jede Handlung bereits vorgegebene Räume vorgesehen sind. In solchen sozialen, unstrukturierten Umgebungen stellt sich das Problem der räumlichen Koordination von Handlungen.

Ein Anwendungsgebiet, für das eine formale Analyse von Raumnutzung in sozialen, unstrukturierten Umgebungen, von Nutzen ist, ist die soziale Robotik. Die soziale Robotik erforscht die psychologischen und technischen Aspekte der Interaktion zwischen Mensch und Roboter. Typische zukünftige Aufgabenfelder für soziale Roboter sind Haushaltstätigkeiten, wie Putzen oder Geschirrspülen (Okada et al., 2006; Cakmak & Takayama, 2013), der Abtransport schmutziger Wäsche von Krankenstationen (Mutlu & Forlizzi, 2008), das Leiten von Führungen in Museen (Nourbakhsh et al., 1999; Yamaoka, Kanda, Ishiguro & Hagita, 2010) und die Bedienung von Gästen in Restaurants (Rockel et al., 2013). All diese Aufgabenfelder umfassen die Anforderung, dass ein Roboter in einer alltäglichen Umgebung autonom mobil ist. Erste Studien zeigen bereits, dass es für die Akzeptanz von Robotern wichtig ist, dass die Roboter die räumlichen Bedürfnisse von Menschen berücksichtigen (Mutlu & Forlizzi, 2008; Koay et al., 2013). Ideale Verfahren zur Handlungsplanung und Navigation von Robotern sollten diese Bedürfnisse berücksichtigen. Die Anwendungsbeispiele, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachtet werden und auch die Evaluation der entstanden Konzeption

beziehen sich deshalb auf die (soziale) Robotik. Ein weiterer Grund dafür, soziale Räume mit Hinblick auf die Robotik zu untersuchen, besteht darin, dass auf diesem Forschungsgebiet in den letzten Jahren bereits zahlreiche formale Modelle entstanden sind, die den Raumaspekt des sozialen Miteinanders von Mensch und Roboter betreffen.¹

1.1. Das soziale Handlungsplatzierungsproblem

Autonome mobile Systeme lösen vielerlei Teilprobleme: Sie rasonieren darüber, welche Handlungen als nächstes auszuführen sind, sie rasonieren darüber, wie, wo und wann sie ihre Handlungen ausführen, sie planen Wege zur Zielposition, sie folgen diesen Wegen und weichen dabei Hindernissen aus, und schließlich führen sie die geplanten Handlungen selbst aus.

Um die Analyse zu lenken, die zur Affordanz-basierten Konzeption sozialer Räume führt, setzt die vorliegende Arbeit ihren Fokus auf das Problem, für eine Handlung einen geeigneten Ort im physikalischen Raum zu finden, einen Affordanzraum, an dem eine bestimmte Handlung von einem bestimmten Akteur ausgeführt werden kann. Dieses Problem ist das »Handlungsplatzierungsproblem« (z.B. Zacharias, Borst, Beetz & Hirzinger, 2008; Keshavdas & Kruijff, 2012; Stulp, Fedrizzi, Mösenlechner & Beetz, 2012; Torta, Cuijpers, Juola & van der Pol, 2012).

Als Erweiterung des Handlungsplatzierungsproblems, wird für den Rahmen dieser Arbeit das »soziale Handlungsplatzierungsproblem« wie folgt definiert: Gegeben ist ein Handlungstyp ϕ und ein Akteur α , der eine Handlung vom Typ ϕ ausführen soll. Gesucht ist eine Platzierung π , so dass

- der Akteur α Handlungen vom Typ ϕ unter Nutzung der Platzierung π ausführen kann und
- die Platzierung π eine der sozial angemessensten aller verfügbaren Platzierungen ist, die α für ϕ -Handlungen nutzen kann.

Die Definition des Handlungsplatzierungsproblems unterstellt, dass Platzierungen hinsichtlich ihrer sozialen Angemessenheit bewertet werden können. Außerdem berücksichtigt die Definition, dass es mehrere »beste Platzierungen« geben kann, aus denen ausgewählt werden soll. Dabei ist die Handlung, die platziert werden soll, nicht notwendigerweise eine Handlung des

¹Zu den Forschungsgebieten innerhalb der Informatik und außerhalb der Robotik, in denen Modellierungen sozialer Räume untersucht werden, zählen Virtuelle Agenten (z.B. Pedica & Vilhjálmsson, 2008), Mensch-Computer-Interaktion und Kunstinstallationen (z.B. Fischer & Hornecker, 2012), Ubiquitous Computing (z.B. Koile, Tollmar, Demirdjian, Shrobe & Darrell, 2003), Geographische Informationssysteme (z.B. Ostermann & Timpf, 2007) und Computer-unterstützte Architektur (z.B. Bhatt, Hois & Kutz, 2012).

Roboters selbst. Ein Roboter, der das soziale Handlungsplatzierungsproblem lösen kann, kann auch Handlungen anderer Akteure platzieren, zum Beispiel als Platzanweiser.

Eine weitere Anforderung an einen sozialen Akteur soll sein, dass er seine Entscheidungen begründet, indem er zum Beispiel durch Verbalisierung Menschen seine Entscheidungen transparent darlegt. Das Lösungsverfahren zum sozialen Handlungsplatzierungsproblem, das nachfolgend ausgearbeitet wird, berücksichtigt, dass Platzierungsmöglichkeiten sowohl positive als auch negative Eigenschaften besitzen können und repräsentiert diese explizit. So ist ein sozialer Roboter sich stets der positiven als auch der negativen Aspekte seiner Entscheidung bewusst und kann seine Entscheidung begründen oder sich gegebenenfalls entschuldigen.

1.2. Einordnung der Handlungsplatzierung in die (soziale) Robotik

1.2.1. Teilprobleme der autonomen Navigation

An der autonomen Navigation eines Roboters sind üblicherweise mehrere Module einer Roboter-Architektur beteiligt. Abbildung 1.2 zeigt eine schematische Übersicht nach Kruse, Pandey, Alami und Kirsch (2013). Ein typischer Kontrollfluss² beginnt damit, dass zunächst ein Aktionsplaner eine Handlungssequenz bestimmt, die der Roboter durchlaufen soll, um ein vorgegebenes Ziel zu erreichen (»action planning«, »task planning« oder auch »mission planning«). Ein Platzierungsplaner bestimmt daraufhin, wo diese Handlungen ausgeführt werden sollen, d.h. er bestimmt Ziel-Posen, die vom Roboter eingenommen werden sollen (»placement planning« (Sisbot, Marin-Urias, Broquère, Sidobre & Alami, 2010) oder auch »pose selection« (Kruse et al., 2013) oder »target selection« (Torta et al., 2012)).

Ein Pfadplaner plant daraufhin unter Nutzung einer Karte der Umgebung einen Pfad von der gegenwärtigen Pose des Roboters zur Ziel-Pose (»[global] path planning« oder »motion planning«). Ein Modul zur Verhaltensauswahl kann während der Fahrt zur Ziel-Pose bestimmte Parameter anpassen, wie beispielsweise die Maximalgeschwindigkeit, mit der der Roboter fahren soll (»behavior selection«). Die lokale Planung berechnet fortwährend Geschwin-

²Dieser simple Kontrollfluss wird häufig angenommen und motiviert die Aufteilung von Planungsproblemen. Es bestehen allerdings gegenseitige Abhängigkeiten (z.B. zwischen Aktions- und Pfadplanung), die die aktuelle Forschung zu Integrationslösungen motiviert (z.B. Kaelbling & Lozano-Pérez, 2011; Dornhege et al., 2012; de Silva, Pandey & Alami, 2013; Leidner & Borst, 2013).

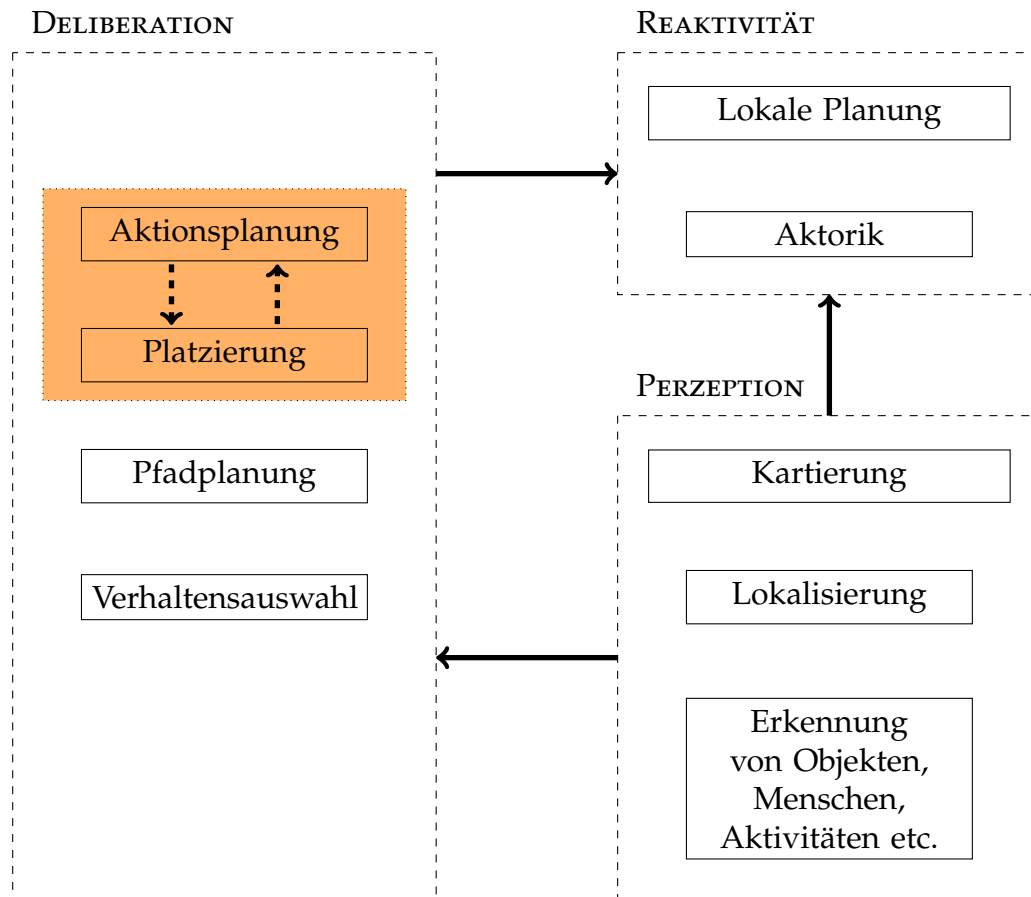


Abbildung 1.2.: Eine Sortierung von Modulen, die bei der Roboternavigation beteiligt sind, nach Kruse et al. (2013). Die durchgezogenen Pfeile markieren den Haupt-Datenfluss zwischen den Gruppen. Farblich hinterlegt ist der Fokus auf die Wechselwirkung zwischen Aktions- und Platzierungsplanung, die für das Platzierungsproblem besonders relevant ist: Planung von Handlungen auf Basis von Wissen über mögliche Handlungsplatzierungen und Platzierung geplanter Handlungen.

digkeiten und Orientierungen und sendet diese an die Kontrollinstanzen, die die Aktorik ansteuern. Die lokale Planung sorgt so dafür, dass dem geplanten globalen Pfad möglichst genau gefolgt wird, während plötzlich auftretende Hindernisse (beispielsweise Menschen) umfahren werden (»local path planning« oder auch »obstacle avoidance«).

1.2.2. Funktionale Aspekte der Handlungsplatzierung

Die einfachste existierende Lösungen zum Handlungsplatzierungsproblem in der Robotik besteht darin, für jede Handlungsmöglichkeit eigens eine Pose vorzusehen (einen Ort mit einer Orientierung). Okada et al. (2006) nennen so eine Pose »Spot«. Der Nachteil dieser Lösung besteht darin, dass der Spot in einer dynamischen Umgebung zeitweise versperrt sein kann oder in einer Umgebung mit mehreren Akteuren nicht zwingend zu den sozial angemess-

sensten Platzierungen gehört. Zudem wird ein Spot für einen spezifischen Roboter eingerichtet: Ein Spot, der von einer Roboter-Plattform genutzt werden kann, kann von einer anderen Roboter-Plattform gegebenenfalls nicht genutzt werden; etwa, weil sich die motorischen Eigenschaften hinreichend unterscheiden.

Eine Alternative zum Spot besteht darin, einen ganzen Raum von Posen zu bestimmen, die für eine Handlung genutzt werden können. Dafür existieren zwei Ansätze:

Im ersten Ansatz wird von einem mobilen Manipulator ausgegangen, dessen Arbeitsraum nach Positionen abgesucht wird, die für den Manipulator gut erreichbar sind (Zacharias et al., 2008). Soll dann beispielsweise ein Objekt gegriffen werden, wird das Wissen über die Erreichbarkeit von Positionen im Arbeitsraum mit dem zu manipulierenden Objekt in Überdeckung gebracht. Aus der Überdeckung kann schließlich eine Ziel-Pose für den Roboter berechnet werden.

Der zweite Ansatz geht von den Objekten in der Umgebung aus, an denen Roboter Handlungen ausüben können (Keshavdas & Kruijff, 2012; Stulp et al., 2012). Dazu wird eine Handlung von unterschiedlichen Positionen relativ zum Objekt simuliert. Durch die Protokollierung von erfolgreichen Handlungsausführungen wird eine Erfolgsverteilung über den Raum der Posen relativ zum Objekt, an dem die simulierte Handlung vorgenommen wird, gelernt.

Die bestehenden Verfahren bewerten mögliche Platzierungen hinsichtlich Erfolgskriterien, nehmen aber soziale Aspekte nicht in Betracht. Ein erster Schritt, um auch soziale Aspekte der Handlungsplatzierung zu berücksichtigen besteht darin, den kompletten Raumbedarf von Handlungen zu repräsentieren und nicht nur mögliche Positionen des Agenten einer Handlung (vgl. Kapitel 5). Außerdem müssen neben rein funktionaler Kriterien, wie beispielsweise die Erreichbarkeit oder die Sichtbarkeit von Objekten von bestimmten Positionen aus, auch soziale Kriterien eingeführt werden, wie zum Beispiel die Vermeidung von Störungen anderer Handlungen (vgl. Kapitel 7).

1.2.3. Soziale Aspekte der Handlungsplatzierung

Der Aspekt des Raumverhaltens von Robotern in alltäglichen Umgebungen ist Gegenstand zahlreicher empirischer Studien zur Wahrnehmung und Akzeptanz robotischen Raumverhaltens im Kontext sozialer Interaktionen zwischen Mensch und Roboter (z.B. Dautenhahn et al., 2006; Walters et al., 2009; Saerbeck & Bartneck, 2010; Kim & Mutlu, 2014). In der konstruktiv-technischen Forschung werden diese Anforderungen aufgegriffen, um Ver-

fahren zur Roboter-Navigation, die traditionellerweise Optimierer kürzester Wege sind, um soziale Aspekte zu erweitern (vgl. Kapitel 2).

Was genau dabei als »sozialer Aspekt« gilt, hängt auch davon ab, welche Art sozialer Roboter im Fokus der Untersuchung liegt. Fong et al. (2003) präsentieren eine Klassifikation sozialer Roboter, die sieben Klassen umfasst. Nach Fong et al. (2003) ist ein Roboter sozial evokativ (»socially evocative«), wenn er vornehmlich deswegen auf Menschen wirkt, weil Menschen die Tendenz haben, Dinge zu anthropomorphisieren. Ein Beispiel dafür sind Roboter, die eher Kuscheltieren gleichen. Ein zweiter Typ sozialer Roboter sind solche, die über Bedienschnittstellen verfügen, die der menschlichen Kommunikation nachempfunden sind wie zum Beispiel Sprachschnittstellen oder Gestik und Mimik. Fong et al. (2003) nennen solche Roboter »social interfaces«. Drittens werden sozial rezeptive (»socially receptive«) Roboter definiert als Roboter, die primär dadurch sozial sind, dass sie von der Interaktion mit Menschen profitieren. Zu dieser Klasse gehören Roboter, die das Verhalten von Menschen imitieren können. Wenn ein Roboter mit Menschen pro-aktiv interagiert, um seine eigenen »Ziele« zu erreichen, »Wünsche« zu befriedigen oder »Emotionen« Ausdruck zu verleihen, dann ist er nach (Fong et al., 2003) »sociable«.

Obgleich die Eigenschaften sozial evokativer, sozial rezeptiver, sozial proaktiver Roboter wichtig sind, so wie auch Schnittstellen, die für Menschen geeignet sind, ein bedeutendes Forschungsthema darstellen, findet sich der Gegenstand dieser Arbeit zur Modellierung sozialer Räume für rücksichtsvolles Handeln in den drei verbleibenden Klassen sozialer Roboter nach Fong et al. (2003) wider. Demnach sind Roboter sozial situiert (»socially situated«), wenn sie in einer sozialen Umgebung agieren. Sozial situierte Roboter besitzen die Fähigkeit, Objekte von Menschen zu unterscheiden. Für sie ist es relevant zu wissen, dass es außer ihnen auch noch andere soziale Akteure gibt, die berücksichtigt werden wollen. Ein Roboter ist sozial eingebettet (»socially embedded«), wenn er über die Situiertheit hinaus sich als Teil der Umgebung und der Handlungen in dieser Umgebung versteht. Er weiß um menschliche Interaktionsstrukturen und fügt sich in den sozialen Kontext ein. Schließlich ist nach Fong et al. (2003) ein Roboter sozial intelligent (»socially intelligent«), wenn er menschenähnliche soziale Intelligenz besitzt, indem sein Verhalten auf Modellen menschlicher Kognition und sozialer Kompetenz beruhen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Literaturstudie nach Arksey und O'Malley (2005) durchgeführt. Für diese Studie wurden 54 Artikel (siehe Anhang A), die in Konferenzbänden und Zeitschriften zur sozialen Robotik und Mensch-Roboter-Interaktion erschienen sind, danach analysiert, welche

Ziele die Autoren mit ihren Forschungsarbeiten verfolgen. Ein Kriterium für die Auswahl eines Artikels war, dass er sich mit den technischen bzw. algorithmischen Aspekten des räumlichen Verhaltens von sozialen Robotern beschäftigen sollte. Die Ergebnisse dieser Literaturstudie sind in Tabelle 1.1 zusammengefasst.

Im ersten Teil der Tabelle sind Adjektive aufgeführt, die das Verhalten der sozialen Roboter charakterisieren, das die Autoren als Ziel ihrer Modellierung verstehen. Einige dieser Eigenschaften lassen sich ohne tiefere Modelle menschlichen Denkens und Handelns erreichen. Die Anforderung, dass ein Roboter sicher ist, zielt auf die Basis-Anforderung, dass niemand Schaden nehmen soll. Die Eigenschaften Verständlichkeit und Interaktivität zielen darauf, dass das räumliche Verhalten des Roboters von Menschen interpretierbar ist. Dabei steht der Roboter als Interface im Vordergrund. Bei den Eigenschaften Menschenähnlichkeit und Anpassbarkeit dreht es sich um Imitation menschlichen Raumverhaltens. Oft wird davon ausgegangen, dass das Verhalten von Robotern am besten ist, wenn es menschlichem Verhalten gleicht.³

Die Terme »sozial-adäquat«, »sozial-bewusst«, »aufmerksam« und »rücksichtsvoll« erfordern mehr als komfortable Schnittstellen und die Fähigkeit zur Imitation menschlichen Handelns. Für diese Arbeit wird der Begriff der Rücksichtnahme als zentraler Begriff der Charakterisierung sozialen Raumverhaltens angesehen. Rücksicht bezeichnet einerseits Verhalten, das die Situation anderer berücksichtigt. Andererseits ist eine Rücksicht auch eine Überlegung oder ein Grund, aus dem man etwas tut. Der Aspekt des Grundes ist für Rücksichtnahme, wie sie hier verstanden werden soll, von großer Relevanz: Nur insofern ein Akteur die Situation von anderen Akteuren als Grund für seine Handlungen begreift, handelt er rücksichtsvoll.

Der zweite Teil der Tabelle benennt Mittel, durch die soziales Verhalten erzeugt werden kann. Hier werden Regeln, sozialen Normen und Konventionen genannt. Es ist zu beobachten, dass solche abstrakten Entitäten, wie eben Regeln, soziale Normen und Konventionen, in der Modellierung des robotischen Navigationsverhaltens aber niemals explizit als modelliert werden. Die Regeln, Normen etc. verbleiben beim Menschen als Modellierer des Roboterhaltens. Hinterher kann zwar evaluiert werden, ob das Modell den Regeln, Normen, Konventionen etc. entspricht, aber der Roboter kann zu keinem Zeitpunkt über diese Regeln, Normen, Konventionen etc. rasonieren, geschweige denn kommunizieren, an welche Regeln er sich gehalten hat und welche Regeln durch sein Handeln verletzt werden.

³Dass die Annahme, dass perfektes Raumverhalten menschliches Raumverhalten ist, zumindest fraglich ist, demonstriert die Abbildung 1.1 auf Seite 2.

Chakaterdisposition	Bezeichnungen
sozial-adäquat (27)	socially acceptable (21), appropriate (5), adequate (1)
angepasst (26)	smooth (12), adaptive (6), harmonious (3), blend themselves into workspace (1), unobstrusive (1), conform (1), human-compliant (1), rule-compliant (1)
komfortabel (21)	comfortable (20), convenient (1)
menschenähnlich (20)	natural (10), human-like (9), realistic (1)
sicher (20)	safe (17), reliable (3)
verständlich (11)	legible (3), predictable (2), understandable (2), intuitive (2), coherent (1), easily understood (1)
rücksichtsvoll (10)	respectful (4), regarding (1), considerate (1), polite (4)
sozial-bewusst (9)	human aware (3), socially aware (2), socially enabled (1), proxemic competent (1), understands & controls proxemics (1), responsible (1)
freundlich (9)	human-friendly (6), friendly (1), robot friendly (1), appealing (1)
interaktiv (6)	effective (4), interactive (1), cooperative (1)
aufmerksam (2)	attending (1), recognizing (1)
Normative Entitäten	Bezeichnungen
Regeln (18)	social rules (7), nonwritten rules (2), proxemic rules (2), rules (2), cultural rules (1), harmonious rules (1), regulation rules (1), politeness rules (1), basic rules of human behavior (1)
Konventionen (11)	social conventions (10), conventions (1)
Randbedingungen (7)	social constraints (2), proximity constraints (2), constraints (1), comfort constraints (1), safety constraints (1)
Persönlicher Raum (5)	personal space (5)
Soziale Normen (4)	social norms (3), sociocultural norms (1)
Prinzipien (2)	principles (1), human proximity guidelines (1)
Soziale Kräfte (2)	social forces (1), spatial effects (1)
Erwartungen (2)	expected behavior (1), social behavior expectation (1)
Protokolle (1)	social protocols (1)
Tendenzen (1)	tendencies (1)
Praktiken (1)	human practice (1)

Tabelle 1.1.: Charakterisierungen des erwünschten Verhaltens sozialer Roboter in sozialen Umgebungen auf Basis einer Studie von 54 Einleitungen von Forschungsartikeln aus der sozialen Robotik. Jeweils in Klammern steht die Anzahl der Artikel, in denen das Wort genannt wird.

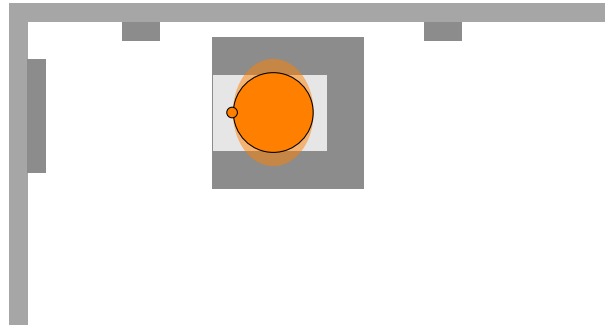


Abbildung 1.3.: Ein Mensch sitzt auf dem Sessel und sieht fern. Für einen Roboter stehen an der hinteren Wand zwei Steckdosen zur Verfügung, die er nutzen kann, um seine Batterien wieder aufzuladen; mit dem Menschen kann er in Interaktion treten.

Das Modellierungsziel, das insbesondere durch Kapitel 7 realisiert wird, besteht darin, die sozialen Gründe zu repräsentieren, die für und gegen Handlungsalternativen sprechen. Ein sozialer Roboter wird damit in die Lage versetzt, das Für und Wider von Handlungsalternativen abzuwägen und begründete Entscheidungen zu treffen—auch in Dilemma-Situationen, in denen er nicht vollständig vermeiden kann, zum Beispiel andere Akteure bei ihren Handlungen im Wege zu stehen. Durch die symbolische Natur der Repräsentationen dieser Gründe erhält der soziale Roboter die Möglichkeit, seine Entscheidungen zu verbal zu begründen und ist damit in seinem Verhalten gegenüber Menschen transparent. Zu diesem Zweck werden in Kapitel 7 Prinzipien aufgestellt, die aber nicht etwa spezifizieren, wie sich der Roboter in einer bestimmten Situation zu verhalten hätte, sondern, welche Gründe es sind, die er bei seiner Entscheidung berücksichtigen soll.

Zur Illustration zeigt Abbildung 1.3 eine Szene, wie sie ein Haushaltsroboter im Alltag vorfinden könnte: Ein Mensch sitzt auf einem Sessel und sieht fern. An der hinteren Wand befinden sich zwei Steckdosen. Der Roboter soll mit dem Menschen in Interaktion zu treten. Da der Batteriestatus des Roboters kritisch ist, wird der Plan generiert, sich zunächst an einer Steckdose aufzuladen, um danach mit dem Menschen zu interagieren.

Um rücksichtsvoll zu handeln, sollte sich der Roboter darüber bewusst sein, dass die gegenwärtige Handlung des Menschen einen Grund hervorbringt, der dagegen spricht, dass sich der Roboter an der linken Steckdose anschließt. Außerdem soll sich der Roboter aus demselben Grund für die Interaktion mit dem Menschen zu seiner Linken positionieren, um die Sicht auf den Fernseher nicht zu versperren. Das zeigt, dass es Dinge gibt, die in der Situation Gründe für oder auch gegen Platzierungen hervorbringen. Herkömmliche Platzierungsplaner (z.B. Sisbot et al., 2010) ziehen kontextuelle Aspekte, wie

laufende Handlungen oder Handlungsmöglichkeiten in der Umgebung, allerdings nicht mit in Betracht.⁴

Eine simple Lösung würde darin bestehen, ein einfaches Regelsystem zu entwerfen, nach dem in Situationen wie der dargestellten, die rechte der beiden Steckdosen auszuwählen ist. Das würde den Roboter dazu befähigen, mit Verweis auf diese Regel, sich sozial-adäquat zu verhalten. Die Situation verkompliziert sich aber deutlich, sobald auch die Nutzung der zweiten Steckdose eine soziale Regel verletzt. Dann ist ein Mechanismus erwünscht, der dem Roboter dazu befähigt, die beiden möglichen Verletzungen abzuwägen und sich möglicherweise trotz der Verletzung für eine der Handlungen zu entscheiden. Angenommen also, dass der Roboter in dem Beispiel dazu getrieben ist, die linke der beiden Steckdosen zu nutzen, dann sollte er sich bewusst darüber sein, dass er mit dieser Handlung die Handlung des Menschen stört, das heißt, er soll über Wissen darüber verfügen, welche Gründe es gibt, die für und die gegen die ergriffene Handlung sprechen.

1.3. Soziale Räume

Um den sozialen Aspekt der Platzierung von Handlungen zu modellieren, werden zunehmend Modelle sozialer Räume als eine vielversprechende Möglichkeit begriffen. Modelle sozialer Räume sind sozial-psychologischen Konzeptionen wie dem »persönlichen Raum« (Hall, 1966), dem »Aktivitätsraum« (Kendon, 1990), oder dem »Territorium« (Altman, 1975) angelehnt. Dieser Sammlung sozialer Räume wurde durch Lindner und Eschenbach (2011, 2013, 2014) der (soziale) Affordanzraum hinzugefügt.

1.3.1. Persönlicher Raum

Die Arbeit von Hall (1966) zählt zu den häufig zitierten Werke in dem Diskurs der sozialen Robotik, der sich mit dem Navigationsverhalten von Robotern beschäftigt. Hall beschreibt den persönlichen Raum als unsichtbaren, ellipsen-förmigen Raum, der jeden Menschen umgibt. Für den durchschnittlichen Amerikaner identifiziert er vier soziale Regionen innerhalb des persönlichen Raumes: die vertraute Region (intimate), die persönliche Region (personal), die soziale Region (social) und die öffentliche Region (public); vgl. Abbildung 1.4. Jede dieser vier Regionen ist wiederum in zwei Sub-Regionen, eine nahe Region und eine ferne Region, eingeteilt. Die Regionen des persönlichen Raumes tragen unterschiedliche soziale Bedeutungen, die von der

⁴Mit bestem Dank an Rachid Alami und Aurélie Clodic für diesen Hinweis (persönliche Kommunikation).

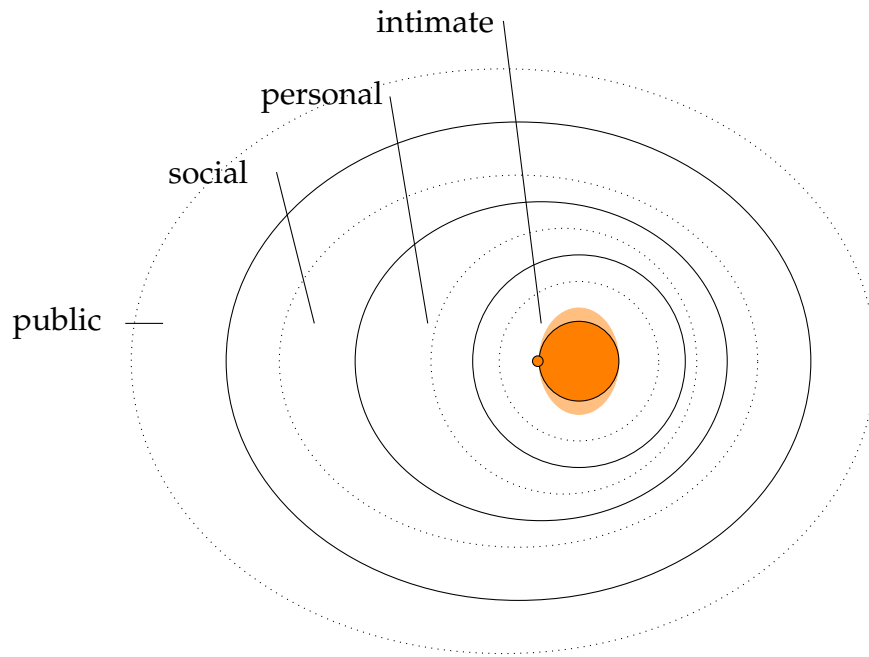


Abbildung 1.4.: Schematische Darstellung des persönlichen Raumes nach Hall (1966) bestehend aus vertrauter Region (intimate), persönlicher Region (personal), sozialer Region (social) und öffentlicher Region (public). Gepunktete Linien markieren die Grenzen zwischen fernen Regionen und nahen Regionen.

Art der Interaktion abhängen, sowie von Eigenschaften der Interaktanten, wie Geschlecht, Alter, kultureller Hintergrund und sozialer Status.

Nach Hall (1966) ist die vertraute Region für Liebende und enge Freunde reserviert. In dieser Region berühren und umarmen sich Menschen, wohingegen nur selten in anderen Modalitäten, wie etwa sprachlich, interagiert wird. Die ferne vertraute Region ermöglicht verbale Kommunikation in flüsternder Weise. Die visuelle Wahrnehmung ist in der vertrauten Region verschwommen und Menschen fühlen sich für gewöhnlich bedrängt, wenn andere Menschen die vertraute Region ohne ihre Zustimmung betreten.

Menschen, die sich in der Öffentlichkeit in der nahen persönlichen Region aufhalten, werden als soziale Einheit verstanden und signalisieren damit ihre Beziehung zueinander, ihre »withness« (Goffman, 1971). Es ist aus dieser Distanz noch immer möglich, sich zu berühren. In einigen Kulturen wird es als Störung empfunden, wenn Fremde in die nahe persönliche Region eindringen (Hall, 1966). Die ferne persönliche Region hält Menschen auf Armlänge. Hier finden Dialoge zwischen Freunden statt.

Die nahe soziale Region wird unter normalen Umständen für Konversationen im öffentlichen Raum und zwischen Menschen, die nicht miteinander befreundet sind, genutzt. Menschen, die gemeinsam miteinander arbeiten, positionieren sich in der nahen sozialen Region. Die ferne soziale Region kann

von anderen Menschen betreten werden, ohne den Besitzer des persönlichen Raumes zu stören. Menschen, die zueinander in der fernen sozialen Region platziert sind, werden als nicht-zusammengehörig wahrgenommen.

Menschen, die sich in der öffentlichen Region befinden, ignorieren sich für gewöhnlich. Es existieren aber manche formale Situationen, in denen Interaktionen auch in der öffentlichen Region stattfinden (Lawson, 2001): Vorlesungen vor Studenten, Reden, Konzerte, Theatervorstellungen.

Auffällig ist der Zusammenhang zwischen den Regionen des persönlichen Raumes und den Möglichkeiten zur Interaktion, für die diese Regionen vorgesehen sind. Hall (1966) begründet den persönlichen Raum mit motorischen und sensorischen Fähigkeiten des Menschen und baut explizit eine Brücke zu den Arbeiten von J. J. Gibson, der in seinen späteren Werken (Gibson, 1977, 1986) den Affordanzbegriff einführen wird. Dieser Zusammenhang ermutigt zu der These, dass die Differenziertheit des persönlichen Raumes, die er durch seine unterschiedlichen Regionen reflektiert, in der Differenziertheit von Affordanzräumen begründet ist, die für unterschiedliche Interaktionen genutzt werden können. Kapitel 6 schlägt eine Affordanz-basierte Modellierung persönlicher Räume vor.

1.3.2. Aktivitätsraum und F-Formation

Ein weiterer Typ sozialen Raumes wird von Kendon (1990) beschrieben. Kendons Modell der F-Formationen resultiert aus Studien zu räumlichen Mustern, nach denen sich Menschen anordnen, um miteinander in Interaktionen zu treten. Kendons Analyse von F-Formation beginnt mit der Feststellung, dass Handlungen räumlich verortet sind. Für jede Handlung können zwei Regionen unterschieden werden: Eine Region, die vom Agenten der Handlung eingenommen wird, die Agentenregion, und eine zweite Region, die von der Handlung über den Ort des Agenten hinaus benötigt wird, die Transaktionsregion (»transactional segment« bei Kendon, 1990, S. 211):

»[the transactional segment] is the space into which [the actant] looks and speaks, into which he reaches to handle objects. He will endeavor to maintain this space, in the face of any intrusions, so long as he is engaged in the particular line of activity which requires it [...] The size of this space is quite variable. A man sitting over a book has a narrow, highly circumscribed transactional segment. A man sprawled on a sofa watching television has a wide transactional segment that extends at least as far as the television set. The transactional segment, thus, is a space that is created and

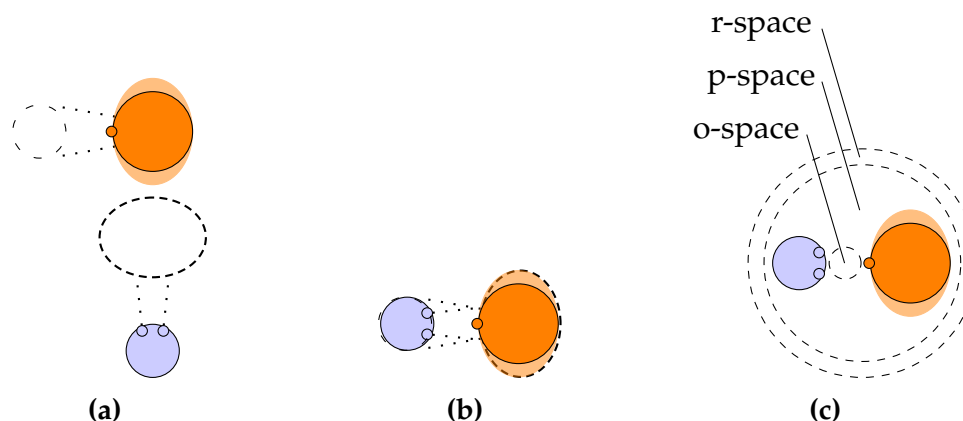


Abbildung 1.5.: Vereinfachte Darstellung zum Zustandekommen einer F-Formation. (a) Interaktion ist nicht möglich, weil die Transaktionsregionen auseinanderliegen. (b) Die Interaktionspartner bringen ihre Transaktionsregionen in geeigneter Weise zusammen. (c) Die F-Formation wird durch die Interaktion konstituiert (Kendon, 1990).

maintained by the individual's behavior.«

F-Formationen entstehen, wenn sich zwei Transaktionsregionen für den Zweck einer Interaktion zwischen zwei Akteuren zueinander ausrichten (siehe Abbildung 1.5). F-Formationen bestehen aus drei Sub-Regionen: »O-Space«, »P-Space« und »R-Space«. Der O-Space ist die Region, in der die Interaktion stattfindet und in den die Teilnehmer der Interaktion räumlich orientiert sind, der P-Space ist die Region, in der die Teilnehmer der Interaktion platziert sind, und der R-Space bildet einen Puffer zwischen der Interaktion und der Umgebung.⁵

Unter der Bezeichnung »activity footprint« sind Aktivitätsräume auch in den Geowissenschaften beschrieben, um mögliche Konflikte bei der Nutzung öffentlicher Räume, wie Parks, zu analysieren (cf. Ostermann & Timpf, 2007). In der Robotik ist dieser Aspekt erst wenig berücksichtigt (siehe aber Abschnitt 2.2).

1.3.3. Sozialer Affordanzraum

Angenommen, dass in dem eingangs erläuterten Beispiel aus Abbildung 1.3 (S. 10) noch niemand vor dem Fernseher sitzt. Dann verletzt der Roboter keinen Aktivitätsraum, wenn er die vordere Steckdose nutzt. Sofern aber erwartbar ist, dass jemand fernsehen wird, hat der Roboter einen Grund, von der

⁵Die Bezeichnung »O-Space« erklärt sich aus den »O«rientierungen der Teilnehmer in dieses Raumsegment und das »P« in »P-Space« kommt von »P«artizipanten, die sich in ihm positionieren. Die Bedeutung von »R« in »R-Space« bleibt unklar (vgl. Kendon, 1990, S. 232ff).



(a)

(b)

(c)

Abbildung 1.6.: Räumliche Anordnungen von Objekten, die aufeinanderfolgende Handlungen ermöglichen: **(a)** Tasse ausspülen und Tasse wiederbefüllen, **(b)** Hände waschen und Hände abtrocknen, **(c)** Briefmarke kaufen und Brief einwerfen.

Nutzung der ersten Steckdose abzusehen. Das ist die Idee des sozialen Affordanzraums: Ein sozialer Affordanzraum ist ein Affordanzraum, dessen Nutzung erwartbar ist (Lindner & Eschenbach, 2013, 2014). Abbildung 1.6 zeigt Beispiele, in denen die Erwartbarkeit der Nutzung von Affordanzräumen dazu führt, rücksichtsvolles von weniger rücksichtsvollem Platzierungsverhalten unterscheiden zu können.

Das erste Beispiel ist eine Küchensituation. Angenommen, dass ein Roboter in der abgebildeten Küchenumgebung erst eine Tasse ausspülen und dann mit Kaffee befüllen soll. Ein mögliches Platzierungsverhalten besteht darin, eine Position vor der Spüle einzunehmen, von dort aus die Tasse erst auszuspülen und sich dann in Richtung Kaffeeautomat zu drehen, um die Tasse mit Kaffee aufzufüllen. Dabei bleibt die Spüle über die gesamte Handlungssequenz Anderen versperrt. Eine Alternative besteht darin, sich für das Auffüllen der Tasse nach dem Ausspülen direkt vor den Kaffeeautomaten zu stellen. Sofern erwartbar ist, dass ein anderer Akteur den Affordanzraum vor der Spüle nutzen möchte, signalisiert das zweite Platzierungsverhalten Rücksicht.

Abbildung 1.7 zeigt, dass es mitunter tiefgehenden Weltwissens bedarf, um soziale Affordanzräume von rein funktionalen Affordanzräumen zu unterscheiden. Hier wird die Rücklehne einer Bank als Wegweiser genutzt. Es ist in diesem Fall erwartbar, dass der Wegweiser von vorbeikommenden Wanderern gelesen wird (die dazugehörigen Affordanzräume sind soziale Affordanzräume). Somit gibt es einen Grund, davon abzusehen, sich auf die Bank zu setzen (obwohl entsprechender Affordanzraum verfügbar ist und die Bank



Abbildung 1.7.: Bank und Wegweiser bilden einen »Conflict by Design«

dazu einlädt, ihre Sitz-Affordanz zu realisieren).

Bewusst ist hier nicht etwa von Verboten und Erlaubnissen die Rede, sondern von Gründen. Wie es um die soziale Adäquatheit in solchen Situation bestellt ist, dürfte abhängig von weiteren, beispielsweise kulturellen Aspekten, sein. Es ist nicht Gegenstand der nachfolgenden Untersuchung, die soziale Adäquatheit oder Inadäquatheit von Handlungen und ihrer Platzierungen zu behaupten. Der Fokus liegt darauf, dass räumlichen Aspekte des sozialen Handelns explizit formal beschrieben werden können und damit der systematischen und algorithmischen Verarbeitung zugänglich gemacht werden.

1.3.4. Territorium

Territorien sind ein weiterer Typ sozialer Räume, der die soziale Bewertung von Handlungsplatzierungen beeinflusst. Angenommen, dass die hintere Steckdose aus dem Beispiel in Abbildung 1.3 für einen anderen Roboter reserviert wäre. Dann brächte diese Reservierung einen Grund hervor, der gegen die Nutzung der zweiten Steckdose spricht. Affordanzräume, die für die Nutzung durch bestimmte Akteure reserviert sind, sind territorialisierte Affordanzräume (oder einfach Territorien).

Der Territorialitätsbegriff wird äußerst divers über Disziplingrenzen hinweg verwendet: in der Biologie, Geographie, Politik, Soziologie etc. (vgl. Delaney, 2005). Für die soziale Robotik sind zunächst weder Staatsterritorien von Belang, noch müssen soziale Roboter Nahrungsquellen oder Weibchen gegen Konkurrenten verteidigen. Relevant ist der Territoriums-begriff aus der Mikrosoziologie (Altman, 1975), der kleine Territorien umfasst, wie den Stammtisch

in der Kneipe, der reservierte Arbeitsplatz in der Bibliothek oder das eigene Büro. Territorien sind Räume, auf die ein Akteur oder eine Gruppe von Akteuren für einen Zeitraum exklusiven Zugriff beansprucht. Ein Territoriumsbesitzer kann darüber entscheiden, wer befugt ist, das Territorium zu betreten (z.B. »Zutritt nur für Personal«, »Hunde müssen draußen bleiben«) und wie sich diejenigen verhalten dürfen, die sich in ihm befinden (z.B. »Rauchen verboten«) (vgl. Richter, 2008). Außerdem ermöglichen Territorien das soziale Phänomen der Einladung (Sebba & Churchman, 1983).

Territorien sind auch dann zu berücksichtigen, wenn ihre Besitzer oder Begünstigten nicht physisch anwesend sind. Ein Territorium kann verletzt werden, ohne dass irgendein Akteur sich dadurch unmittelbar gestört oder behindert fühlt. Durch diese Eigenschaft grenzen sie sich von anderen sozialen Räumen ab, deren Verletzung notwendigerweise mit der Störung von Menschen, Handlungen oder der Vereitelung von Handlungsmöglichkeiten zusammenfällt. Zudem sind für Territorien drei Arten der Störung zu unterscheiden, die Sommer (1969) in Verletzung »violation«, Invasion »invasion« und Kontamination »contamination« unterteilt; wobei »violation« meint, dass ein Territorium unbefugterweise genutzt wird, »invasion«, dass das Territorium unbefugterweise betreten wird und »contamination«, dass ein fremdes Territorium verschmutzt wird.

Satake, Iba, Kanda, Imai und Saiki (2014) und Lindner und Eschenbach (2011) sind die bisher einzigen Arbeiten, die die Invasion von Territorien als einen für die soziale Robotik relevanten sozialen Raum thematisieren. Kapitel 6 definiert Territorium als Affordanzraum, auf den eine Gruppe von Akteuren Nutzungsanspruch erhebt. In Kapitel 7 werden Prinzipien zur Vermeidung von Territoriums-Verletzung und -Invasion aufgestellt.

1.4. Methodischer Ansatz: Spezifikation wissensbasierter Systeme

Aus den vorangegangenen Beispielen wird ersichtlich, dass wir als Menschen erkennen können, wohin eine Handlung unter sozialen Gesichtspunkten platziert werden soll. Es ist uns als Menschen möglich sowohl zu erkennen, wo eine Handlung möglich ist, als auch, wo sie niemandem im Wege steht. Außerdem können wir als Menschen mit Verweis auf soziale Räume begründen, warum eine Platzierung einer anderen Platzierung vorzuziehen ist. Die Hauptthese dieser Arbeit lautet, dass es das Wissen über Handlungsmöglichkeiten und sozialen Raum ist, das intelligente Systeme (Menschen und soziale Roboter) dazu befähigt, das soziale Handlungsplatzierungsproblem zu lö-

sen. Diese These schließt sich einer grundsätzlichen Annahme der klassischen Künstlichen Intelligenz an, wonach sich intelligentes Verhalten eines Akteurs durch dessen Wissen erklärt (z.B. McCarthy, 1959; Newell, 1982; Levesque, 2014). Bezogen auf das soziale Handlungsplatzierungsproblem bedeutet das: Falls ein autonomes System das Problem intelligent löst, dann weil es Wissen darüber nutzt, dass es a) von der ausgewählten Platzierung aus erfolgreich handeln kann, und b) alles in allem auch unter Berücksichtigung sozialer Räume, gute Gründe hat, sich so-oder-so zu platzieren.

Die Untersuchung geeigneter Repräsentationen von Weltwissen und deren Nutzung für die Robotik ist immer wieder Gegenstand der Forschung (z.B. Arkin, 1990; Tenorth & Beetz, 2009), und wird insbesondere von den Vertretern der »Cognitive Robotics« nach (Levesque & Reiter, 1998) vertreten (siehe auch Levesque, Reiter, Lespérance, Lin & Scherl, 1997; Shanahan & Witkowski, 2001; Shanahan, 2004; Thielscher, 2006; Levesque & Lakemeyer, 2007).

Der Kern der Arbeit ist von der Hypothese getragen, dass intelligente Systeme ihre Entscheidungen auf Basis symbolisch repräsentierten Wissens treffen; vgl. »Knowledge Representation Hypothesis« von Smith (1982) (zitiert nach (Brachman & Levesque, 2004)). Das Verhalten eines intelligenten Systems kann demnach unter Verwendung des Wissens erklärt werden, das das System besitzt. Was ein System über die Welt weiß, in der es handeln soll, ist intern durch eine Menge von Sätzen repräsentiert, die in einer formalen Sprache formuliert sind. Ein System entscheidet sich für eine Handlung, indem es diese Sätze verarbeitet.

Die Prädikatenlogik erster Stufe ist beispielsweise eine solche formale Sprache, in der Sätze über die Welt formuliert werden können. In den Kapiteln 4 bis 7 der vorliegenden Arbeit wird die Prädikatenlogik erster Stufe verwendet, um grundlegende Konzepte und Relationen zu definieren. Die Motivation zur Nutzung von Logik liegt primär darin, dass Logik ein Werkzeug ist, mit dessen Hilfe sich Probleme, Konzepte und Zusammenhänge verstehen und formal darstellen lassen. Das gilt unabhängig davon, ob Logik auch als Implementationsprache genutzt wird und ob Gebrauch von Techniken des logischen Schließens, wie z.B. Theorembeweisen, gemacht werden soll.

Methodisch geht die Arbeit vor, indem sie ein Vokabular als Inventar von Konzepten und Relationen konzipiert. Unter Verwendung dieses Vokabulars kann Wissen über die sozio-räumliche Umwelt so repräsentiert werden, dass es einem autonomen System möglich ist, in einem beliebigen Szenario das soziale Handlungsplatzierungsproblem zu lösen. Dabei wird die Perspektive eingenommen, dass es einerseits Basis-Wissenseinträge gibt, die das System akquirieren muss, um Entscheidungen treffen zu können, und dass es ande-

rerseits Fakten gibt, die das System aus den primitiven Fakten ableitet. Diese Unterscheidung finden sich in relationalen Datenbanken beispielsweise in Form von Tabellen und Sichten wieder (vgl. Olivé, 2007), oder als Fakten und Regeln in deduktiven Datenbanken (vgl. Levesque, & Brachman, 1985).

In der aktuellen Forschung zur Künstlichen Intelligenz ist die wissensbasierte Perspektive keineswegs unumstritten und Logik nur ein Werkzeug von vielen. Ein signifikanter Teil der Forschung auf dem Gebiet des sozialen Raumverhaltens von sozialen Robotern argumentiert, dass die sozialen Normen des Miteinanders kaum in Form von logischen Sätzen spezifiziert werden können, sondern daten-getrieben erlernt werden sollten (z.B. Chung & Huang, 2012; Luber, Spinello, Silva & Arras, 2012). Durch die wissensbasierte Perspektive grenzt sich die vorliegende Arbeit von diesen Arbeiten ab. Ein nützlicher Aspekt der wissensbasierten Modellierung besteht darin, dass wissensbasierte Modelle in symbolischen Wissensverarbeitungsverfahren genutzt werden können. Ein prominentes Beispiel sind symbolische Aktionsplaner, die Aktionssequenzen erzeugen können, die eine symbolisch beschriebene Start-Situation in eine Ziel-Situation überführen (z.B. Hoffmann & Nebel, 2001). Aber auch die Generierung von sprachlichen Äußerungen, z.B. Erklärungen, Rechtfertigungen und Entschuldigungen wird durch symbolische Repräsentationen vereinfacht.

In anderen Arbeiten wurde sozialer Raum vornehmlich auf Ebene von lokalen Navigationsverfahren betrachtet, für die numerische Modelle geeigneter sind (z.B. Yoda & Shiota, 1997; Kirby, Simmons & Forlizzi, 2009; Sisbot et al., 2010; Kessler, Schroeter & Gross, 2011; Torta et al., 2012) Kapitel 2 gibt auch einen Überblick über die Verwendung von Potentialfeldern, numerischen Optimierungsverfahren und Klassifikatoren zur Modellierung sozialer Räume.

1.5. Beitrag und Aufbau der Arbeit

1.5.1. Hauptresultate

Die vorliegende Arbeit trägt in mehrfacher Hinsicht zum wissenschaftlichen Diskurs bei, der damit befasst ist, die konzeptionellen und technischen Voraussetzungen dafür herzustellen, dass mobile autonome Systeme in sozialen Umgebungen intelligent agieren.

Das soziale Handlungsplatzierungsproblem wie es in Abschnitt 1.1 definiert wird erweitert bisherige Arbeiten zur Platzierungsplanung (z.B. Sisbot et al., 2010; Zacharias et al., 2008; Keshavdas & Kruijff, 2012; Stulp et al., 2012), indem es die Anforderung umfasst, dass ein Roboter seine eigenen Handlun-

gen platziert und dabei die Platzierung von Handlungen anderer Akteure berücksichtigt. Anders als vorherige Arbeiten zur Platzierungsplanung werden die räumlichen Bedürfnisse von Handlungen betont, die über die bloße Position des Agenten einer Handlung hinausgehen, indem systematisch Agentenregionen und Transaktionsregionen unterschieden werden. Es ist in diesem Ansatz möglich, den Kontext, in dem eine Handlung stattfindet, zu erfassen. Während gängige Ansätze die lokalen Anforderungen an eine Handlung berücksichtigen (beispielsweise die Nähe zu einer Person, mit der ein Roboter interagiert), vernachlässigen sie die Umgebung, in der die Handlung eingebettet ist. Das kann dazu führen, dass die Handlungsmöglichkeiten von Interaktionspartnern oder Dritter versperrt werden.

Ein weiterer Beitrag besteht darin, dass mit dem sozialem Affordanzraum ein weiterer sozialer Raum eingeführt wird, der zusätzlich zu persönlichen Räumen, Aktivitätsräumen und Territorien für eine reibungslose Ko-Existenz von Mensch und Roboter von Bedeutung ist (vgl. Lindner & Eschenbach, 2011, 2013, 2014).

Die vier benannten Typen sozialer Räume werden auf Basis von Affordanzräumen definiert. Eine zentrale Behauptung lautet: Soziale Räume sind Affordanzräume mit besonderen Eigenschaften. Unter dieser Perspektive ist Wissen über Affordanzräume grundlegend für das Wissen über soziale Räume; insbesondere lassen sich soziale Räume über die Raumbedürfnisse von Handlungen erklären und ihre Geometrien ergeben sich aus den Geometrien von Affordanzräumen. Ein praktischer Vorteil dieser Modellierung besteht darin, dass die unterschiedlichen sozialen Räume einheitlich behandelt werden können. So ist es beispielsweise nicht nötig, Geometrien für persönliche Räume, für Aktivitätsräume etc. gesondert zu verwalten. Eine Affordanzbasierte Konzeption sozialer Räume fasst insbesondere auch die Bedeutung von Handlungsmöglichkeiten für das Empfinden von sozialer Nähe, die in den Analysen von Hall (1966) betont wird, in anderen Modellierungen für die soziale Robotik aber übersehen wird.

Schließlich werden in dieser Arbeit acht Prinzipien der Handlungsplatzierung beschrieben (Kapitel 7), die berücksichtigen, dass soziale Räume manchmal dadurch soziale Bedeutung erfahren, dass vermieden werden sollte, sie zu verletzen, aber auch, dass soziale Räume manchmal dadurch sozial bedeutsam sind, dass sie gezielt genutzt werden sollten. Außerdem unterscheiden die acht Prinzipien der Handlungsplatzierung einerseits Verletzungen sozialer Räume, die dadurch entstehen, dass soziale Räume in rücksichtsloser Weise genutzt werden von solchen Verletzungen, die dadurch entstehen, dass soziale Räume in rücksichtsloser Weise (bloß) betreten werden. Die vorgeleg-

te Modellierung von Prinzipien nimmt die Sicht ein, dass durch Prinzipien Entitäten, die sozialen Raum konstituieren (Menschen, Handlungen, Handlungsmöglichkeiten), Gründe für und gegen die Nutzung von Affordanzräumen hervorbringen. Die Prinzipien verknüpfen auf diese Weise räumliche Aspekte (Affordanzraum) mit sozialen Aspekten (Gründe) und erlauben so, dass das soziale Handlungsplatzierungsproblem auf ein qualitatives, bipolares Entscheidungsproblem (Dubois, Fargier & Bonnefon, 2008) reduziert werden kann. Lösungsverfahren für qualitative, bipolare Entscheidungsprobleme bringen Handlungsalternativen unter Berücksichtigung von Gründen (Pros und Cons) in eine Präferenzordnung.

1.5.2. Struktur der Arbeit

Der nachfolgende Arbeit ist wie folgt strukturiert: Kapitel 2 stellt bestehende Modellierungen sozialer Räume in der Robotik dar, die zu einem großen Anteil für spezifische Anwendungsszenarien unter Verwendung unterschiedlicher Modellierungswerkzeuge (wie Euklidische Geometrie, Potentialfunktionen und Klassifikatoren) aufgestellt werden.

Kapitel 3 liefert einen Überblick über Affordanzbegriffe aus der Psychologie und der Robotik. Dabei wird deutlich, dass mit dem Begriff der Affordanz sowohl inter- als auch intradisziplinär unterschiedliche Dinge bezeichnet werden: Manche Autoren bezeichnen mit »Affordanz« die Eigenschaften von Objekten, durch die bestimmte Handlungen an ihnen vollzogen werden können, andere Autoren meinen mit »Affordanz« die Eigenschaften von Akteuren, die sie dazu befähigen, Handlungen an Objekten vorzunehmen, und eine dritte Verwendung des Begriffes »Affordanz« bezeichnet das Verhältnis zwischen Eigenschaften von Objekten und Eigenschaften von Akteuren, das die erfolgreiche Handlungsausführung ermöglicht.

Kapitel 4 konzipiert Affordanzen als Eigenschaften von Objekten, die durch Handlungen realisiert werden können und die relativ zu Handlungstypen mit den Fähigkeiten von Akteuren zusammenpassen. Die Spezifikation von Affordanz und Fähigkeit wird in die Ontologie Dolce-Core (Borgo & Masolo, 2009) eingebettet, die bereits philosophisch-fundierte Spezifikationen grundsätzlicher Kategorien wie »Objekt«, »Ereignis« und »Eigenschaft« umfasst—Konzepte, die in allen Affordanz-Theorien eine Rolle spielen.

Kapitel 5 charakterisiert Affordanzräume als Entitäten, die von Handlungen genutzt werden. Die Konzeption von Affordanzraum basiert auf der Basic-Place-Theory von Donnelly (2005). Die Basic-Place-Theory ist eine Ontologie »relativer Orte«, die in Bezug zu ihren Referenzobjekten topologisch stabil sind. Das Kapitel mündet in der Definition eines Platz-Kandidaten für eine

Handlung.

Auf Basis von Affordanzräumen werden in Kapitel 6 soziale Räume definiert: Ein Aktivitätsraum ist ein Affordanzraum, der von einer Handlung genutzt wird, ein sozialer Affordanzraum ist ein Affordanzraum, dessen Nutzung erwartbar ist, ein Territorium ist ein Affordanzraum, für die Territoriumsbesitzer exklusives Nutzungsrecht behaupten, und ein persönlicher Raum setzt sich gerade aus jenen Affordanzräumen zusammen, die zur Interaktion mit einem Menschen genutzt werden können.

Kapitel 7 stellt acht Prinzipien zur Platzierung von Handlungen in sozialen Räumen auf. Jene Dinge, die soziale Räume produzieren bringen sozio-räumliche Gründe hervor, die dafür oder dagegen sprechen, Handlungen in bestimmte Platz-Kandidaten zu platzieren und von der Platzierung in andere Platz-Kandidaten abzusehen. Das soziale Handlungsplatzierungsproblem wird auf ein bipolares, qualitatives Entscheidungsproblem reduziert. Das ermöglicht, das soziale Handlungsplatzierungsproblem durch ein Verfahren aus der Entscheidungstheorie zu lösen, das (Handlungs-)Alternativen unter Berücksichtigung von Gründen unterschiedlicher Stärke und Polarität (Pros und Cons) in eine Präferenzordnung bringen kann. Auf diese Weise können Platzierungen sozial bewertet werden.

Kapitel 8 evaluiert die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume, indem Studien aus der Literatur zur Mensch-Roboter-Interaktion unter der Perspektive von Affordanzen, Affordanzräumen und sozio-räumlichen Gründen modelliert werden. Die Studien sind jeweils mit der Frage nach der sozialen Angemessenheit von Positionierungen von Robotern relativ zu Menschen befasst. Die Evaluation zeigt, dass die entstandene Konzeption ausdrucksstark genug ist, um realistische Szenarien der Mensch-Roboter-Interaktion formal zu beschreiben, und das in den Szenarien enthaltene soziale Handlungsplatzierungsproblem unter vertretbarem Aufwand zu lösen.

KAPITEL 2

Modellierungen sozialer Räume in der Robotik

Bei der Navigation und Positionierung sozialer Roboter in sozialen Umgebungen (das heißt Umgebungen, die sie sich mit Menschen teilen) handelt es sich um ein junges und aktuelles Forschungsgebiet. Ein verbreiteter Ansatz besteht darin, soziale Räume, wie sie in Abschnitt 1.3 eingeführt wurden, in formale Modelle zu übersetzen, die im Rahmen von Roboter-Architekturen ausgenutzt werden können.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Modellierungen sozialer Räume, wie sie aktuell für navigierende Roboter aufgestellt und realisiert werden. Dabei wird stets das Ziel verfolgt, Roboter in die Fähigkeit zu versetzen, in Umgebungen, die sie sich mit Menschen teilen, sicher und angemessen zu navigieren. Wie der Überblick zeigen wird, sind bisher persönliche Räume, Aktivitätsräume, soziale Affordanzräume und Territorien (vgl. Abschnitt 1.3) von verschiedenen Forschungsgruppen bereits berücksichtigt. Allerdings existiert noch kein umfassendes Modell, das die einzelnen sozialen Räume kohärent erfasst.

Abschnitt 2.1 befasst sich mit Modellierungsalternativen des persönlichen Raumes für die Navigation und Positionierung von Robotern in der Nähe von Menschen. In Abschnitt 2.2 geht es um Modellierungen von Aktivitätsräumen und F-Formationen, die Roboter befähigen, räumliche Formationen herzustellen, um in Interaktion mit Menschen zu treten oder um an bereits bestehenden Formationen teilzunehmen. Eine Modell eines Territoriums, das von einem Roboter genutzt werden kann, um Positionen für Interaktionen zu bewerten findet eine kurze Darstellung in Abschnitt 2.3. Schließlich führt 2.4 in bestehende Modellierungen von Affordanzräumen ein. Affordanzräume werden für Roboter sowohl aus einer funktionalen und aus einer sozialen Perspektive modelliert. Funktionale Modellierungen von Affordanzräumen

repräsentieren den zu erwartenden Handlungserfolg an räumlichen Positionen und dienen dazu, einen Roboter so zu platzieren, dass er seine Handlung (beispielsweise das Greifen eines Objektes oder das Beobachten eines Objektes) erfolgreich ausführen kann. Soziale Affordanzraummodelle hingegen repräsentieren Erwartungen an das Auftreten von Handlungen von Menschen an Positionen und können von Robotern dazu genutzt werden, Menschen gezielt dort aufzusuchen, wo sie erwartet werden können, oder um das Zusammentreffen mit Menschen zu vermeiden.

2.1. Modellierungen persönlicher Räume

Wenn sich Mensch und Roboter im Raum begegnen, dann stellt sich die Frage nach angemessenen räumlichen Abständen, die Roboter zu Menschen einhalten sollten. Diese Frage stellt sich sowohl in Fällen, in denen sich der Roboter zum Menschen positioniert, um mit ihm in eine Interaktion zu treten, als auch in Fällen, in denen der Mensch während der Navigation des Roboters als ein besonderes Hindernis berücksichtigt werden soll, das andere Bedürfnisse besitzt als ein gewöhnliches, unbelebtes Hindernis. Die Darstellung des persönlichen Raumes von Hall (1966) hat in der sozialen Robotik jüngst diverse Lösungsansätze für diese Probleme inspiriert.

Eine Modellierungsvariante beschreibt den persönlichen Raum als geometrische Entität (beispielsweise als ellipsenartige Form), in deren Zentrum der Mensch als Besitzer des persönlichen Raumes positioniert ist (Abschnitt 2.1.1). Eine alternative Modellierungsvariante besteht darin, den persönlichen Raum als Skalarfeld zu modellieren, das Positionen um einen Menschen herum einen Wert zuweist, der als Grad der Angemessenheit der Nähe zum Menschen interpretiert werden kann (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1. Geometrische Modelle

Nakauchi und Simmons (2002) präsentieren ein Verfahren, um einen Roboter in sozial angemessener Weise an einer Schlange teilnehmen zu lassen, die durch Menschen gebildet wird, die an einem Schalter warten. Eine gute Platzierung innerhalb dieser Schlange muss zwei Anforderungen genügen: Der Roboter soll seinem Vordermann nicht unangenehm nahe stehen und doch nahe genug, um als ein Teilnehmer der Schlange erkennbar zu sein. Der Lösungsansatz basiert auf einem Modell des persönlichen Raumes. Die Distanzen, die vom Roboter in der Schlange eingenommen werden, wurden empirisch erhoben.

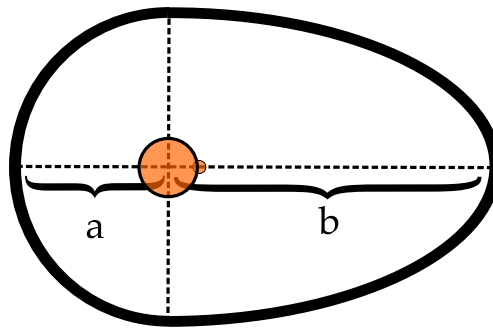


Abbildung 2.1.: Geometrisches Modell eines persönlichen Raumes nach (Lam et al., 2011) und (Tomari et al., 2012). Der persönliche Raum setzt sich aus zwei Halb-Ellipsen zusammen. Eine Halb-Ellipse modelliert den Teil des persönlichen Raumes im Rücken eines Menschen. Die Längen der Halb-Hauptachse und der Halb-Nebenachse betragen jeweils a . Die andere Halb-Ellipse modelliert den Teil des persönlichen Raumes, der sich vor dem Menschen erstreckt. Die Länge der Halb-Hauptachse beträgt b und die Länge der Halb-Nebenachse beträgt a .

In den Studien von Lam, Chou, Chiang und Fu (2011) und Tomari, Kobayashi und Kuno (2012) besteht die Aufgabe des Roboters darin, Menschen geeignet auszuweichen. Die lokale Pfadplanung des Roboters soll also während der Fahrt beachten, möglichst angemessene Abstände zu Menschen einzunehmen, und notfalls den Roboter anzuhalten, wenn ein Ausweichen nicht möglich ist. Zu diesem Zweck modellieren sowohl Lam et al. (2011) als auch Tomari et al. (2012) den persönlichen Raum, indem sie eine einzige Region annehmen, die sich aus einer vorderen und einer hinteren Halb-Ellipse zusammensetzt (vergleiche Abbildung 2.1).

Die hintere Halb-Ellipse modelliert den Teil des persönlichen Raumes, der sich hinter einem Menschen erstreckt, die vordere Halb-Ellipse den Teil, der sich in Blickrichtung des Menschen erstreckt. Die Längen von Halb-Hauptachse und Halb-Nebenachse der hinteren Halb-Ellipse betragen jeweils a . Der Parameter a wird von Lam et al. (2011) auf $a = 1m$ gesetzt und liegt damit in der persönlichen Distanz nach Hall (1966). Tomari et al. (2012) setzen $a = 0.4m$, was nach Hall (1966) innerhalb der vertrauten Distanz liegt.

Die Länge b der Haupt-Halbachse der vorderen Ellipse wird in beiden Ansätzen abhängig von der Situation variiert. Wenn sich der Roboter im Aufmerksamkeitsbereich des Menschen befindet, schrumpft b bei Tomari et al. (2012) auf die Länge von a . Bewegt sich der Roboter außerhalb dieses Aufmerksamkeitsbereichs, so wird die Länge von b auf die doppelte Länge von a erhöht. Der persönliche Raum schrumpft also in dem Moment, in dem der Mensch die Präsenz des Roboters gut zur Kenntnis nehmen kann. Befindet sich der Roboter hingegen außerhalb des Aufmerksamkeitsbereichs, so soll ein größerer Abstand gehalten werden, um durch plötzliches Auftauchen im

Nahbereich des Aufmerksamkeitsbereiches den Menschen nicht zu stören. Von Lam et al. (2011) wird der Parameter b abhängig von der Geschwindigkeit des Menschen eingestellt. Je schneller ein Mensch, desto mehr Abstand soll der Roboter zu diesem Menschen einhalten.

In beiden Ansätzen werden die geometrischen Repräsentationen persönlicher Räume als virtuelle Hindernisse für die lokale Pfadplanung des Roboters verwendet. Zu diesem Zweck werden Schnittpunkte zwischen den Laserstrahlen, die vom Roboter ausgehen, und den Halb-Ellipsen der persönlichen Räume berechnet. So werden die persönlichen Räume virtuell erkannt und von der lokalen Fahrtplanung wie Hindernisse behandelt. In beiden Ansätzen stellt das Modell des persönlichen Raumes lediglich sicher, dass der Roboter während seiner Fahrt zu einem Zielpunkt vermeidet, in den persönlichen Raum eines entgegenkommenden Menschen einzudringen. Aus diesem Grund kommen die persönlichen Räume von Lam et al. (2011) und Tomari et al. (2012) ohne weitere innere Struktur des persönlichen Raumes aus.

Dass auch die Unterscheidung zwischen einer inneren und einer äußeren Region des persönlichen Raumes für die Vermeidung des Eindringens in den persönlichen Raum genutzt werden kann, zeigen Pandey und Alami (2009). Auch in ihrer Arbeit geht es darum, dass ein Roboter während der Fahrt Verletzungen persönlicher Räume entgegenkommender Menschen vermeiden soll. Die Geometrie des persönlichen Raumes besteht in diesem Ansatz aus zwei abgeschnittenen Ellipsen, die sich im Vorderbereich des Menschen erstrecken (siehe Abbildung 2.2).

Der innere Teil des Modells soll der persönlichen Region des Hall-Modells und der äußere Teil seiner sozialen Region entsprechen (Pandey & Alami, 2009). Sobald ein geplanter Pfad des Roboters durch die persönliche Region des persönlichen Raumes führt, wird ein Punkt auf dem Rand der sozialen Region konstruiert, durch den der Pfad umgelenkt wird. Ein globaler Pfad wird also aufgrund persönlicher Räume lokal angepasst. Die Konstruktion des Ausweichpfades geschieht durch die Projektion des Mittelpunktes der Linie zwischen den Eintrittspunkt in die persönliche Region und Austrittspunkt aus der persönlichen Region auf den Rand der sozialen Region. Für weitere Konstellationen von initialer Roboterposition und persönlichem Raum beschreiben Pandey und Alami (2009) unterschiedliche Ausweichmanöver dieser Art, unter denen der Roboter jeweils auswählt.

Der Überblick zeigt, dass geometrische Modellierungen persönlicher Räume hauptsächlich für die lokale Pfadplanung verwendet werden (vergleiche Tabelle 2.1 auf Seite 32). Der persönliche Raum stellt dabei ein besonderes Hindernis dar, das umfahren werden soll. Eine Ausnahme bilden Nakauchi

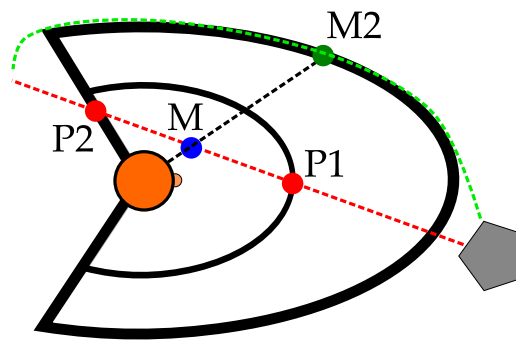


Abbildung 2.2.: Geometrisches Modell des persönlichen Raumes nach Pandey und Alami (2009). Der persönliche Raum besteht aus zwei abgeschnittenen Ellipsen, die sich entlang des Vorderbereichs des Menschen erstrecken. Die innere Ellipse entspricht der persönlichen Region nach Hall (1966) und die äußere Ellipse entspricht der sozialen Region. Führt ein geplanter Pfad (rote Linie) des Roboters (grau) durch die persönliche Region, wird ein Punkt (M2) auf dem Rand der sozialen Region konstruiert, durch den der Pfad umgelenkt wird (grüne Linie). Dazu wird der Mittelpunkt (M) der Linie zwischen Eintrittspunkt (P1) in die persönliche Region und Austrittspunkt (P2) aus der persönlichen Region auf den Rand der sozialen Region projiziert.

und Simmons (2002). Hier wird der persönliche Raum genutzt, um eine angemessene Position zu einem Menschen einzunehmen.

2.1.2. Persönlicher Raum als Potentialfeld

Aus der Physik stammen Modelle räumlichen Verhaltens von Menschen, die aus der Metapher der Kraftfelder abgeleitet sind. Demnach existieren abstoßende und anziehenden Kräfte, die die Abstände zwischen Menschen erklären. Modelle dieser Art werden beispielsweise bei der Simulation von Bewegungen von Menschenmassen verwendet (vgl. Helbing & Molnar, 1995).

In der Robotik findet diese Metapher von Kraftfeldern, in denen sich ein Roboter bewegt, in Form Potentialfeld-basierter lokalen Pfadplanern Anwendung (z.B. Arkin, 1989). Um unter diesem Ansatz Einflüsse persönlicher Räume zu modellieren, wird jeder Position um einen Menschen herum ein Potential zugeordnet. Dieses Potential kann als Grad der Angemessenheit der Position relativ zum Menschen als Träger des persönlichen Raumes interpretiert werden. Die Kraft ergibt sich als Gradient des Potentialfeldes entlang des stärksten Abfalls. Je näher also der Roboter einer Person kommt, desto größer wird die Kraft, die ihn von der Person abstößt.

Potentialfelder für Ausweichverhalten

Eine der ersten Arbeiten zur Modellierung sozialer Räume für die Pfadplanung von Robotern in sozialen Umgebungen ist die Arbeit von Sisbot, Marin-

Urias, Alami und Simeon (2007). Ein Roboter soll auf seinem Weg zum Ziel möglichst wenig in umliegende persönliche Räume eindringen. Dazu erweitern Sisbot et al. (2007) die Kostenfunktion eines globalen A*-Pfadplaners um ein Sicherheitskriterium: Je näher der Roboter einem Menschen kommt, desto größer werden die Sicherheitskosten. Die Kostenfunktion wird als Gauß-Funktion modelliert, deren Mittelwert der Position des Menschen entspricht. Durch den persönlichen Raum erhält jede Koordinate im Suchraum einen Sicherheitskostenwert, der umso höher ist, je näher die Koordinate der Position des Menschen liegt.

Kirby et al. (2009) erweitern den Ansatz von Sisbot und Kollegen für den Fall, dass sich Mensch und Roboter in einem Flur begegnen. Kirby und Kollegen argumentieren, dass in einem solchen Fall die Geschwindigkeit, mit der sich Mensch und Roboter begegnen, die räumliche Ausdehnung des persönlichen Raumes beeinflusst. Für die Modellierung eines solchen dynamischen persönlichen Raumes werden zwei Gauß-Funktionen kombiniert. Im Rücken des Menschen wird eine erste Funktion eingefügt, deren Varianz in x- und y-Richtung gleich ist. Je größer die Geschwindigkeit ist, mit der sich Mensch und Roboter aufeinander zubewegen, desto größer wird die Varianz der Funktion. Vor dem Menschen gibt es eine zweite Gauß-Funktion, deren Varianz in x-Richtung gleich der Varianzen der ersten Funktion ist, und deren Varianz in y-Richtung ein Vielfaches der Varianz der ersten Gauß-Funktion entspricht. Die Modellierung von Kirby und Kollegen findet ihr geometrisches Pendant in den Arbeiten von Lam et al. (2011) und Tomari et al. (2012), in denen der persönliche Raum aus einem Halbkreis im Rücken der Person und einer Geschwindigkeits-abhängigen Ellipse im Vorderbereich der Person modelliert ist (vgl. Abschnitt 2.1.1).

Potentialfelder zur Positionierung

Potentialfelder können auch genutzt werden, um einen Roboter gezielt relativ zu einem Menschen zu positionieren. Wenn ein Roboter mit einem Menschen in Interaktion treten soll, stellt sich die Frage, welche Position relativ zum Menschen vom Roboter eingenommen werden soll. Zur Lösung dieses Problems werden Konstellationen und Summen von Gauß-Funktionen konzipiert, die komplexere Potentialfelder erzeugen (Svenstrup, Tranberg Hansen, Andersen & Bak, 2011; Kessler et al., 2011).

Das Modell von Kessler et al. (2011) besteht aus drei zwei-dimensionalen Gaußfunktionen (vgl. Abbildung 2.3). Die erste Funktion (2.3a) sorgt dafür, dass der Roboter dem Menschen gegenüber ausreichend Abstand hält. Die Varianz ist in x- und y-Richtung gleich und somit gleicht sie den Funktionen,

die beispielsweise schon von Sisbot et al. (2007) verwendet werden. Die zweite Funktion (Abbildung 2.3b) unterscheidet sich von der ersten Funktion in ihrer geringeren Amplitude und der größeren Varianz. Durch Differenzbildung der beiden Funktionen entsteht eine dritte Funktion, die in jede Richtung ein Minimum in einem bestimmten Abstand zum Mittelpunkt aufweist (Abbildung 2.3c). Die Parametrisierung sorgt dafür, dass das Minimum in der sozialen Region des persönlichen Raumes nach Hall (1966) liegt. Schließlich wird eine weitere Funktion (Abbildung 2.3d) verwendet, um den Anfahrtswinkel des Roboters zu modellieren. Diese Funktion hat eine negative Amplitude und damit ein eindeutiges Minimum. Die Funktion wird im Frontalbereich des Menschen (zwischen -45° und $+45^\circ$) hinzuaddiert. Das Resultat zeigt sich in Abbildung 2.3e.

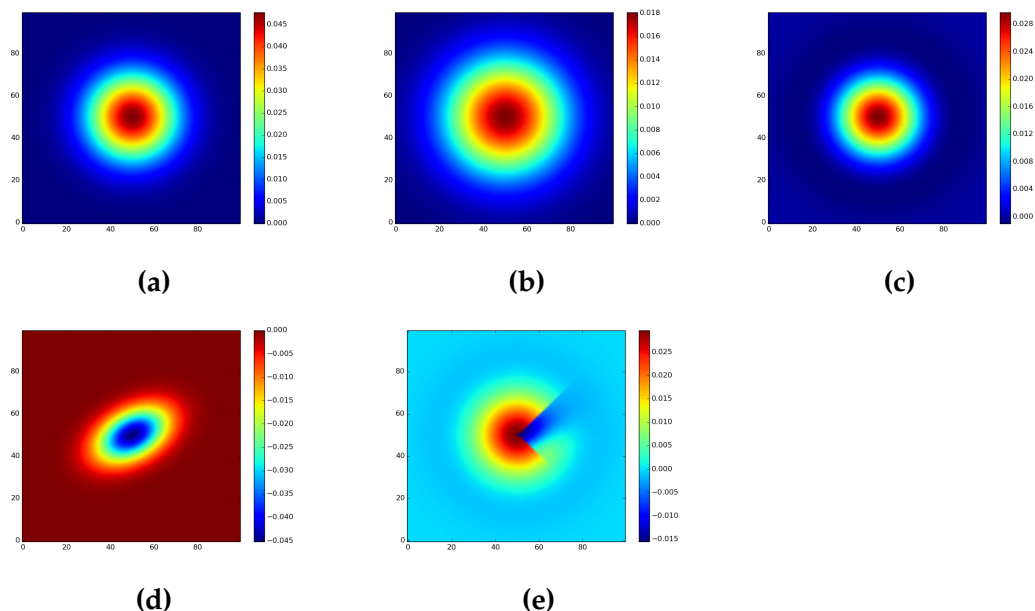


Abbildung 2.3.: Darstellung der Modellierung des persönlichen Raumes nach Kessler et al. (2011). **(a)** Repulsives Potentialfeld, das den Roboter vom Menschen abstößt. **(b)** Inverse eines Attraktorfeldes. Besitzt eine geringere Amplitude und eine größere Varianz als die erste Funktion. **(c)** Die Differenz der Potentialfelder. Es besitzt in einer Entfernung, die der sozialen Distanz bei (Hall, 1966) gleichen soll, ein Potential-Basin (dunkel-blau). **(d)** Ein Potentialfeld, das unabhängig von der Orientierung des Menschen in seinem Drehwinkel verändert werden kann. Es soll die Anfahrtsposition und -richtung des Roboters leiten. **(e)** Das Ergebnis der Addition der Potentialfelder **(d)** und **(c)** (im Bereich -45° bis $+45^\circ$).

Für die Fahrtplanung in dem entstandenen Potentialfeld wird ausgenutzt, dass es ein eindeutiges Minimum gibt, das die Zielposition des Roboters bestimmt. Um dort hinzugelangen, wird von der Zielposition aus ein Pfad zur gegenwärtigen Position des Roboters geplant. Bei der Planung werden die

Potentiale wie Kosten behandelt.¹

Svenstrup et al. (2011) verwenden ein ganz ähnliches Modell des persönlichen Raumes als Vektorfeld für die lokale Navigation. Dafür wird jeweils an der Position des Roboters der Kraftvektor berechnet, der den Richtung und Geschwindigkeit vorgibt und den Roboter letztlich in das einzige Minimum (an der gewünschten Endposition) navigieren lässt.

Die Idee, dass es eine optimale Position gibt, an der der Roboter relativ zu seinem menschlichen Interaktionspartner lokalisiert werden sollte, wird bei Torta et al. (2012) auf eine Menge von Positionen erweitert. Diese Menge heißt »Region of Approach« (RA) und ist definiert als die Menge von Positionen (relativ zu einem Menschen), deren »likability«-Wert über einen Schwellwert liegt ($RA = \{x \in \mathbb{R}^2 : l(x) \geq 0.1\}$). Dabei ist $x = (\rho, \theta)$ eine Position in Polarkoordinatendarstellung; und zwar im Koordinatensystem, dessen Ursprung die Position des Menschen bildet: ρ ist die Distanz zum Menschen und θ die Winkeldistanz zur Blickrichtung des Menschen.

Die »Likability« einer Position entspricht der Präferenz des Menschen dafür, dass der Roboter während der Interaktion an genau dieser Position steht. Zur Bestimmung der »Likability«-Funktion wurden von Torta und Kollegen im Vorfeld empirische Studien durchgeführt, in denen Versuchspersonen bewertet haben, ob sich der Roboter an einer geeigneten Position befindet, um mit ihm in eine verbale Interaktion zu treten. Die »Region of Approach« bildet also ab, wie die Nutzung des Raumes um den Menschen herum von diesem Menschen empfunden wird—und zwar hinsichtlich der Adäquatheit einer Positionierung zum Zwecke einer Interaktionshandlung eines bestimmten Typs durchgeführt von einem bestimmten Roboter.

Auch bei der »Region of Approach« handelt es sich um ein Potentialfeld, das relativ zur Position des Menschen konstruiert wird. Im Unterschied zu den anderen Potentialfeldern hat das Potentialfeld von Torta und Kollegen allerdings kein eindeutiges Minimum und das »Likability«-Feld nimmt Maximalwerte an den adäquatesten Positionen an, nicht an den zu vermeidenden Positionen. Zur Platzierung des Roboters für die Interaktion mit dem Menschen wird jene Position $\vec{x}$ angesteuert, für die $l(\vec{x})/d(\vec{x}, \vec{x}_r)$ maximal ist. Dabei designiert $d(\vec{x}, \vec{x}_r)$ die Distanz zwischen der Position des Roboters $\vec{x}_r$ und der Position $\vec{x}$, und $l(\vec{x})$ repräsentiert die Präferenz für $\vec{x}$. Es wird also eine Abwägung getroffen zwischen der Präferenz einer Position und der Aufwand,

¹Kessler et al. (2011) verwenden einen Fast-Marching Planner. Das Verfahren beruht auf der Idee, dass von einer Quelle aus Wellen ausgesendet werden, die durch Gebiete stark-positiver Potentiale gebremst und durch Gebiete stark-negativer Potentiale beschleunigt werden. Sobald eine Welle den Roboter erreicht, kann er durch Gradientenabstieg zum Ziel gelangen.

der vom Roboter aufgebracht werden müsste, um diese Position zu erreichen.

2.1.3. Bewertung

Es können unterschiedliche Typen von Modellierungen persönlicher Räume identifiziert werden: der persönliche Raum als geometrische Entität mit scharfen Grenzen und der persönliche Raum als Potentialfeld. Die Modellierungsvarianten werden bei der Pfadplanung ausgenutzt, damit Roboter einen ausreichend großen Abstand zu Menschen einhalten. Andererseits zeigt sich auch eine Anwendung bei der Positionierung des Roboters relativ zu einem menschlichen Interaktionspartner. Modelle persönlicher Räume können also auch genutzt werden, um räumliche Formationen herzustellen.

Potentialfelder modellieren die Intuition der größeren Verletzung, je näher der Roboter dem Menschen kommt. Weit verbreitet sind Gauß'sche Potentialfeldmodelle. Allerdings ist eine Gauß-Funktion über das gesamte Gebiet ungleich Null. Theoretisch kann ein Roboter also einen persönlichen Raum nicht nicht verletzen. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen von Lu, Allan und Smart (2013), dass die Wechselwirkung zwischen der Parametrisierung von Gauß-basierten persönlichen Räumen und der Parametrisierung von Pfadplanungsalgorithmen dazu führen kann, dass es zu Kollisionen zwischen Roboter und Mensch kommt. Generell gilt: Je mehr Parameter in die Modellierung eingeführt werden, desto unvorhersehbarer sind die Wechselwirkungen.

Auch bei Svenstrup et al. (2011) und bei Kessler et al. (2011) zeigt sich, dass das Verhalten des Roboters empfindlich von der Passung der Parametrisierungen der einzelnen Funktionen, aus denen der persönliche Raum zusammengesetzt wird, abhängt. Fast gänzlich außerhalb der Diskussion steht die Frage, wie diese Parameter dynamisch gesteuert werden können.²

Die Modellierungen von Nakauchi und Simmons (2002); Svenstrup et al. (2011); Kessler et al. (2011); Torta et al. (2012) zeigen einen Zusammenhang von Handlungsmöglichkeiten, die Menschen Robotern bieten, und die Angemessenheit von Platzierungen im persönlichen Raum auf. Am deutlichsten wird das bei (Torta et al., 2012), wo Positionen relativ zum Menschen danach bewertet werden, wie angenehm ein Mensch es empfindet, wenn der Roboter von dieser Position aus mit ihm verbal interagiert. Daraus entsteht ein spezifischer persönlicher Raum, der den Zusammenhang zwischen Handlungsmöglichkeit und sozialer Angemessenheit explizit herstellt.

²Svenstrup et al. (2011) thematisieren diesen Punkt. Die Parameter werden demnach in Abhängigkeit davon gesetzt, wie interessiert ein Mensch an der Interaktion mit dem Roboter erscheint. Diese Steuerung ist also abermals äußerst spezifisch für einen Handlungskontext gestaltet.

Quelle	Modellierung	Modul	Ziel
Nakauchi und Simmons (2002)	Geometrie	PP	Platzieren
Lam et al. (2011)	Geometrie	LPP	Passieren
Tomari et al. (2012) &	Geometrie	LPP	Passieren
Pandey und Alami (2009)	Geometrie	LPP	Passieren
Sisbot et al. (2007, 2010)	Potentialfeld	GPP, PP	Passieren, Platzieren
Kirby et al. (2009)	Potentialfeld	GPP	Passieren
Svenstrup et al. (2011)	Potentialfeld	LPP	Platzieren
Kessler et al. (2011)	Potentialfeld	PP, LPP	Platzieren
Torta et al. (2012)	Potentialfeld	PP	Platzieren

Tabelle 2.1.: Modellierungen des persönlichen Raumes. Geometrische Modelle finden ihre Anwendung in der Positionierungsplanung (PP) und in der lokalen Pfadplanung (LPP) und hauptsächlich mit dem Ziel, das Eindringen in den persönlichen Raum beim Passieren eines Menschen zu verhindern. Potentialfeld-Modelle werden auch in der globalen Pfadplanung (GPP) verwendet. Anwendungen sind neben dem Passieren von Menschen auch die gezielte Annäherung an einen menschlichen Interaktionspartner.

Trotz der Tatsache, dass der Großteil der diskutierten Arbeiten eine Darstellung des persönlichen Raumes nach Hall (1966) mit seinen vier Regionen enthält, existieren keine geometrischen Modelle, die diese Struktur des persönlichen Raumes tatsächlich vollständig abbilden. Stattdessen werden Modellierungen persönlicher Räume vorgeschlagen, die speziell für bestimmte Anwendungsfälle konstruiert sind. Tabelle 2.1 fasst die Diskussion im Überblick zusammen.

2.2. Modellierungen von Aktivitätsräumen und F-Formationen

Im Vergleich zur Anzahl an Modellierungen und Anwendungen des persönlichen Raumes innerhalb der Robotik, existieren nur wenige Ansätze zur Modellierung von Aktivitätsräumen und F-Formationen (vergleiche Abschnitt 1.3.2) für Roboteranwendungen. Modelle von Aktivitätsräumen können genutzt werden, um Roboter dazu zu befähigen, die Initiative zu ergreifen und sich so zu platzieren, dass ein Aktivitätsraum entstehen kann (z.B. Yamao-

Quelle	Modellierung	Modul	Ziel
Althaus et al. (2004)	Vektorfeld	LPP	Platzieren
Yamaoka et al. (2010)	Skalarfeld	PP	Initiieren
Rios-Martinez et al. (2011)	Potentialfeld	GPP	Vermeiden, Formieren
Gómez et al. (2013)	Potentialfeld	GPP	Vermeiden, Platzieren

Tabelle 2.2.: Modellierungen von Aktivitätsräumen, insbesondere F-Formationen nach (Kendon, 1990). Die Modelle werden vom Roboter genutzt, um an einer F-Formation teilzunehmen, um eine Formation selbst zu initiieren oder um die Störung einer F-Formation zu vermeiden. (PP: Platzierungsplanung, LPP: Lokale Pfadplanung, GPP: Globale Pfadplanung)

ka et al., 2010). Andere Arbeiten befassen sich mit der Dynamik einer F-Formation (z.B. Althaus, Ishiguro, Kanda, Miyashita & Christensen, 2004), also der räumlichen Struktur, die entsteht, wenn Gruppen mit mindestens zwei Teilnehmern, interagieren: Der Roboter soll sich stetig den Veränderungen der räumlichen Positionen der Gruppe anpassen. Eine weitere Gruppe von Ansätzen modelliert F-Formationen dafür, dass sie vom Roboter bei Bedarf umfahren werden oder gezielt angesteuert werden können (Rios-Martinez, Renzaglia & Laugier, 2011; Gómez, Mavridis & Garrido, 2013). Tabelle 2.2 auf Seite 33 liefert einen Überblick.

Von Yamaoka et al. (2010) wird das Szenario betrachtet, dass ein Präsentator einem Zuhörer ein Objekt präsentiert. In der Rolle des Präsentators, die hier vom Roboter übernommen wird, stellt sich das Problem der guten Platzierung, so dass Präsentator, Objekt und Zuhörer adäquat ihre Rollen spielen können. Das Modell von Yamaoka et al. (2010) bewertet Positionen in einer Umgebung und berücksichtigt dabei vier Kriterien: die Nähe des Präsentators zum Zuhörer, die Nähe des Präsentators zum präsentierten Objekt, das Sichtfeld des Zuhörers (der sowohl den Präsentators als auch das Objekt sehen soll) sowie das Sichtfeld des Präsentators.

Althaus et al. (2004) betrachten den Fall, dass ein Roboter passiv an einer bestehenden F-Formation mit beliebig vielen Teilnehmern teilnehmen soll. Das Verfahren basiert auf dem Wissen über die Positionen der Teilnehmer in der F-Formation relativ zur Pose des Roboters: ψ_j ist die Winkelkoordinate der Position des j -ten Teilnehmers relativ zum Roboter, und d_j ist die Distanz des j -ten Teilnehmers zum Roboter. Das Navigationsmodul berechnet zu jedem Zeitpunkt auf Basis von ψ_j und d_j die optimale Translationsge-

schwindigkeit v des Roboters sowie dessen optimale Orientierung ψ . Damit ist jeder möglichen Position des Roboters direkt ein Vektor zugeordnet.

Wie in der Modellierung von Yamaoka et al. (2010) wird auch in der Modellierung bei Althaus et al. (2004) nicht zwischen der Generierung des Verhaltens des Roboters in der F-Formation und der F-Formation selbst unterschieden. Der Roboter besitzt also kein Modell der F-Formation als eigene, durch die Gruppe konstituierte, räumliche Struktur. Er weiß lediglich, wie er sich verhalten soll, das heißt, wie er auf Veränderungen seines Abstandes zu den Gruppenmitgliedern reagieren muss, um seiner Aufgabe, die Formation aufrecht zu erhalten, zu erfüllen. Damit ist es nicht möglich, das Wissen über das richtige Verhalten in F-Formationen auch für andere Aufgaben zu nutzen—zum Beispiel, um eine bestehende F-Formation, an der man nicht teilnehmen möchte, so zu umfahren, dass sie nicht gestört wird.

Explizite Modellierungen von Aktivitätsräumen bzw. F-Formationen werden in (Rios-Martinez et al., 2011; Gómez et al., 2013) vorgestellt. Hauptsächlich um die Störung bestehender F-Formationen zu vermeiden, modellieren Rios-Martinez et al. (2011) F-Formationen als Gauß'sche Potentialfelder, die den Modellierungen persönlicher Räume als Potentialfelder ähneln. Im Unterschied zu den Modellierungen persönlicher Räume, bei denen das Maximum des Potentialfeldes stets an der Position des Menschen als Träger des persönlichen Raumes verortet ist, hat die Gauß-Funktion zur Modellierung einer F-Formation nach Rios-Martinez und Kollegen ihr Maximum im Zentrum des O-Space. Um das Zentrum des O-Space zu finden, konstruieren die Autoren einen Punkt, der sich aus den Positionen der Teilnehmer der F-Formation und der Überschneidung ihrer Blickrichtung ergibt. Die Konstruktion nimmt an, dass bei der F-Formation genau zwei Akteure beteiligt sind. Dadurch, dass das Modell von der Überschneidung der Blickrichtungen der Agenten ausgeht, eignet es sich beispielsweise nicht zur Modellierung von F-Formationen, bei denen sich die Blickrichtungen der Teilnehmer nicht notwendigerweise überschneiden; zum Beispiel, wenn sich Personen nebeneinander aufstellen, um gemeinsam auf ein Objekt zu blicken. Eine Erweiterung des Modells von Rios-Martinez et al. (2011) auf beliebig viele Teilnehmer wird von Gómez et al. (2013) vorgeschlagen.

Das Modell der F-Formation kann durch einen Pfadplaner genutzt werden, der das Durchfahren einer F-Formation in Form von Risikokosten berücksichtigt. So soll vermieden werden, dass ein Pfad einen O-Space durchkreuzt. Als weitere Anwendung kann das Modell genutzt werden, um einen Roboter an einer F-Formation teilnehmen zu lassen.

2.3. Modellierungen von Territorien

Das Konzept des Territoriums ist in der sozialen Robotik noch kaum berücksichtigt. Ausnahmen bilden die Modellierungen von Territorien durch Lindner und Eschenbach (2011) (vgl. Abschnitt 2.5) und von Satake et al. (2014). Satake und Kollegen schlagen ein Verfahren vor, durch das Positionen vor einem Shop danach bewertet werden können, ob es als Territoriumsverletzung gelte, wenn sich ein Roboter an diese Position stellte, um mit einem Passanten ins Gespräch zu kommen.

Positionen vor dem Shop sind durch drei Eigenschaften charakterisiert: durch ihre Distanz zur Fassade des Shops (»distance to shop«), dadurch, ob sie den Eingangsbereich des Shops versperren (»entrance obstructions«) und dadurch, ob sie Regale des Shops versperren (»shelf obstruction«).

Anhand dieser drei Eigenschaften wird mit Hilfe eines Klassifikators ein Modell des Territoriums vor dem Shop gelernt, das Positionen als »Territorium verletzend« oder »nicht Territorium verletzend« klassifiziert.

Das Modell eines Territoriums nach Satake et al. (2014) ist damit äußerst spezifisch für den Fall von Shops als Territorien. Die Eigenschaften, nach denen Positionen bewertet werden, sind unpassend für andere Terrorientypen, wie zum Beispiel die belegte Liege am Pool oder der reservierte Tisch im Restaurant. Vollständig unbeachtet bleibt auch der Innenbereich des Shops als eigentlichen Kern des Territoriums. Es dreht sich hier einzig um die Angemessenheit von Raumnutzung vor dem Shop, mit besonderer Berücksichtigung der Zugänglichkeit von Regalen und Eingangsbereichen.

Dabei wird allerdings der Bezug zwischen Handlungsmöglichkeiten und Territorien an einem spezifischen Beispiel gut sichtbar: Die beiden Eigenschaften »entrance obstructions« und »shelf obstructions«, nach denen Positionen vor dem Shop klassifiziert werden, verweisen direkt darauf, dass Störungen von Handlungsmöglichkeiten (also das Blockieren von Affordanzen) zu vermeiden sind.

Durch die Nutzung eines einfachen Klassifizierers in Satake et al. (2014) bleibt der Grund verborgen, weswegen die Handlung an einer Position als territorialverletzend gilt oder nicht. Die Gründe dafür hängen in unbestimmter Weise mit der Distanz der Position zur Fassade, mit dem Abstand zum Eingang und dem Abstand zu Regalen zusammen, aber welche Eigenschaften für eine bestimmte Position ausschlaggebend sind, kann nicht explizit werden. Insbesondere sind die Gründe für die Bewertungen der Positionen, etwa im Sinne von »Eingangsbereiche sollen freigehalten werden« und »Regale sollen zugänglich sein«, nur implizit über die Auswahl der Eigenschaften

der Positionen abgebildet. Damit kann das Modell nicht genutzt werden, um Platzierungen im Sinne der Verhaltensregeln zu erklären (z.B. »Ich platziere mich hierher, weil ich hier den Eingangsbereich nicht versperre«).

Das Modell von Satake und Kollegen weist Gemeinsamkeiten mit dem Modell des persönlichen Raumes nach Torta et al. (2012) auf. In beiden Fällen werden Positionen relativ zu einem Objekt (einem Laden bei Satake et al. (2014), und einem Menschen bei Torta et al. (2012)) klassifiziert. Während Satake et al. (2014) die Positionen als »Territoriumsverletzung« oder »nicht Territoriumsverletzung« klassifizieren, bewerten Torta et al. (2012) die Positionen nach dem Grad, wie sehr der Mensch, mit dem der Roboter interagieren soll, die Interaktion von dieser Position aus als angenehm empfindet.

2.4. Modellierungen von Affordanzräumen

Affordanzräume spielen überall dort eine Rolle, wo evaluiert werden soll, an welchen Orten eine Handlung von einem Akteur erfolgreich ausgeführt werden kann. Zunächst handelt es sich um ein rein funktionales Kriterium, das ein Akteur für sich berücksichtigen kann. Seine soziale Dimension erhält der Affordanzraum, insoweit er die Handlungsmöglichkeiten anderer Akteure repräsentiert. Abschnitt 2.4.1 präsentiert existierende Affordanzraummodelle, die unter der funktionalen Perspektive erstellt werden, und Abschnitt 2.4.1 stellt Affordanzraummodelle vor, die für Anwendungen in der sozialen Robotik geeignet sind.

2.4.1. Funktionale Perspektive auf Affordanzräume

In dem Szenario von Stulp et al. (2012) wird eine Tasse auf einem Tisch betrachtet, die von einem mobilen Roboter gegriffen und angehoben werden soll. Die Aufgabe des Roboters besteht dafür zunächst darin, eine geeignete Position anzufahren, von der aus die Handlung des Greifens und Anhebens erfolgreich ausgeführt werden kann. Bei Keshavdas und Kruijff (2012) hingegen ist ein Szenario verunfallter Autos gegeben. Der Roboter ist mit einer Kamera ausgerüstet und die Aufgabe des Roboters besteht darin, sich relativ zu einem Unfallauto derart zu positionieren, dass die Kamera möglichst viel vom Innenraum des Fahrzeuges einsehen kann.

Zur Erstellung der »Action-Related Places« werden einzelne Positionen relativ zur Tasse als Trainingsdaten genutzt. Die Positionen sind als »erfolgreich« oder »unerfolgreich« gekennzeichnet, je nachdem, ob die Simulation der Greif- und Hebehandlung von der Position aus gelang oder misslang. »Action-Related Places« kodieren die Verteilung der Erfolgsaussicht ei-

ner Greif-/Hebebehandlung an einer Position relativ zu Position und Orientierung eines Objektes, das manipuliert werden soll. »Functional Maps« bei Keshavdas und Kruijff (2012) kodieren, von welchen Posen aus ein Roboter relativ zu einem bestimmten Fahrzeug mindestens ein bestimmtes Mindest-Volumen des Fahrzeuginnenraums einsehen kann. Beide Modellierungsansätze kodieren Wissen über die Erfolgsaussichten einer Handlung für spezifische Roboterplattformen abhängig von Positionen, die ein Roboter potentiell einnehmen kann. Dabei handelt es sich um Positionen relativ zu einem Objekt, an dem die Handlung vorgenommen werden soll.

Vahrenkamp, Asfour und Dillmann (2013) und Zacharias et al. (2008) verfolgen einen komplementären Ansatz. Der Ansatz basiert auf einer Repräsentation der Fähigkeiten eines mobilen Manipulators. Im Arbeitsraum des Roboters werden Positionen danach bewertet, wie gut sie vom Manipulator angesteuert werden können. Diese Form des Wissens über die Fähigkeiten kann ebenfalls genutzt werden, um den Roboter relativ zu einem Objekt zu platzieren, das manipuliert werden soll. Dazu werden gut erreichbare Positionen im Arbeitsraum des Roboters mit der Position des Objektes aligniert. Aus der Alignierung kann die Pose berechnet werden, die der Roboter einnehmen muss, um das Objekt erfolgreich zu manipulieren.

2.4.2. Soziale Perspektive auf Affordanzräume

Eine soziale Sicht nehmen die Arbeiten von Kanda, Glas, Shiomi und Hagita (2009), Tipaldi und Arras (2011a, 2011b) und Pandey und Alami (2013) ein.

Kanda et al. (2009) stellen eine »Use of Space Map« vor. Die »Use of Space Map« repräsentiert die Umgebung des Roboters als Gitterkarte. Mit jeder Zelle in diesem Gitter sind mehrere Histogramme $H_x(i, t)$ assoziiert, die die Häufigkeit des Auftretens einer Handlung vom Typ x in Zelle i während des Zeitintervalls t repräsentieren. Diese Repräsentation kann als Vorhersage von Handlungen in bestimmten Gebieten zu bestimmten Zeitpunkten genutzt werden. Soll der Roboter also mit Akteuren in Kontakt treten, die Handlungen vom Typ x nachgehen, hält sich der Roboter in der Nähe von Zellen auf, in denen gerade viele x -Handlungen zu erwarten sind. Soll der Roboter hingegen x -Handlungen möglichst nicht stören, so behält er Abstand zu Zellen, in denen viele x -Handlungen zu erwarten sind.

Mit dem Ziel, einen sozialen Roboter mit der Fähigkeit auszustatten, Menschen gezielt aufzusuchen (Tipaldi & Arras, 2011a) oder die Begegnung mit Menschen gezielt zu vermeiden (Tipaldi & Arras, 2011b) führen Tipaldi und Arras eine »Affordance Space Map« ein. Wie die »Use of Space Map« von Kanda et al. (2009) enthält auch die »Affordance Space Map« eine Menge dis-

kreter Gebiete. Statt der Häufigkeit des Auftretens von Handlungen in diesen Gebieten ist mit jedem dieser Gebiete die Rate des Auftretens von Handlungen in diesem Gebiet assoziiert. Mithilfe der »Affordance Space Map« kann die Wartezeit ermittelt werden, die ein Roboter in einem bestimmten Gebiet verharren muss, um Zeuge einer bestimmten Handlung zu werden.

Pandey und Alami (2013) stellen eine Datenstruktur namens »Affordance Graph« vor. Der Affordanz-Graph repräsentiert die Handlungsmöglichkeiten, die durch die vorhandenen Objekte und Agenten ausführbar sind. Dazu enthält der Affordanz-Graph für jede Aufgabe (z.B. für die Aufgabe, einem Agenten ein Objekt anzureichen) einen Teil-Graphen, den »Taskability Graph«. Dieser Teil-Graph enthält gerichtete Kanten zwischen Agenten. Eine Kante (A, B) im »Taskability Graph« zur Aufgabe »to give« repräsentiert, dass Agent A dem Agenten B etwas geben kann. Die Kante ist mit weiteren Informationen zu dieser Handlungsmöglichkeit annotiert: Den Positionen, an denen die Handlung ausgeführt werden könnte, und den Fähigkeiten, die die Agenten zur Handlungsausführung aufbringen müssen (z.B. die Fähigkeit zu sehen (»to see«) und die Fähigkeit, den Arm auszustrecken (»to reach«), werden von beiden Teilnehmern einer Handlung des Gebens verlangt). In einem zweiten Teil-Graphen des »Affordance Graph«, dem »Manipulability Graph«, repräsentieren gerichtete Kanten in ganz analoger Weise wie beim »Taskability Graph«, welche Handlungen Agenten an Objekten ausüben können.

Das Wissen im »Affordance Graph« kann dazu genutzt werden, Objekte so zu platzieren, dass sie von einem anderen Agenten gesehen oder aufgenommen werden können, oder um kooperative Pläne zu erstellen, in denen die Fähigkeiten der einzelnen Agenten berücksichtigt werden (Pandey & Alami, 2013).

2.4.3. Bewertung

Die diskutierten Arbeiten zeigen, dass Affordanz und Raum in der Robotik aus einer funktionalen und einer sozialen Perspektive betrachtet wird. Unter der funktionalen Perspektive liegt der Fokus auf dem Roboter als Akteur, der mit bestimmten Fähigkeiten ausgestattet ist. Diese Fähigkeiten bestimmen darüber, von welchen Positionen aus bestimmte Handlungen an bestimmten Objekten überhaupt möglich sind (Keshavdas & Kruijff, 2012; Stulp et al., 2012).

Unter der sozialen Perspektive werden die Handlungsmöglichkeiten anderer Agenten berücksichtigt. Einerseits werden Erwartungen bezüglich der Nutzung von Räumen durch Menschen ausgenutzt, um Roboter derart zu Positionieren, dass sie den Handlungen von Menschen nicht im Wege stehen

(Tipaldi & Arras, 2011b), oder aber darin, bestimmten Menschen gezielt zu begegnen (Kanda et al., 2009; Tipaldi & Arras, 2011a).

Ebenfalls unter der sozialen Perspektive fällt die Arbeit von Pandey und Alami (2013). Der Affordanz-Graph von Pandey und Alami repräsentiert die Handlungsmöglichkeiten zwischen Individuen an Orten. Dabei werden die Voraussetzungen in Form von individuellen Fähigkeiten der Agenten dazu ausgenutzt, kooperative Pläne zu generieren.

Tabelle 2.3 fasst sowohl die Affordanzraum-Modelle zusammen, die funktional orientiert sind, als auch jene, die sozial orientiert sind.

Quelle	Modellierung	Modul	Ziel
Keshavdas und Kruijff (2012)	Posen + Erfolg	PP	Platzieren
Stulp et al. (2012)	Positionen + Erfolg	PP	Platzieren
Vahrenkamp et al. (2013)	Posen + Erfolg	PP	Platzieren
Kanda et al. (2009)	Zellen + Häufigkeiten	PP	Interaktion, Vermeidung
Tipaldi und Arras (2011a, 2011b)	Zellen + Raten	GPP	Interaktion, Vermeidung
Pandey und Alami (2013)	Affordanz-Graph	AP	Interaktion, Kooperation

Tabelle 2.3.: Modellierungen, die unter das Konzept des Affordanzraumes fallen. Affordanzraummodelle werden für die Optimierung des Handlungserfolgs durch eine möglichst erfolgsversprechende Platzierung des Roboters ausgenutzt (Platzierungsplanung, PP). Außerdem können Affordanzraummodelle genutzt werden, um Begegnungen mit anderen Akteuren gezielt herbeizuführen oder zu vermeiden (Globale Pfadplanung, GPP) oder um kooperative Pläne zu generieren (Aktionsplanung, AP).

2.5. Qualitative Modellierungen sozialer Räume

Die verbreiteten Ansätze zur Modellierung sozialer Räume in der Robotik sind quantitativ-numerischer Natur. Sowohl die sozialen Räume selbst, als auch das Verhalten von Robotern in sozialen Räumen, wird weitestgehend numerisch modelliert, das heißt, durch Kostenfunktionen, durch Potentialfelder, durch parametrisierte geometrische Modellierungen etc.

Diesen numerischen Modellen stehen natürlichsprachliche Verhaltensspezifikationen gegenüber, die keine numerischen Angaben enthalten. Solche Spe-

zifikationen könnten etwa lauten »der Roboter soll sich in die persönliche Region des persönlichen Raumes stellen« oder »der Roboter soll nicht durch den Aktivitätsraum fahren« oder »der Roboter soll das Territorium nicht betreten«. Eine abstrakte Verhaltensspezifikation der Art »der Roboter soll sich in die persönliche Region des persönlichen Raumes stellen« birgt gegenüber einer numerischen Variante »Roboter, halte genau 1 m Abstand« den Vorteil, dass die erste Spezifikation auch auf Szenarien übertragbar ist, in denen sich die Größe der persönlichen Region ändert.³ Um rücksichtsvolles Raumverhalten zu spezifizieren, sind Geometrien und Distanzen nicht unbedingt nötig.

Schließlich führt die Abwesenheit abstrakterer Repräsentationen dazu, dass das Wissen über soziale Räume höheren, wissensverarbeitenden Prozessen nicht zur Verfügung steht. Das führt beispielsweise dazu, dass Roboter unter rein numerischen Ansätzen ihr räumliches Verhalten nicht gut begründen können. Einem Potentialfeld folgend kann der Roboter bestenfalls sein Handeln einem Menschen gegenüber wenig informativ damit begründen, dass er dem geringsten Widerstand folgt oder dem Optimum entgegenfährt. Wenn andererseits die Prinzipien und Gründe, nach denen ein Roboter handelt, symbolisch formuliert sind, können diese auch kommuniziert werden.

Eine Möglichkeit, räumliche Sachverhalten zu beschreiben, ohne dafür auf metrische Konzepte wie Distanzen oder auf Geometrie zurückzugreifen, besteht darin, Relationen zu nutzen, die in mereotopologischen Theorien verwendet werden. Vertreter solcher Theorien sind beispielsweise der Region-Connection-Calculus (Randell, Cui & Cohn, 1992) oder die Basic-Place-Theory (Donnelly, 2005). Solche Theorien enthalten Relationen, die Beziehungen zwischen Regionen beschreiben. Eine Sammlung solcher Relationen ist:

$P(r, r')$	r ist Teil von r'
$TPP(r, r')$	r ist ein tangentialer echter Teil von r'
$NTPP(r, r')$	r ist ein nicht-tangentialer echter Teil von r'
$EC(r, r')$	r ist extern verbunden mit r'
$O(r, r')$	r überlappt r'
$SR(r, r')$	r umgibt r'

Diese Relationen können genutzt werden, um soziale Räume zu beschreiben: Soziale Räume bestehen aus Regionen, die untereinander in räumlichen

³Zwar sind nach Hall (1966) die Regionen des persönlichen Raumes mit numerischen Distanzen verknüpft, aber Hall schreibt auch, dass diese Distanzen variieren können; beispielsweise ließen Umweltfaktoren wie Lärm oder Dunkelheit Menschen normalerweise näher zusammenrücken (Hall, 1966, S. 116).

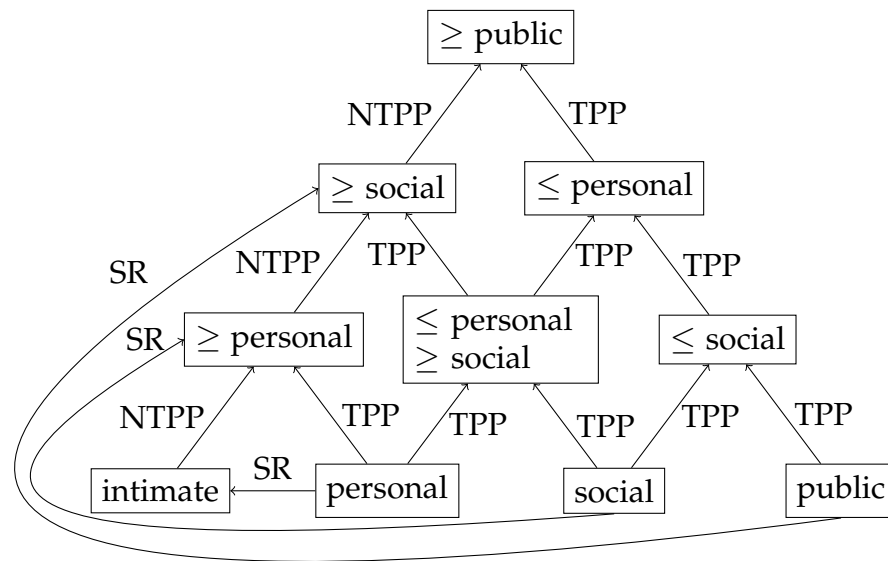


Abbildung 2.4.: Die Topologie des persönlichen Raumes nach Lindner und Eschenbach (2011).

Beziehungen stehen (Lindner & Eschenbach, 2011). Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch eine Beschreibung des persönlichen Raumes. Der persönliche Raum besteht aus vier Basis-Regionen, der vertrauten Region (»intimate«), der persönlichen Region (»personal«), der sozialen Region (»social«) und der öffentlichen Region (»public«). (Vergleiche dazu auch Abbildung 1.4 auf Seite 12.) Die vertraute Region *intimate* wird von der persönlichen Region *personal* umschlossen. Die vertraute Region und die persönliche Region bilden zusammen die Region $\geq \text{personal}$, so dass die vertraute Region ein nicht-tangentialer Teil von $\geq \text{personal}$ ist (d.h., *intimate* berührt nicht den Rand von $\geq \text{personal}$) und die persönliche Region ein tangentialer Teil von $\geq \text{personal}$ ist (d.h., *personal* berührt den Rand von $\geq \text{personal}$). Entsprechend wird die Struktur der Regionen des persönlichen Raumes mittels Regionen und mereotopologischen Beziehungen zwischen Regionen formal beschrieben. Neben der mereotopologischen Struktur des persönlichen Raumes beschreiben Lindner und Eschenbach (2011) unter anderem auch das Territorium, den Aktivitätsraum und den Affordanzraum.

Nützlich sind solche symbolischen Beschreibungen, um sie direkt in Verhaltensspezifikationsprachen wie beispielsweise die Programmiersprache GOLOG (Levesque et al., 1997), in Regelsystemen oder in Aktionsplanern wie zum Beispiel FF (Hoffmann & Nebel, 2001) zu nutzen. Eine Errungenschaft der Informatik besteht gerade darin, dass sie Formalismen erfunden hat, die Menschen ermöglichen, das Verhalten von Maschinen in abstrakter Form zu

beschreiben, insbesondere durch höhere Programmiersprachen.

Im Listing 2.1 ist ein simpler Pfadplanungsalgorithmus in der Programmiersprache GOLOG aufgezeigt (vgl. Lindner & Eschenbach, 2011). Der Algorithmus wird mit einer Zielregion r aufgerufen. Falls die Zielregion erreicht wurde, wird dem Plan eine Aktion eingefügt, die dafür sorgt, dass der Roboter die Parkerlaubnis erhält, also die Erlaubnis dafür, in der Zielregion auch wirklich zu verbleiben. Falls die Zielregion noch nicht erreicht wurde, wird von der Region r' , in der sich der Roboter derzeit befindet, eine benachbarte Region r'' ausgewählt. Eine benachbarte Region ist eine Region, die mit r' extern verbunden ist (EC) und sozial-homogen ist (SH). EC steht für die mereotopologische Relation »externally connected« und sozial-homogen bedeutet hier, dass jeder Teil der Region durch dieselben sozialen Räume überdeckt ist (vgl. Lindner & Eschenbach, 2011). Nach der Auswahl von r'' wird dafür gesorgt, dass der Roboter die Erlaubnis erhält, r'' zu betreten, und die Aktion des Betretens von r'' wird dem Plan hinzugefügt. Schließlich wird der Algorithmus rekursiv aufgerufen.

```

proc( simpleSociallyAwarePathPlanner( r ) ,
  if( CurrentRegion( r ) ,
    acquirePermissionAndPerformAction( park , r ) ,
    /* else */
    pi( r' , ?( CurrentRegion( r' ) )
      : pi( r'' , ?( EC( r' , r'' ) & SH( r'' ) )
        : acquirePermissionAndPerformAction( enter , r'' )
        : simpleSociallyAwarePathPlanner( r )
      ) ) ) )

proc( acquirePermissionAndPerformAction( actionType , r ) ,
  if( overlappingSocialRegionImpermissible( actionType , r ) ,
    pi( r' , ?( SocialSpaceRegion( r' ) & O( r , r' )
      & impermissible( actionType , r' ) )
      : selectAndPerformSignal( actionType , r' )
      : acquirePermissionAndPerformAction( actionType , r )
    ) ,
    /* else */
    perform( actionType , r )
  ) )

```

Listing 2.1: Simple Golog Planner

Abbildung 2.5 zeigt exemplarisch eine Domäne, in der der Planer angewendet wurde. Ein Museumsbesucher *visitor* steht vor einem Gemälde *painting*. Der Museumsbesucher hat einen persönlichen Raum (durch Ellipsen dargestellt) und einen Affordanzraum (rechteckig im Vordergrund von *visitor*),

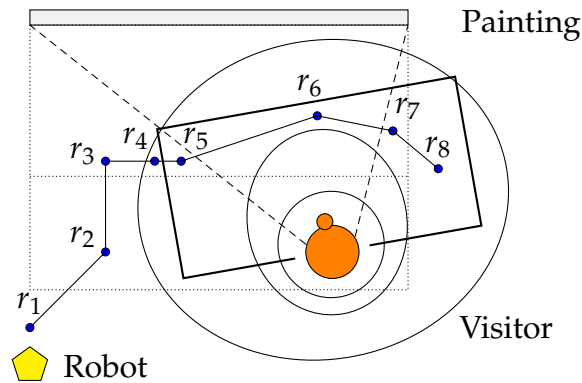


Abbildung 2.5.: Eine Aktionssequenz, die soziale Räume berücksichtigt:
 $[\text{enter}(r_2); \text{enter}(r_3); \dots; \text{signal}(\text{enter}(r_6)); \text{enter}(r_6); \text{enter}(r_7); \text{enter}(r_8)]$

der genutzt werden kann, um mit *visitor* in Kontakt zu treten. Das Gemälde hat ebenfalls einen Affordanzraum, der genutzt werden kann, um das Gemälde zu betrachten. Schließlich erzeugt der Algorithmus unter 2.1 eine Aktionssequenz: Erst betritt der Roboter nacheinander die Regionen r_2 bis r_5 . Dann fragt er den Museumsbesucher, ob es in Ordnung sei, dass er seine Handlung stört. Daraufhin bewegt sich der Roboter über r_6 und r_7 in die Zielregion r_8 . Dort initiiert er die Interaktion mit dem Museumsbesucher.

Die Arbeit von Dylla, Kreutzmann und Wolter (2014) ist ein weiteres Beispiel für eine Anwendung mereotopologischer Modelle sozialer Räume bei der Pfadplanung. Auch hier werden Modelle dieser Art genutzt, um Verhalten eines Roboters bezüglich des persönlichen Raumes eines Menschen zu spezifizieren. Während der Pfadplanung kann geprüft werden, ob die symbolisch beschriebenen Verhaltensspezifikationen stets erfüllt sind.

Unberücksichtigt ist bei den Arbeiten, die unter diesem Abschnitt dargestellt wurden, ob es ein gemeinsames Fundament gibt, auf dem sich unterschiedliche Typen sozialer Räume kohärent beschreiben lassen. Zwar werden in (Lindner & Eschenbach, 2011) verschiedene Typen sozialer Räume bereits mit demselben Mitteln der Mereotopologie beschrieben, aber doch stehen die Modelle weitestgehend unverbunden nebeneinander. Hinsichtlich der Anwendungsfrage bleibt ungeklärt, wie der Roboter eine gute Zielregion identifiziert, wie die Geometrien der Regionen bestimmt werden können, wie soziale Räume mit Handlungstypen zusammenhängen, und wie sich der Roboter zwischen alternativen Handlungsoptionen entscheiden kann.

Auch der Ansatz von Dylla et al. (2014) berücksichtigt nicht, dass ein sozialer Roboter mit Dilemma-Situationen umgehen können muss, beispielsweise wenn er dazu getrieben ist, die eine oder andere soziale Norm des räumlichen Verhaltens zu verletzen.

2.6. Zwischenfazit

Der Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zur Modellierung sozialer Räume für die Roboternavigation zeigt ein sehr diverses Bild. Das hängt nicht zuletzt damit zusammen, dass zumeist äußerst spezifische Anwendungsfälle Gegenstand der Modellierung sind, wie beispielsweise das Positionieren vor einem Shop (Satake et al., 2014), das Greifen einer Tasse (Stulp et al., 2012), das Einsehen von Innenräumen verunglückter Fahrzeuge (Keshavdas & Kruijff, 2012), das Auffinden einer Person in einem Gebäude (Tipaldi & Arras, 2011a), die verbale Informationsvermittlung durch einen Nao-Roboter an einen Menschen (Torta et al., 2012) etc.

Fragen der Generalisierbarkeit der Modellierungen werden kaum thematisiert. So existiert beispielsweise bisher kein Modell des persönlichen Raumes, das für die Platzierung verschiedener Handlungen und zur Vermeidung von Verletzungen gleichermaßen genutzt werden könnte. Obwohl das Mehr-Zonen-Modell von Hall (1966) fast überall dargestellt wird, findet es sich mit Ausnahme von (Lindner & Eschenbach, 2011) stets nur partiell modelliert.

Die Modellierung von Aktivitätsräumen beschränkt sich weitestgehend auf den Fall von Gesprächssituationen. Wie Handlungen im Allgemeinen Raum einnehmen und welche innere, räumliche Struktur sie erzeugen, ist kaum behandelt. Die Modellierung zur Verhinderung von Territorialverletzungen nach Satake et al. (2014) ist derart speziell, dass sie über das Konzept des Territoriums an sich nur wenig verrät.

Der (soziale) Affordanzraum schließlich wird auf Ebene von Positionen und Posen betrachtet ohne zu berücksichtigen, dass die affordierten Handlungen Raumbedarf haben, der über reine Positionen hinausgeht (unsere Vorarbeiten in (Lindner & Eschenbach, 2011, 2013, 2014) bilden die Ausnahme). Beispielsweise muss für den Erfolg einer Greifhandlung auch der Raum zwischen der Position des Akteurs und dem zu greifenden Objekt frei sein. Dieser Raumbedarf ist insbesondere auch abhängig von den Fähigkeiten der potentiellen Agenten der Handlungen. Ein großer Akteur mit langem Manipulator beispielsweise hat einen anderen Raumbedarf als ein kleiner Akteur mit einem kurzen Manipulator.

2.6.1. Missing Link: Grundlegendes Prinzip der Modellierung sozialer Räume

Trotz der Spezifität von Modellierungen gibt es aber auch offenkundige Gemeinsamkeiten. Ein immer wiederkehrendes Schema ist, dass Platzierungen relativ zu einem Menschen oder einem Objekt bewertet werden, der oder das

dem Roboter bestimmte Handlungen bereitstellt.

Torta et al. (2012) stellen ein Beispiel dafür dar, dass für die Platzierung eines Roboters im persönlichen Raum eines Menschen Positionen relativ zu dem menschlichen Interaktionspartner hinsichtlich des Kriteriums bewertet werden, wie gut sie sich als Position für die Handlungsausführung des Roboters eignen. Das Schema findet sich ebenfalls bei den Aktivitätsräumen wieder, in denen Positionen relativ zu den Positionen der Teilnehmer bewertet sind. Bei Althaus et al. (2004) beispielsweise wird in Abhängigkeit der Konstellation der Teilnehmer jeder möglichen Position des Roboters ein Vektor zugeordnet, der beschreibt, ob der Roboter richtig steht oder seine Position verändern sollte (und auf welche Weise). Auch das Modell des Territoriums eines Shops von Satake et al. (2014) folgt dem Schema, indem Positionen hinsichtlich ihres Abstands zum Shop und zu den Regalen vor dem Shop als territoriumsverletzend oder nicht territoriumsverletzend klassifiziert werden. Schließlich findet sich das Schema bei den funktionalen Affordanzraummodellen wieder: Relativ zu einer zu greifenden Tasse (Stulp et al., 2012) oder relativ zu einem Auto (Keshavdas & Kruijff, 2012) werden Positionen danach bewertet, ob eine Handlungsausführung erfolgsversprechend ist.

In jedem der erwähnten Fälle gibt es Menschen oder unbelebte Objekte, die dem Roboter oder anderen Akteuren Handlungsmöglichkeiten geben: ein Mensch ermöglicht anderen Akteuren, mit ihm zu interagieren, aber diese Interaktionen sind nicht von jeder möglichen Position aus gleichermaßen adäquat (Torta et al., 2012). Bereits interagierende Menschen ermöglichen anderen Akteuren, an der Interaktion teilzunehmen (Althaus et al., 2004), und ein Ausstellungsobjekt eröffnet einem Akteur, es einem Anderen zu präsentieren (Yamaoka et al., 2010). Aber nicht jede Position zur Teilnahme oder zur Objektpräsentation ist gleichermaßen sozial rücksichtsvoll. Ein Shop ermöglicht dem Roboter, sich mit Kunden zu unterhalten, und der Eingangsbereich des Shops ermöglicht Kunden, den Shop zu betreten, so wie die Regale vor dem Shop den Kunden ermöglichen, sich Produkte anzusehen. Nicht jede Position, an der sich der Roboter mit Kunden unterhalten kann, ist gleichermaßen geeignet, denn es ist rücksichtslos, sich vor dem Eingang zu stellen, den andere Kunden nutzen möchten, oder sich vor Regale zu stellen, aus denen sich andere Kunden bedienen möchten.

Aus dieser Beobachtung begründet sich der Ansatz, der in der vorliegenden Arbeit entwickelt werden soll: Funktionale Affordanzräume sind das Fundament aller sozialen Räume. Funktionale Affordanzräume strukturieren realen Raum, in dem bestimmte Handlungen möglich sind. Nur wenn Handlungen in diesem funktionalen Sinn möglich sind, dann können soziale Kriterien an

sie geknüpft werden. Nur wenn Handlungen funktional möglich sind, dann können sie auch erwartet werden. Nur dann, wenn Handlungen im funktionalen Sinne möglich sind, können Territorien verletzt werden. Soweit der persönliche Raum als eine Menge von Platzierungen angesehen wird, die zur Interaktion mit einem Menschen genutzt werden können (und das legen die Darstellungen von Hall (1966) nahe), setzt der persönliche Raum ebenfalls voraus, dass Handlungsmöglichkeiten im funktionalen Sinne bestehen. Und schließlich setzt ein Aktivitätsraum funktionalen Affordanzraum voraus: Wo Aktivitätsraum ist, da ist auch eine Handlung, und wo eine Handlung ist, da ist auch die funktionale Handlungsmöglichkeit.

2.6.2. Entscheiden und Begründen

Bei sozialen Räumen gesellt sich neben die räumliche Komponente auch immer eine normative Komponente. Soziale Räume in Verbindung zu Konventionen, Regeln, Normen des räumlichen Verhaltens—sie bestimmen mit, wie ein Akteur handeln sollte und wie das räumliche Verhalten eines Akteurs von Anderen bewertet wird. Wenn beispielsweise gilt, dass Mitglieder eines bestimmten Kulturkreises bestimmte Handlungen in einer bestimmten Region des persönlichen Raumes platzieren, dann gibt diese Norm Akteuren einen Grund, sich Mitgliedern des Kulturkreises gegenüber entsprechend zu verhalten.

Der Überblick in diesem Kapitel über bestehende Modellierungen sozialer Räume zeigt, dass dieser normative Aspekt vor allem über numerische Parameter modelliert wird. In den Potentialfeldansätzen zur Platzierung des Roboters im persönlichen Raum beispielsweise werden die Parameter mehrerer Gauß-Funktionen so gewählt, dass sich der Roboter angemessen platziert. Das Modell ist also a priori dafür eingerichtet, den Roboter an die richtige Stelle zu lenken. Es ist hingegen nicht der Fall, dass sich der Roboter entscheidet, nach reiflicher Überlegung und Einbeziehung der Präferenzen des Menschen oder auch anderer Aspekte des Handlungskontextes, sich genau an diese Position zu platzieren. Der Designer des Modells hat das für ihn bereits so eingerichtet und der Roboter folgt dem Gradienten bis zum Ziel. Andersherum wäre es aber auch denkbar, dass der Roboter sich erst überlegt, welche Platzierung sozial angemessen und rücksichtsvoll ist und dann lediglich zum Zwecke der Navigation ein Potentialfeld generiert, das seiner Entscheidung entspricht.

Normen, Regeln, Konventionen werden also zwar modelliert, aber nicht repräsentiert. Sie sind nicht als eigene Entitäten Gegenstand der Entscheidungsfindung. Das Fehlen von Repräsentationen von Gründen, die für oder gegen

Platzierungen sprechen, wird insbesondere dann bemerkbar, wenn der Roboter zwischen Handlungsweisen abwägen soll, die allesamt gute und schlechte Eigenschaften besitzen. Bisherige Arbeiten sind vorrangig darauf ausgerichtet, Situationen zu beschreiben, in denen sich kaum Konflikte auftun. Wenn aber zwischen zwei Platzierungen ausgewählt wird, gegen die unterschiedliche Gründe sprechen, und der Roboter dennoch eine Entscheidung trifft, dann begeht er in jedem Fall eine Verletzung. Im Angesicht solcher Dilemmata wäre es wünschenswert, wenn der Roboter in der Lage wäre, zu erklären, dass er im Wissen über die Verletzung sich so-oder-so entschieden hat, weil die Nachteile der anderen Platzierung schwerer wogen. Numerische Optimierungen hingegen führen zu optimalen Entscheidungen, berücksichtigen aber nicht, dass auch die optimale Entscheidung absolut gesehen negative Eigenschaften besitzen kann. Auch gegen die beste Platzierung können schwere Gründe sprechen, über die sich ein sozialer Akteur bewusst sein sollte. Symbolische Repräsentation von Handlungsgründen können insbesondere dafür genutzt werden, Erklärungen und Entschuldigungen zu formulieren.

KAPITEL 3

Affordanzen in der Psychologie und in der Robotik

Bevor die nachfolgenden Kapitel eine Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume entwickeln, soll hier zunächst der Begriff der Affordanz und seine Verwendung in der Psychologie, in der er durch die Arbeiten von James J. Gibson (Gibson, 1977, 1986) seinen Ursprung fand, und in der Robotik, in der er fruchtbare Anwendung findet, nachgezeichnet werden. Die Debatte über »die richtige« Definition von Affordanz wird insbesondere in der Psychologie-Literatur stellenweise hitzig geführt (vgl. Michaels, 2003). Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, aufzuzeigen, dass mit dem Begriff »Affordanz« tatsächlich unterschiedliche Dinge bezeichnet werden, die aber über unterschiedliche Konzeptionen von Affordanz hinweg für die Ausführung von Handlungen als relevant erachtet werden. Es existiert lediglich Uneinigkeit darüber, welche dieser für Handlungen relevanten Aspekte als Affordanz bezeichnet werden sollen.

Ein Unteraspekt der nachfolgenden Analyse ist die Frage nach der Wahrnehmbarkeit von Affordanz. Oft wird davon ausgegangen, dass Affordanzen etwas privates sind, etwas, das nur diejenigen wahrnehmen, die die Affordanzen auch realisieren können. Eine solche Konzeption von Affordanz ist aber für die Lösung des Handlungsplatzierungsproblems, aber auch für die soziale Robotik im Allgemeinen nicht zielführend, da es hier gerade darum geht, die Handlungsmöglichkeiten anderer Handelnder mit zu berücksichtigen. Es ist nicht zuletzt Gibson selbst, der schreibt, dass Lebewesen beginnen, sich zu sozialisieren, sobald sie in der Lage seien, zu erkennen, welchen Wert die Dinge für andere Individuen besitzen, das heißt, welche Affordanzen sie für andere Individuen bereitstellen (Gibson, 1986, S. 141).

Abschnitt 3.2 führt die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen unterschiedlichen Konzeptionen des Affordanz-Begriffes in der Psychologie auf.

Abschnitt 3.3 blickt auf die Problemklassen, die unter Nutzung des Konzeptes der Affordanz in der Robotik gelöst werden, und darauf, wie Affordanzen zu diesem Zweck jeweils modelliert werden. Dabei ist zu beobachten, wie sich Modellierungen von Affordanzen unterscheiden—und zwar abhängig davon, ob soziale Interaktion zwischen Agenten (zum Beispiel Kommunikation) durch das Affordanz-Konzept unterstützt werden soll, oder ob die individuelle Handlungsausführung eines spezifischen Roboters im Vordergrund steht.

3.1. Die Entwicklung des Affordanzbegriffes durch Gibson

Gibson (1977, 1986) entwickelt eine Konzeption der Beziehung zwischen Umwelt und Lebewesen, nach der die Umwelt a-priori Bedeutung enthält, die Lebewesen wahrnehmen können. Diese »Bedeutung«, die Gibson mit dem Term »Affordanz« bezeichnet, informiert die Lebewesen darüber, welche Handlungsmöglichkeit die Umwelt ihnen bietet. Gibson postuliert, dass die Welt auf zwei Ebenen organisiert sei. Auf der einen Ebene existieren physikalische Objekte, Substanzen und ihre Oberflächen. Rein physikalische Eigenschaften. Auf der zweiten Ebene existieren Affordanzen (Gibson, 1977, S. 71). Affordanzen sind Eigenschaften höherer Ordnung, die sich aus Kombinationen physikalischer Eigenschaften auf der ersten Ebene ergeben (Gibson, 1977, S. 71).

Gibson charakterisiert Affordanzen folgendermaßen als etwas, das die Umwelt den Lebewesen anbietet:

»The *affordances* of the environment are what it *offers* the animal, what it *provides* or *furnishes*, either for good or ill. [...] I mean by it [the noun *affordance*] something that refers to both the environment and the animal in a way that no existing term does. It implies the complementarity of the animal and the environment.«
Gibson (1986, S. 127); Die Hervorhebungen sind aus dem Original übernommen.

Gibsons Darstellungen des Affordanz-Konzeptes sind von allerlei Beispielen begleitet (Gibson, 1977, S. 68, 70, 75): Feste, horizontale Oberflächen affordieren Stehen und Laufen, und Knie-hohe, feste Oberflächen affordieren Sitzen, Klippen affordieren, von ihnen herunterzufallen, Werkzeuge affordieren, sie zu nutzen. Manche Objekte affordieren Essen oder Trinken, anderen affordieren Vergiftung. Die Luft affordiert zu atmen und ungehinderte Bewegung, Wasser affordiert Ertrinken. Messer affordieren Schneiden und Bälle

affordieren Werfen. Und schließlich affordieren Lebewesen einander gegenseitig Interaktionen.

Gibsons eigene Charakterisierungsversuche des Wesens von Affordanz finden an dieser Stelle bereits ihr Ende. Gibson versucht nicht, Affordanz ontologisch einzuordnen, zu beschreiben, wie Affordanz mit Handlungen zusammenhängt und inwiefern Affordanz von den Fähigkeiten von Lebewesen zur Handlungsausführung abhängig ist. Auch die Beschreibung, wie Kombinationen physikalischer Eigenschaften Affordanzen konstituieren, geht über eine Auflistung von Beispielen nicht hinaus. Und so gibt es in der Zeit nach Gibson vielerlei Interpretationsansätze von Vertretern der »Ecological Psychology«, von denen einige im nächsten Abschnitt behandelt werden.

3.2. Affordanzen in der Psychologie

Ausgehend von Gibson ist der Affordanzbegriff in unterschiedlicher Weise von verschiedenen Autoren aus unterschiedlichen Forschungsgebieten interpretiert und weiterentwickelt worden (z.B. Turvey, 1992; Reed, 1996; Chemero, 2003; Stoffregen, 2003). Die Interpretationen des Affordanzbegriffs unterscheiden sich sowohl in ihrer ontologischen Dimension (»Was ist Affordanz?«) als auch in ihrer epistemologischen Dimension (»Wie erwirbt ein Lebewesen Kenntnis von dem Vorhandensein einer Affordanz?«).

Die ontologische Frage ist insbesondere relevant für die Modellierung von Affordanz. Eine Antwort auf diese Frage legt offen, wie Affordanz mit anderen Entitäten zusammenhängt—insbesondere mit den Handlungen, durch die Affordanzen realisiert werden und mit den Lebewesen, die diese Handlungen ausführen. Die epistemologische Frage ist relevant, wenn es darum geht, wie Affordanz genutzt werden darf oder kann.

3.2.1. Ontologische Unterscheidungen

Bezüglich der ontologischen Frage »Was ist Affordanz?« werden vier Standpunkte eingenommen: Erstens wird Affordanz als Eigenschaft der Umwelt (beziehungsweise von Objekten, die sich in der Umwelt befinden) begriffen (Turvey, 1992; Reed, 1996), zweitens wird Affordanz als Eigenschaft von Lebewesen aufgefasst (Ellis & Tucker, 2000), drittens besteht die Idee, Affordanz sei eine emergente Eigenschaft von Umwelt-Lebewesen-Systemen (Stoffregen, 2003), und viertens wird die Ansicht vertreten, Affordanz sei eine Relation zwischen Lebewesen und ihrer Umwelt (Chemero, 2003).

Affordanz als Eigenschaft der Umwelt

Turvey (1992) fasst Handlungsmöglichkeiten als real existierende Entitäten auf. Affordanz sei insbesondere kein Konstrukt des Erkenntnisprozesses eines kognitiven Systems, sondern eine Voraussetzung dafür, dass ein Lebewesen erkennen kann, welche Handlungen ihm die Umwelt bietet (Turvey, 1992).

Um dem Möglichkeits-Charakter von Affordanz gerecht zu werden, konzipiert Turvey Affordanzen als Dispositionen. Dispositionen sind Potentiale, die sich unter bestimmten Umständen manifestieren. Beispielsweise ist »Wasserlöslichkeit« die Disposition eines Stoffes, die sich in Situationen manifestiert, in denen der Stoff mit Wasser in Berührung gerät: Der Stoff löst sich im Wasser auf. Affordanzen, so Turvey, sind eben jene Dispositionen, die sich in den Handlungen von Lebewesen manifestieren. Sie sind Potentiale für Handlungen: Die Disposition, eine bestimmte Handlung zu tun, geht der tatsächlichen Handlung stets voraus. Ein weiterer Aspekt von Turveys Konzeption besteht darin, dass er unterstellt, dass es zu jeder Disposition stets eine komplementäre Disposition gibt. Die Disposition eines Stoffes, sich in Wasser aufzulösen, ist beispielsweise komplementär zur Disposition von Wasser, wasserlösliche Stoffe aufzulösen.

Turveys Modell sieht vor, dass die Umstände, in denen eine Disposition eines Objektes Z realisiert wird, ein anderes Objekt X erfordern. Dieses X ist das Komplement von Z . Es muss eine Disposition besitzen, die mit der Disposition von Z zusammenpasst. Ein Objekt Z mit Disposition q und ein Objekt X mit Disposition p formen dann ein neues Objekt $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$, das eine Manifestations-Eigenschaft r besitzt. Affordanzen sind Dispositionen, deren komplementäre Dispositionen Fähigkeiten von Lebewesen sind.¹ Als Beispiel fungiert die Affordanz einer Stufe, erklommen zu werden (vgl. Turvey, 1992). Die Stufe sei das Objekt Z , das die Affordanz q besitzt, erklommen werden zu können (»climbability«). Wenn weiterhin X ein Lebewesen ist, das eine zu q komplementäre Fähigkeit p besitzt, dann ist das Objekt $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ ein Stufen-Lebewesen-System, in dem sich die Affordanz durch ein Erklimmen r manifestiert.

Zusammenfassend charakterisiert Turvey (1992) Affordanzen als reale Möglichkeit, als Dispositionen, die durch Fähigkeiten (»effectivities«) von Lebewesen komplementiert werden. Turveys Affordanzen sind existentiell abhängig von Fähigkeiten von Lebewesen: Eine Stufe ist nur erklimmbar, wenn es ein Lebewesen gibt, das sie erklimmen kann.²

¹Turvey (1992) spricht in diesem Zusammenhang von »effectivities«.

²Eine alternative Sicht vertritt Reed (1996). Er definiert Affordanzen, wie Turvey, ebenfalls als Eigenschaften der Umwelt, legt allerdings eine andere Beziehung zu den Fähigkeiten

Affordanz als Eigenschaften von Lebewesen

In neuropsychologischen Arbeiten taucht ein Affordanzbegriff auf, der der Konzeption von Turvey gewissermaßen orthogonal entgegensteht (z.B. Tucker & Ellis, 1998; Ellis & Tucker, 2000; Jeannerod, 1994). In diesen Arbeiten wird der Begriff »Affordanz« genutzt, um die neuronalen Aktivitätsmuster zu bezeichnen, die entstehen, wenn Menschen Objekte visuell dargeboten werden, an denen sie Handlungen vollziehen können. Diese Aktivitätsmuster entstehen in Motor-Arealen des Kortex, und zwar sowohl wenn der Beobachter die Absicht hat, eine Handlung auszuführen, als auch in Situationen, in denen die Handlungsabsicht noch gar nicht besteht (Tucker & Ellis, 1998). Die in diesen Studien untersuchte Hypothese lautet, dass verschiedene Aktivitätspotentiale (Affordanzen) konkurrieren bis sich eine von ihnen durchsetzt und es zur Handlungsausführung kommt.

Diese Perspektive auf Affordanz steht der Konzeption von Gibson sehr fern, wie die Autoren auch selbst bemerken (vgl. Ellis & Tucker, 2000). Das liegt insbesondere daran, dass hier Affordanz nicht als Eigenschaft der Umwelt verstanden wird, die unabhängig vom Beobachter besteht. Andererseits liefert diese Sicht auf Affordanz eine greifbare Erklärung für den »Einladungscharakter« von Affordanz. Es ist nicht immer so, dass erst eine Handlungsabsicht besteht und dann erst eine passende Affordanz gesucht wird, um die Handlungsabsicht zu realisieren. Es ist mitunter auch der Fall, dass sich Handlungsabsichten erst ergeben, nachdem Handlungsmöglichkeiten erkannt wurden (cf. Withagen, de Poel, Araújo & Pepping, 2012).

Affordanz als Eigenschaften von Umwelt-Lebewesen-Systemen

Stoffregen (2003) knüpft an die Affordanz-Definition von Turvey (1992) an, sieht aber Affordanz nicht als eine dispositionale Eigenschaft der Umwelt, sondern als eine Eigenschaft von Umwelt-Lebewesen-Systemen.

Wie auch Turvey geht Stoffregen dabei von einer Dualität zwischen Umwelt und Lebewesen aus. Ähnlich wie Turvey formuliert Stoffregen: Wenn Z ein Lebewesen und X ein Objekt der Umwelt ist und q eine Eigenschaft von Z und p eine Eigenschaft von X ; Dann definiert die Beziehung zwischen p und q , p/q , eine Eigenschaft h höherer Ordnung des Systems $W_{pq} = (X_p, Z_q)$. Diese Eigenschaft höherer Ordnung ist nach Stoffregen eine Affordanz.

von Lebewesen zu Grunde. Reed begreift Affordanzen als Ressourcen in der Umwelt, an die sich Lebewesen anpassen. Eine Stufe besaß also bereits die Affordanz »Erklimmbarkeit«, bevor es ein Lebewesen gab, das die Fähigkeit besaß, die Stufe zu erklimmen. Eine Affordanz im Sinne von Reed (1996) ist nur dann eine Affordanz im Sinne von Turvey (1992), wenn es ein Lebewesen gibt, das eine zur Affordanz komplementäre Fähigkeit besitzt.

Im Gegensatz zu Turveys Definition stehen sich in Stoffregens Definition Affordanzen und Fähigkeiten von Lebewesen nicht auf gleicher Ebene gegenüber. Stattdessen sind Fähigkeiten Eigenschaften von Lebewesen, die für Affordanzen als Eigenschaften höherer Ordnung konstitutiv mitwirken: Die Fähigkeit eines Menschen, eine Stufe zu steigen, und die Eigenschaften der Stufe (ihre Höhe etc.) wirken konstitutiv bei der Produktion der Stufe-Hinaufsteigen-Affordanz. Die Eigenschaften der Stufe erfahren in Stoffregens Konzeption keine besondere Benennung. Insbesondere sind sie, im Widerspruch zu (Turvey, 1992), keine Affordanzen.

Affordanz als Relation zwischen Umwelt und Lebewesen

Chemero (2003) vertritt die Ansicht, dass Affordanzen gar keine Eigenschaften sind, sondern Relationen zwischen Situationen, die Lebewesen wahrnehmen, und den Lebewesen selbst. Wenn ein Beobachter die Affordanz der Erklimmbarkeit einer Stufe wahrnimmt, dann nimmt der Beobachter eine Relation der Stufe und sich selbst wahr.

Als repräsentative Struktur von Affordanz gibt Chemero (2003) für jeden Affordanz-Typen ϕ eine eigene binäre Relation $\text{Affords-}\phi(\text{feature}, \text{ability})$ vor. Dabei ist *feature* eine Eigenschaft der Situation und *ability* eine Eigenschaft des Lebewesens (eine Fähigkeit).

Die Definition von Chemero (2003) ist stark verwandt mit der Definition von (Stoffregen, 2003). Stoffregens emergente Affordanz h als Eigenschaft eines Umwelt-Lebewesen-Systems kann als Reifikation der Affordanz als Relation in Chemos Definition aufgefasst werden.

3.2.2. Epistemologische Unterscheidung

Neben den ontologischen Voraussetzungen, in denen sich Konzeptionen von Affordanz unterscheiden, existieren auch zwei unterschiedliche Ansichten über die Wahrnehmbarkeit von Affordanz. Die Frage, welche Voraussetzungen Akteure mitbringen müssen, um Kenntnis von Affordanz zu erlangen, ist eine epistemologische Frage.

Ogleich die Beantwortung dieser Frage keine allzu großen Auswirkungen auf die Modellierung von Affordanz birgt, so ist sie doch relevant, wenn es darum geht, wie Affordanz genutzt werden kann. Einige Autoren vertreten die Auffassung, dass eine Affordanz nur von jenen Lebewesen wahrgenommen werden kann, die in der Lage sind, die Affordanz zu realisieren (cf. Michaels, 2003). Hinter dieser Sicht verbirgt sich die Idee, dass sich Affordanz stets relativ zum Beobachter zeigt. Die Affordanz des Steigens einer Treppe, die

ein Mensch wahrnimmt, der lange Beine hat, ist eine andere Affordanz, als sie vom kurzbeinigen Menschen wahrgenommen wird (Warren, 1984). Viele Studien zur Wahrnehmung von Affordanz fokussieren stets die Beziehung zwischen den physikalischen Eigenschaften des Beobachters und den physikalischen Eigenschaften des Beobachteten. Neben der Wahrnehmung der Affordanz des Erklommens einer Stufe als Relation zwischen der Beinlänge des Beobachters und der Höhe der Stufe (Warren, 1984) wurde beispielsweise auch die Wahrnehmung der Affordanz des Durchschreitens einer Öffnung als Relation zwischen der Breite des Beobachters und der Größe der Öffnung (Warren & Whang, 1987) untersucht, sowie die Affordanz, eine Straße sicher zu überqueren als Verhältnis von mittlerem Zeitabstand zwischen zwei vorbeifahrenden Autos und der Geschwindigkeit, mit der der Beobachter die Straße überqueren kann (Lee, Young & McLaughlin, 1984).

Die Wahrnehmung von Affordanzen Anderer bleibt in der empirischen Affordanz-Forschung unbehandelt. Und so wird nicht selten in der Theoriebildung auch die Ansicht vertreten, Affordanz müsse per se so verstanden werden, dass sie sich nur jenen Lebewesen zu erkennen gibt, die auch in der Lage sind, die Affordanz durch eine Handlung zu realisieren (Michaels, 2003). Um aber Schlüsse über die Handlungsmöglichkeiten anderer Akteure ziehen zu können — wie es der Affordanz-basierte Ansatz zur Lösung des sozialen Handlungsplatzierungsproblems voraussetzt —, bedarf es einer Konzeption, in der es möglich ist, dass Akteure die Affordanzen anderer Akteure erkennen. Dass dies nicht grundlegend der ursprünglichen Idee von Affordanz widerspricht, ist durch Gibson (1986, S. 141) dokumentiert: Hier schildert Gibson, wie Kleinkinder zunächst die Affordanzen wahrnehmen, die die Dinge ihnen selbst bereitstellen. Dann, sobald das Kind in der Lage sei, den Wert der Dinge auch für Andere wahrzunehmen, beginne es, sich zu sozialisieren:

»The child begins, no doubt, by perceiving the affordances of things for her, for her own personal behavior. [...] But she must learn to perceive the affordances of things for other observers as well as for herself. An affordance is often valid for all the animals of a species [...] Only when each child perceives the values of things for others as well as for herself does she begin to be socialized.« ebd.

3.3. Modellierung von Affordanzen in der Robotik

Affordanz als Konzept zur Repräsentation von Handlungsmöglichkeiten wird in der Robotik divers eingesetzt. Die Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der Form, in der Wissen über Affordanzen repräsentiert ist, und darin, wie

dieses Wissen für die Handlungsplanung und Ausführung genutzt wird. Eine klassische Anwendung von Affordanzen in der Robotik besteht darin, die direkte Abbildung von Sensor-Daten auf Aktionen zu modellieren. In neueren Ansätzen werden solche Abbildungen von Robotern durch die Interaktion mit ihrer Umgebung autonom erlernt (Abschnitt 3.3.1). Darüber hinaus wird Affordanz genutzt, um abstrakte Planungsoperatoren zu spezifizieren: Hier taucht Affordanz auch als Vorbedingung von Aktionen auf (Abschnitt 3.3.2). Schließlich bilden Repräsentationen potentieller Handlungen zwischen verschiedenen Akteuren und zwischen Akteuren und Objekten eine Grundlage für kooperatives Verhalten in der Mensch-Roboter-Interaktion (Abschnitt 3.3.3).

3.3.1. Sensori-motorische Kopplung

Eine Form, Affordanz in der Robotik auszunutzen, besteht darin, Affordanz als ein Muster im perzeptuellen Strom zu erfassen, mit dem ein Verhalten assoziiert ist (z.B. Duchon, Kaelbling & Warren, 1998). Beispielsweise wird der optischen Fluss als Affordanz aufgefasst, der mit dem Navigationsverhalten des Roboters verknüpft ist—etwa um Hindernissen auszuweichen.

Die Nutzung von Affordanz zur Sensor-Motor-Kopplung besteht allgemein darin, ausgewählte Eigenschaften des perzeptuellen Stimulus, wie etwa Oberflächenstrukturen und ihre Veränderung, direkt zu nutzen, um Verhalten zu steuern. Es ist dafür nicht notwendig (und auch nicht gewollt), dass der Roboter ein Modell seiner Umwelt besitzt. Ob ein Objekt durch den Roboter manipulierbar ist, oder ob eine Region für den Roboter navigierbar ist, wird aufgrund ausgewählter perzeptueller Eigenschaften festgestellt, ohne dass der Roboter ein Modell des manipulierbaren Objektes haben müsste, ein Modell der Hindernisse in der Umgebung, oder gar ein Modell seiner eigenen Fähigkeiten.

In aktuelleren Arbeiten wird die Kopplung zwischen sensorischen Mustern und ausgeführtem Verhalten durch Lernverfahren erhoben. Die Arbeiten von Stoytchev (2008) und Detry et al. (2011) zur Manipulation von Objekten und von (Şahin, Çakmak, Doğar, Uğur & Üçoluk, 2007) zur Roboter-Navigation sind repräsentative Vertreter dieses Ansatzes.

Bei Stoytchev (2008) soll der Roboter lernen, wie sich die Positionen von Objekten auf einer Ebene verändern, wenn er mit einem spezifischen Werkzeug ein bestimmtes Verhalten auf die Objekte ausübt. Das Lernergebnis wird in Form einer Affordanz-Tabelle repräsentiert, die die Werkzeug-Konfiguration, das ausgeübte Verhalten, den Zustand der Objekte vor der Verhaltensausübung und den Zustand der Objekte nach der Verhaltensausübung erfasst.

Das Wissen, das in der Affordanz-Tabelle repräsentiert ist, kann von dem Roboter genutzt werden, um für eine gegebene Aufgabe (ein Zielobjekt in bestimmter Weise zu bewegen) ein passendes Werkzeug und ein passendes Verhalten aus dem Verhaltensrepertoire auszuwählen.

Bei Detry et al. (2011) werden Greif-Affordanzen gelernt. Der Ansatz basiert auf einem Sampling-Verfahren, das eine Greifdichte erzeugt, die den Erfolg von Greifhandlungen in einer Objekt-Greifer-Konfiguration repräsentiert. Objekt-Greifer-Konfigurationen, die erfolgreich in stabilen Griffen resultieren, werden hier als Greif-Affordanzen bezeichnet. Unterschiedliche Greifer führen an unterschiedlichen Objekten zu unterschiedlichen Greif-Affordanzen.

Bei Şahin et al. (2007) soll der Roboter lernen, wie er zwischen Hindernissen navigieren kann. Affordanzen werden als Tripel (Entität, Verhalten, Effekt) repräsentiert. Das Element »Entität« repräsentiert Merkmale der sensorischen Perzeption, die aus Kamerabildern extrahiert werden. Das Element »Verhalten« verweist auf eine von sieben Aktionsalternativen von »scharf rechts einbiegen« über »geradeaus fahren« bis »scharf links einbiegen«. Das Element »Effekt« repräsentiert, ob das Durchfahren geglückt ist oder nicht. Nach einer Trainingsphase navigiert der Roboter, indem er abhängig von den momentanen Sensor-Daten eine der »erfolgreichen« Aktionen ausführt.

Gemeinsam ist diesen Ansätzen, dass sie darauf verzichten, interne symbolische Modelle der Umwelt oder des Roboters vorzuhalten. Hingegen werden sensorische Muster auf ein vordefiniertes Verhaltensrepertoire abgebildet. Affordanz wird als etwas begriffen, das stark an die individuelle Sensor-Motor-Kopplung eines spezifischen Roboters geknüpft ist. Es ist beispielsweise nicht vorgesehen, dass das Wissen über Affordanz mit anderen Robotern geteilt wird, oder dass Affordanzen anderer Akteure (andere Roboter oder Menschen) erkannt und berücksichtigt werden. Die eingenommene Perspektive auf Affordanz deckt sich weitestgehend mit der Affordanz-Definition von Chemero (2003). Die Beziehung zwischen Eigenschaften einer Situation und dem Handelnden stehen im Vordergrund. Als zusätzlicher divergierender Aspekt kommt hinzu, dass in den Robotik-Ansätzen auch die Effekte der Handlungen (also die Effekte der Realisierung von Affordanzen) Teil der Repräsentationen von Affordanzen sind. Dieser Aspekt findet sich so nicht in den Affordanz-Theorien der Psychologie.

3.3.2. Planungsoperatoren

Wissen über Affordanz wird auch für die deliberative Aktionsplanung von Robotern genutzt (Rome et al., 2008; Lörken & Hertzberg, 2008; Krüger et al., 2011). Anders als in den Ansätzen unter Abschnitt 3.3.1, wird Wissen über

Affordanzen genutzt, um abstrakte Planungsoperatoren zu spezifizieren und um Pläne auszuführen.

Lörken und Hertzberg (2008) unterscheiden zu diesem Zweck Affordanz-Repräsentationen von Affordanz-Prädikaten. Affordanz-Repräsentationen entsprechen Tripeln bestehend aus einer Beschreibung eines Stimulus, dem Verweis auf ein Verhalten (eine Aktion, die der Roboter ausführen kann) und der Beschreibung des beobachtbaren Effekts des Verhaltens. Das Wissen, dass rote Objekte vom Roboter aufgehoben werden können, wird beispielsweise in diesem Ansatz als Tripel repräsentiert, so dass das erste Element die Information »red« enthält, das zweite Element die Aktion »lift« und das dritte Element die Information, dass das rote Objekt sich nach der Ausführung an einer höher gelegenen Stelle befindet (Rome et al., 2008). Affordanz-Prädikate hingegen beschreiben die Eigenschaft räumlicher Regionen, bestimmte Affordanzen bereitzustellen. Dafür wird die Umgebung des Roboters zunächst in diskrete Regionen unterteilt. Sobald der Roboter in einer Region eine Affordanz erkennt (indem er einen Stimulus wahrnimmt, der in einem Affordanz-Tripel spezifiziert ist), wird die Region als Bereitsteller dieser Affordanz registriert. Die Formel »liftable(*region*)« beispielsweise ist genau dann wahr, wenn der Roboter in der Region *region* die Affordanz »liftable« wahrgenommen hat. Die Affordanz-Tripel sind die Wahrmacher für Affordanz-Prädikate.

Lörken und Hertzberg (2008) spezifizieren auf Grundlage von Affordanz-Prädikaten Planungsoperatoren. In Listing 3.1 ist beispielhaft die Spezifikation einer Aktion des Anhebens eines Objektes durch den Roboter angegeben. Das Affordanz-Prädikat »liftable« kommt sowohl in der Vorbedingung des Planungsoperators vor (der Roboter kann nur dann ein Objekt aufnehmen, wenn er sich in einer Region befindet, die ihm als »liftable« bekannt ist), als auch in der Effekt-Spezifikation des Operators (nachdem der Roboter das anhebbare Objekt angehoben hat, kann in der Region nichts weiteres mehr angehoben werden). Dabei kommt das Objekt, das angehoben werden soll, im Planungsoperator selbst nicht vor. Das schafft Wiederverwendbarkeit des Planungsoperators für unterschiedliche Roboter. Ein Roboter beispielsweise, der nur rote, runde Objekte anheben kann, und ein anderer Roboter, der nur blaue, quadratische Objekte anheben kann, können denselben Planungsoperator verwenden (das Rotsein und das Rundsein oder das Blausein und das Quadratischsein sind nicht Teil der Vorbedingungen).

Eine zweite Rolle kommt den Affordanz-Repräsentationen (den Tripeln) bei der Planausführung zu. Wenn eine Aktion ausgeführt werden soll, dann begibt sich der Roboter in eine Region, von der er weiß, dass sie die Aktion afforziert. Dort angekommen durchsucht er seinen Wissensbestand nach

```
(:action lift
  :parameters (?region -region)
  :precondition (and
    (robotAt ?region)
    (liftable ?region)
    (not (hasLiftedSomething)))
  :effect (and (hasLiftedSomething)
    (not (liftable ?region)))
)
```

Listing 3.1: PDDL-Spezifikation eines Aktionsoperators unter Verwendung des Affordanz-Prädikats »liftable« in Aktions-Vorbedingungen und Aktions-Effekten (aus Lörken & Hertzberg, 2008). Die Aktion »lift« kann nur ausgeführt werden, wenn sich der Roboter in einer Region befindet, die die Affordanz »liftability« affordiert. Nach dem Anheben des Objektes affordiert die Region keine zweite Anhebe-Aktion (unter der Annahme, dass es pro Region nur ein Objekt gibt, das angehoben werden kann).

Affordanz-Repräsentationen, die zu dem auszuführenden Aktionstyp passen. Daraufhin durchsucht er seine unmittelbare Umgebung nach einem der passenden Stimuli. Wurde ein solcher Stimulus gefunden, benutzt er das konkrete Objekt, von dem der Stimulus ausgeht, um an ihm die beabsichtigte Aktion auszuführen.

Wie auch bei den Ansätzen, die unter Abschnitt 3.3.1 diskutiert wurden, ist das Wissen über Affordanz auch hier stark an den Roboter selbst gebunden. Die Voraussetzungen des Roboters selbst, eine Aktion auszuführen, sind hier wie dort nicht Teil der Repräsentation. Der Planungsoperator in Listing 3.1 ist beispielsweise so zu lesen, dass der spezifische Roboter, für den die Aktion geplant wird, die Aktion ausführen kann, wenn der spezifische Roboter in einer Region ist, die ihm die Aktion affordiert. Von den Fähigkeiten des Roboters, die ebenso Voraussetzungen dafür sind, dass er die Aktion ausführen kann, wird abstrahiert. Die Komplementarität zwischen Affordanz und Fähigkeit ist nicht explizit. Somit kann ein Roboter nicht die Handlungsmöglichkeiten eines anderen Roboters repräsentieren. Durch die Verwendung der Affordanz-Prädikate allerdings wird eine Möglichkeit geschaffen, dass Roboter untereinander Wissen darüber austauschen können, in welchen Regionen ihnen welche Handlungsoptionen zur Verfügung stehen (vgl. Hertzberg, Lingemann, Lörken, Nüchter & Stiene, 2008).

Die »Action-Object Complexes« von Krüger et al. (2011) vereinen die Aspekte des Lernens durch eigene Erfahrung und des Vorausplanens, indem sie Planungsoperatoren als Prädiktionsfunktionen betrachten, die den Zustand der Welt mit einem gewissen Grad von Verlässlichkeit in einen Folgezustand

transformieren. Diese Abbildungen können einerseits analog zu den Ansätze unter Abschnitt 3.3.1 erlernt werden, als auch für vorausschauende Aktionsplanung genutzt werden.

3.3.3. Mensch-Roboter-Interaktion

Die Ansätze zur Nutzung von Affordanz, die in den beiden vorangegangenen Abschnitten 3.3.1 und 3.3.2 dargestellt wurden, betonen den Roboter als situiert handelnden Akteur. Affordanz ist immer bezogen auf den Roboter als Beobachter und Handelnden definiert. Diese Perspektive wird von Şahin et al. (2007) auch als die »Agenten-Perspektive« identifiziert: Ein Agent erkennt *seine* Handlungsmöglichkeiten, die die Umgebung ihm bietet. Diese Perspektive beschränkt die Anwendung von Affordanz für die Mensch-Roboter-Interaktion im Generellen und auch für die soziale Handlungsplatzierung im Speziellen: Wenn der Roboter in der Lage sein soll, bei seiner Positionierung die Handlungsmöglichkeiten anderen Akteure zu berücksichtigen, dann muss er in der Lage sein, eine »Beobachter-Perspektive« (siehe ebenfalls Şahin et al., 2007) einzunehmen.

Bei Raubal und Moratz (2008) werden Handlungsmöglichkeiten für Menschen und Roboter in einer gemeinsamen Repräsentation erfasst. In einem Anwendungsfall betrachten Raubal und Moratz (2008) die Aufgabe eines autonomen Rollstuhls, einen Menschen sicher von einem Startpunkt zu einem entlegenen Ziel zu transportieren. Auf dem Weg zum Ziel erkennt der autonome Rollstuhl, wie ein Auto einen abgesenkten Bordstein blockiert und somit den geplanten Pfad behindert. Die Repräsentation dieser Situation enthält mehrere Affordanzen: Das Auto kann den Pfad blockieren, der Fahrer des Autos kann im Auto sitzen, der Benutzer des autonomen Rollstuhls kann mit dem Fahrer des Autos kommunizieren, der autonome Rollstuhl kann mit dem Menschen, den er transportiert, kommunizieren etc. Der Roboter besitzt somit Wissen nicht nur über die Handlungsmöglichkeiten, die ihm zur Verfügung stehen, sondern auch über die Handlungsmöglichkeiten anderer Akteure. Dieses Wissen kann er beispielsweise nutzen, um den Menschen, den er transportiert, über die Situation zu informieren und dafür zu sorgen, dass eine Kommunikation mit dem Fahrer zustande kommt. Wäre das Wissen über die Affordanzen auf die Affordanzen des autonomen Rollstuhls eingeschränkt, könnte er maximal mit dem Menschen, den er transportiert, kommunizieren oder einen neuen Pfad planen. Er wüsste aber nicht um die Möglichkeit, dass sein Nutzer den Fahrer des Autos darum bittet, den Bordstein freizugeben.

Ontologisch knüpft der Ansatz von Raubal und Moratz (2008) an die De-

definition von Stoffregen (2003) an: Nicht weiter benannte Eigenschaften von Objekten in der Umwelt und von Akteuren produzieren Affordanzen. Raubal (2001) erlaubt, dass unter mehreren Affordanzen mental ausgewählt werden kann, dass sie realisiert werden können und dass sie kommuniziert werden können.

Ebenfalls unter die Beobachter-Perspektive fällt der Ansatz von Pandey und Alami (2013). Ihr Ziel besteht darin, Roboter zu befähigen, kooperatives Verhalten zu planen, so dass die Fähigkeiten potentieller Interaktionspartner berücksichtigt werden. Dazu führen Pandey und Alami (2013) eine Datenstruktur namens »Affordance Graph« ein. Der »Affordance Graph« repräsentiert Handlungsmöglichkeiten, die durch die in einer Situation vorhandenen Objekte und Agenten ausführbar sind. Ein Teil-Graph namens »Taskability Graph« enthält gerichtete Kanten zwischen Agenten. Eine Kante (A, B) im »Taskability Graph« zur Aufgabe »to give« repräsentiert, dass Agent A dem Agenten B etwas geben kann. Die Kante ist mit Informationen zu räumlichen Positionen, an denen die Handlung ausgeführt werden kann, und die Fähigkeiten, die die Akteure zur Handlungsausführung aufbringen müssen verknüpft. In einem zweiten Teil-Graphen des »Affordance Graph«, dem »Manipulability Graph«, repräsentieren gerichtete Kanten analog zum »Taskability Graph«, welche Handlungen Agenten an Objekten ausüben können.

Der Ansatz von Pandey und Alami (2013) steht der Definition von Chemero (2003) am nächsten: Affordanzen sind Relationen zwischen Entitäten (hier gekennzeichnet durch Kanten im »Affordance Graph«). Im Unterschied zu den anderen Ansätzen aus den vorangegangenen Abschnitten, in denen ebenfalls Affordanzen als Relationen repräsentiert wurden, spielen bei Pandey und Alami (2013) die Effekte der Realisierung von Affordanzen keine Rolle. Hin-gegen wird verstärkt auf die Fähigkeiten fokussiert, die Akteure aufbringen müssen, um eine Affordanz zu realisieren. Des Weiteren wird eine Verknüpfung zur räumlichen Dimension von Handlungen hergestellt: Um Affordanz zu realisieren, müssen geeignete räumliche Positionen eingenommen werden.

3.4. Fazit

Unterschiedliche Affordanz-Theorien sind sich einig über die grundsätzliche Beschaffenheit der Welt: Es existieren Objekte, an denen Lebewesen Handlungen vornehmen können. Dafür sind bestimmte Eigenschaften verantwortlich. Manche dieser Eigenschaften sind Eigenschaften von Objekten und andere sind Eigenschaften von Lebewesen. Die Eigenschaften von Objekten und Lebewesen müssen in einer bestimmten Weise zusammenpassen, damit eine

Handlung ausgeführt werden kann. Uneinigkeit herrscht lediglich darüber, ob die Eigenschaften der Objekte »Affordanz« heißen, oder ob die Eigenschaften der Lebewesen »Affordanz« heißen, oder ob es das Zusammenpassen dieser Eigenschaften ist, das »Affordanz« heißt.

Die Untersuchungen zur Verwendung von Affordanz in der Robotik in Abschnitt 3.3 offenbaren grundlegende Unterschiede zwischen den Repräsentationen und der Verwendung von Affordanzen. In einigen Arbeiten werden Affordanzen als Relationen zwischen perzeptuellen Stimuli, Aktionen und Effekten von Aktionen aufgefasst. Affordanz stellt eine Abbildung zwischen Perzeption und Handlungsausführung dar, die immer relativ zum handelnden Akteur verstanden werden muss. Diese Abbildung kann von einem Roboter autonom erlernt werden, indem er Handlungen ausführt und ihre Effekte protokolliert. Solche Akteurs-spezifischen Auffassungen über den Affordanzbegriff gelangen an ihre Grenzen, wenn es möglich sein soll, die Handlungsmöglichkeiten anderer Akteure bei der Planung eigener Handlungen zu berücksichtigen. Und so finden sich in Arbeiten, in denen das Affordanz-Konzept auch die Kooperation und Kommunikation zwischen Akteuren unterstützen soll, ganz andere Ansätze. Weder die perzeptuellen Stimuli noch die Effekte von Handlungen spielen hier noch eine Rolle. Stattdessen rücken die unterschiedlichen Fähigkeiten verschiedener Akteure in den Vordergrund, Handlungen an Objekten und anderen Akteuren vorzunehmen.

Die Konzeption, die in den folgenden Kapiteln ausgearbeitet wird, fasst, ähnlich zur Konzeption nach Turvey (1992) und Reed (1996) die Eigenschaften von Objekten, an denen Akteure Handlungen ausführen können, als Affordanzen auf. So sind Affordanzen über ihre Träger verortbar (Kapitel 4) und produzieren relativ zu ihren Trägern Affordanzräume (Kapitel 5).

KAPITEL 4

Affordanz: Eine formale Charakterisierung

Die Untersuchung im vorangegangenen Kapitel konnte offenlegen, dass über unterschiedliche Konzeptionen von Affordanz hinweg im Grunde genommen Einigkeit darüber besteht, wie die Welt beschaffen ist: Es existieren Lebewesen, die an Objekten Handlungen vollziehen: Sie sitzen auf Stühlen, greifen Tassen, steigen Treppen etc. Diese Handlungen werden möglich, weil Lebewesen und die Objekte, an denen sie Handlungen ausführen, Eigenschaften besitzen, die in entscheidender Weise zusammenpassen.

Derart grundsätzliche Konzepte wie »Objekt«, »Eigenschaft« oder »Ereignis« werden in philosophisch-fundierten Ontologien spezifiziert und für die Informatik verfügbar gemacht. Ein Beispiel dafür ist DOLCE-CORE (Borgo & Masolo, 2009). Fundamentalontologien fokussieren auf sehr generelle Konzepte und Relationen (»Teil-von«, »Teilnahme«, »Konstitution«), die nicht spezifisch für bestimmte Domänen sind. Diese Ontologien zielen damit auf einen hohen Grad an Wiederverwendbarkeit für viele konkrete Modellierungsaufgaben. Solche Domänen-unabhängigen Konzepte und Relationen werden in der Metaphysik (der Philosophie des Seins) im Rahmen traditionsreicher Diskurse untersucht. So werden die primitiven Konzepte und Relationen in Fundamentalontologien mit Bedacht ausgewählt und ihre Bedeutung axiomatisch charakterisiert. Zu diesem Zweck wird üblicherweise die Prädikatenlogik erster Stufe gewählt, die eine gut verstandene Semantik und reiches Ausdrucksvermögen besitzt. Da in Anwendungen hingegen oft weniger ausdrucksstarke Sprachen verwendet werden (wie etwa Beschreibungslogiken, Hornlogik, Relationenalgebra etc.), sind die formalen Spezifikationen daher nicht als Implementierungen zu verstehen. Sie dienen in erster Linie als Präzisierung eines Konzept- und Relationen-Inventars, mit dem sich spezifische Domänen aus der Affordanz-Perspektive beschreiben lassen.

Abschnitt 4.1 führt die grundlegenden Annahmen von DOLCE-CORE nach Borgo und Masolo (2009) ein, soweit sie für die Charakterisierung von Affordanzen benötigt werden. Darauf aufbauend werden Affordanz und Fähigkeiten als Eigenschaften von Objekten formalisiert, die in Hinsicht auf das Affordieren eines Handlungstyps zusammenpassen (Abschnitt 4.2). Schließlich führt Abschnitt 4.3 transitive Handlungen ein, die Ereignisse im Sinne von DOLCE-CORE sind. Sie besitzen eine einfache Teilnehmerstruktur, die aus einem Agenten und einem Patiens besteht. Eine transitive Handlung nutzt Fähigkeiten des Agenten und realisiert Affordanzen des Patiens. Dass ein Affordant einem Akteur Handlungen eines bestimmten Typs afforziert, ist also eine notwendige Vorbedingung für eine transitive Handlung. Abschnitt 4.4 wendet die Affordanz-Konzeption exemplarisch für die Aktionsplanung eines Roboters in einer einfachen Büro-Domäne an.

Die formalen Spezifikationen bestehen aus Definitionen (**D**) und Axiomen (**A**), die in der Sprache der Prädikatenlogik notiert sind. Zur besseren Übersicht werden Formeln, die aus (Borgo & Masolo, 2009) übernommen werden dem Namensraum **D** zugeordnet und die Verweise auf die originalen Formeln werden in Fußnoten angegeben. Die Formeln, die der Affordanz- und Affordanzraummodellierung eigen sind, werden mit vorangestelltem **A** benannt. Innerhalb eines Namensraumes werden Definitionen und Axiome durchnummeriert (»**A.D1**« bezeichnet zum Beispiel die erste Definition zum Thema Affordanz- und Affordanzraum).

4.1. Die Fundamental-Ontologie Dolce-Core

DOLCE-CORE unterscheidet sechs Basis-Kategorien, die allesamt unter die Oberkategorie »Temporäre Partikulare« (PT) fallen (vgl. Borgo & Masolo, 2009): »Objekte« (O), »Ereignisse« (E), »Eigenschaften« (Q), »Regionen« (R), »Konzepte« (C). Der obere Teil von Abbildung 4.1 stellt die Basiskonzepte von DOLCE-CORE dar.

Objekte sind diejenigen Dinge, die primär räumlich verortet sind: Stühle, Treppen, Tassen, aber auch Menschen und Roboter gehören nach dieser Ontologie zu den Objekten. Ereignisse hingegen sind primär zeitlich verortet und haben Objekte als Teilnehmer. Durch die Teilnahme-Relation sind auch Objekte zeitlich verortet, so sie Teilnehmer von Ereignissen sind, und Ereignisse sind über ihre Teilnehmer räumlich verortbar.

Sowohl Objekte als auch Ereignisse können Eigenschaften besitzen. Eigenschaften werden in DOLCE-CORE als »Qualities« bezeichnet. Die Größe eines Objektes und seine Farbe sind Eigenschaften, die dem Objekt inhärent sind.

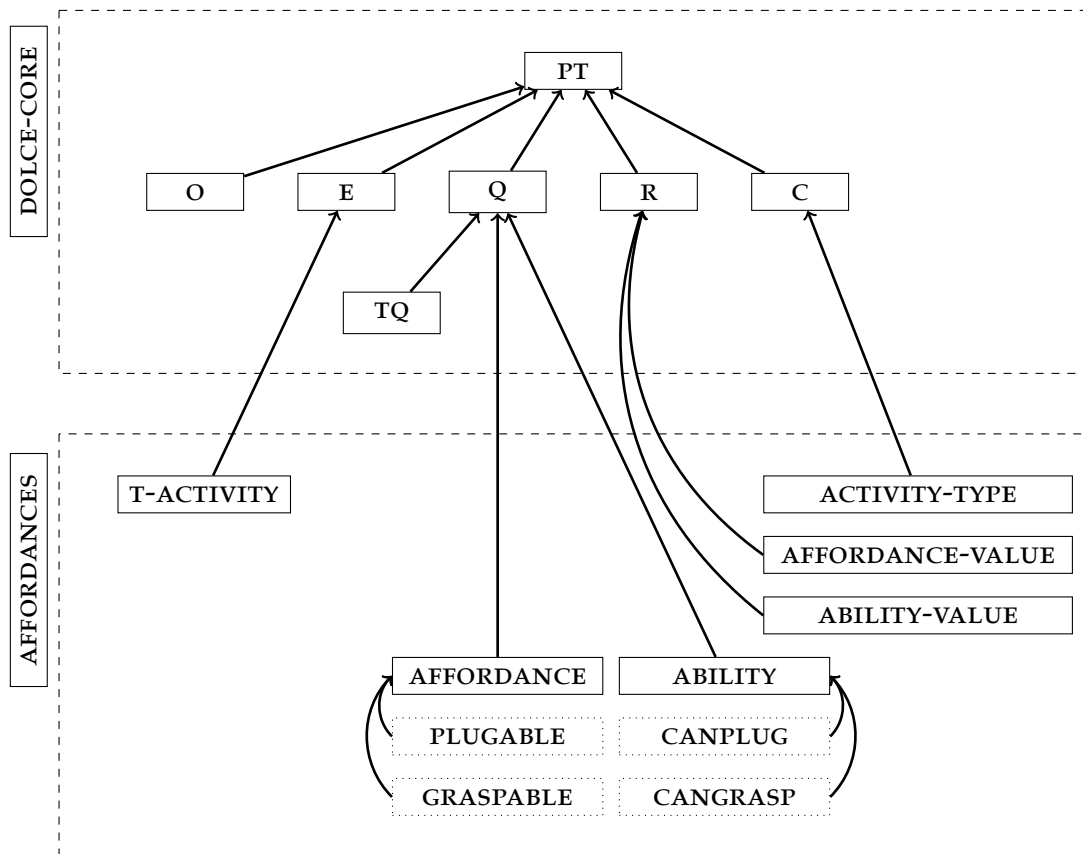


Abbildung 4.1.: Die Basiskonzepte von DOLCE-CORE (oben) nach Borgo und Masolo (2009) und die Verankerung der Konzepte aus der Affordanz-Konzeption (unten). Pfeile symbolisieren die »is-a«-Beziehung zwischen Konzepten, gepunktet umrandete Kästchen sind domänenspezifisch (hier exemplarisch zu verstehen).

DOLCE-CORE unterteilt Eigenschaften in Eigenschaftstypen (Q_i). Beispielsweise kann man Eigenschaften vom Typ »Größe« von Eigenschaften der Art »Farbe« unterscheiden. Jeder Eigenschaftstyp ist mit mindestens einem Wertebereich (»Quality Space«) (s_{ij}) assoziiert. Der Wertebereich enthält die Werte, die Eigenschaften eines Eigenschaftstyps annehmen können. Eigenschaften vom Typ »Farbe« sind beispielsweise mit dem Wertebereich aller möglichen Farben assoziiert. Die Werte selbst sind als Regionen klassifiziert. Im Wertebereich aller möglichen Farben existieren beispielsweise Regionen für die Farbe »rot«, Regionen für die Farbe »blau« und gegebenenfalls auch für »rot-blau-gestreift«.

Konzepte sind in DOLCE-CORE ebenfalls temporale Partikulare. Beispiele für Konzepte sind »ein Student sein« oder »eine Greifbewegung sein«. Im Gegensatz zu den Eigenschaften sind Konzepte unabhängig von ihren Instanzen. Zwei gleichgroße Objekte haben zwei unterschiedliche Eigenschaften vom Typ »Größe«, die aber denselben Wert haben. Dagegen sind zwei Studenten Instanz desselben Konzeptes »ein Student sein«.

Partikulare stehen zueinander in mereologischen Beziehungen: Ein Partikular kann Teil eines anderen Partikulars sein; ausgedrückt durch die Relation p (»part of«), die als Primitiv verwendet wird. p ist reflexiv (**D.A1**), transitiv (**D.A2**) und antisymmetrisch (**D.A3**). Sofern ein Partikular ein Objekt, ein Ereignis, eine Eigenschaft, eine Region oder ein Konzept ist, sind auch seine Teile Objekte, Ereignisse, Qualitäten, Regionen beziehungsweise Konzepte (**D.A4**).

$$\mathbf{D.A1} \quad \forall x, x [p(x, x)]$$

$$\mathbf{D.A2} \quad \forall x, y, z [[p(x, y) \wedge p(y, z)] \Rightarrow p(x, z)]$$

$$\mathbf{D.A3} \quad \forall x, y [[p(x, y) \wedge p(y, x)] \Rightarrow x = y]$$

$$\mathbf{D.A4} \quad \text{Falls } \phi \text{ O, E, } Q_i, S_{jk}, \text{ oder c ist, dann: } \forall x, y [[\phi(y) \wedge p(x, y)] \Rightarrow \phi(x)]$$

Um Affordanz zu charakterisieren, wird ein Inventar benötigt, mit dem über Objekte und ihre Eigenschaften geredet werden kann. DOLCE-CORE benutzt die Inhärenz-Relation (i), um Partikulare mit ihren Eigenschaften in Bezug zu setzen. Axiom **D.A5** restringiert die Relation derart, dass nur Eigenschaften Partikularen inhärent sind.¹ Zudem kann eine Eigenschaft nur einem einzigen Partikular inhärent sein (**D.A6**), und jede Eigenschaft ist mindestens einem Partikular inhärent (**D.A7**).² So ist sichergestellt, dass Eigenschaften eindeutig ihrem Träger zuordenbar sind und dass es keine Eigenschaften gibt, die ohne Träger frei existieren. Das Axiom **D.A8** fordert zudem, dass einem Partikular jeweils nur maximal eine Eigenschaft pro Eigenschaftstyp inhärent ist (kein Objekt hat zwei Längen).³ Diese Beschränkung hat Konsequenzen für die Modellierungen von Domänen, in denen Objekte mehrere Affordanzen und Fähigkeiten besitzen: Falls ein Objekt mehrere Affordanzen oder Fähigkeiten als Eigenschaften besitzen können soll, müssen diese unterschiedlichen Eigenschaftstypen zuordenbar sein. Besitzt beispielsweise eine Tasse zwei Affordanzen, eine für das Greifen der Flasche und eine andere für das Heben der Flasche, dann gehören die Affordanzen zwei zu unterscheidenden Eigenschaftstypen »Greifen-Affordanz« und »Heben-Affordanz« an.

$$\mathbf{D.A5} \quad \forall x, y [i(x, y) \Rightarrow Q(x)]$$

$$\mathbf{D.A6} \quad \forall x, y [[i(x, y) \wedge i(x, y')] \Rightarrow y = y']$$

$$\mathbf{D.A7} \quad \forall x [Q(x) \Rightarrow \exists y [i(x, y)]]$$

$$\mathbf{D.A8} \quad \forall x, x', y [[i(x, y) \wedge i(x', y) \wedge Q_i(x) \wedge Q_i(x')] \Rightarrow x = x']$$

¹Axiom A20 in (Borgo & Masolo, 2009)

²Axiome A21 und A22 in (Borgo & Masolo, 2009)

³Axiom A24 in (Borgo & Masolo, 2009)

Es fehlt jetzt noch eine Verknüpfung der Eigenschaften mit den Werte-Räumen. Für diese Verknüpfung gibt es in DOLCE-CORE die Relation L . Diese Relation setzt Regionen in den Werte-Räumen mit Eigenschaften zu Zeitpunkten in Beziehung. $L(x, y, t)$ beschreibt, dass die Eigenschaft y zum Zeitpunkt t den Wert x annimmt. Axiome **D.A9** und **D.A10** restringieren die Relation entsprechend.⁴ Jede Eigenschaft eines Eigenschaftstyps Q_i muss (zu jedem Zeitpunkt, an dem sie präsent ist) aus mindestens einem assoziierten Werte-Raum einen Wert annehmen. Die Axiome **D.A11** und **D.A12** stellen das gemeinsam sicher.⁵ Eigenschaften haben also zu jedem Zeitpunkt ihrer Existenz einen Wert, und dieser Wert kommt aus einem der passenden Werte-Räume (Affordanz-Eigenschaften können beispielsweise keine Farb-Werte annehmen; und Greif-Affordanzen nehmen keine Werte aus dem Raum der Sitz-Affordanzen an). Axiom **D.A13** fordert zudem, dass Eigenschaften zu keinem Zeitpunkt mehr als einen Wert aus einem Werte-Raum annehmen (**D.A13**).⁶ Schließlich fordert **D.A14** für den Fall, dass eine Eigenschaft zu einem Zeitpunkt einen Wert aus einem Werte-Raum annimmt, dass sie auch zu jedem Zeitpunkt ihrer Existenz einen Wert aus diesem Werte-Raum annimmt.⁷⁸

$$\mathbf{D.A9} \quad \forall x, y, t [L(x, y, t) \Rightarrow R(x) \wedge Q(y)]$$

$$\mathbf{D.A10} \quad \forall x, y, t [L(x, y, t) \Rightarrow PRE(y, t)]$$

$$\mathbf{D.A11} \quad \forall x, y, t [[L(x, y, t) \wedge Q_i(y)] \Rightarrow \bigvee_j s_{ij}(x)]$$

$$\mathbf{D.A12} \quad \forall y, t [[Q(y) \wedge PRE(y, t)] \Rightarrow \exists x L(x, y, t)]$$

$$\mathbf{D.A13} \quad \forall x, x', y, t [[L(x, y, t) \wedge L(x', y, t) \wedge s_{jk}(x) \wedge s_{jk}(x')] \Rightarrow x = x']$$

$$\mathbf{D.A14} \quad \forall x, y, t, t' [[L(x, y, t) \wedge PRE(y, t') \wedge s_{jk}(x)] \Rightarrow \exists x' [L(x', y, t') \wedge s_{jk}(x')]]$$

Neben der Möglichkeit, Eigenschaften von Partikularen über Eigenschaften, Eigenschaftstypen und Werte-Räume zu modellieren, können Konzepte genutzt werden, um Partikulare näher zu charakterisieren. Beispielsweise wäre es umständlich, die Zuschreibung eines Ereignis, eine Handlung vom Typ »Greifhandlung« zu sein, darüber zu modellieren, dass dem Ereignis eine Ei-

⁴Axiome A30 und A31 in (Borgo & Masolo, 2009)

⁵Axiome A34 und A35 in (Borgo & Masolo, 2009)

⁶Axiom A36 in (Borgo & Masolo, 2009)

⁷Axiom A37 in (Borgo & Masolo, 2009)

⁸DOLCE-CORE erlaubt, dass eine Eigenschaft zu einem Zeitpunkt einen Wert aus mehr als nur einem Werte-Raum erhält. Das ermöglicht, dass Eigenschaften bezüglich unterschiedlicher Skalen gemessen werden können. Eine Länge kann gleichzeitig einen Wert aus dem Meter-Werte-Raum oder aus dem Meilen-Werte-Raum erhalten, eine Farbe einen Wert aus dem RGB-Raum und einen Wert aus dem CMYK-Raum etc. Für die Modellierung von Affordanzen und Fähigkeiten wird diese Modellierungsmöglichkeit nicht genutzt.

genschaft inhärent ist, die den Wert »Greifhandlung« annimmt. Zu diesem Zweck stellt DOLCE-CORE eine Klassifizierungsrelation CF zur Verfügung: $CF(x, y, t)$ steht für »zum Zeitpunkt t klassifiziert x das Partikular y als x «. Um also zu beschreiben, dass das Ereignis $grasp_1$ (zum Zeitpunkt t_0) für eine Greifhandlung gehalten wird, kann der Ausdruck $CF(grasping, grasp_1, t_0)$ genutzt werden. Die beiden Axiome **D.A15** und **D.A16** stellen sicher, dass es nur Konzepte sind, die Partikulare über die CF -Relation klassifizieren, und dass nur präsente Partikulare durch die CF -Relation klassifiziert werden.⁹

$$\mathbf{D.A15} \quad \forall x, y, t [CF(x, y, t) \Rightarrow C(x)]$$

$$\mathbf{D.A16} \quad \forall x, y, t [CF(x, y, t) \Rightarrow PRE(y, t)]$$

Objekte und Ereignisse werden in DOLCE-CORE unter Verwendung einer Teilnahme-Relation PC (»participation«) in Beziehung gesetzt. $PC(x, y, t)$ steht dafür, dass das Objekt x an dem Ereignis y zum Zeitpunkt t teilnimmt. Axiom **D.A17** formuliert die entsprechenden Restriktionen.¹⁰ Weitere Axiome fordern, dass jedes Ereignis (solange es präsent ist) mindestens einen Teilnehmer hat (**D.A18**), und dass jedes Objekt (solange es präsent ist) an mindestens einem Ereignis (mindestens an seinem eigenen Leben) teilnimmt (**D.A19**). Wenn ein Objekt an einem Ereignis teilnimmt, dann nimmt es auch an Ereignissen teil, von denen das Ereignis ein Teil-Ereignis ist (**D.A20**); und Objekte nehmen mit all ihren Teilen an Ereignissen teil (**D.A21**).¹¹

$$\mathbf{D.A17} \quad \forall x, y, t [PC(x, y, t) \Rightarrow O(x) \wedge E(y)]$$

$$\mathbf{D.A18} \quad \forall x, t [[E(x) \wedge PRE(x, t)] \Rightarrow \exists y PC(y, x, t)]$$

$$\mathbf{D.A19} \quad \forall x, t [[O(x) \wedge PRE(x, t)] \Rightarrow \exists y PC(x, y, t)]$$

$$\mathbf{D.A20} \quad \forall x, y, y', t [[PC(x, y, t) \wedge P(y, y', t) \wedge E(y')] \Rightarrow PC(x, y', t)]$$

$$\mathbf{D.A21} \quad \forall x, x', y, t [[PC(x, y, t) \wedge P(x', x, t)] \Rightarrow PC(x', y, t)]$$

Auch Ereignissen können Eigenschaften inhärent sein, die aber generell verschieden von jenen Eigenschaften sind, die Objekten inhärent sind (**D.A22**).¹² Beispielsweise können Objekte aber nicht Ereignisse Farben und Gewichte besitzen. Zudem ist jedem Ereignis eine Eigenschaft inhärent, die vom Typ »Zeit« (TQ) ist (**D.A23**). Jedes Ereignis ist zeitlich verortbar. Eine Zeit-

⁹Axiome A17 und A18 in (Borgo & Masolo, 2009)

¹⁰Axiom A39 in (Borgo & Masolo, 2009)

¹¹Axiome A40 bis A44 in (Borgo & Masolo, 2009)

¹²Axiom A44 in (Borgo & Masolo, 2009)

Eigenschaft nimmt zum Zeitpunkt t stets t als Wert an (D.A24).¹³

$$\text{D.A22} \quad \forall x, y, z, v \left[[I(x, y) \wedge Q_i(x) \wedge E(y) \wedge I(z, v) \wedge Q_j(z) \wedge O(v)] \Rightarrow \right. \\ \left. [\neg Q_j(x) \wedge \neg Q_i(z)] \right]$$

$$\text{D.A23} \quad \forall x, y \left[E(x) \Rightarrow \exists y \left[TQ(y) \wedge I(y, x) \right] \right]$$

$$\text{D.A24} \quad \forall x, y, t \left[[L(x, y, t) \wedge TQ(y)] \Rightarrow x = t \right]$$

Die Fundamentalontologie stellt einen Modellierungsrahmen für Domänen dar, in denen Objekte, Ereignisse, Eigenschaften etc. eine Rolle spielen. Diese Sicht auf die Welt verträgt sich mit dem Konsens, auf dem die Affordanz-Theorien aus Kapitel 3 beruhen. Tabelle B.1 fasst die Konzepte und Relationen, die durch DOLCE-CORE eingeführt werden, im Überblick zusammen.

4.2. Affordanz und Fähigkeit als Eigenschaften

Das Ziel dieses Abschnitts besteht darin, eine Konzeption von Affordanz und Fähigkeit als Eigenschaft im Sinne von DOLCE-CORE zu entwickeln. Insbesondere werden neue zentrale Konzepte eingeführt (vergleiche den unteren Teil von Abbildung 4.1) sowie eine neue primitive Relation cpl , mit der die Passung (»complementarity«) von Fähigkeiten und Affordanzen bezüglich Handlungstypen beschrieben wird.

DOLCE-CORE unterstützt drei Varianten, um Eigenschaften von Objekten zu beschreiben. Die erste Variante besteht darin, für jede Eigenschaft ein eigenes Prädikat einzuführen. Um zu beschreiben, dass ein Objekt (zu einem Zeitpunkt) eine Affordanz x besitzt, könnte ein Prädikat $HAS\text{-}x\text{-}AFFORDANCE$ eingeführt werden, und entsprechendes für Fähigkeiten. Ein Nachteil dieses Vorgangs besteht darin, dass die Menge der konkreten Affordanzen und Fähigkeiten, die für einen Anwendungsfall gebraucht werden, domänenspezifisch ist. Um ein Szenario zu modellieren müsste jedes Mal zunächst das Inventar an Prädikaten entsprechend erweitert werden. Hinzu kommt, dass so über Affordanzen und Fähigkeiten nicht quantifiziert werden könnte, und die Spezifikation allgemeiner, generischer Zusammenhänge zwischen Affordanzen und Fähigkeiten erschwert wäre.

Die nächste Möglichkeit besteht darin, Affordanzen und Fähigkeiten als Konzepte im Sinne von DOLCE-CORE zu modellieren. Dass ein Objekt o eine Affordanz x besitzt, könnte durch einen Fakt $CF(x, o, t)$ repräsentiert werden. Damit sind Affordanzen und Fähigkeiten Entitäten der Domäne. Das wäre durchaus ein gangbarer Weg.

¹³Axiome A46 und A45 in (Borgo & Masolo, 2009)

Die Dritte Variante besteht darin, Affordanzen und Fähigkeiten im Sinne der Eigenschaften und Eigenschafts-Werte bei DOLCE-CORE zu beschreiben. Ein Vorteil gegenüber den anderen Modellierungsvarianten besteht darin, dass einerseits davon geredet werden kann, dass zwei Objekte dieselbe Affordanz (auf Ebene der Fähigkeits-Werte) besitzen (zum Beispiel dass beide Objekte drückbar sind), und dass andererseits davon geredet werden kann, dass die Drückbarkeit des einen Objektes gerade durch eine bestimmte Handlung realisiert wird, während die Drückbarkeit des anderen Objektes nicht realisiert wird (Affordanz auf Ebene der Fähigkeiten).

Nachfolgend wird zur Modellierung von Affordanzen und Fähigkeiten die dritte Modellierungsvariante verfolgt. Um Affordanzen und Fähigkeiten als Eigenschaften von den Affordanz- und Fähigkeits-Werten abzugrenzen, die sie annehmen können, werden fortan in den Formeln Variablen, die über Affordanzen und Fähigkeiten als Eigenschaften quantifizieren (d.h. Instanzen von AFFORDANCE und ABILITY), als aff' bzw. ab' (mit Apostroph) geschrieben und Variablen, die über die Affordanz- und Fähigkeits-Werte quantifizieren (d.h. Instanzen von AFFORDANCE-VALUE und ABILITY-VALUE) als aff bzw. ab .

Es soll zunächst möglich sein, generelle Beziehungen zwischen Affordanz-Werten und Fähigkeits-Werten auszudrücken. Beispielsweise, dass Akteure, die fähig sind, Dinge zu heben, die 1 Kilo schwer sind, alle Dinge heben können, die 1 Kilo oder weniger schwer sind; oder dass Roboter, die über Euro-Stecker verfügen (was hier als Fähigkeit begriffen wird), sich an Steckdosen anschließen können, die für Euro-Stecker oder für Schuko-Stecker gemacht sind, während sich Roboter, die über Schuko-Stecker verfügen, nur an Schuko-Steckdosen anschließen können. Zu diesem Zweck wird die Relation CPL als primitive Relation der Affordanz-Konzeption eingeführt. $CPL(\phi, ab, aff)$ steht dafür, dass der Fähigkeits-Wert ab bezüglich des Handlungstypen ϕ mit dem Affordanz-Wert aff zusammenpasst; ab und aff heißen auch ϕ -komplementär. Axiom A.A1 schränkt die Interpretation von CPL entsprechend ein.

$$\text{A.A1} \quad \forall \phi, ab, aff [CPL(\phi, ab, aff) \Rightarrow [\text{ACTIVITY-TYPE}(\phi) \wedge \text{ABILITY-VALUE}(ab) \wedge \text{AFFORDANCE-VALUE}(aff)]]$$

Die mereologische Struktur der Partikulare in DOLCE-CORE (also der Umstand, dass Partikulare Teil von anderen Partikularen sein können) kann ausgenutzt werden um zu beschreiben, dass beispielsweise die Fähigkeit, 1 Kilo zu heben auch die Fähigkeit einschließt, 500 Gramm zu heben (etwa durch den Ausdruck $P(\text{canlift1kg}, \text{canlift500g})$), und dass Steckdosen, die das Einstöpseln von Schuko-Steckern ermöglichen, auch das Einstöpseln von Euro-

Steckern ermöglichen ($P(\text{schuko-fitting}, \text{euro-fitting})$). Aus diesen Überlegungen ist das Axiom **A.A2** motiviert. Es besagt, dass wenn ein Fähigkeits-Wert ab_2 und ein Affordanz-Wert aff_2 ϕ -komplementär sind, dann sind auch alle Fähigkeits- und Affordanz-Werte, von denen ab_2 oder aff_2 Teile sind, paarweise ϕ -komplementär.

$$\mathbf{A.A2} \quad \forall \phi, ab_1, aff_1 [\exists ab_2, aff_2 [\text{CPL}(\phi, ab_2, aff_2) \wedge P(ab_2, ab_1) \wedge P(aff_2, aff_1)] \Rightarrow \text{CPL}(\phi, ab_1, aff_1)]$$

Auf Basis von ϕ -Komplementarität definiert **A.D1** die Relation **AFFORDS**: Ein Objekt o affordiert genau dann zu einem Zeitpunkt t einem Akteur α einen Handlungstypen ϕ , falls dem Objekt o eine Affordanz inhärent ist und dem Akteur α eine Fähigkeit, so dass die Werte, die die Fähigkeit und die Affordanz zum Zeitpunkt t annehmen, ϕ -komplementär sind.

$$\mathbf{A.D1} \quad \forall o, \alpha, \phi, t [\text{AFFORDS}(o, \alpha, \phi, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists aff', ab', aff, ab [I(aff', o) \wedge I(ab', \alpha) \wedge L(aff', aff, t) \wedge L(ab', ab, t) \wedge \text{CPL}(\phi, ab, aff)]]$$

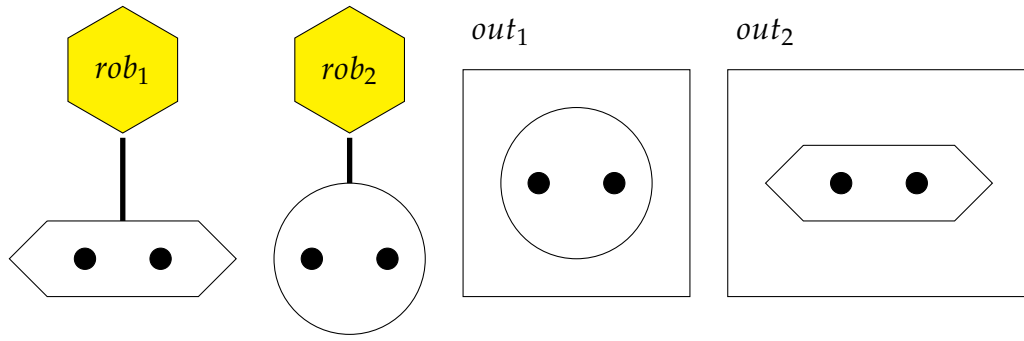
Als *Affordanten* sollen nun genau diejenigen Objekte bezeichnet werden, denen Affordanzen inhärent sind (**A.D2**), und die Objekte, denen eine Fähigkeit inhärent ist, heißen *Akteure* (**A.D3**). Durch bloßes Einsetzen in die Definition **A.D1** ergibt sich, dass es sich beim affordierenden Objekt um einen Affordanten handelt und beim Objekt, dem etwas affordiert wird, um einen Akteur. Es folgt aber nicht, dass jeder Affordant einem Akteur etwas affordieren muss: Es bleibt die Möglichkeit offen, dass ein Affordant Affordanzen besitzt, zu denen kein Akteur passende Fähigkeiten hat. Diese Konzeption entspricht der Perspektive, dass Affordanzen Ressourcen sind, die unabhängig von der Existenz von Akteuren »in der Welt« sind (vgl. Reed, 1996).

$$\mathbf{A.D2} \quad \forall o [\text{AFFORDANT}(o) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists aff' I(aff', o)]$$

$$\mathbf{A.D3} \quad \forall \alpha [\text{ACTANT}(\alpha) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists ab' I(ab', \alpha)]$$

Um zu demonstrieren, wie ein Modellierer eine konkrete Domäne aus der Affordanz-Perspektive beschreiben kann, ist ein Beispiel in Abbildung 4.2 dargestellt.

Der Zustand einer Domäne wird hier in Form von Fakten repräsentiert. Dabei werden Basis-Fakten (»Basic Facts«) von abgeleiteten Fakten (»Derived Facts«) unterschieden. Basis-Fakten sind diejenigen Fakten, die das informationsverarbeitende System repräsentiert haben muss, um weitere Fakten ab-



BASIC FACTS

AFFORDANCES (STATIC)

$P(\text{euro-fitting}, \text{schuko-fitting}).$
 $CPL(\text{plug}, \text{schuko-ready}, \text{schuko-fitting}). CPL(\text{plug}, \text{euro-ready}, \text{euro-fitting}).$
 $I(ab_1, rob_1). I(ab_2, rob_2). I(aff_1, out_1). I(aff_2, out_2).$

AFFORDANCES (DYNAMIC)

$L(ab_1, \text{euro-ready}). L(ab_2, \text{schuko-ready}).$
 $L(aff_1, \text{schuko-fitting}). L(aff_2, \text{euro-fitting}).$

DERIVED FACTS

$AFFORDANT(out_1). AFFORDANT(out_2). ACTANT(rob_1). ACTANT(rob_2).$
 $AFFORDS(\text{plug}, out_2, rob_1). AFFORDS(\text{plug}, out_1, rob_2).$
 $AFFORDS(\text{plug}, out_1, rob_1).$

Abbildung 4.2.: Exemplarische Domäne zur Modellierung von Affordanzen und Fähigkeiten. Die oberen Boxen beschreiben den Teil des Wissens, der in der Wissensbasis steht und den Zustand im Bild beschreibt. Die untere Box stellt das Wissen darüber dar, welche Affordanten welchen Akteuren zum betrachteten Zeitpunkt welche Arten von Handlungen affordieren (abgeleitet unter Nutzung von **A.D1** und **A.A2**).

leiten zu können.

Die Basis-Fakten gliedern sich in statische Basis-Fakten und dynamische Basis-Fakten. In der oberen Box in Abbildung 4.2 ist generelles Wissen über das Zusammenpassen von Affordanz- und Fähigkeitswerten repräsentiert. Der erste Eintrag repräsentiert, dass ein Roboter, der sich in Euro-Steckdosen anschließen kann, sich auch in Schuko-Steckdosen stecken kann. Man kann sich hier vorstellen, dass ein Roboter mit Euro-Stecker echt mehr kann als ein Roboter mit Schuko-Stecker, und dass eine Schuko-Steckdose echt mehr ermöglicht als eine Euro-Steckdose; daher die Teil-Von-Beziehungen. Explizit gegeben ist zudem, dass die Fähigkeit, sich in Schuko-Steckdosen zu stecken, Stecken-komplementär zu der Affordanz ist, Schuko-Stecker aufzunehmen;

entsprechendes gilt für Euro-Stecker. Diese Art generellen Wissens muss für eine Domäne nur einmalig spezifiziert werden, so dass festgehalten ist, welche Affordanz- und Fähigkeits-Werte relevant sind, und wie sie bezüglich der betrachteten Handlungstypen zusammenpassen. Diese Faktenmenge gehört zum unveränderlichen Bestandteil der Domänenbeschreibung.

Ebenso wie die CPL-Beziehungen sind auch die Inhärenz-Beziehungen zeitlich stabil: Der Roboter *rob₁* besitzt die Fähigkeit *ab₁*, der Roboter *rob₂* die Fähigkeit *ab₂*, die Steckdose *out₁* die Affordanz *aff₁* und die zweite Steckdose *out₂* die Affordanz *aff₂*. Die Eigenschaften sind fest mit ihren Trägern verbunden, aber die Werte, die die Eigenschaften annehmen können, sind zeit-variabel. Aus diesem Grund besitzt die Relation *L* ein Zeit-Argument.

An Stellen, an denen der zeitliche Verlauf nicht Fokus der Diskussion ist, werden in Darstellungen, die Faktenmengen enthalten, wie Abbildung 4.2, Schnappschüsse betrachtet, das heißt, konkrete Zustände, in denen sich die Domäne befindet. In diesen Fällen werden die Zeitargumente weggelassen.

Unter der ersten Box in Abbildung 4.2 findet sich also die Darstellung eines konkreten Zustands der abgebildeten Domäne, in dem der Roboter *rob₁* über einen Euro-Stecker verfügt und *rob₂* über einen Schuko-Stecker. Das wird dadurch modelliert, dass die Fähigkeit *ab₁* von *rob₁* zum betrachteten Zeitpunkt den Wert *euro-ready* hat, und die Fähigkeit *ab₂* von *rob₂* den Wert *schuko-ready*. Außerdem ist die Affordanz der Steckdose *out₁* mit Wert *schuko-fitting* und die Affordanz der Steckdose *out₂* mit Wert *euro-fitting* belegt.

Unter Verwendung der Definition **A.D2** und **A.D3** (S. 71) kann aus den gegebenen Fakten abgeleitet werden, dass *rob₁* und *rob₂* Akteure sind, und dass es sich bei den Steckdosen *out₁* und *out₂* um Affordanten handelt. Unter Verwendung der Definition **A.D1** (S. 71) ist zudem ableitbar, dass die Steckdose *out₂* dem Roboter *rob₁* und die Steckdose *out₁* dem Roboter *rob₂* Handlungen vom Typ *plug* affordieren. Unter zusätzlicher Berücksichtigung von Axiom **A.A2** (S. 71) ermöglicht auch Steckdose *out₁* dem Roboter *rob₁* das Einstöpseln.

4.3. Realisierung von Affordanzen durch transitive Handlungen

Affordanzen und Fähigkeiten kommt die Rolle notwendiger Vorbedingungen für Handlungen zu: Nur wenn die Steckdose dem Roboter das Einstecken afforziert, kann der Roboter sich an der Steckdose anschließen. Dieser Zusammenhang soll jetzt für eine Klasse von Handlungen charakterisiert werden, die hier als *transitive Handlungen* (T-ACTIVITY) bezeichnet werden. Transitive

Handlungen haben genau zwei Teilnehmer: einen Agenten, der die Handlung ausführt und einen zweiten Teilnehmer, der als Patiens der Handlung bezeichnet wird.¹⁴ Beispiele für Handlungen mit einer solchen Struktur sind: »Der Roboter (Agent) schließt sich an die Steckdose (Patiens) an«, »der Roboter (Agent) greift die Tasse (Patiens)«, »der Mensch (Agent) betrachtet das Gemälde (Patiens)«. Nicht zu den transitiven Handlungen gehören Handlungen, für die kein Patiens auszumachen ist, wie bei »der Mensch zählt bis 10« oder »der Roboter blinkt«. Es wirkte gezwungen, wollte man hier den Träger einer Affordanz ausmachen. Auch werden Handlungen ausgeschlossen, die eine komplexere Teilnehmerstruktur aufweisen, wie beispielsweise »der Roboter übergibt die Tasse an den Menschen«. Hierbei bilden Eigenschaften von Roboter, Tasse und Mensch ein Geflecht, das darüber entscheidet, ob die Handlung erfolgreich ausgeführt werden kann.

Für transitive Handlungen kann beobachtet werden, dass sie Affordanzen ihres Patiens realisieren und Fähigkeiten ihrer Agenten nutzen. Für diese beiden Rollen, die Affordanzen und Fähigkeiten für transitive Handlungen spielen, sind die zwei dreistellige Relationen `REALIZES` und `USES` vorgesehen. `REALIZES` ist eine Relation zwischen Handlungen (`T-ACTIVITY`) und Affordanzen (`AFFORDANCE`) zu Zeitpunkten (`TQ`) (**A.A3**), und `USES` zwischen Handlungen (`T-ACTIVITY`) und Fähigkeiten (`ABILITY`) zu Zeitpunkten (`TQ`) (**A.A4**). Zu jedem Zeitpunkt, zu dem eine transitive Handlung präsent ist, instantiiert sie einen Handlungstypen (**A.A5**), realisiert eine Affordanz (**A.A6**) und benutzt dafür eine Fähigkeit (**A.A7**).

$$\mathbf{A.A3} \quad \forall ac, aff', t [\text{REALIZES}(ac, aff', t) \Rightarrow [\text{ACTIVITY}(ac) \wedge \text{AFFORDANCE}(aff') \wedge \text{TQ}(t)]]$$

$$\mathbf{A.A4} \quad \forall ac, ab', t [\text{USES}(ac, ab', t) \Rightarrow [\text{ACTIVITY}(ac) \wedge \text{ABILITY}(ab') \wedge \text{TQ}(t)]]$$

$$\mathbf{A.A5} \quad \forall ac, t [[\text{T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{PRE}(ac, t)] \Rightarrow \exists \phi [\text{ACTIVITY-TYPE}(\phi) \wedge \text{CF}(\phi, ac, t)]]$$

$$\mathbf{A.A6} \quad \forall ac, t [[\text{T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{PRE}(ac, t)] \Rightarrow \exists aff' [\text{REALIZES}(ac, aff', t)]]$$

$$\mathbf{A.A7} \quad \forall ac, t [[\text{T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{PRE}(ac, t)] \Rightarrow \exists ab' [\text{USES}(ac, ab', t)]]$$

Wenn eine transitive Handlung eine Fähigkeit nutzt, dann ist der Träger dieser Fähigkeit auch Teilnehmer der transitiven Handlung (**A.A8**). Dasselbe gilt für den Träger der Affordanz, die die transitive Handlung realisiert

¹⁴Der Begriff »Patiens« ist der Linguistik entnommen, wo mit Patiens eine thematische Rolle bezeichnet ist. Der Patiens ist derjenige, mit dem eine Handlung etwas tut, während der Agens derjenige ist, der eine Handlung ausführt.

(A.A9).

$$\mathbf{A.A8} \quad \forall ac, ab', t [\text{USES}(ac, ab', t) \Rightarrow \forall \alpha [I(ab', \alpha) \Rightarrow \text{PC}(\alpha, ac, t)]]$$

$$\mathbf{A.A9} \quad \forall ac, aff', t [\text{REALIZES}(ac, aff', t) \Rightarrow \forall o [I(aff', o) \Rightarrow \text{PC}(o, ac, t)]]$$

Auf Basis von Realisierung von Affordanzen und Nutzung von Fähigkeiten definieren **A.D4** und **A.D5** die beiden Relationen **AGENT** und **PATIENT**: Agenten einer transitiven Handlung sind genau diejenigen Objekte, deren Fähigkeiten die Handlung nutzt; Patiens einer transitiven Handlung sind genau diejenigen Objekte, deren Affordanz durch die Handlung realisiert wird. Die beiden Relationen werden als Spezialisierungen von der Teilnahme-Relation **PC** verwendet (vergleiche Axiome **D.A17** bis **D.A21** auf Seite 68), das heißt, Patiens und Agent einer transitiven Handlungen sind auch ihre Teilnehmer.

$$\mathbf{A.D4} \quad \forall \alpha, ac, t [\text{AGENT}(\alpha, ac, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists ab' [\text{USES}(ac, ab', t) \wedge I(ab', \alpha) \wedge \text{PC}(\alpha, ac, t)]]$$

$$\mathbf{A.D5} \quad \forall o, ac, t [\text{PATIENT}(o, ac, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists aff' [\text{REALIZES}(ac, aff', t) \wedge I(aff', o) \wedge \text{PC}(o, ac, t)]]$$

Das Axiom **A.A10** stellt nun den Zusammenhang zwischen dem Typ einer transitiven Handlung und dem Verhältnis von realisierter Affordanz und benutzter Fähigkeit her: Jede transitive Handlung vom Typ ϕ realisiert eine Affordanz und nutzt eine Fähigkeit, deren Werte ϕ -komplementär sind. Weil jede Affordanz, die von einer transitiven Handlung realisiert wird, ihrem Patiens inhärent ist und jede genutzte Fähigkeit ihrem Agenten (**D.A7**, **A.D5**, **A.D4**), folgt mit **A.A10** und der Definition von **AFFORDS** (**A.D1**), dass an jeder transitiven Handlung vom Typ ϕ ein Agent und ein Patiens beteiligt sind, so dass der Patiens dem Agenten Handlungen vom Typ ϕ affordiert (**A.T1**). Dies kann als Vorbedingung für eine Handlung aufgefasst werden: Affordiert ein Affordant einem Akteur nicht ϕ -Handlungen, dann kann es auch keine ϕ -Handlungen geben, an denen der Affordant als Patiens und der Akteur als Agent teilnehmen.

$$\begin{aligned} \mathbf{A.A10} \quad \forall ac, \phi, t [& [\text{T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{CF}(\phi, ac, t)] \Rightarrow \\ & \exists ab', aff', ab, aff [\text{REALIZES}(ac, aff', t) \wedge \text{USES}(ac, ab', t) \wedge \\ & \text{L}(aff, aff', t) \wedge \text{L}(ab, ab', t) \wedge \text{CPL}(\phi, ab, aff)]] \end{aligned}$$

$$\mathbf{A.T1} \quad \forall ac, \phi, t [[\text{T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{CF}(\phi, ac, t)] \Rightarrow \exists o, \alpha [\text{AGENT}(\alpha, ac, t) \wedge \text{PATIENT}(o, ac, t) \wedge \text{AFFORDS}(o, \alpha, \phi, t)]]$$

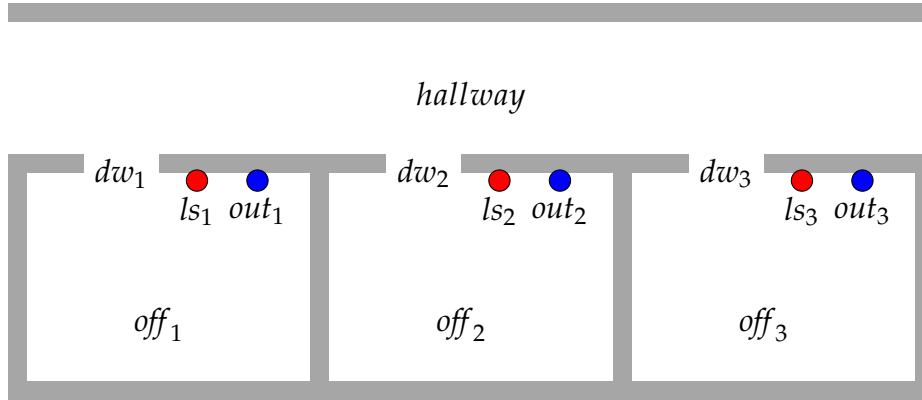


Abbildung 4.3.: Oben: Karte einer Büro-Umgebung. Drei Büros off_1, off_2, off_3 sind über den Flur *hallway* erreichbar. In den Büros befinden sich je eine Steckdose out_1, out_2, out_3 und ein Lichtschalter ls_1, ls_2, ls_3 . Die Büros sind über einen Türdurchgang dw_1, dw_2, dw_3 mit dem Flur verbunden.

Die Tabelle B.2 im Appendix fasst zusammen, welche Konzepte und Relationen bis hierher neu eingeführt wurden, um Affordanzen, Fähigkeiten, ihre Passung bezüglich Handlungstypen sowie ihre Rolle bei der Handlungsführung zu beschreiben.

4.4. Anwendung: Affordanzen bei der Aktionsplanung

In diesem Abschnitt zeigt ein Beispiel exemplarisch, wie eine Affordanz-basierte Domänenbeschreibung zur Aktionsplanung genutzt werden kann. Die Domäne ist anhand einer Karte in Abbildung 4.3 dargestellt, und ihre vollständige, formale Beschreibung findet sich im Anhang D.

Es gibt drei Büros, die jeweils über einen Türdurchgang mit einem Flur verbunden sind. In jedem Büro gibt es eine Steckdose und einen Lichtschalter. Der Roboter rob_1 soll einen Aktionsplan erstellen, an dessen Ende in jedem Büro das Licht ausgeschaltet ist. Initial brennt in jedem Büro das Licht.

Zunächst wird die Affordanz-basierte Beschreibung der Domäne in Abbildung 4.4 betrachtet. Das ist das Wissen, über das der Roboter über die Welt verfügt: Er weiß um die Lichtschalter ls_1, ls_2, ls_3 , die Steckdosen out_1, out_2, out_3 und die Türen dw_1, dw_2, dw_3 . Er weiß um ihre Affordanzen und die Affordanz-Werte, die sie gegenwärtig annehmen. Außerdem sind seine eigenen Fähigkeiten repräsentiert, wonach er Lichtschalter drücken kann (ab_1 mit Wert $ab-pr_1$), durch die Türen passt (ab_2 mit Wert $ab-wa_1$) und über einen Schuko-Stecker verfügt (ab_3 mit Wert $ab-pl_2$).

Mit der Definition von AFFORDS (A.D1) können die Fakten abgeleitet werden, die für die Aktionsplanung relevant sind: Welche Lichtschalter dem Roboter das Drücken affordieren, welche Steckdosen ihm das Anschließen affor-

BASIC FACTS

AFFORDANCES (STATIC)

$P(ab-pl_2, ab-pl_1). P(aff-pl_1, aff-pl_2).$
 $CPL(press, ab-pr_1, aff-pr_1). CPL(walk-through, ab-wa_1, aff-wa_1).$
 $CPL(plug, ab-pl_1, aff-pl_1). CPL(plug, ab-pl_2, aff-pl_2).$
 $I(ab_1, rob_1). I(ab_2, rob_1). I(ab_3, rob_1).$
 $I(aff_1, ls_1). I(aff_2, ls_2). I(aff_3, ls_3). I(aff_4, out_1). I(aff_5, out_2). I(aff_6, out_3).$
 $I(aff_7, dw_1). I(aff_8, dw_2). I(aff_8, dw_2). I(aff_9, dw_3).$

AFFORDANCES (DYNAMIC)

$L(ab_1, ab-pr_1). L(ab_2, ab-wa_1). L(ab_3, ab-pl_2).$
 $L(aff_1, aff-pr_1). L(aff_2, aff-pr_1). L(aff_3, aff-pr_1). L(aff_4, aff-pl_1). L(aff_5, aff-pl_1).$
 $L(aff_6, aff-pl_2). L(aff_7, aff-wa_1). L(aff_8, aff-wa_1). L(aff_9, aff-wa_1).$

DERIVED FACTS

$AFFORDANT(ls_1). AFFORDANT(ls_2). AFFORDANT(ls_3). AFFORDANT(out_1).$
 $AFFORDANT(out_2). AFFORDANT(out_3). AFFORDANT(dw_1). AFFORDANT(dw_2).$
 $AFFORDANT(dw_3). ACTANT(rob_1)$
 $AFFORDS(press, ls_1, rob_1). AFFORDS(press, ls_2, rob_1). AFFORDS(press, ls_3, rob_1).$
 $AFFORDS(walk-through, dw_1, rob_1). AFFORDS(walk-through, dw_2, rob_1).$
 $AFFORDS(walk-through, dw_3, rob_1). AFFORDS(plug, out_1, rob_1).$
 $AFFORDS(plug, out_2, rob_1). AFFORDS(plug, out_3, rob_1).$

Abbildung 4.4.: Die erste Box enthält generelle Fakten über das Zusammenpassen von Affordanz-Werten und Fähigkeits-Werten. *ab-pl1*: Fähigkeits-Wert für »sich an Euro-Steckdosen anschließen zu können«; *ab-pl2*: Fähigkeits-Wert, für »sich an Schuko-Steckdosen anschließen zu können«; *ab-pr1*: Fähigkeits-Wert, für »Lichtschalter drücken zu können«; *ab-wa1*: Fähigkeits-Wert, für »durch die Türen fahren zu können«; *aff-pl1*, *aff-pr1*, *aff-wa1* stehen für die entsprechenden Affordanz-Werte. Darüber hinaus sind Fakten über die Affordanzen und Fähigkeiten als Eigenschaften des Roboters, der Lichtschalter, der Steckdosen und der Türen angegeben. Die unterste Box enthält die abgeleiteten AFFORDS-Fakten.

dieren, und welche Türen ihm das Durchfahren affordieren..

Listing 4.1 stellt exemplarisch die PDDL-Beschreibung des Operators zum Anschließen an eine Steckdose dar. Der Affordant (die Steckdose) muss dem Agenten der Handlung (der hier implizit derjenige Akteur ist, der seine Handlungen plant), Handlungen vom Typ *plug* ermöglichen. Außerdem muss sich der Akteur in der Nähe des Affordanten befinden.

So wie der Operator in Listing 4.1 sind auch die anderen Operatoren spezifiziert: Der Affordant, an dem die Handlung ausgeführt werden soll, muss dem Roboter auch tatsächlich Handlungen dieses Typs affordiert. Neben dieser Anforderung müssen Roboter und Affordant zudem in derselben Region

```
(:action plug
:parameters (?a – affordant)
:precondition (and (affords ?a plug)
  (exists (?r – region)
    (and (robot-at ?r) (affordant-at ?a ?r)))
  (> (battery-status) 0))
:effect
  (assign (battery-status) (battery-capacity))))
```

Listing 4.1: PDDL-Spezifikation des Aktionsoperators zum Anschließen an eine Steckdose.

sein. Hier ist also bereits angelegt, dass der Roboter relativ zum Affordanten platziert sein muss, also eine räumliche Vorbedingung, die über das Affordieren hinausgeht. (Dieser Aspekt wird im nächsten Kapitel detaillierter ausgearbeitet.) Eine vollständige Beschreibung der Aktionsoperatoren findet sich im Anhang D.

Die drei Aktionen Lichtschalter drücken (*press*), an Steckdose anschließen (*plug*) und durch Tür gehen (*walk-through*) haben jeweils einen senkenden Effekt auf den Batteriestatus des Roboters. Initial reicht der Strom noch für zwei Aktionen. Da der Roboter also mit seinem Batteriestatus nicht alle drei Lichtschalter drücken kann, fügt der Planer eine Auflade-Aktion hinzu. Allerdings ist nur die Steckdose im Büro *off*₃ vom Typ Schuko, während die anderen beiden Steckdosen vom Euro-Typ sind und somit dem Roboter keine Auflade-Handlungen ermöglichen. Der ausgegebene Plan sieht deshalb vor, dass der Roboter zunächst in das Büro *off*₃ fährt, sich dort an die Steckdose anschließt (wonach er wieder voll aufgeladen ist) und dann den Schalter im Büro drückt (wonach im Büro das Licht aus ist). Anschließend schaltet der Roboter die Lichter im zweiten und im ersten Büro aus, so dass der Zielzustand erreicht ist.

Unter Verwendung eines symbolischen Aktionsplaners (z.B. Hoffmann & Nebel, 2001) kann auf Basis der PDDL-Spezifikationen (Anhang D), die wiederum aus der Affordanz-basierten Beschreibung der Domäne abgeleitet wurde, folgender Aktionsplan generiert werden:

$$\begin{aligned}
 & \text{walk-through } dw_3 \Rightarrow \text{plug } out_3 \Rightarrow \text{press } ls_3 \\
 & \Rightarrow \text{walk-through } dw_3 \Rightarrow \text{walk-through } dw_2 \Rightarrow \text{press } ls_2 \\
 & \Rightarrow \text{walk-through } dw_2 \Rightarrow \text{walk-through } dw_1 \Rightarrow \text{press } ls_1
 \end{aligned}$$

Das Beispiel zeigt, wie aus dem grundsätzlichen Wissen über Affordanzen und Fähigkeiten Fakten über Affordieren-Beziehungen abgeleitet werden

können, die wiederum nützlich sind, um den initialen Zustand für ein Planungsproblem zu beschreiben. Das Planungsverfahren selbst braucht über Affordanzen und Fähigkeiten und ihre ϕ -Komplementaritäten nicht mehr zu rasonieren. Insbesondere muss das Zusammenpassen von Affordanzen und Fähigkeiten nicht als Teil der Aktions-Vorbedingungen aufwändig modelliert werden. Es können auch völlig neuartige Stecker-Sorten eingefügt werden, ohne irgendetwas an der Planbeschreibung zu ändern.

Ändern sich die Eigenschaften der Objekte oder des Roboters, oder soll ein Plan für einen anderen Roboter (etwa einen, der über einen Euro-Stecker verfügt) geplant werden, so führt das lediglich zu anderen AFFORDS-Fakten in der Zustandsbeschreibung, während alles andere wiederverwendet werden kann. Somit kann die hier dargestellte Affordanz-Konzeption—ähnlich zu der Verwendung von Affordanzen bei Lörken und Hertzberg (2008)—zum Design wiederverwendbarer Planungs-Operatoren verwendet werden.

Im nächsten Kapitel wird die Konzeption um den Affordanzraum erweitert, mit dem es möglich ist, über den räumlichen Aspekt der Platzierung einer Handlungen relativ zu einem Affordanten zu reden. Im Allgemeinen wird es viele mögliche Platzierungen für das Anschließen an die Steckdose geben oder für das Drücken eines Lichtschalters, d.h. aus unterschiedlichen Winkeln und Abständen zum Affordanten; Affordanzräume erlauben es, diese Unterschiede zu beschreiben.

Darauf aufbauend werden in Kapiteln 6 und 7 soziale Räume eingeführt sowie eine Konzeption von Gründen, die dafür oder dagegen sprechen, manche Affordanzräume anderen Affordanzräumen vorzuziehen.

KAPITEL 5

Affordanzraum

Damit eine transitive Handlung eines Typs ϕ erfolgreich ausgeführt wird, ist es notwendig, dass der Patiens der Handlung dem Agenten der Handlung ϕ -Handlungen affordiert. Zusätzlich muss geeigneter Raum für die Handlung zur Verfügung stehen. Die Konzeption von Affordanzen als Eigenschaften, wie sie im vorangegangenen Kapitel entworfen wird, wird in diesem Kapitel um diesen Raumaspekt erweitert. Der Raum, der von einer transitiven Handlung benötigt wird, um eine Affordanz erfolgreich zu realisieren, heißt »Affordanzraum«.

Es gibt mehrere Alternativen, Affordanzräume ontologisch einzuordnen. Eine Möglichkeit besteht darin, einen einzigen absoluten physikalischen Raum anzunehmen, in dem all die Akteure, Affordanten und Affordanzräume enthalten sind. Je nachdem, wie die Affordanten in diesem absoluten Raum verortet sind, können manche Regionen des absoluten Raumes für Handlungen genutzt werden und sind somit Regionen eines Affordanzraumes. Angenommen, dass eine Tasse einem Roboter ermöglicht, sie zu greifen. Zu einem Zeitpunkt steht die Tasse auf der linken Ecke eines Tisches. Es gibt dann in der Nähe der linken Ecke des Tisches eine Region, die der Roboter nutzen kann, um die Tasse zu greifen. Zu einem späteren Zeitpunkt wird die Tasse von der linken Ecke des Tisches auf die rechte Ecke des Tisches umgestellt. Unter der Annahme eines einzigen absoluten physikalischen Raumes ist es nun eine andere Region, die der Roboter nutzen kann, um die Tasse zu greifen. Damit ist die Relation zwischen Affordanzraum und seiner räumlichen Ausprägung zeit-abhängig.

Eine alternative Sichtweise besteht darin, dass Regionen Objekten zugeordnet werden können und sich mit diesen Objekten durch den Raum bewegen. Relativ zur Tasse existieren also Regionen, die sich relativ zur Tasse durch

den Raum bewegen. Rückt die Tasse von der linken zur rechten Ecke des Tisches, dann rücken auch ihre Regionen mit. So wäre es zu beiden Zeitpunkten dieselbe Region (relativ zur Tasse), die der Roboter zum Greifen der Tasse nutzen kann. Eine Ontologie, die diese Perspektive auf Raum und Bewegung einnimmt, ist die Basic-Place-Theory von Donnelly (2005).

Die Art und Weise, mit der über soziale Räume geredet wird, insbesondere über persönlichen Raum, legt eine Raumontologie nach der Basic-Place-Theory nahe. Sommer (1969, S. 27) beispielsweise beschreibt den persönlichen Raum als »portable territory since the individual carries it with him wherever he goes«. Eine Raumontologie, die Regionen relativ zu Objekten verortet, vermag einen persönlichen Raum nahe an Sommers Formulierung als einen Komplex von Regionen zu beschreiben, der sich relativ zu einem Menschen stabil anordnet und sich mit dem Menschen durch den Raum bewegt. Kapitel 6 wird zeigen, dass diese Raumontologie auch für die anderen Typen sozialer Räume eine gute Basis ist.

Zur qualitativen Beschreibung von Affordanzräumen, ihrer inneren topologischen Struktur und den räumlichen Beziehungen, in denen sie zueinander stehen können, führt Abschnitt 5.1 die Basic-Place-Theory ein. Abschnitt 5.2 charakterisiert Affordanzraum mit Hilfe der Basic-Place-Theory. Abschnitt 5.3 führt das Konzept des Platz-Kandidaten ein, mit dessen Hilfe der funktionale Teil des sozialen Handlungsplatzierungsproblems gelöst werden kann, wie Abschnitt 5.5 exemplarisch demonstriert.

Die Axiome, Definitionen und Theoreme der Basic-Place-Theory werden im Namensraum **B** eingeordnet, diejenigen, die spezifisch für Affordanzräume sind, in den Namensraum **A**.

5.1. Donnellys Basic-Place-Theory

Die Basic-Place-Theory nach Donnelly (2005) ist eine Theorie, mit der sich zeit-veränderliche Relationen zwischen Regionen beschreiben lassen, die wiederum relativ zu Objekten verortet sind. So ist zum Beispiel die Vorderseite meines Schreibtisches eine Region, die relativ zum Schreibtisch verortet ist: Bewegt sich der Schreibtisch, so bewegt sich auch die Vorderseite des Schreibtisches entsprechend. Der rechten Hälfte des Schreibtisch ergeht es ebenso. Die Vorderseite des Schreibtisches und die rechte Seite des Schreibtisches sind relativ zum selben Objekt verortet. Der Schreibtisch ist ihrer beider »Referenzobjekt« (Donnelly, 2005). Die maximale Menge aller Regionen, die dasselbe Referenzobjekt haben, heißt »Lokationenkomplex« (Donnelly, 2005).

Eine terminologische Vorbemerkung an dieser Stelle: Donnelly (2005) ver-

meidet in ihrem Text den Terminus »Region« und zieht stattdessen »Ort« (»place«) vor. Tatsächlich sind die Regionen der Basic-Place-Theory nicht mit den Regionen der Werte-Räume aus DOLCE-CORE zu verwechseln. Wenn nachfolgend von Regionen die Rede ist, dann sind immer Ort im Sinne der Basic-Place-Theory gemeint. Der Hauptgrund, bei dem Terminus »Region« zu verbleiben, besteht darin, dass die Verwendung konsistent zu den Vorarbeiten in (Lindner & Eschenbach, 2011, 2013) ist. Außerdem trägt »Ort« eine Konnotation, die nicht unbedingt auf jeden Affordanzraum passt, da Orten gewöhnlich Bedeutungen zugeschrieben werden, z.B. historische oder soziale Bedeutungen, die Affordanzräume nicht unbedingt besitzen. In den Formeln wird für die Regionen der Basic-Place-Theory das Prädikatsymbol $\text{REGION}_{\text{BPT}}$ gebraucht.

5.1.1. Zeit-abhängige Relationen zwischen Regionen

Als primitive zeit-abhängige Relation zwischen Regionen fungiert in der Basic-Place-Theory die Relation MT (»meets«). $\text{MT}(r_1, r_2, t)$ steht dafür, dass sich zum Zeitpunkt t die Regionen r_1 und r_2 *berühren*. MT ist zu jedem Zeitpunkt reflexiv (**B.A1**) und symmetrisch (**B.A2**).¹ Das Axiom **B.A3** schränkt die Interpretation von MT derart ein, dass nur Regionen im Sinne der Basic-Place-Theory in der MT-Relation stehen.²

$$\mathbf{B.A1} \quad \forall r_1, r_2 [\text{MT}(r_1, r_2) \Rightarrow \text{MT}(r_2, r_1)]$$

$$\mathbf{B.A2} \quad \forall r [\text{MT}(r, r)]$$

$$\mathbf{B.A3} \quad \forall r_1, r_2, t [\text{MT}(r_1, r_2, t) \Rightarrow [\text{TQ}(t) \wedge \text{REGION}_{\text{BPT}}(r_1) \wedge \text{REGION}_{\text{BPT}}(r_2)]]$$

Mittels MT definiert Donnelly (2005) weitere zeit-abhängige Relationen, mit denen die relative Lage von Regionen zu einem Zeitpunkt beschrieben werden kann: Region r_1 wird genau dann von einer Region r_2 zu einem Zeitpunkt t *überdeckt* (»covered by«), wenn jede Region, die r_1 berührt, auch Region r_2 berührt (**B.D1**). Zwei Regionen r_1 und r_2 sind genau dann *exakt koinzident* (»exactly coincident«), wenn sie genau dieselben Regionen berühren (**B.D2**). Zwei Regionen sind genau dann *partiell koinzident* (»partially coincident«) zu einem Zeitpunkt t , wenn es eine Region r_3 gibt, die von beiden Regionen

¹vgl. Axiome A1 und A2 in (Donnelly, 2005)

²In der sortierten Logik von Donnelly (2005) ist dieses Axiom nicht nötig.

überdeckt wird (**B.D3**).³

$$\mathbf{B.D1} \quad \forall t, r_1, r_2 [\text{COV}(r_1, r_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{REGION}_{\text{BPT}}(r_1) \wedge \text{REGION}_{\text{BPT}}(r_2) \wedge \forall r_3 [\text{MT}(r_3, r_1, t) \Rightarrow \text{MT}(r_3, r_2, t)]]]$$

$$\mathbf{B.D2} \quad \forall t, r_1, r_2 [\text{ECOIN}(r_1, r_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{REGION}_{\text{BPT}}(r_1) \wedge \text{REGION}_{\text{BPT}}(r_2) \wedge \forall r_3 [\text{MT}(r_3, r_1, t) \Leftrightarrow \text{MT}(r_3, r_2, t)]]]$$

$$\mathbf{B.D3} \quad \forall t, r_1, r_2 [\text{PCOIN}(r_1, r_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_3 [\text{COV}(r_3, r_1, t) \wedge \text{COV}(r_3, r_2, t)]]]$$

Donnelly (2005) nutzt diese vier Relationen auch, um die zeit-abhängige, relative Lage von Objekten und Regionen und von Objekten zueinander zu beschreiben. Um die Lage von Objekten relativ zu Regionen zu beschreiben, werde ich vier Prädikate MT^o , COV^o , ECOIN^o , PCOIN^o nutzen. $\text{MT}^o(o, r, t)$ steht dafür, dass jede Region, die das Objekt o zu t exakt ausfüllt, die Region r zu t berührt, $\text{COV}^o(o, r, t)$ dafür, dass jede Region, die das Objekt o zu t exakt ausfüllt, von r zu t überdeckt wird, etc.

5.1.2. Referenzobjekte und relativ fixierte Regionen

Eingangs wurde bereits erwähnt, dass Regionen Referenzobjekten zuordenbar sind, wie zum Beispiel die Vorderseite meines Schreibtisches (Region) dem Schreibtisch (Objekt). Die Menge aller Regionen, die demselben Referenzobjekt zugeordnet sind, nennt Donnelly (2005) einen Lokationenkomplex. Zwei Regionen, die sich im selben Lokationenkomplex befinden, heißen *relativ fixiert* (RF). Die Relation RF von Donnelly auf Basis der Relation RO definiert. $\text{RO}(o, r)$ steht dafür, dass das Objekt o Referenzobjekt der Region r ist. Axiom **B.A4** formuliert die entsprechenden Sorten-Restriktionen. Axiome **B.A5** und **B.A6** fordern, dass es mindestens eine Region gibt, die einem Referenzobjekt zugeordnet ist und dass sich Regionen, die sich ein Referenzobjekt teilen, alle Referenzobjekte gemeinsam haben.⁴ Schließlich definiert **B.D4**, dass zwei Regionen genau dann relativ fixiert sind, wenn sie entweder einem gemeinsamen Referenzobjekt zugeordnet sind, oder wenn keine der beiden Regionen irgendeinem Referenzobjekt zugeordnet ist.⁵

$$\mathbf{B.A4} \quad \forall o, r [\text{RO}(o, r) \Rightarrow [O(o) \wedge \text{REGION}_{\text{BPT}}(r)]]$$

$$\mathbf{B.A5} \quad \exists o, r [\text{RO}(o, r)]$$

³vgl. Axiome D1 bis D3 in (Donnelly, 2005); Axiom D4 führt ABUT als fünfte zeit-abhängige Relation ein, die hier bei der Beschreibung von Affordanzräumen aber nicht benötigt wird.

⁴vgl. Axiome A4 und A5 in (Donnelly, 2005)

⁵vgl. Definition D7 in (Donnelly, 2005); Regionen, die keinem Referenzobjekt zugeordnet sind, bilden in der Basic-Place-Theory den absoluten Raum.

$$\mathbf{B.A6} \quad \forall o_1, r_1, r_2 \left[[\text{RO}(o_1, r_1) \wedge \text{RO}(o_1, r_2)] \Rightarrow \forall o_2 [\text{RO}(o_2, r_1) \Leftrightarrow \text{RO}(o_2, r_2)] \right]$$

$$\mathbf{B.D4} \quad \forall r_1, r_2 \left[\text{RF}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{REGION}_{\text{BPT}}(r_2) \wedge \text{REGION}_{\text{BPT}}(r_2) \wedge \right. \\ \left. [\exists o [\text{RO}(o, r_1) \wedge \text{RO}(o, r_2)] \vee \forall o [\neg \text{RO}(o, r_1) \wedge \neg \text{RO}(o, r_2)]]] \right]$$

Mit **B.D4** im Zusammenspiel mit **B.A6** ergibt sich, dass **RF** eine Äquivalenzrelation auf der Menge der Regionen ist. Jede **RF**-Äquivalenzklasse entspricht einem Lokationenkomplex. Zusätzliche Axiome der Basic-Place-Theory stellen sicher, dass sich relativ fixierte Regionen in einem topologisch stabilen Gefüge befinden.

Überdeckt eine Region r_2 eine Region r_1 zum Zeitpunkt t , dann gibt es eine Region r_3 , die relativ fixiert zur Region r_2 ist und zum Zeitpunkt t exakt mit Region r_1 koinzidiert (**B.A7**). Wenn zwei Regionen relativ fixiert sind und einander zu einem Zeitpunkt berühren, dann berühren sie einander zu jedem Zeitpunkt (**B.A8**). Und wenn eine Region von einer zu ihr relativ fixierten Region überdeckt wird, dann wird sie auch immer von ihr überdeckt (**B.A9**).⁶

Außerdem nehmen Referenzobjekte eine feste Position innerhalb ihres Regionenkomplexes ein. Wenn ein Objekt o Referenzobjekt einer Region r ist, dann gibt es eine zu r relativ fixierte Region, die zu jedem Zeitpunkt mit dem Referenzobjekt exakt koinzidiert (**B.A10**).⁷

$$\mathbf{B.A7} \quad \forall t, r_1, r_2 [\text{COV}(t, r_1, r_2) \Rightarrow \exists r_3 [\text{RF}(r_2, r_3) \wedge \text{ECOIN}(t, r_1, r_3)]]$$

$$\mathbf{B.A8} \quad \forall r_1, r_2 [\text{RF}(r_1, r_2) \Rightarrow \exists t [\text{MT}(t, r_1, r_2)] \Rightarrow \forall t [\text{MT}(t, r_1, r_2)]]$$

$$\mathbf{B.A9} \quad \forall r_1, r_2 [\text{RF}(r_1, r_2) \Rightarrow \exists t [\text{COV}(t, r_1, r_2)] \Rightarrow \forall t [\text{COV}(t, r_1, r_2)]]$$

$$\mathbf{B.A10} \quad \forall o, r_1 [\text{RO}(o, r_1) \Rightarrow \exists r_2 [\text{RF}(r_1, r_2) \wedge \forall t [\text{ECOIN}^o(t, o, r_2)]]]$$

5.1.3. Zeit-unabhängige Relationen zwischen Regionen

Die eingeführten zeit-abhängigen Relationen zwischen Regionen werden verwendet, um räumliche Relationen zu bestimmten Zeitpunkten zu beschreiben. So wird die Vorderseite meines Schreibtisches derzeit von meinem Büro überdeckt und nicht von meinem Flur. Wird der Schreibtisch allerdings vom Büro in den Flur getragen, so verändern sich die Verhältnisse. Hingegen aber verändern sich die räumlichen Relationen zwischen der Vorderseite und der Hinterseite des Schreibtisches nicht—ganz egal, wie man den Tisch dreht und wendet.

In der Basic-Place-Theory werden diese zeitlich stabilen Beziehungen, in denen die Regionen eines Lokationenkomplexes zueinander stehen, durch me-

⁶vgl. Axiome A7, A8 und A9 in (Donnelly, 2005)

⁷vgl. Axiom A6 in (Donnelly, 2005); mit dem Unterschied, dass A6 **ECOIN** und **B.A10** **ECOIN**^o verwendet (siehe dazu Anmerkungen in Abschnitt 5.1.1)

reotopologische Relationen beschrieben, wie »Teil-von«, »Überlappung« und »Verbundenheit«. Donnelly (2005) definiert diese zeit-unabhängigen räumlichen Relationen auf Basis der zeit-abhängigen Relationen. Weil sich diese Definitionen von den Definitionen der mereologischen Prädikate unterscheiden, die in DOLCE-CORE definiert werden, werden hier die mereologischen Prädikate der Basic-Place-Theory jeweils mit dem Zusatz BPT benannt.

Eine Region r_1 ist genau dann *Teil von* (»part of«) Region r_2 , wenn r_1 und r_2 relativ fixiert sind und zu jedem Zeitpunkt t die Region r_1 von der Region r_2 überdeckt wird (B.D5). Zwei Regionen *überlappen* (»overlap«) sich genau dann, wenn sie eine gemeinsame Teilregion haben (B.D6). Zwei Regionen sind genau dann miteinander *verbunden* (»connected«), wenn sie relativ fixiert sind und einander zu jedem Zeitpunkt berühren (B.D7).⁸ Für die Beschreibung der topologischen Struktur von Affordanzräumen ist zudem die mereologische Summe von Regionen nützlich. Die Region r_1 ist genau dann die mereologische Summe der Regionen r_2 und r_3 , wenn r_1 genau diejenigen Regionen überlappt, die r_2 oder r_3 überlappen (B.D8). Wegen der Reflexivität von $\circ$ und der Definition (B.D6) gilt, dass, soweit die Summe zweier Regionen existiert, die beiden Regionen und die Summe relativ fixiert sind.⁹ Es wird auch »+« als Abkürzung von SUM verwendet, so dass beispielsweise $\text{SUM}(r + r', r, r')$ gilt.

$$\text{B.D5} \quad \forall r_1, r_2 [\text{P}_{\text{BTP}}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} \text{RF}(r_1, r_2) \wedge \forall t [\text{COV}(t, r_1, r_2)]]$$

$$\text{B.D6} \quad \forall r_1, r_2 [\text{O}_{\text{BTP}}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{RF}(r_1, r_2) \wedge \forall t [\text{PCOIN}(r_1, r_2, t)]]]$$

$$\text{B.D7} \quad \forall r_1, r_2 [\text{C}_{\text{BTP}}(r_1, r_2) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{RF}(r_1, r_2) \wedge \forall t [\text{MT}(t, r_1, r_2)]]]$$

$$\text{B.D8} \quad \forall r_1, r_2, r_3 [\text{SUM}(r_1, r_2, r_3) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall r_4 [\text{O}_{\text{BTP}}(r_4, r_1) \Leftrightarrow [\text{O}_{\text{BTP}}(r_4, r_2) \vee \text{O}_{\text{BTP}}(r_4, r_3)]]]$$

Die Tabelle B.3 im Anhang führt die Konzepte und Relationen auf, die durch die Basic-Place-Theory neu hinzukommen.

5.2. Charakterisierung von Affordanzräumen

Unter Verwendung der Basic-Place-Theory wird die räumliche Struktur von Affordanzräumen formal charakterisiert werden. Diese Charakterisierung orientiert sich an dem Modell von Kendon (1990), nach dem Handlungen räumlich verortet sind. Nach diesem Modell gibt es stets eine Region, in der der

⁸vgl. Definitionen D8, D9 und D10 in (Donnelly, 2005)

⁹Weitere Axiome in (Donnelly, 2005) stellen sicher, dass für alle relativ fixierten Regionen Summen existieren und dass Summen eindeutig sind.

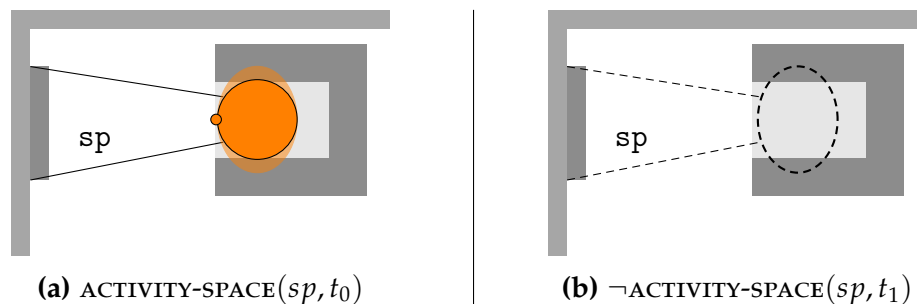


Abbildung 5.1: Ein Affordanzraum sp kann genutzt werden, um fernzusehen. Die (potentielle) Agentenregion von sp befindet sich auf dem Sofa, die (potentielle) Transaktionsregion erstreckt sich zwischen dem Sofa und dem Fernseher. a) Der Affordanzraum sp wird zum Zeitpunkt t_0 genutzt und ist somit ein Aktivitätsraum. b) Zum Zeitpunkt t_1 ist der Affordanzraum sp ungenutzt und somit kein Aktivitätsraum.

Agent der Handlung verortet ist. Diese Region nenne ich »Agentenregion«. Zudem gibt es eine Region, die für die Handlungsausführung zusätzlich benötigt wird. Kendon spricht hier vom »transactional segment« (Kendon, 1990, S. 211), in das der Agent der Handlung blickt, spricht und das er für die Manipulation von Objekten nutzt. Ich nenne diese Region »Transaktionsregion«.

Wenn also der räumliche Bedarf einer Handlung in eine Agentenregion und eine Transaktionsregion strukturiert ist, dann existiert zu einer potentiellen Handlung auch eine potentielle Agentenregion und eine potentielle Transaktionsregion—eben gerade diejenigen Regionen, die zur Agentenregion und Transaktionsregion einer Handlung werden. Die potentielle Agentenregion ist die Region, die während der Nutzung des Affordanzraumes durch den Agenten der Handlung selbst ausgefüllt wird. Die potentielle Transaktionsregion kann sich über die potentielle Agentenregion hinaus erstrecken. Im Falle des Betrachtens einer Sache (z.B. beim Fernsehen oder beim Betrachten eines Bildes) wird durch die Handlung mehr Raum beansprucht als durch den Betrachter selbst ausgefüllt ist (der Raum zwischen dem Betrachter und dem Betrachteten). Diesen beiden Regionen des Affordanzraumes füge ich die Affordantenregion als dritte grundlegende Affordanzraum-Region hinzu. Die Affordantenregion ist die Region, die von dem Affordanten während der Handlung ausgefüllt wird und im Falle der Nutzung eines Affordanzraumes zur Patiensregion wird, also zu jener Region, die von dem Patiens der Handlung eingenommen wird (vgl. Abschnitt 4.3, in dem die Teilnehmerstruktur transitiver Handlungen eingeführt wird).

Abbildung 5.1 stellt den Zusammenhang zwischen Aktivitätsraum nach Kendon (1990) und dem aus ihm abgeleiteten Affordanzraum dar. Sofern ein Affordanzraum genutzt wird, wird er zum Aktivitätsraum, der sich in Agen-

tenregion, Transaktionsregion und Patiensregion räumlich strukturiert. Wird die Handlung beendet, bleibt der Affordanzraum als potentieller Aktivitätsraum zurück, der sich als potentielle Agentenregion, potentielle Transaktionsregion und Affordantenregion räumlich strukturiert. Ein Affordanzraum spielt also zu manchen Zeitpunkten die Rolle eines Aktivitätsraumes und so spielen auch potentielle Agentenregionen zu manchen Zeitpunkten die Rolle von Agentenregionen etc. Eine potentielle Agentenregion ist also nicht etwa eine »potentielle« Region, die nur dann existiert, wenn sie ein Agent für eine Handlungsausführung nutzt. Eine potentielle Agentenregion ist eine tatsächliche Region relativ zum Affordanten einer Handlung (hier: relativ zum Fernseher), die im Falle, dass ein Agent sie zur Handlungsausführung nutzt, zur Agentenregion wird.

5.2.1. Räumliche Struktur von Affordanzräumen

Entsprechend der bisherigen Darstellung fordert Axiom **A.A11**, dass Affordanzräume über eine potentielle Agentenregion (P-AGENT-REG), über eine potentielle Transaktionsregion (P-TRANS-REG) und über eine Affordantenregion (AFFORDANT-REG) verfügen. Über die räumlichen Relationen dieser Regionen lässt sich sagen, dass die potentielle Transaktionsregion eines Affordanzraumes immer mit der potentiellen Agentenregion und mit der Affordantenregion desselben Affordanzraumes verbunden ist. Die potentielle Transaktionsregion bildet das Bindeglied zwischen Agenten und Affordanten. Es gibt Handlungen, wie das Betrachten eines Objektes, die die potentielle Transaktionsregion frei lassen. Im Falle anderer Handlungen, wie ein Greifen einer Tasse oder ein Bedienen eines Berührungsbildschirmes, überlappt die potentielle Agentenregion mit der potentiellen Transaktionsregion. Das Axiom **A.A12** fordert, dass die potentielle Agentenregion, die potentielle Transaktionsregion und die Affordantenregion eines Affordanzraumes miteinander verbunden sind.

$$\mathbf{A.A11} \quad \forall sp \left[\text{AFFORDANCE-SPACE}(sp) \Rightarrow \exists r_1, r_2, r_3 \left[\text{P-AGENT-REG}(sp, r_1) \wedge \right. \right. \\ \left. \left. \text{P-TRANS-REG}(sp, r_2) \wedge \text{AFFORDANT-REG}(sp, r_3) \right] \right]$$

$$\mathbf{A.A12} \quad \forall sp, r_1, r_2, r_3 \left[\left[\text{P-AGENT-REG}(sp, r_1) \wedge \text{P-TRANS-REG}(sp, r_2) \wedge \right. \right. \\ \left. \left. \text{AFFORDANT-REG}(sp, r_3) \right] \Rightarrow \left[\text{C}_{\text{BTP}}(r_1, r_2) \wedge \text{C}_{\text{BTP}}(r_1, r_3) \right] \right]$$

Bezüglich der Eindeutigkeit der Zuordnung von potentiellen Agentenregionen, potentiellen Transaktionsregionen und Affordantenregionen zu Affordanzräumen wird davon ausgegangen, dass jeder Affordanzraum über ge-

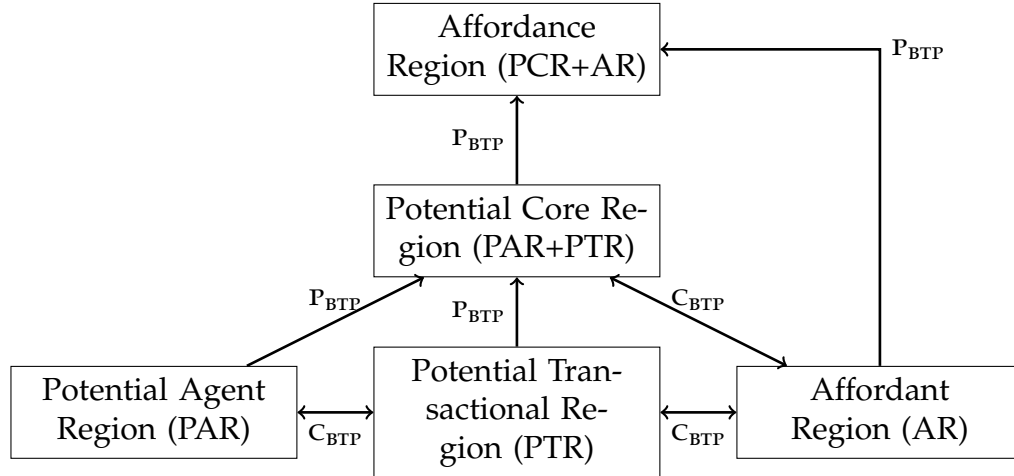


Abbildung 5.2.: Die Affordanzraum-Regionen eines Affordanzraumes: Die Affordanzregion setzt sich aus einer potentiellen Kernregion (PCR) und einer Affordantenregion (AR) zusammen. Die potentielle Kernregion ist die mereologische Summe aus potentieller Agentenregion und potentieller Transaktionsregion (PTR).

nau eine potentielle Agentenregion, genau eine potentielle Transaktionsregion und genau eine Affordantenregion verfügt.

Zur weiteren räumlichen Strukturierung von Affordanzräumen werden Zusammenfassungen von potentiellen Affordanzregionen, potentiellen Transaktionsregionen und Affordantenregionen betrachtet: Die potentielle Agentenregion und die potentielle Transaktionsregion eines Affordanzraumes bilden gemeinsam seine *potentielle Kernregion* (P-CORE-REGION, **A.D6**). Die mereologische Summe aus potentieller Kernregion und Affordantenregion eines Affordanzraumes ergibt schließlich die *Affordanzregion* des Affordanzraumes (AFFORDANCE-REG, **A.D7**). Die potentiellen Agentenregionen, potentiellen Transaktionsregionen, Affordantenregionen, potentiellen Kernregionen und Affordanzregionen werden von hier an unter dem Term *Affordanzraum-Regionen* zusammengefasst. Abbildung 5.2 stellt die mereotopologische Struktur der Affordanzraum-Regionen eines Affordanzraumes diagrammatisch dar.

$$\mathbf{A.D6} \quad \forall sp, r_1 [P\text{-CORE-REGION}(sp, r_1) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_2, r_3 [SUM(r_1, r_2, r_3) \wedge P\text{-AGENT-REG}(sp, r_2) \wedge P\text{-TRANS-REG}(sp, r_3)]]$$

$$\mathbf{A.D7} \quad \forall sp, r_1 [AFFORDANCE\text{-}REG(sp, r_1) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_2, r_3 [SUM(r_1, r_2, r_3) \wedge P\text{-CORE-REGION}(sp, r_2) \wedge AFFORDANT\text{-}REG(sp, r_3)]]$$

Auf diese Weise ist die räumliche Struktur von Affordanzräumen in sich zeit-unabhängig, das heißt, sie verändert ihre Topologie nicht. Die potentielle

Agentenregion eines Affordanzraumes ist immer mit der potentiellen Transaktionsregion desselben Affordanzraumes verbunden. Auch ist eine potentielle Agentenregion, die mit der Affordantenregion verbunden ist, zu jedem Zeitpunkt mit ihr verbunden. Eine Folge dessen ist, dass es mit den diskutierten Mitteln nicht möglich ist, den zeitlichen Verlauf des räumlichen Bedarfs einer Handlung zu beschreiben. Als Beispiel kann ein Touchscreen dienen, der an der Wand hängt. Relativ zum Touchscreen befindet sich ein Affordanzraum, der von einem Menschen genutzt werden kann, um den Touchscreen zu bedienen. Während ein Mensch diesen Touchscreen bedient, wird er zu manchen Zeitpunkten den Touchscreen berühren und zu anderen Zeitpunkten nicht. Ein anderes Beispiel ist ein Staubsaugerroboter, der über die Zeit seiner Handlung an unterschiedlichen Orten ist, das heißt, die räumlichen Bedürfnisse dieser Handlung sind äußerst dynamisch. Dieser Detailgrad ist ohne Weiteres hier nicht darstellbar, weil die Regionen eines Lokationenkomplexes topologisch stabil sind (d.h., sie können sich nicht zu manchen Zeitpunkten berühren und zu anderen Zeitpunkten nicht). Diese Einschränkung ist allerdings vernachlässigbar, wenn der zeitliche Verlauf von Handlungen nicht im Vordergrund steht. Daher beschränkt sich die nachfolgende Darstellung auf Handlungen, die von ihrer räumlichen Struktur relativ statisch sind.

5.2.2. Produktion und Nutzung von Affordanzräumen

In diesem Abschnitt soll geklärt werden, wodurch Affordanzräume überhaupt entstehen. Zweitens fordert die Basic-Place-Theory, dass relativ fixierte Regionen entweder gar keine Referenzobjekte haben (und somit im absoluten Raum liegen) oder all ihre Referenzobjekte gemeinsam haben. Die erste Möglichkeit scheidet für Affordanzraum-Regionen aus, da es ja möglich sein soll, dass sich Affordanzraum-Regionen bewegen, wenn sich Affordanten bewegen.

Zunächst wird eine neue primitive Relation `PRODUCES` eingeführt, mit der beschrieben werden kann, dass ein Affordanzraum durch eine Affordanz *produziert* wird. Außerdem wird die Relation `PLACED-AT` benutzt, um zu beschreiben, dass eine transitive Handlung in einem Affordanzraum platziert ist. (Axiome **A.A13** und **A.A14** formulieren die entsprechenden Restriktionen für `PRODUCES` und `PLACED-AT`.) Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Relationen kann nun durch folgende Überlegung hergestellt werden: Wenn eine transitive Handlung eine bestimmte Affordanz *aff'* realisiert, dann ist die transitive Handlung in einem Affordanzraum platziert, der von *aff'* produziert wird (**A.A15**). Die transitive Handlung des Fernsehens realisiert eine bestimmte Affordanz des Fernsehschwerers und sie ist in einem Affordanzraum plat-

ziert, der von dieser Affordanz des Fernsehers produziert wird. Zusammen mit Axiom **A.A6** (S. 74) gilt dann auch, dass jede transitive Handlung in einem Affordanzraum platziert ist, der durch eine Affordanz produziert wird, die die transitive Handlung realisiert. Das heißt auch, dass die Verfügbarkeit eines solchen Affordanzraumes eine Voraussetzung dafür ist, dass eine transitive Handlung überhaupt ausgeführt werden kann. (Abschnitt 5.3 beleuchtet detaillierter, welche Anforderungen ein Affordanzraum erfüllen muss, damit in ihm eine bestimmte transitive Handlung platziert werden kann.)

$$\mathbf{A.A13} \quad \forall aff', sp \text{ [PRODUCES}(aff', sp) \Rightarrow$$

$$\text{[AFFORDANCE}(aff') \wedge \text{AFFORDANCE-SPACE}(sp)]]$$

$$\mathbf{A.A14} \quad \forall ac, sp, t \text{ [PLACED-AT}(ac, sp, t) \Rightarrow$$

$$\text{[T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{AFFORDANCE-SPACE}(sp) \wedge \text{TQ}(t)]]$$

$$\mathbf{A.A15} \quad \forall ac, aff', t \text{ [[REALIZES}(ac, aff', t) \wedge \text{T-ACTIVITY}(ac) \wedge \text{CF}(\phi, ac, t)] \Rightarrow$$

$$\exists o, \alpha, \phi \text{ [PATIENT}(o, ac, t) \wedge \text{AGENT}(\alpha, ac, t) \wedge \text{AFFORDS}(o, \alpha, \phi, t) \wedge \\ \text{ATTACHED-TO}(sp, o)]]$$

Bezüglich der Referenzobjekte von Affordanzraum-Regionen soll die folgende Aussage zutreffen: Falls eine Region r Affordanzraum-Region eines Affordanzraumes ist, der durch eine Affordanz aff' produziert wird, dann ist der Träger von aff' das Referenzobjekt dieser Affordanzraum-Region r (**A.A16**). Der Fernseher ist beispielsweise das Referenzobjekt der potentiellen Agentenregion des Affordanzraumes, der durch die Affordanz des Fernsehens produziert wird (und so geht es auch allen anderen Affordanzraum-Regionen dieses Affordanzraumes).

$$\mathbf{A.A16} \quad \forall sp, r, aff' \text{ [[AFF-SPACE-REGION}(sp, r) \wedge \text{PRODUCES}(aff', sp)] \Rightarrow$$

$$\forall o \text{ [I}(aff', o) \Leftrightarrow \text{RO}(o, r)]]$$

Dadurch ist ferner festgelegt, dass alle Affordanzraum-Regionen, die zu Affordanzräumen eines gemeinsamen Affordanten gehören, auf demselben Lokationenkomplex liegen—also relativ fixiert sind (**A.T2**).

$$\mathbf{A.T2} \quad \forall sp, r_1, r_2 \text{ [[AFF-SPACE-REGION}(sp, r_1) \wedge \text{AFF-SPACE-REGION}(sp, r_2)] \Rightarrow$$

$$\text{RF}(r_1, r_2)]]$$

Affordanzraum-Regionen, die relativ fixiert sind, stehen in topologisch stabilen Relationen zueinander. Das heißt insbesondere, dass sich Affordanzraum-Regionen genau dann überlappen, wenn sie sich zu irgendeinem Zeit-

punkt überlappen. Das Theorem **A.T2** kann ausgenutzt werden, um die Koinzidenz von Affordanzraum-Regionen und somit mögliche Konflikte zwischen Affordanzräumen (vgl. Abschnitt 5.4) effizient zu berechnen: Affordanzraum-Regionen mit gemeinsamem Referenzobjekt sind genau dann zu einem Zeitpunkt partiell koinzident, wenn sie zu irgendeinem Zeitpunkt partiell koinzident sind. Es braucht somit nur ein einziges Mal berechnet werden, ob zwei Affordanzraum-Regionen partiell koinzidieren, um zu wissen, ob sie immer partiell koinzidieren (zum Beispiel indem die Überlappung ihrer Geometrien berechnet wird).

Es wird sich als nützlich erweisen, eine Relation für die Zuordnung von Affordanzräumen zu den Trägern ihrer Produzenten zur Verfügung zu haben. So definiert **A.D8**, dass ein Affordanzraum genau dann einem Objekt *anhängt* (ATTACHED-TO), wenn das Objekt Träger der Affordanz ist, die den Affordanzraum produziert.

$$\mathbf{A.D8} \quad \forall sp, o \left[\text{ATTACHED-TO}(sp, o) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists aff' \left[\text{I}(aff', o) \wedge \text{PRODUCES}(aff', sp) \right] \right]$$

Schließlich können Aussagen über die Verortung der Teilnehmer einer transitiven Handlung gemacht werden. Die potentielle Agentenregion ist für den Agenten da und die Affordantenregion für den Affordanten. Wenn also eine transitive Handlung in einem bestimmten Affordanzraum platziert ist, dann ist der Agent der Handlung in der potentiellen Agentenregion des genutzten Affordanzraumes lokalisiert und der Patiens der Handlung in der Affordantenregion (**A.A17**).

$$\begin{aligned} \mathbf{A.A17} \quad \forall ac, sp, t, \alpha, o, r_1, r_2 \left[\left[\text{PLACED-AT}(ac, sp, t) \wedge \text{AGENT}(\alpha, ac, t) \wedge \right. \right. \\ \left. \left. \text{PATIENT}(o, ac, t) \wedge \text{P-AGENT-REG}(sp, r_1) \wedge \text{AFFORDANT-REG}(sp, r_2) \right] \Rightarrow \right. \\ \left. \left[\text{COV}^O(o, r_1, t) \wedge \text{COV}^O(o, r_2, t) \right] \right] \end{aligned}$$

5.2.3. Räumliche Fähigkeiten

Die Affordanz-Konzeption aus Kapitel 4 erlaubt, dass beispielsweise Handlungen eines kleinen Roboters und eines großen Roboters gleichermaßen ein und dieselbe Affordanz des Durch-die-Tür-Gehens realisieren, dass Greifhandlungen des Roboters mit sehr langem Manipulator und Greifhandlungen des Menschen mit normaler Armlänge ein und dieselbe Affordanz des Tasse-Greifens realisieren, und dass Handlungen des Bild betrachtens eines Roboters mit einer Kinect dieselbe Affordanz realisiert wie die Handlung des Betrachtens durch einen Mensch mit seinen Augen.

Während aber ein kleiner Roboter im Türrahmen kein großes Hindernis

für einen einzelnen Menschen darstellt, stellt er womöglich ein Hindernis für einen Kinderwagen, Einkaufswagen oder ein Krankenhausbett dar. Ein Roboter mit einem langen Manipulator kann die Tasse von einer größeren Entfernung aus greifen als ein Akteur mit einem kurzem Manipulator. Das Betrachten eines Objektes ist je nach verwendeter Sensorik nur in einem bestimmten Bereich ausführbar (eine Kinect hat zum Beispiel je nach Modus eine Reichweite von 80cm bis 4m bzw. von 50cm bis 3m). Es gibt also Affordanzräume, die nicht von allen Handlungen genutzt werden können, die dieselbe Affordanz realisieren. Welche Affordanzräume es sind, die von einer Handlung genutzt werden können, hängt auch von den räumlichen Fähigkeiten der Agenten ab. Darunter fallen erstens Fähigkeiten, sich groß zu machen (sich zu strecken) oder sich klein zu machen (sich schlank zu machen oder sich zu ducken). Zweitens fallen sensorische Fähigkeiten in diese Kategorie, wie die Fähigkeit, ein Objekt aus einer bestimmten Entfernung erkennen zu können.

Eine Affordanz muss folglich für verschiedene räumliche Fähigkeiten auch eigene Affordanzräume produzieren. Um den Zusammenhang zwischen einem Affordanzraum und einer räumlichen Fähigkeit zu beschreiben, wird die Relation *SUPPORTS* eingeführt, deren Sortenrestriktion durch Axiom **A.A18** beschrieben sind. Der Ausdruck $\text{SUPPORTS}(sp, ab)$ steht dafür, dass der Affordanzraum sp die räumliche Fähigkeit (auf Ebene der Fähigkeits-Werte) ab unterstützt. Axiom **A.A19** hält die Passung von räumlicher Fähigkeit des Agenten und unterstützter räumlicher Fähigkeit eines Affordanzraumes fest: Wenn eine Handlung einen Affordanzraum nutzt, dann besitzt der Agent der Handlung zum Zeitpunkt der Handlung eine durch den Affordanzraum unterstützte Fähigkeit.

$$\mathbf{A.A18} \quad \forall sp, ab \left[\text{SUPPORTS}(sp, ab) \Rightarrow \right. \\ \left. [\text{AFFORDANCE-SPACE}(sp) \wedge \text{ABILITY-VALUE}(ab)] \right]$$

$$\mathbf{A.A19} \quad \forall ac, sp, \alpha, t \left[[\text{PLACED-AT}(ac, sp, t) \wedge \text{AGENT}(\alpha, ac)] \Rightarrow \right. \\ \left. \exists ab', ab \left[\text{I}(ab', \alpha) \wedge \text{L}(ab, ab', t) \wedge \text{SUPPORTS}(sp, ab) \right] \right]$$

5.3. Platz-Kandidaten für transitive Handlungen

Mit Hinblick auf das Ziel, eine Lösung für das soziale Handlungsplatzierungsproblem zu erreichen, sind nun grundlegende Voraussetzungen zusammengetragen. Um eine transitive Handlung eines bestimmten Typs ϕ auszuführen, muss es einen Affordanten geben, der dem potentiellen Agenten α ϕ -Handlungen affordiert. Ist ein solcher Affordant gefunden, dann muss

zusätzlich ein passender Affordanzraum zur Auswahl stehen, in den die geplante Handlung platziert werden kann.

Diese Anforderungen führen zur Definition des *designierten Platz-Kandidaten* für eine transitive Handlung (**A.D9**). Ein Affordanzraum sp ist genau dann zu einem Zeitpunkt t ein designierter Platz-Kandidat für die Ausführung einer Handlung vom Typ ϕ durch einen Akteur mit Fähigkeit ab' , wenn der Wert von ab' ϕ -komplementär zum Wert der Affordanz aff' ist, die sp produziert (rein funktionale Anforderung), und der Affordanzraum darüber hinaus die räumliche Fähigkeit von α unterstützt (räumliche Anforderung). Aus der Sicht eines Akteurs ist ein designierter Platz-Kandidat also ein Affordanzraum, der von einer Affordanz produziert wird, die mit den eigenen Fähigkeiten zusammenpasst und der zudem die eigenen räumlichen Fähigkeiten (die Fähigkeit sich zu strecken o.ä.) unterstützt.

Ein designierter Platz-Kandidat wird genau dann als (*tatsächlicher*) *Platz-Kandidat* für eine transitive Handlung bezeichnet, wenn er zur Nutzung *frei* ist (**A.D10**). Dass ein Affordanzraum frei ist, soll bedeuten, dass er ohne Behinderungen genutzt werden kann. Nicht frei ist ein Affordanzraum, wenn er bereits gegenwärtig durch eine Handlung belegt ist, oder wenn andere Objekte wie Wände oder andere Hindernisse in ihm verortet sind. Einzig der Affordant selbst darf die Affordanzraumregion besetzen. Ein Affordanzraum heißt also genau dann frei, wenn sich außer dem Affordanten keine Objekte in der Affordanzregion befinden (**A.D11**).

$$\begin{aligned} \mathbf{A.D9} \quad \forall sp, \phi, \alpha, t \quad & [\text{D-CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \\ & \exists aff', aff, sp, ab'_1, ab_1 \quad [\text{PRODUCES}(aff', sp) \wedge \text{L}(aff, aff', t) \wedge \\ & \text{CPL}(\phi, ab_1, aff) \wedge \text{L}(ab_1, ab'_1, t) \wedge \text{I}(ab_1, \alpha) \wedge \\ & \exists ab'_2, ab_2 \quad [\text{SUPPORTS}(sp, ab_2) \wedge \text{L}(ab, ab'_2, t) \wedge \text{I}(ab'_2, \alpha)]]] \end{aligned}$$

$$\mathbf{A.D10} \quad \forall sp, \phi, \alpha, t \quad [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{D-CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{FREE}(sp, t)]]$$

$$\mathbf{A.D11} \quad \forall sp, t \quad [\text{FREE}(sp, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \forall o, r \quad [[\text{PCOIN}^o(o, r) \wedge \text{AFFORDANCE-REG}(sp, r)] \Rightarrow \text{ATTACHED-TO}(sp, o)]]$$

Ein Platz-Kandidat erfüllt also vier Anforderungen: Die produzierende Affordanz passt zu den Fähigkeiten des potentiellen Agenten der zu platzierenden Handlung, der Platz-Kandidat unterstützt die räumliche Fähigkeit des potentiellen Agenten, und er ist erreichbar und frei von Blockaden. Es sind genau diese Platz-Kandidaten, die Lösungen für den funktionalen Aspekt des sozialen Handlungsplatzierungsproblems sind, und die noch sozial bewertet

werden müssen, um die sozial-adäquatesten Platz-Kandidaten zu bestimmen, unter denen schließlich einer als Resultat der Handlungsplatzierungsplanung ausgewählt wird.

5.4. Konflikte zwischen Affordanzräumen

Ein grundlegender Aspekt bei der Bewertung eines Platz-Kandidaten ist, ob und inwiefern die Nutzung eines Platz-Kandidaten mit anderen möglichen Handlungen in Konflikt steht. Dabei wird ausgenutzt, dass Handlungen in Affordanzräumen platziert sind. Um also zu bestimmen, ob die Nutzung eines Platz-Kandidaten mit einer Handlung (oder einer möglichen Handlung) konfligiert, kann überprüft werden, ob der Platz-Kandidat mit anderen Platz-Kandidaten in einer konflikthaften Weise partiell koinziiert. Dabei sollen unterschiedliche Typen potentieller Konflikte unterschieden werden.

Der erste Konflikttyp besteht, wenn die potentiellen Agentenregionen zweier Affordanzräume partiell koinzident sind. In diesem Fall können die beiden Affordanzräume nicht gleichzeitig von zwei unterschiedlichen Handlungen genutzt werden, da sich die Agenten dieser Handlungen notwendigerweise gegenseitig im Weg stehen würden. Definition **A.D12** definiert eine entsprechende zeit-abhängige Relation **CONFLICT-AA** zwischen Affordanzräumen.¹⁰

Ein zweiter Konflikttyp konstituiert sich aus der partiellen Koinzidenz einer potentiellen Agentenregion und einer potentiellen Transaktionsregion. In Fällen, in denen die potentielle Agentenregion eines Affordanzraumes mit der potentiellen Transaktionsregion eines anderen Affordanzraumes partiell koninziert, würde die Ausführung einer Handlung, die den zweiten Affordanzraum nutzt, durch eine parallel stattfindende Handlung im ersten Affordanzraum gestört sein. Ein Beispiel dafür ist das Betrachten eines Objektes aus der Ferne: Wenn zwei Akteure α_1 und α_2 das Objekt betrachten und α_1 vor α_2 steht, dann beeinträchtigt α_1 die Handlung von α_2 . **A.D13** definiert die zeit-abhängige Relation **CONFLICT-AT**, in der Affordanzräume zueinander stehen, die in einen Konflikt dieses zweiten Typs verwickelt sind.

Steht ein Affordanzraum mit einem anderen Affordanzraum in der Beziehung **CONFLICT-AA** oder in der **CONFLICT-AT**-Beziehung, dann koinziiert die potentielle Affordanzregion des ersten Affordanzraumes mit der potentiellen Kernregion des zweiten Affordanzraumes. Es wird sich als nützlich erweisen, hierfür ein zusätzliches Prädikat **CONFLICT-AC** zur Verfügung zu haben, das durch Definition **A.D14** definiert ist.

¹⁰»AA« im Prädikatsnamen steht dafür, dass der potentielle Konflikt durch die partielle Koinzidenz der potentiellen Agentenregionen begründet ist. Entsprechend steht »T« innerhalb der Prädikatsnamen anderer Konflikt-Prädikate für die potentielle Transaktionsregion.

Während also beim Betrachten des Objektes der Akteur α_1 die Handlung vom Akteur α_2 behindert, ist es andersherum nicht der Fall, dass α_2 die Handlung von α_1 stört. Das ist damit zu erklären, dass die Handlung von α_2 die potentielle Transaktionsregion nicht physikalisch nutzt. Wäre die Handlung von α_2 von einer anderen Art, so dass die potentielle Transaktionsregion physikalisch genutzt würde, so würde sie auch die Handlung von α_1 stören, der ja in ihr steht. Man könnte sich beispielsweise vorstellen, dass α_1 das Objekt betrachtet, während α_2 , hinter α_1 stehend, das Objekt mit einem Wasserstrahl säubert. Ein Affordanzraum steht genau dann mit einem zweiten Affordanzraum in einem potentiellen Konflikt dieses dritten Typs, wenn die potentielle Transaktionsregion des ersten Affordanzraumes physikalisch genutzt wird und mit der potentiellen Agentenregion des zweiten Affordanzraumes partiell koinzidiert (**A.D15**).

Viertens steht ein Affordanzraum in einem potentiellen Konflikt zu einem zweiten Affordanzraum, falls die potentielle Transaktionsregion des ersten Affordanzraumes partiell mit der potentiellen Transaktionsregion des zweiten Affordanzraumes koinzidiert und die potentielle Transaktionsregion des ersten Affordanzraumes physikalisch genutzt wird. Zwei Affordanzräume, die etwa nur zum Betrachten eines Affordanten genutzt werden, können nicht in dieser Art von Konflikt zueinander stehen (sich kreuzende Sichtfelder behindern sich nicht gegenseitig). Definition **A.D16** definiert entsprechend die Relation **CONFLICT-TT**.

Ein Affordanzraum steht genau dann in einem potentiellen Konflikt zu einem anderen Affordanzraum, wenn der erste Affordanzraum in einer der vier aufgezeigten Weisen mit dem zweiten Affordanzraum konfligiert (**A.D17**). Die Relation **CONFLICT** ist nicht symmetrisch (wie das Beispiel des Betrachtens eines Objektes zeigt), aber reflexiv (jeder Affordanzraum steht mit sich selbst im Konflikt).

$$\mathbf{A.D12} \quad \forall sp_1, sp_2, t [\text{CONFLICT-AA}(sp_1, sp_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_1, r_2 [\text{P-AGENT-REG}(sp_1, r_1) \wedge \text{P-AGENT-REG}(sp_2, r_2) \wedge \text{PCOIN}(r_1, r_2, t)]]$$

$$\mathbf{A.D13} \quad \forall sp_1, sp_2, t [\text{CONFLICT-AT}(sp_1, sp_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_1, r_2 [\text{P-AGENT-REG}(sp_1, r_1) \wedge \text{P-TRANS-REG}(sp_2, r_2) \wedge \text{PCOIN}(r_1, r_2, t)]]$$

$$\mathbf{A.D14} \quad \forall sp_1, sp_2, t [\text{CONFLICT-AC}(sp_1, sp_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CONFLICT-AA}(sp_1, sp_2, t) \vee \text{CONFLICT-AT}(sp_1, sp_2, t)]]$$

$$\mathbf{A.D15} \quad \forall sp_1, sp_2, t [\text{CONFLICT-TA}(sp_1, sp_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_1, r_2 [\text{P-TRANS-REG}(sp_1, r_1) \wedge \text{PHYS-USED-REG}(sp_1, r_1) \wedge \text{P-AGENT-REG}(sp_2, r_2) \wedge \text{PCOIN}(r_1, r_2, t)]]$$

A.D16 $\forall sp_1, sp_2, t [\text{CONFLICT-TT}(sp_1, sp_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists r_1, r_2 [\text{P-TRANS-REG}(sp_1, r_1) \wedge \text{PHYS-USED-REG}(sp_1, r_1) \wedge \text{P-TRANS-REG}(sp_2, r_2) \wedge \text{PCOIN}(r_1, r_2, t)]]$

A.D17 $\forall sp_1, sp_2, t [\text{CONFLICT}(sp_1, sp_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CONFLICT-AA}(sp_1, sp_2, t) \vee \text{CONFLICT-AT}(sp_1, sp_2, t) \vee \text{CONFLICT-TA}(sp_1, sp_2, t) \vee \text{CONFLICT-TT}(sp_1, sp_2, t)]]$

Der Begriff des potentiellen Konfliktes zwischen Affordanzräumen ist hier rein funktionaler Natur. Damit wird zunächst nur beschrieben, welche Affordanzräume nicht störungsfrei parallel nutzbar sind. Die *CONFLICT*-Relation wird bei der Definition von Prinzipien, nach denen es Gründe gibt, Handlungen in einem Affordanzraum zu platzieren bzw. von der Platzierung bestimmter Handlungen in bestimmte Affordanzräume abzusehen, eine grundlegende Rolle spielen (vgl. Kapitel 7).

5.5. Anwendung für die funktionale Handlungsplatzierung

Anhand eines Beispiels soll nun demonstriert werden, wie die eingeführten Konzepte und Relationen genutzt werden können, um das Wissen, das ein Roboter über Affordanzräume besitzt, zu repräsentieren.

In Abbildung 5.3 (S. 98) ist eine seitliche Sicht auf einen Lichtschalter, der an der Wand hängt, dargestellt. Dem Lichtschalter ist eine Affordanz inhärent, deren Wert *pressable* ist. Darüber hinaus seien zwei mobile Roboter *rob₁* und *rob₂* angenommen, die jeweils über eine Fähigkeit mit dem Fähigkeitswert *can-press* verfügen. Außerdem wissen die Roboter, dass die Eigenschaftswerte *can-press* und *pressable* bezüglich des Handlungstyps *press* zusammenpassen. Der Lichtschalter ermöglicht beiden Robotern Handlungen vom Typ Lichtschalter-Drücken (*press*). Soweit folgt die Modellierung der Affordanz-Konzeption aus Kapitel 4.

Als Erweiterung der Fähigkeitsmodellierung kommen hier räumliche Fähigkeiten dazu, die in Abschnitt 5.3 eingeführt wurden und in Kapitel 4 noch keine gesonderte Rolle spielten. Für dieses Beispiel sei der Roboter *rob₁* mittlerer Größe und verfüge über einen nicht sehr weitreichenden Arbeitsraum (*mid-size-and-workspace-narrow*). Roboter *rob₂* hingegen wird als Roboter geringer Größe modelliert, der aber einen weitreichenden Arbeitsraum (*small-size-and-workspace-wide*) besitzt.

Aus den gegebenen Fakten können die Fakten über *AFFORDS*-Beziehungen abgeleitet werden: Der Lichtschalter afforziert beiden Robotern Handlungen vom Typ *press*.

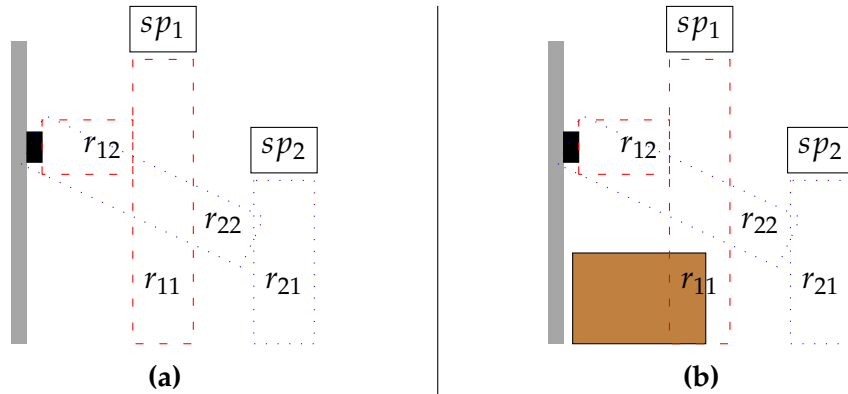


Abbildung 5.3.: (a) Darstellung zweier Affordanzräume sp_1 und sp_2 , in die Handlungen des Lichtschalterdrückens platziert werden können; unterstützen unterschiedliche räumliche Fähigkeiten. (b) Affordanzraum sp_1 wird von einer Truhe (braun) blockiert.

Den Repräsentationen von Affordanzen und Fähigkeiten werden nun Repräsentationen von Affordanzräumen beigegefügt. Die Übersicht findet sich in Abbildung 5.4 (S. 100). Demnach sind zwei Affordanzräume sp_1 und sp_2 bekannt. Der Affordanzraum hat Region r_{11} zur potentiellen Agentenregion und r_{12} zur potentiellen Transaktionsregion, während r_{21} die potentielle Agentenregion von Affordanzraum sp_2 ist und r_{22} die potentielle Transaktionsregion von Affordanzraum sp_2 . Beide Affordanzräume teilen sich r_{13} als Affordantenregion. (Vergleiche auch Abbildung 5.3a.) Beide potentiellen Transaktionsregionen werden von Handlungen, die in diesen Affordanzräumen platziert werden, physikalisch genutzt. Zusätzlich ist über den Affordanzraum sp_1 bekannt, dass er Akteure mittlerer Größe, die einen gering weitreichenden Arbeitsraum haben, unterstützt, während über sp_2 bekannt ist, dass er kleine Akteure mit einem weitreichenden Arbeitsraum unterstützt. Zudem sind beide Affordanzräume von derselben Affordanz produziert.

Aus diesen Basis-Fakten können weitere Fakten abgeleitet werden: Weil nichts darüber bekannt ist, dass sich Hindernisse in den Affordanzräumen befinden, wird unter der Annahme einer geschlossenen Welt abgeleitet, dass Affordanzräume sp_1 und sp_2 frei sind (A.D11). Außerdem ist sp_1 ein Platz-Kandidat für transitive Handlungen des Typs *press*, die rob_1 als Agenten haben, und sp_2 ein Platz-Kandidat für transitive Handlungen des Typs *press*, die rob_2 als Agenten haben. Schließlich stehen die beiden Affordanzräume gegenseitig im potentiellen Konflikt zueinander (d.h. sie können nicht gleichzeitig störungsfrei genutzt werden).

Schließlich ist in Abbildung 5.5 (S. 101) der Fall beschrieben, in dem eine Truhe *coffer* partiell mit der Region r_{11} koinzidiert. Über Region r_{11} ist ja bekannt, dass es sich um die potentielle Agentenregion des Affordanzraumes

```

(:action press
  :parameters (?o – affordant)
  :precondition
    (and (affords ?o press)
      (exists (?sp – affordance-space ?r – region)
        (and (candidate ?sp press)
          (p-agent-reg ?sp ?r)
          (robot-at ?r))))
  :effect
    ...

```

Listing 5.1: PDDL-Spezifikation eines Aktionsoperators. Räumliche Voraussetzungen der Handlungsausführung sind unter Verwendung des Konzepts des Platz-Kandidaten spezifiziert.

sp_1 handelt. Wegen $PCOIN^o(coffer, r_{11})$ verliert sp_1 nun auch die Eigenschaft, frei zu sein. In Folge dessen ist sp_1 nun kein tatsächlicher Platz-Kandidat für *press*-Handlungen durch rob_1 . Das Wissen über die Position der Truhe verändert also das ableitbare Wissen darüber, welche Affordanzräume tatsächliche Platz-Kandidaten sind. Fragte man bei der Wissensbasis an, welcher Akteur denn den Lichtschalter bedienen könne, werden in der Situation aus Abbildung 5.4 beide Roboter genannt, während in der Situation aus Abbildung 5.5 nur für *press*-Handlungen durch Roboter rob_2 die Voraussetzungen erfüllt sind.

Mit dem Konzept des Platz-Kandidaten für eine Handlung können auch die Spezifikationen räumlicher Voraussetzungen in Aktionsoperatoren konkretisiert werden. Ein Beispiel zeigt Abbildung 5.1: Die Voraussetzung dafür, dass ein Objekt (o) gedrückt werden kann, besteht darin, dass o dem Roboter Handlungen vom Typ *press* ermöglicht und dass der Roboter in einer Region steht, die potentielle Agentenregion eines tatsächlichen Platz-Kandidaten für *press*-Handlungen durch den Roboter ist.

BASIC FACTS

AFFORDANCES (STATIC)

$CPL(\textit{press}, \textit{can-press}, \textit{pressable}).$

$I(\textit{aff}_1, \textit{light-switch}). I(\textit{ab}_1, \textit{rob}_1). I(\textit{ab}_2, \textit{rob}_2). I(\textit{ab}_3, \textit{rob}_1). I(\textit{ab}_4, \textit{rob}_2).$

AFFORDANCES (DYNAMIC)

$L(\textit{aff}_1, \textit{pressable}). L(\textit{ab}_1, \textit{can-press}). L(\textit{ab}_2, \textit{can-press}).$

$L(\textit{ab}_3, \textit{mid-size-and-workspace-narrow}). L(\textit{ab}_4, \textit{small-size-and-workspace-wide}).$

AFFORDANCE SPACES (STATIC)

$SOURCE-OF(\textit{aff}_1, \textit{sp}_1).$

$P-AGENT-REG(\textit{sp}_1, \textit{r}_{11}). P-TRANS-REG(\textit{sp}_1, \textit{r}_{12}). AFFORDANT-REG(\textit{sp}_1, \textit{r}_{13}).$

$PHYS-USED-REG(\textit{sp}_1, \textit{r}_{12}). SUPPORTS(\textit{sp}_1, \textit{mid-size-and-workspace-narrow}).$

$SOURCE-OF(\textit{aff}_1, \textit{sp}_2).$

$P-AGENT-REG(\textit{sp}_2, \textit{r}_{21}). P-TRANS-REG(\textit{sp}_2, \textit{r}_{22}). AFFORDANT-REG(\textit{sp}_2, \textit{r}_{13}).$

$PHYS-USED-REG(\textit{sp}_2, \textit{r}_{22}). SUPPORTS(\textit{sp}_2, \textit{small-size-and-workspace-wide}).$

PARTIAL COINCIDENCE (DYNAMIC)

$PCOIN(\textit{r}_{11}, \textit{r}_{11}). PCOIN(\textit{r}_{11}, \textit{r}_{22}). PCOIN(\textit{r}_{12}, \textit{r}_{12}). PCOIN(\textit{r}_{12}, \textit{r}_{22}).$

$PCOIN(\textit{r}_{21}, \textit{r}_{21}). PCOIN(\textit{r}_{22}, \textit{r}_{22}). PCOIN(\textit{r}_{22}, \textit{r}_{11}). PCOIN(\textit{r}_{22}, \textit{r}_{12}).$

DERIVED FACTS

$RO(\textit{light-switch}, \textit{r}_{11}). RO(\textit{light-switch}, \textit{r}_{12}). RO(\textit{light-switch}, \textit{r}_{21}).$

$RO(\textit{light-switch}, \textit{r}_{22}).$

$ATTACHED-TO(\textit{sp}_1, \textit{light-switch}). ATTACHED-TO(\textit{sp}_2, \textit{light-switch}).$

$FREE(\textit{sp}_1). FREE(\textit{sp}_2).$

$D-CANDIDATE(\textit{sp}_1, \textit{press}, \textit{rob}_1). D-CANDIDATE(\textit{sp}_2, \textit{press}, \textit{rob}_2).$

$CANDIDATE(\textit{sp}_1, \textit{press}, \textit{rob}_1). CANDIDATE(\textit{sp}_2, \textit{press}, \textit{rob}_2).$

$CONFLICT-AT(\textit{sp}_1, \textit{sp}_2). CONFLICT-AC(\textit{sp}_1, \textit{sp}_2). CONFLICT-TA(\textit{sp}_2, \textit{sp}_1).$

$CONFLICT-TT(\textit{sp}_1, \textit{sp}_1). CONFLICT-TT(\textit{sp}_1, \textit{sp}_2). CONFLICT-TT(\textit{sp}_2, \textit{sp}_1).$

$CONFLICT-TT(\textit{sp}_2, \textit{sp}_2).$

$CONFLICT(\textit{sp}_1, \textit{sp}_1). CONFLICT(\textit{sp}_1, \textit{sp}_2). CONFLICT(\textit{sp}_2, \textit{sp}_1).$

$CONFLICT(\textit{sp}_2, \textit{sp}_2).$

Abbildung 5.4.: Fakten über die vorhandenen Affordanzräume in Beispiel 5.3a.

BASIC FACTS

AFFORDANCES (STATIC)

CPL(*press, can-press, pressable*).

I(*aff₁, light-switch*). I(*ab₁, rob₁*). I(*ab₂, rob₂*). I(*ab₃, rob₁*). I(*ab₄, rob₂*).

AFFORDANCES (DYNAMIC)

L(*aff₁, pressable*). L(*ab₁, can-press*). L(*ab₂, can-press*).

L(*ab₃, mid-size-and-workspace-narrow*). L(*ab₄, small-size-and-workspace-wide*).

AFFORDANCE SPACES (STATIC)

SOURCE-OF(*aff₁, sp₁*).

P-AGENT-REG(*sp₁, r₁₁*). P-TRANS-REG(*sp₁, r₁₂*). AFFORDANT-REG(*sp₁, r₁₃*).

PHYS-USED-REG(*sp₁, r₁₂*). SUPPORTS(*sp₁, mid-size-and-workspace-narrow*).

SOURCE-OF(*aff₁, sp₂*).

P-AGENT-REG(*sp₂, r₂₁*). P-TRANS-REG(*sp₂, r₂₂*). AFFORDANT-REG(*sp₂, r₁₃*).

PHYS-USED-REG(*sp₂, r₂₂*). SUPPORTS(*sp₂, small-size-and-workspace-wide*).

PARTIAL COINCIDENCE (DYNAMIC)

PCOIN(*r₁₁, r₁₁*). PCOIN(*r₁₁, r₂₂*). PCOIN(*r₁₂, r₁₂*). PCOIN(*r₁₂, r₂₂*).

PCOIN(*r₂₁, r₂₁*). PCOIN(*r₂₂, r₂₂*). PCOIN(*r₂₂, r₁₁*). PCOIN(*r₂₂, r₁₂*).

PCOIN^O(*coffer, r₁₁*).

DERIVED FACTS

RO(*light-switch, r₁₁*). RO(*light-switch, r₁₂*). RO(*light-switch, r₂₁*).

RO(*light-switch, r₂₂*).

ATTACHED-TO(*sp₁, light-switch*). ATTACHED-TO(*sp₂, light-switch*).

FREE(*sp₂*).

D-CANDIDATE(*sp₁, press, rob₁*). D-CANDIDATE(*sp₂, press, rob₂*).

CANDIDATE(*sp₂, press, rob₂*).

CONFLICT-AT(*sp₁, sp₂*). CONFLICT-AC(*sp₁, sp₂*). CONFLICT-TA(*sp₂, sp₁*).

CONFLICT-TT(*sp₁, sp₁*). CONFLICT-TT(*sp₁, sp₂*). CONFLICT-TT(*sp₂, sp₁*).

CONFLICT-TT(*sp₂, sp₂*).

CONFLICT(*sp₁, sp₁*). CONFLICT(*sp₁, sp₂*). CONFLICT(*sp₂, sp₁*).

CONFLICT(*sp₂, sp₂*).

Abbildung 5.5.: Fakten über die vorhandenen Affordanzräume in Beispiel 5.3b.

KAPITEL 6

Soziale Räume als Affordanzräume

Das Ziel dieses Kapitels besteht darin, die sozialen Räume, die bei der Handlungsplatzierung berücksichtigt werden sollen, auf das Fundament der Affordanzräume zu stellen. In Abschnitt 1.3 wurden vier Typen sozialer Räume eingeführt: Der Aktivitätsraum nach Kendon (1990), der entsteht, wo Akteure Handlungen ausführen, die nicht gestört werden sollen, der persönliche Raum, der nach Hall (1966) und Sommer (1969) jeden Menschen umgibt und die Distanzen bestimmen, die Menschen während Interaktionen zueinander einnehmen, das Territorium, das von Menschen etabliert wird, um exklusiven Zugriff auf Raum zu behaupten (Altman, 1975), und schließlich der soziale Affordanzraum, der nicht blockiert werden sollte, um Akteuren nicht ihrer Handlungsmöglichkeiten zu berauben (Lindner & Eschenbach, 2013, 2014).

In Kapitel 2 wurde deutlich, dass in der Robotik ganz unterschiedliche Modellierungsansätze verwendet werden, um soziale Räume zu formalisieren. Fast ausschließlich sind diese Ansätze für die Verwendung in spezifischen Verfahren der lokalen Pfad- und Platzierungsplanung entworfen und decken zumeist genau einen Typen sozialer Räume ab. Mit der Konzeption, die nachfolgend vorgestellt wird, ist es hingegen möglich, die vier erwähnten Typen sozialer Räume einheitlich zu beschreiben und somit unterschiedlichsten Verfahren der symbolischen Wissensverarbeitung zugänglich zu machen.

Grundsätzlich sind zwei Alternativen denkbar, wie soziale Räume in die Konzeption von Affordanzen und Affordanzräumen eingebettet werden können. Die erste Alternative besteht darin, soziale Räume als zusätzliche Individuen einzuführen, die manchmal manche Affordanzräume überdecken und somit die soziale Angemessenheit der Nutzung von Affordanzräumen bestimmen. Die zweite Alternative besteht darin, soziale Räume als Affordanzräume mit besonderen Eigenschaften zu konzipieren.

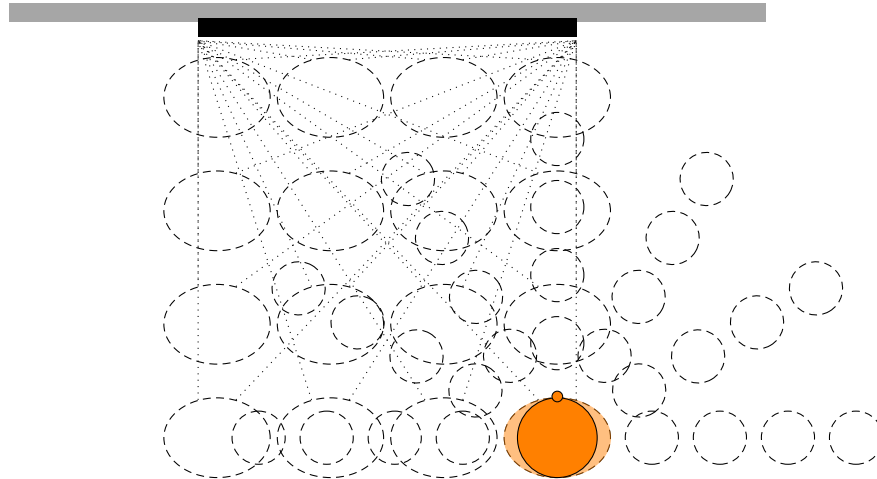


Abbildung 6.1.: Darstellung einer Szene in einem Museum: Ein Museumsbesucher betrachtet ein Gemälde. Zum Betrachten des Gemäldes stehen Museumsbesuchern mehrere Affordanzräume zur Verfügung, deren potentielle Agentenregion jeweils durch eine Ellipse dargestellt ist. Die potentielle Transaktionsregion ist durch gepunktete Linien angedeutet, die die Ellipse mit den beiden Enden des Bildes verbinden. Einer der hinteren Affordanzräume wird gerade für eine Handlung des Betrachtens des Gemäldes genutzt. Der Agent dieser Handlung besitzt seinerseits Affordanzräume, die von anderen Akteuren für Interaktionen mit ihm genutzt werden können. Die potentiellen Agentenregionen dieser Affordanzräume sind durch Kreise dargestellt, potentielle Transaktionsregionen bleiben hier ausgespart, um die Übersichtlichkeit zu bewahren.

In Abbildung 6.1 würde unter der ersten Modellierungsvariante zusätzlich zu den Affordanzräumen, die für Interaktionen mit dem Museumsbesucher genutzt werden können, ein persönlicher Raum hinzugefügt werden, so dass diejenigen Affordanzräume, die sich nahe am Menschen befinden, in der vertrauten Region des persönlichen Raumes liegen, die entfernteren in der persönlichen Region etc. (vgl. die Darstellung der Regionen des persönlichen Raumes nach Hall (1966) in Abschnitt 1.3.1). Diese Modellierung führt dazu, dass soziale Räume und ihre Regionen als neue Individuen in die Situationsbeschreibung eingeführt werden.

Eine zweite Modellierungsvariante führt soziale Räume nicht als neue Individuen ein. Stattdessen spielen Affordanzräume zu manchen Zeitpunkten die Rolle von sozialen Räumen. Die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume nimmt diese zweite Perspektive ein. Affordanzräume besitzen zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedliche Eigenschaften und konstituieren so sozialen Raum: Ein Aktivitätsraum ist ein Affordanzraum, der gegenwärtig genutzt wird, ein sozialer Affordanzraum ist ein Affordanzraum, dessen Nutzung erwartbar ist, ein Territorium ist ein Affordanzraum, für den Akteure ein exklusives Nutzungsrecht beanspruchen, und der persönliche Raum eines Menschen ist die Zusammenfassung jener Affordanzräume, die zur In-

teraktion mit diesem Menschen genutzt werden können.

Statt beispielsweise für Abbildung 6.1 eine vertraute Region des persönlichen Raumes einzuführen, die Affordanzräume, die dem Museumsbesucher besonders nahe sind, überlappt, werden die Affordanzräume selbst als vertraute Affordanzräume identifiziert, die gemeinsam die vertraute Region des persönlichen Raumes bilden. Es braucht auch nicht zusätzlich zum derzeitig genutzten Affordanzraum ein Aktivitätsraum eingeführt werden, der den Affordanzraum überdeckt—der Aktivitätsraum ist ein modifizierter Affordanzraum. Der Vorteil dieser zweiten Variante besteht darin, dass keine weiteren Individuen eingeführt werden müssen und auch keine zusätzlichen Geometrien. Die Geometrie der sozialen Räume ergibt sich aus der Geometrie der Affordanzräume.

Auch in diesem Kapitel werden einige neue Relationen eingeführt. Die Formeln stehen diesmal im Namensraum **S** (für »Social Space«). Alle Konzepte und Relationen, die in diesem Kapitel zur Beschreibung sozialer Räume neu eingeführt werden, sind im Anhang in Tabellen B.5 und B.6 aufgeführt.

6.1. Definitionen sozialer Räume

6.1.1. Aktivitätsräume

Im vorangegangenen Kapitel wird die Struktur des Affordanzraumes aus dem Aktivitätsraum abgeleitet. Diese Ableitung ist durch das Modell von Kendon (1990) motiviert, nach dem Handlungen räumlich verortbar sind. In Kendons Modell wird eine Region, die vom Agenten einer Handlung besetzt wird, von jener Region unterschieden, die der Agent über seine eigene Position hinaus benötigt, um die Handlung erfolgreich auszuführen. Das Modell von Kendon liefert die Blaupause für den Affordanzraum, der als potentieller Aktivitätsraum charakterisiert wurde und dessen räumliche Struktur eine potentielle Agentenregion, eine potentielle Transaktionsregion und eine Affordantenregion umfasst.

Für die Definition des Aktivitätsraumes wird nun der Affordanzraum als grundlegender aufgefasst: Ein Affordanzraum ist genau dann zu einem Zeitpunkt ein Aktivitätsraum, wenn zu diesem Zeitpunkt eine Handlung in ihm platziert ist (**S.D1**). Die Definition eines Aktivitätsraumes nutzt die Relation **PLACED-AT**, die in Abschnitt 5.2.2 eingeführt wird.

$$\mathbf{S.D1} \quad \forall sp, t [\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists ac [\text{PLACED-AT}(ac, sp, t)]]$$

Man beachte, dass durch diese Definition kein Zirkelschluss besteht. Ein

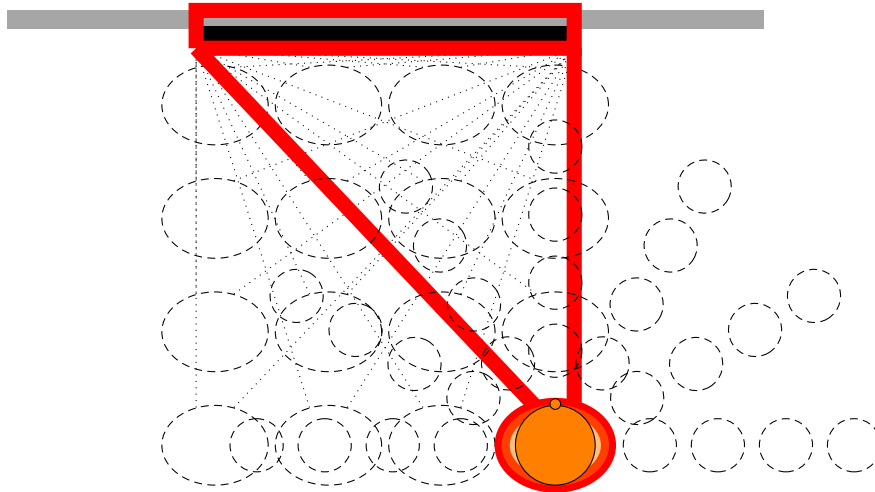


Abbildung 6.2.: Derjenige Affordanzraum, der für das Betrachten des Gemäldes durch den Museumsbesucher genutzt wird, ist farblich hervorgehoben. Er spielt zu diesem Zeitpunkt die Rolle eines Aktivitätsraumes.

solcher würde bestehen, wenn zuvor einerseits behauptet wäre, dass Affordanzräume Aktivitätsräume seien, um nun durch **S.D1** zu definieren, dass Aktivitätsräume Affordanzräume sind. Tatsächlich wurde aber lediglich die räumliche Struktur von Aktivitätsräumen auf die räumliche Struktur von Affordanzräumen übertragen. Dass der Aktivitätsraum in der Literatur vor dem Affordanzraum beschrieben wurde, liegt vermutlich daran, dass Aktivitätsräume beobachtbar sind. Durch Aktivitäten werden Affordanzräume erst sichtbar, sie bestehen aber bereits vor der Aktivität.

Ein Aktivitätsraum ist also keine neue Sorte von Individuen. Es brauchen nicht Aktivitätsräume zusätzlich zu Affordanzräumen modelliert werden; Affordanzräume spielen lediglich zu manchen Zeitpunkten die Rolle, ein Aktivitätsraum zu sein.

Im Beispiel des Museumsbesuchers, der ein Gemälde an der Wand betrachtet, ist also derjenige Affordanzraum, den das Gemälde produziert und den der Museumsbesucher für seine Handlung nutzt, ein Aktivitätsraum. Dieser Aktivitätsraum ist in Abbildung 6.2 hervorgehoben, indem die Ränder der Affordanzraum-Regionen des genutzten Affordanzraumes farblich nachgezogen sind. Sobald der Museumsbesucher die Betrachtung des Gemäldes beendet, hört der Affordanzraum auf, Aktivitätsraum zu sein (vergleiche auch die Darstellung in Abbildung 5.1).

Wenn ein Affordanzraum zu einem Aktivitätsraum wird, dann gibt es eine Handlung, die in ihm verortbar ist. Der Agent dieser Handlung besetzt die potentielle Agentenregion des Affordanzraumes, die potentielle Transaktionsregion des Affordanzraumes wird tatsächlich benötigt, um die Handlung erfolgreich auszuführen, und der Patiens der Handlung ist gerade der Af-

fordant, an dem der genutzte Affordanzraum hängt, und der sich in der Affordantenregion befindet (vgl. Abschnitt 5.2.1, in dem die räumliche Struktur von Affordanzräumen formal eingeführt wird).

Die potentielle Agentenregion des genutzten Affordanzraumes wird über den Zeitraum der Nutzung zur *Agentenregion des Aktivitätsraumes* (**S.D2**), seine potentielle Transaktionsregion zur *Transaktionsregion des Aktivitätsraumes* (**S.D2**), und die Affordantenregion des Affordanzraumes wird zur *Patiensregion des Aktivitätsraumes* (**S.D4**). Damit sind die Regionen des Aktivitätsraumes, die Kendons Modell entlehnt sind (Agentenregion, Transaktionsregion, und die hinzugefügte Patiensregion) auf Basis von Affordanzraum-Regionen rekonstruiert. Ferner sei die potentielle Kernregion eines Aktivitätsraumes seine *Kernregion* (**S.D5**) und die Affordanzregion des Aktivitätsraumes seine *Aktivitätsregion* (**S.D6**).

$$\text{S.D2} \quad \forall sp, r, t [\text{AGENT-REGION}(sp, r, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t) \wedge \text{P-AGENT-REG}(sp, r)]]$$

$$\text{S.D3} \quad \forall sp, r, t [\text{TRANSACTIONAL-REGION}(sp, r, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t) \wedge \text{P-TRANS-REG}(sp, r)]]$$

$$\text{S.D4} \quad \forall sp, r, t [\text{PATIENT-REGION}(sp, r, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t) \wedge \text{AFFORDANT-REG}(sp, r)]]$$

$$\text{S.D5} \quad \forall sp, r, t [\text{CORE-REGION}(sp, r, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t) \wedge \text{CORE-REGION}(sp, r)]]$$

$$\text{S.D6} \quad \forall sp, r, t [\text{ACTIVITY-REG}(sp, r, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t) \wedge \text{AFFORDANCE-REG}(sp, r)]]$$

6.1.2. Soziale Affordanzräume

Nicht alle Affordanzräume sind automatisch sozial relevant, nur weil sie für Handlungen genutzt werden können. Wenn beispielsweise nicht erwartbar ist, dass jemand durch die Tür kommt, dann handelt derjenige, der sich vor die Türe stellt, auch nicht rücksichtslos. Auch ist es mir beispielsweise möglich, den Lichtschalter sowohl im Büro stehend als auch vom Flur aus mit einem Griff um die Wand zu bedienen. Es existieren also gleichermaßen Affordanzräume im Büro und im Flur, die für Handlungen des Lichtschalter-Drückens genutzt werden können. Weil ich den Lichtschalter üblicherweise vom Büro aus bediene, empfinde ich es nicht als rücksichtslose Einschränkung meiner Handlungsmöglichkeiten, wenn der Affordanzraum im Flur versperert wird.

Von manchen Affordanzräumen ist hingegen erwartbar, dass sie genutzt werden. Wenn ich im Büro bin und es draußen dunkel wird, ist es erwartbar, dass ich einen der Affordanzräume nutzen werde, die am Lichtschalter hängen und sich in meinem Büro befinden. Diese Affordanzräume sollten frei gehalten werden. Während der Öffnungszeiten eines Geschäftes ist erwartbar, dass die Eingangstür genutzt wird, es ist erwartbar, dass morgens die Kaffeemaschine bedient wird, abends der Ofen und um 20 Uhr der Fernseher. Solche Affordanzräume, deren Nutzung erwartbar ist, sind *soziale Affordanzräume*.

Ein Affordanzraum ist genau dann zu einem Zeitpunkt sozialer Affordanzraum, wenn für diesen Zeitraum erwartbar ist, dass jemand den Affordanzraum nutzen möchte (**S.D7**), etwa weil es üblich ist, dass der Affordanzraum zu dem Zeitpunkt genutzt wird. Die Definition des sozialen Affordanzraumes nutzt die Relation *EXPECTABLE*, die ausdrückt, dass erwartbar ist, dass ein Akteur der Art *sr* den Affordanzraum *sp* zum Zeitpunkt *t* nutzen wird. Axiom **S.A1** beschreibt die passenden Sorten-Restriktionen. Dabei ist *sr* Instanz der Kategorie »Concept« im Sinne von DOLCE-CORE (vergleiche Abschnitt 4.1, insbesondere Seite 67f).

$$\mathbf{S.D7} \quad \forall sp, t \left[\text{SOCIAL-AFF-SPACE}(sp, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists sr \left[\text{EXPECTABLE}(sr, sp, t) \right] \right]$$

$$\mathbf{S.A1} \quad \forall sr, sp, t \left[\text{EXPECTABLE}(sr, sp, t) \Rightarrow \left[C(sr) \wedge \text{AFFORDANCE-SPACE}(sp) \wedge \text{TQ}(t) \right] \right]$$

Die Repräsentation von sozialen Affordanzräumen setzt eine Komponente voraus, die das Wissen über erwartbare Affordanzraumnutzungen in Form von *EXPECTABLE*-Fakten bereitstellt. Andere Arbeiten in der Robotik demonstrieren, dass diese Art von Wissen aus Beobachtungen des Verhaltens von Akteuren in einer Umgebung erlernt werden kann (z.B. Kanda et al., 2009; Tipaldi & Arras, 2011a). Diese Daten geben üblicherweise Auskunft darüber, zu welchen Zeitpunkten welche Arten von Akteuren an welchen Orten bestimmte Handlungen ausführen, beispielsweise dass Kunden eines Einkaufszentrums (eine Art von Akteuren) zu bestimmten Zeiten verstärkt die Schaufenster betrachten (Kanda et al., 2009). Die Daten machen hingegen keine Aussagen über einzelne Akteure und ihr Verhalten. Aus diesem Grunde ist die erste Stelle (*sr*) des Prädikats *EXPECTABLE* eine soziale Rolle und kein Individuum. Zur Repräsentation der Erwartbarkeit individueller Akteure könnte eine entsprechende Relation definiert werden, so dass an erster Argumentstelle statt einer sozialen Rolle ein Akteur steht.

In Abbildung 6.3 sind die sozialen Affordanzräume rot umrandet. Ihre Nutzung durch Museumsbesucher ist momentan erwartbar. Dabei fällt auf, dass

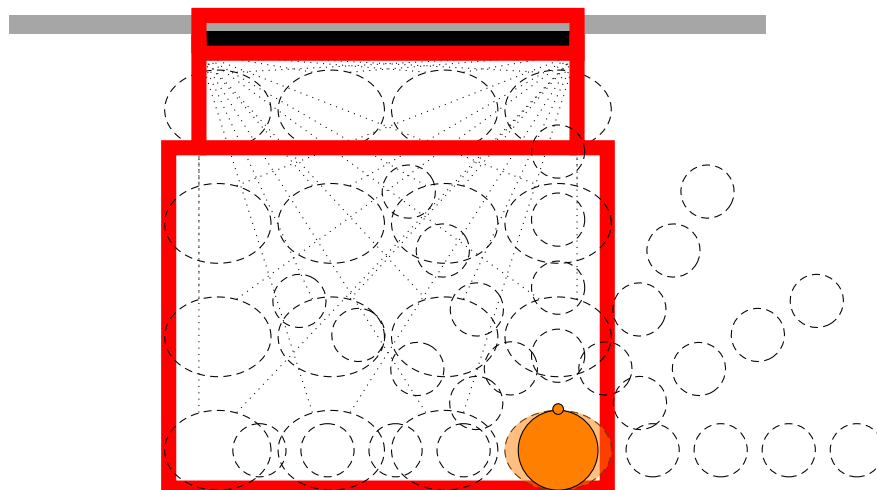


Abbildung 6.3.: Die rot umrandeten Affordanzräume werden üblicherweise durch Museumsbesucher zum Betrachten des Gemäldes benutzt. Sie spielen die Rolle sozialer Affordanzräume.

es sich nur um jene Affordanzräume handelt, deren potentielle Agentenregionen sich in der zweiten bis vierten Zeile befinden. Diejenigen Affordanzräume, die sich in der ersten Zeile ganz nahe dem Gemälde befinden, werden von den Museumsbesuchern für gewöhnlich nicht benutzt.

Seien die Affordanzräume derart bezeichnet, dass $sp_{n,m}$ den Affordanzraum repräsentiert, dessen potentielle Agentenregion sich in der n -ten Zeile und m -ten Spalte (beginnend mit $sp_{1,1}$) gemäß Abbildung 6.3 befindet, und bezeichneten weiterhin *visitor* das Konzept des Museumsbesuchers und *now* den gegenwärtigen Zeitpunkt. Dann ist der Fakt $\text{EXPECTABLE}(\text{visitor}, sp_{2,1}, \text{now})$ Teil der Zustandsbeschreibung, die die abgebildete Situation beschreibt, nicht aber der Fakt $\text{EXPECTABLE}(\text{visitor}, sp_{1,2}, \text{now})$.

Soziale Affordanzräume sind in zweierlei Hinsicht für die Handlungsplatzierung relevant. Erstens sollen Handlungen so platziert werden, dass durch sie die Handlungsmöglichkeiten Anderer möglichst nicht eingeschränkt werden. Abschnitt 7.4.2 formuliert dazu das Prinzip der Wahrung von Handlungsmöglichkeiten Anderer. Andererseits sollten Handlungen möglichst erwartungskonform platziert werden. Es gibt also unter Umständen Gründe bestimmte soziale Affordanzräume zu nutzen, wie Abschnitt 7.4.3 ausführt.

6.1.3. Territorien

Der Begriff des Territoriums ist selbst breit und über viele Disziplinen hinweg diversen Diskursen unterworfen (Delaney, 2005). Das Ziel dieses Abschnitts besteht darin, eine Form des Territoriums zu spezifizieren, das in mikrosozialen Kontexten wirkt und im Alltag in der Form von reservierten Tischen in

Restaurants, markierten Sitzplätzen in Warteräumen oder privaten Parkplätzen in Erscheinung tritt. Insbesondere wird die Unterscheidung von Sommer (1969) berücksichtigt, nach der gegenüber Territorien auf unterschiedliche Weise rücksichtslos agiert werden kann: durch unbefugte Nutzung (»violation«) und durch unbefugtes Betreten (»invasion«).

Manchmal wird ein Affordanzraum weder gerade genutzt, noch ist seine Nutzung erwartbar, und dennoch ist es ein Zeichen von Rücksicht, diesen Affordanzraum für seine eigenen Handlungen nicht zu nutzen. So ist es beispielsweise unangemessen, einen reservierten Parkplatz zu nutzen, auch wenn derjenige, für den der Parkplatz reserviert ist, diesen Parkplatz gerade nicht nutzen möchte. Es ist aber nicht verboten, diesen Parkplatz zu betreten um ihn zu durchkreuzen. Andererseits gibt es Territorien, die nur von Befugten betreten werden dürfen. Der Grund ist dann darin zu finden, dass bestimmte Affordanzen vor dem Zugriff Unbefugter geschützt werden sollen, und nicht darin, dass gerade laufende Handlungen oder Handlungsmöglichkeiten Anderer geschützt werden sollen.

Zur Modellierung von Territorien wird eine neue Relation CLAIMS-USE eingeführt. $\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t)$ steht dafür, dass zum Zeitpunkt t die Gruppe γ den Affordanzraum sp als Territorium für Handlungen des Typs ϕ durch Akteure, die in einer sr -Beziehung zu γ stehen, reserviert. Axiom **S.A2** gibt die Sorten-Restriktionen von CLAIMS-USE an.

$$\mathbf{S.A2} \quad \forall \gamma, sr, sp, \phi, t [\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t) \Rightarrow [\text{GROUP}(\gamma) \wedge \text{AFFORDANCE-SPACE}(sp) \wedge \text{C}(sr) \wedge \text{ACTIVITY-TYPE}(\phi) \wedge \text{TQ}(t)]]$$

Mittels der Relation CLAIMS-USE kann eingestellt werden, für welche Handlungen und von wem ein Affordanzraum territorialisiert ist, und wer welche Handlungen an einem Affordanten vornehmen darf. Wenn eine Gruppe einen Affordanzraum für bestimmte Handlungen durch bestimmte Akteure reserviert, dann liefert diese Gruppe solchen Akteuren einen Grund, den Affordanzraum zu nutzen. Ein Restaurant (als Institution) reserviert seine Tische normalerweise für seine Gäste, so dass nur Akteure, die als Gäste des Restaurants gelten, einen Grund haben, die Tische des Restaurants zu nutzen (während Nicht-Gäste einen Grund haben, ihre Handlungen des Speisens an Tischen außerhalb des Restaurants zu platzieren). CLAIMS-USE vergibt also Exklusiv-Nutzungsrechte.

Das Beispiel, in dem der Parkplatz nur durch Bewohner des Hauses benutzt werden darf, kann mittels CLAIMS-USE durch den Fakt repräsentiert werden, der dafür steht, dass zu dem betrachteten Zeitpunkt *now* die Bewohner des

Hauses als Gruppe (*residents*) nur ihren Mitgliedern (*member*) das Parken *park* auf dem Parkplatz ($sp_{\text{parking-lot}}$) erlaubt:

$$\text{CLAIMS-USE}(\text{residents}, sp_{\text{parking-lot}}, \text{park}, \text{member}, t).$$

Für Territorien, deren Zutritt beschränkt ist, wird der Modellierung die Relation CLAIMS-BE-AT hinzugefügt. CLAIMS-BE-AT(γ, sp, sr, t) steht dafür, dass die Gruppe γ nur Akteuren, die in einer Beziehung *sr* zu ihr stehen, den Zutritt zu *sp* gestattet. Die Sorten-Restriktionen für diese Relation sind durch **S.A3** gegeben.

$$\begin{aligned} \mathbf{S.A3} \quad \forall \gamma, sr, sp, t \quad & [\text{CLAIMS-BE-AT}(\gamma, sp, sr, t) \Rightarrow [\text{GROUP}(\gamma) \wedge \\ & \text{AFFORDANCE-SPACE}(sp) \wedge C(sr) \wedge \text{TQ}(t)]] \end{aligned}$$

Durch CLAIMS-BE-AT wird also eine stärkere territoriale Restriktion etabliert als durch CLAIMS-USE. In einen durch CLAIMS-USE territorialisierten Affordanzraum dürfen Außenstehende (also jene, die durch das Territorium nicht begünstigt sind) nicht für ihre Handlungen nutzen. Dagegen dürfen die durch CLAIMS-BE-AT territorialisierte Affordanzräume von Außenstehenden nicht einmal betreten werden und somit auch nicht genutzt werden, sofern die Nutzung eines Affordanzraumes mit dem Betreten des Affordanzraumes einhergeht (das ist bereits dadurch gegeben, dass der Agent einer transitiven Handlung, die einen Affordanzraum nutzt, in der potentiellen Agentenregion des Affordanzraumes lokalisiert ist; vgl. Abschnitt 5.2.2).

Territoriale Zutrittsbeschränkungen werden mitunter auch durch Markierungen signalisiert. Ein Beispiel ist in der Museums-Szene in Abbildung 6.4 gegeben. Hier hat der Museumsbetreiber die erste Reihe der Affordanzräume vor dem Gemälde territorialisiert, etwa indem eine sichtbare Absperrung aufgebaut wurde oder durch einen automatischen Alarmton, der ertönt, sobald ein Museumsbesucher zu nahe an das Gemälde tritt.

Unter Verwendung von CLAIMS-USE und CLAIMS-BE-AT wird ein Territorium ganz analog zu Aktivitätsraum und sozialen Affordanzraum definiert (**S.D8**): Ein Affordanzraum ist genau dann zu einem Zeitpunkt ein Territorium, wenn es einen territorialen Anspruch gibt, der den Affordanzraum zu diesem Zeitpunkt umfasst.

$$\begin{aligned} \mathbf{S.D8} \quad \forall sp, t \quad & [\text{TERRITORY}(sp, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists \gamma, \phi, sr \quad [\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t) \vee \\ & \text{CLAIMS-BE-AT}(\gamma, sp, sr, t)]] \end{aligned}$$

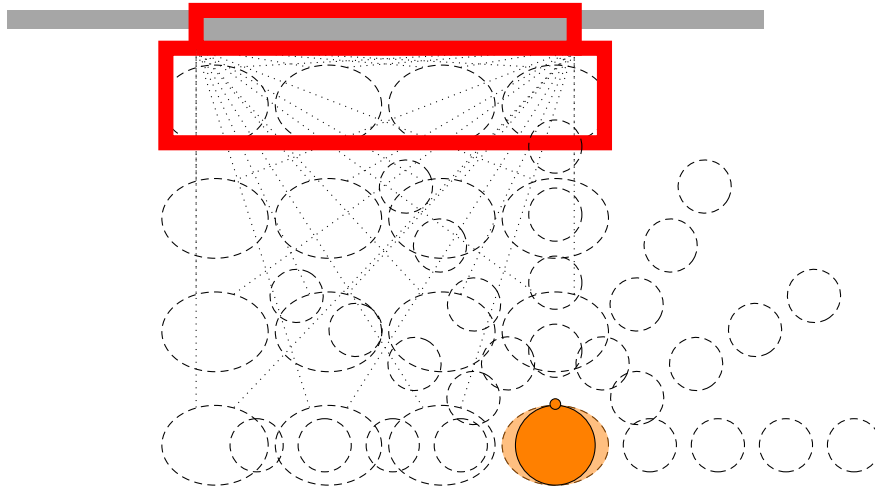


Abbildung 6.4.: Die Museumsverantwortlichen territorialisieren durch die Einrichtung einer Absperrung oder eines Alarmtons diejenigen Affordanzräume, deren potentiellen Agentenregionen dem Gemälde besonders nahe sind. Die Affordanzräume spielen die Rolle von Territorien, von deren Nutzung Museumsbesucher ausgeschlossen sind.

Damit Territorien wirken, muss es die Möglichkeit geben, die sozialen Beziehungen zwischen Gruppen und Akteuren zu beschreiben. Dazu wird die Relation *SOCIAL-REL* eingeführt. Im Hinblick auf die Wiederverwendung für persönliche Räume können über *SOCIAL-REL* soziale Beziehungen zwischen Gruppen und Akteuren und zwischen Akteuren und Akteuren beschrieben werden. $\text{SOCIAL-REL}(x, y, sr, t)$ steht dafür, dass die Gruppe/der Akteur x mit der Gruppe/dem Akteur y (zum Zeitpunkt t) in der sozialen Beziehung sr steht. Die Relation ist nicht symmetrisch in den ersten beiden Argumenten: Wenn x Gastgeber von y ist, dann steht x mit y in der sozialen Beziehung *host* während y mit x nicht in der *host*-Beziehung, sondern in der *guest*-Beziehung steht. Sorten-Restriktionen für *SOCIAL-REL* formuliert Axiom **S.A4**.

$$\text{S.A4} \quad \forall x, y, sr, t [\text{SOCIAL-REL}(x, y, sr, t) \Rightarrow [[\text{ACTANT}(x) \vee \text{GROUP}(x)] \wedge [\text{ACTANT}(y) \vee \text{GROUP}(y)] \wedge \text{SOCIAL-CONCEPT}(sr)] \wedge \text{TQ}(t)]$$

Die Verwendung von Wissen über vorhandene Territorien wird im nächsten Kapitel diskutiert. Insbesondere finden drei Prinzipien zur Platzierung von Handlungen bezüglich Territorien in den Abschnitten 7.4.4, 7.4.5 und 7.4.6 ihre Diskussion (Prinzip der Nutzung eigener Territorien, Prinzip der Meidung unbefugter Nutzung von Territorien, Prinzip der Meidung von unbefugtem Betreten von Territorien).

6.1.4. Persönliche Räume

Nachdem Aktivitätsraum, sozialer Affordanzraum und Territorium auf Basis von Affordanzräumen definiert wurden, bleibt nun noch der persönliche Raum übrig, über den in der sozialen Robotik mit Abstand die meisten und diversesten Modelle präsentiert wurden (vergleiche Abschnitt 2.1). Mit einem Affordanz-basiertem Modell persönlicher Räume wird dieser Fundus nachfolgend um ein Modell reicher, das einen wichtigen Aspekt des persönlichen Raumes nach Hall (1966) betont, der von bestehenden Modellen übersehen wird: Die Bedeutung von Handlungsmöglichkeiten für das Empfinden von sozialer Nähe.

Hall (1966) legt in seiner Herleitung des persönlichen Raumes sehr viel Wert auf die Wahrnehmungs- und Handlungsmöglichkeiten zwischen Menschen als Faktoren interpersoneller Distanz, und nur vergleichsweise beiläufig auf die so häufig zitierten metrischen Distanzangaben, nach denen die vertraute Distanz bis 45cm, die persönliche Distanz bis 120cm, die soziale Distanz bis 360cm und die öffentliche Distanz darüber hinaus reicht (vgl. auch die Darstellung in Abschnitt 1.3.1).

Die nahe vertraute Distanz, so schreibt Hall (1966, S. 110), sei »the distance of love-making and wrestling«, und in der nahen persönlichen Distanz »one can hold or grasp the other person« (Hall, 1966, S. 113). Hall schreibt weiter, dass die Benennung der Distanzen darauf zeigen soll, welche Handlungstypen in ihnen möglich sind:

»My choice of terms to describe various distances was [...] influenced by [...] a desire to provide a clue as to the types of activities [...] associated with each distances [...]« (Hall, 1966, S. 114)

Weiter führt Hall aus, dass die Wahrnehmung von Nähe von den Handlungsmöglichkeiten abhängt (»[t]he [...] sense of closeness derives in part from the possibilities present in regard to what each participant can do to the other with his extremities« (Hall, 1966, S. 113)) und dass Menschen Distanzen handlungs- und gefühls-abhängig platzieren (»[t]he specific distance chosen depends on the transaction; the relationship of the interacting individuals, how they feel, and what they are doing« (Hall, 1966, S. 120)).

Unter der Affordanz-basierten Perspektive auf soziale Räume wird hier ein Modell des persönlichen Raumes vorgeschlagen, nach dem der persönliche Raum eines Menschen sich aus genau denjenigen Affordanzräumen zusammensetzt, die von den Affordanzen des Menschen produziert werden. Diese Affordanzräume sind gerade diejenigen Affordanzräume, die andere Akteure

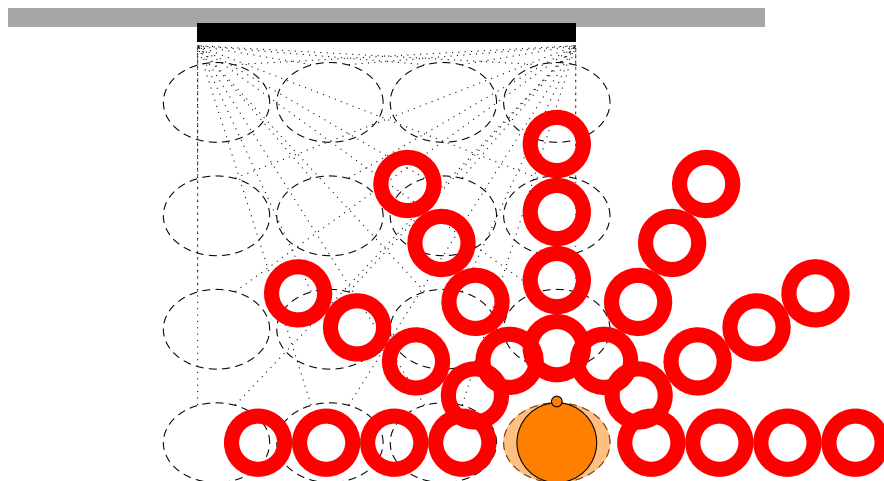


Abbildung 6.5.: Rot hervorgehoben sind jene Affordanzräume, die von Interaktionen mit dem Museumsbesucher genutzt werden können. Sie bilden einen Teil des persönlichen Raumes des Besuchers.

für Interaktionen mit dem Menschen nutzen können. Solche Affordanzräume sollen im Hinblick auf die Analysen Edward Halls nachfolgend als *Hall-Affordanzräume* bezeichnet werden. Definition **S.D9** definiert: Ein Affordanzraum ist genau dann ein Hall-Affordanzraum, wenn er an einem Menschen hängt.¹

$$\mathbf{S.D9} \quad \forall sp [\text{HALL-AFF-SPACE}(sp) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists \alpha [\text{HUMAN}(\alpha) \wedge \text{ATTACHED-TO}(sp, \alpha)]]$$

Im Gegensatz zu den anderen sozialen Räumen ist ein Hall-Affordanzraum seine gesamte Lebensdauer über ein Hall-Affordanzraum. Diese Eigenschaft ergibt sich daraus, dass ein Affordanzraum nicht mal an dem einen und dann an dem anderen Objekt hängt, sondern sein Referenzobjekt über den zeitlichen Verlauf beibehält. Also hängt ein Affordanzraum, der einem Menschen anhängt (per Definition ein Hall-Affordanzraum) auch zu jedem Zeitpunkt diesem Menschen an. Hingegen kann ein Affordanzraum mal ein Aktivitätsraum sein, weil eine Handlung in ihm platziert ist, und dann wieder nicht, wenn die Handlung abgeschlossen ist.

Die Hall-Affordanzräume des Museumsbesuchers, die von einem Museumsroboter genutzt werden können, um den Museumsbesucher zusätzliche Informationen zum Gemälde zu geben, sind in Abbildung 6.5 hervorgehoben. Sie bilden einen Teil des persönlichen Raumes des Besuchers. Zusätzlich kann es auch noch weitere Affordanzräume geben, die von Menschen und Robotern genutzt werden können, um den Besucher die Hand zu geben, um ihm

¹Vergleiche Definition **A.D8** auf Seite 92, nach der ein Affordanzraum genau dann einer Entität anhängt, wenn die Entität Träger der Affordanz ist, die den Affordanzraum produziert.

in die Augen zu schauen, um ihn zu umarmen etc.

Damit Hall-Affordanzräume entscheidend bei der Bewertung von Platz-Kandidaten wirken können, muss bekannt sein, wie der Träger des persönlichen Raumes die Platzierung von Handlungen in den Hall-Affordanzräumen, die ihm anhängen, empfindet. Dafür wird die Relation `ACCEPTS-USE` eingeführt. `ACCEPTS-USE( $sp, \phi, sr, t$ )` steht dafür, dass der Mensch, an dem der Hall-Affordanzraum sp hängt, die Platzierung von Handlungen des Typs ϕ in sp zum Zeitpunkt t nur dann akzeptiert, falls der Agent der Handlung in der sozialen Beziehung sr zu ihm steht. Axiom **S.A5** drückt entsprechende Sorten-Restriktionen aus.

$$\mathbf{S.A5} \quad \forall sp, \phi, sr, t [\text{ACCEPTS-USE}(sp, \phi, sr, t) \Rightarrow [\text{HALL-AFF-SPACE}(sp) \wedge \text{ACTIVITY-TYPE}(\phi) \wedge \text{SOCIAL-CONCEPT}(sr) \wedge \text{TQ}(t)]]$$

Neben dem Aspekt, dass für Interaktionen mit einem Menschen bestimmte Affordanzräume akzeptiert sind (und andere nicht), gibt es noch einen zweiten Aspekt, der von Sommer (1969) in Bezug auf den persönlichen Raum genannt wird. Sommer identifiziert den persönlichen Raum mit einer einzigen Region, die von anderen Akteuren situations-abhängig per se nicht betreten werden darf. Anders als bei Hall geht es bei Sommer nicht primär um Distanzen, die Menschen bei Interaktionen einnehmen, sondern um Abstände, die Menschen zueinander einhalten, wenn sie einander fremd sind und nicht in Interaktion treten möchten. Goffman (1971) spricht auch von unfokussierter Interaktion, wenn Menschen ihr Verhalten der Präsenz anderer Akteure anpassen, ohne ihre Handlungen selbst auf die anderen Akteure zu beziehen.

Um auch die Funktion des persönlichen Raumes im Falle unfokussierter Interaktion abbilden zu können, wird eine zweite Relation `TOO-CLOSE` eingeführt. Der Ausdruck `TOO-CLOSE( $sp, sr, t$ )` steht dafür, dass der Mensch, an dem der Hall-Affordanzraum sp hängt, es zum Zeitpunkt t für eine zu große Annäherung hält, wenn Akteure, die in einer sr -Beziehung zu ihm stehen, ihre Handlungen derart platzieren, dass sie währenddessen in der Affordanzraum-Region von sp stehen.

$$\mathbf{S.A6} \quad \forall sp, \phi, sr, t [\text{TOO-CLOSE}(sp, sr, t) \Rightarrow [\text{HALL-AFF-SPACE}(sp) \wedge \text{SOCIAL-CONCEPT}(sr) \wedge \text{TQ}(t)]]$$

Dass die Relationen `ACCEPTS-USE` und `TOO-CLOSE` zeit-abhängig sind, ermöglicht zu modellieren, dass ein Mensch zu unterschiedlichen Zeitpunkten, je nach Situation oder emotionalem Zustand, unterschiedliche Präferenzen

hat; bishin zu extremen Zuständen, in denen ein Mensch gar kein empfinden des persönlichen Raumes mehr hat. Die neurowissenschaftliche Studie von Kennedy, Gläscher, Tyszka und Adolphs (2009) zum Beispiel zeigt, dass der untersuchte Patient mit Amygdala-Läsion keine Reaktion auf das Eindringen in seinen persönlichen Raum zeigt.

Ungeachtet der Frage, ob Goffmans Terminologie der fokussierten und unfokussierten Interaktionen glücklich gewählt ist (es ist ungewöhnlich, bei unfokussierter Interaktion überhaupt von Interaktion zu reden) wird nachfolgend seine Terminologie verwendet. Anders als etwa »Ko-Präsenz« enthält »unfokussierte Interaktion« den Aspekt, dass die Präsenz des einen Akteurs tatsächlich einen Einfluss auf das Verhalten des anderen Akteurs hat.

Empirische Studien aus der Mensch-Roboter-Interaktion liefern Evidenz dafür, dass die Unterscheidung dieser beiden Interaktionstypen für die Bewertung von Positionen eines Roboters bezüglich eines Menschen tatsächlich relevant ist. Während je nach Art der fokussierten Interaktion unterschiedliche Distanzen als adäquat empfunden werden (z.B. Walters et al., 2009; Kim & Mutlu, 2014), wird von anderen Autoren (z.B. Luber et al., 2012) beobachtet, dass bei unfokussierten Interaktionen der persönliche Raum eine andere Rolle zu spielen scheint. Luber et al. (2012) analysieren Daten aus Überwachungskameras im öffentlichen Raum und finden, dass fremde Personen einander in geringeren Abständen passieren, als es Modelle vorhersagen, die den persönlichen Raum nach Hall (1966) abbilden. In der Tat verweisen die Darstellungen von Hall (1966) ausschließlich auf den Fall fokussierter Interaktion zwischen Menschen.

In den Abschnitten 7.4.7 und 7.4.8 wird die Unterscheidung zwischen fokussierten und unfokussierten Interaktionen nach Goffman (1971) nochmals unter dem Aspekt der Bewertung von Platz-Kandidaten aufgegriffen. Dabei wird ein erstes Prinzipien formuliert, nach denen ein Mensch einen Grund für die Nutzung eines (Hall-)Affordanzraumes für eine fokussierte Interaktion liefert, sofern er die Nutzung des Affordanzraumes durch solche Handlungen akzeptiert (gemäß ACCEPTS-USE). Ein zweites Prinzip wiederum besagt, dass Handlungen nicht so platziert werden sollen, dass sie einem unbeteiligten Menschen zu nahe kommen (gemäß TOO-CLOSE).

Abbildung 6.6 zeigt exemplarisch, wie ein Affordanz-basierter persönlicher Raum aussehen kann, der die Grundtypen sozialer Beziehungen nach Hall (1966) berücksichtigt (vertraut, persönlich, sozial). Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Modellierung eines persönlichen Raumes nach der Affordanz-basierten Konzeption beginnt mit der Feststellung einer (oder mehrerer) Affordanzen, die einem Menschen inhärent sind. Um exemplarisch den

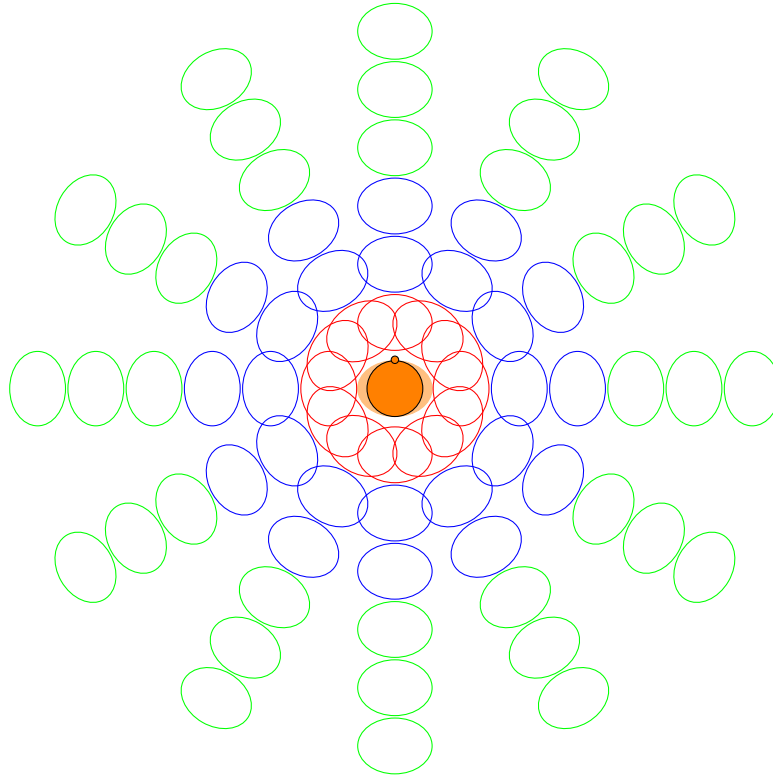


Abbildung 6.6.: Hall-Affordanzräume, die für Interaktionen mit dem Menschen genutzt werden können. Unterschieden sind nach Hall (1966) diejenigen Hall-Affordanzräume, die durch vertraute Menschen (rot) genutzt werden dürfen, durch Menschen, zu denen eine persönliche Beziehung besteht (blau) und solche, zu denen eine soziale Beziehung besteht (grün). Die potentiellen Agentenregionen der Hall-Affordanzräume sind als Ellipsen dargestellt.

persönlichen Raum aus Abbildung 6.6 zu modellieren, kann angenommen werden, dass der Mensch *hum* Träger einer Affordanz *aff'* inhärent ist, deren Wert ein generischer Affordanz-Wert *interact* ist. Der Mensch ermöglicht also anderen Akteuren, mit ihm zu interagieren (vgl. Abschnitt 4.2):

$$\text{HUMAN}(\text{hum}).\text{I}(\text{aff}', \text{hum}).\text{L}(\text{interact}, \text{aff}').$$

Die Affordanz *aff'* produziert mehrere Affordanzräume, in die Interaktionen platziert werden können, die also Menschen und Roboter nutzen können, um mit dem Menschen *hum* in Interaktion zu treten. Abbildung 6.6 stellt 72 dieser Affordanzräume dar. Jeder dieser 72 Affordanzräume wird von *aff'* produziert (vgl. Abschnitt 5.2.2):

$$\text{PRODUCES}(\text{aff}', \text{sp}_1). \dots \text{PRODUCES}(\text{aff}', \text{sp}_{72}).$$

Nach Definitionen **S.D9** und **A.D8** (S. 92) handelt es sich damit bei allen 72 Affordanzräumen um Hall-Affordanzräume. Um zu beschreiben, dass der Mensch *hum* Interaktionen nur mit Akteuren akzeptiert, die in einer vertrauten Beziehung zu ihm stehen, kann das Prädikat **ACCEPTS-USE** genutzt werden. Die folgende Faktenmenge bezieht sich auf die ersten zwölf inneren Affordanzräume, deren potentielle Agentenregionen in Abbildung 6.6 in roter Farbe dargestellt sind:

$$\text{ACCEPTS-USE}(sp_1, \text{interact}, \text{intimate}).$$

$$\dots$$

$$\text{ACCEPTS-USE}(sp_{12}, \text{interact}, \text{intimate}).$$

Analog repräsentieren die folgende Fakten, dass *hum* akzeptiert, dass Akteure, mit denen er in einer persönlichen Beziehung steht, ihre Interaktionen mit ihm in einen der 24 blauen Affordanzräumen platzieren, und diejenigen, zu denen er eine soziale Beziehung hegt, einen der 36 äußeren Affordanzräume nutzen:

$$\text{ACCEPTS-USE}(sp_{13}, \text{interact}, \text{personal}).$$

$$\dots$$

$$\text{ACCEPTS-USE}(sp_{36}, \text{interact}, \text{personal}).$$

$$\text{ACCEPTS-USE}(sp_{37}, \text{interact}, \text{social}).$$

$$\dots$$

$$\text{ACCEPTS-USE}(sp_{72}, \text{interact}, \text{social}).$$

Zusätzlich kann unter Verwendung von **TOO-CLOSE** ausgedrückt werden, dass alle Individuen, die nicht mit *hum* interagieren, die vertrauten Affordanzräume nicht betreten sollen:

$$\text{TOO-CLOSE}(sp_1, \text{anyone}).$$

$$\dots$$

$$\text{TOO-CLOSE}(sp_{12}, \text{anyone}).$$

Generell ist das Modell des persönlichen Raumes nicht abhängig von der Klassifikation der sozialen Beziehungen in vertraut, persönlich, sozial und öffentlich. Hall (1966, S. 128) erwähnt, dass diese vierstufige Klassifikation seinen Beobachtungen nach auf den typischen Nordamerikaner zutrifft, in anderen Kulturen aber beispielsweise Familie/Nicht-Familie-Beziehungen ausschlaggebend sind. Wollte man dennoch die vier Hauptregionen des persönli-

chen Raumes nach Hall (1966) rekonstruieren, können die potentiellen Agentenregionen der jeweiligen Hall-Affordanzräume zusammengefasst werden, so wie unter Abschnitt 5.2.1 die potentielle Kern-Region eines Affordanzraumes als mereologische Summe von potentieller Agentenregion und potentieller Transaktionsregion definiert wurde. Um zum Beispiel die vertraute Region nach Hall (»intimate region«) zu rekonstruieren, kann die mereologische Summe über alle potentiellen Agentenregionen jener Hall-Affordanzräume eines Menschen gebildet werden, für die gilt, dass der Mensch nur vertrauten Interaktionspartnern gestattet, diese Hall-Affordanzräume zu nutzen. Die vertraute Region eines persönlichen Raumes ist dann genau die mereologische Summe jener Regionen, die potentielle Agentenregionen von Hall-Affordanzräumen sp_n sind, in einer Relation $\text{ACCEPTS-USE}(sp_n, \phi_n, \text{intimate}, t)$ stehen (für beliebige Handlungstypen ϕ_n) und demselben Menschen anhängen. Entsprechend können auch persönliche, soziale und öffentliche Regionen des persönlichen Raumes rekonstruiert werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird die generellere und differenziertere Natur der hier vorgelegten Affordanz-basierten Modellierung ausgenutzt, unter der es möglich ist, das beliebige Klassifikationen sozialer Beziehungen modelliert werden können, das heißt, über die Einteilung in vertraute, persönliche, soziale und öffentliche Distanzen hinaus.

6.2. Fazit

Die vorgelegte Konzeption sozialer Räume führt eine handvoll Relationen ein, um soziale Eigenschaften von Affordanzräumen zu beschreiben. Der Aktivitätsraum ist ein Affordanzraum, in dem gegenwärtig eine Handlung platziert ist, ein sozialer Affordanzraum ist ein Affordanzraum, dessen Nutzung erwartbar ist, ein Territorium ist ein Affordanzraum, für den exklusive Nutzungsrechte etabliert werden, und persönliche Räume setzen sich aus Hall-Affordanzräumen zusammen (d.h., Affordanzräumen, die Menschen anhängen). Wie sich zeigte, ist es nicht notwendig, für die Behandlung von sozialen Räumen neben Affordanzräumen neue sozio-räumliche Strukturen in die Modellierung einzuführen. Soziale Räume sind Affordanzräume mit besonderen Eigenschaften. Zudem betont diese Konzeption eine enge Beziehung zwischen sozialen Raum und Handlungsmöglichkeiten. Diese Beziehung ist insbesondere in der Arbeit von Hall (1966) sichtbar und bisher in anderen Modellen aus der Robotik (vgl. Kapitel 2) noch nicht repräsentiert.

Die vorgelegte Konzeption sozialer Räume ermöglicht auch, dass ein einzelner Affordanzraum zur selben Zeit Aktivitätsraum, sozialer Affordanzraum,

Territorium und Hall-Affordanzraum sein kann. Als ein Beispiel für eine solche Situation kann man sich einen Arzt vorstellen, der verfügt, dass nur er und seine Kollegen einen Patienten berühren dürfen, der mit einem ansteckenden Virus infiziert ist. Damit sind die Hall-Affordanzräume des Patienten, in die Handlungen des Berührens des Patienten platziert werden können, auch Territorien. Ist zudem erwartbar, dass der Patient vom Arzt behandelt wird, sind diese Affordanzräume auch soziale Affordanzräume, und wird der Patient gegenwärtig tatsächlich behandelt, dann ist einer dieser Affordanzräume auch Aktivitätsraum. Dieser Affordanzraum existiert nicht etwa vier Mal, sondern genau einmal und er spielt vier soziale Rollen.

Prinzipien der sozialen Handlungsplatzierung

Das soziale Handlungsplatzierungsproblem wurde im Einleitungskapitel unter Abschnitt 1.1 wie folgt definiert:

Gegeben ist ein Handlungstyp ϕ und ein Akteur α , der eine Handlung vom Typ ϕ ausführen soll. Gesucht ist eine Platzierung π , so dass

- der Akteur α Handlungen vom Typ ϕ unter Nutzung der Platzierung π ausführen kann und
- die Platzierung π eine der sozial angemessensten aller verfügbaren Platzierungen ist, die α für ϕ -Handlungen nutzen kann.

Diese Definition unterstellt, dass Platzierungen hinsichtlich ihrer sozialen Angemessenheit bewertet werden können. Außerdem berücksichtigt die Definition, dass es mehrere »beste Platzierungen« geben kann, aus denen ausgewählt werden soll.

Mit den Resultaten aus den vergangenen Kapiteln kann die Problemformulierung konkretisiert werden: Um das soziale Handlungsplatzierungsproblem unter der Affordanz-basierten Perspektive zu lösen, gilt es, einen der sozial angemessensten Platz-Kandidaten für eine Handlung (vgl. Abschnitt 5.3) auszuwählen. Es gilt in diesem Kapitel zu klären, wie Platz-Kandidaten sozial bewertet werden können.

7.1. Entscheiden mit qualitativen, bipolaren Gründen

Eine gründliche und rationale Herangehensweise bei der Entscheidungsfindung besteht darin, sich über die Gründe bewusst zu werden, die für und gegen die jeweiligen (Handlungs-)Optionen sprechen und diese Gründe abzuwägen. Ein frühes Zeugnis dieser Vorgehensweise findet sich in einem Brief

von Benjamin Franklin aus dem Jahre 1772 an den Wissenschaftler Joseph Priestley, der nach einem Rat fragte, ob er eine neuen Stelle annehmen solle (vgl. Franklin, 1956):

»To get over this [that all the Reasons pro and con are not present to the Mind at the same time], my Way is, to divide half a Sheet of Paper by a Line into two Columns, writing over the one Pro, and over the other Con. Then [...] I put down under the different Heads short Hints of the different Motives that at different Times occur to me for or against the Measure. When I have thus got them all together in one View, I endeavour to estimate their respective Weights; and where I find two, one on each side, that seem equal, I strike them both out: If I find a Reason pro equal to some two Reasons con, I strike out the three. If I judge some two Reasons con equal to some three Reasons pro, I strike out the five; and thus proceeding I find at length where the Ballance lies; and if [...] nothing new that is of Importance occurs on either side, I come to a Determination accordingly. [...] And tho' the Weight of Reasons cannot be taken with the Precision of Algebraic Quantities, yet when each is thus considered separately and comparatively, and the whole lies before me, I think I can judge better[...]« Benjamin Franklin

Franklin beschreibt eine »Moral or Prudential Algebra«, nach der die Gründe, Pros und Cons, für jede der verfügbaren Handlungsalternativen aufgelistet, gewichtet und schließlich zu einem Resultat aggregiert werden. Der Prozess der Entscheidungsfindung umfasst mehrere Teilprozesse: Erst müssen die Handlungsoptionen bekannt sein. Danach können die Gründe erkannt werden, die für und gegen die Handlungsoptionen sprechen. Diese Gründe sind unterschiedlicher Stärke, so dass sie gegeneinander abgewogen werden können. Schließlich wird nach einem Vorgang der Aggregation ersichtlich, welche Handlungsoptionen anderen Handlungsoptionen überlegen sind. Dabei betont Franklin, dass die Gewichte nicht von numerischer Genauigkeit seien und doch erlauben, Mengen von Gründen als gleichgewichtig zu identifizieren.

Über derartige anekdotische Evidenz hinaus werden auf dem Gebiet der Künstlichen Intelligenz Probleme der Entscheidungsfindung unter Berücksichtigung von Pros und Cons unter dem Begriff der bipolaren qualitativen Entscheidungsfindung (»bipolar qualitative decision making«) formal untersucht (z.B. Dubois et al., 2008). Dabei steht »bipolar« dafür, dass es sowohl

Gründe für (Pros) als auch Gründe gegen (Cons) eine Option gibt.¹ Mit »qualitativ« ist gemeint, dass die Gewichte (oder Stärken) von Gründen auf Ordinalskalen angegeben werden statt auf Intervallskalen. Die Gründe sind beispielsweise »schwach«, »stark« und »sehr stark«. Neben formalen Analysen existieren auch empirische Studien, die zeigen, dass formale bipolare, qualitative Entscheidungsverfahren die tatsächlichen Entscheidungen von Menschen gut prognostizieren (Bonnefon, Dubois, Fargier & Leblois, 2008).

Zu den prominentesten empirischen Arbeiten und mathematischen Modellen der Entscheidungstheorie gehört die Prospect-Theory nach Kahneman und Tversky (1979). Diese Theorie beschreibt, wie Menschen die positiven und negativen Aspekte von Entscheidungsalternativen auf unterschiedliche Weise ins Kalkül ziehen, wenn sie eine Entscheidung treffen sollen. Die Theorie erfasst beispielsweise das Phänomen der Verlustaversion, das heißt, dass Menschen dazu tendieren, Verluste stärker zu gewichten als Gewinne.

Eine Hypothese, die im Rahmen dieser Arbeit nicht empirisch untersucht werden kann, könnte deshalb lauten, dass, wenn intelligente Systeme sich »so wie Menschen« entscheiden sollen und ihre Entscheidungen für Menschen nachvollziehbar (transparent) sein sollen, sie auch die Fähigkeit besitzen müssen, die Pros und Cons von Entscheidungsalternativen gesondert zu betrachten und qualitativ zu gewichten.

7.1.1. Allgemeines Rahmenwerk

Bevor die Gründe in den Fokus gerückt und in die Konzeption sozialer Räume eingeordnet werden, wird hier zunächst ein Rahmenwerk zum bipolaren, qualitativen Entscheidungsproblem nach Dubois et al. (2008) skizziert.

Eine Instanz des bipolaren, qualitativen Entscheidungsproblems besteht aus einer endlichen Menge D möglicher (Handlungs-)Optionen, einer Menge von Gründen X , die auf einer bipolaren Skala V angeordnet sind, sowie einer total geordneten Skala L der Stärken die Gründe haben können (Dubois et al., 2008). Die einfachste bipolare Skala ist $V = \{-, 0, +\}$, deren Elemente negative Polarität, Neutralität und positive Polarität repräsentieren. Jeder Grund aus X ist dann entweder gegen, für oder irrelevant bezüglich der Bewertung von (Handlungs-)Optionen aus D . Die Skala der Stärken L besitzt ein stärkstes Element 1_L und ein schwächstes Element 0_L . Jedem Grund aus X wird durch $\pi : X \rightarrow L$ eine Stärke zugeordnet.

Für jede (Handlungs-)Option $a \in D$ ist $A = \{x \mid x(a) \neq 0\}$ die Menge

¹In den Arbeiten von Dubois, Fargier und Bonnefon ist hauptsächlich von »arguments« oder »pros and cons«, aber nicht von »reasons« die Rede. Zum Zwecke einer einheitlichen Terminologie übersetze ich hier das »argument« von Dubois und Kollegen mit »Grund«.

der relevanten Gründe für Option a . A enthält also genau diejenigen Gründe aus X , die bezüglich a entweder negative oder positive Polarität besitzen. Die Menge $A^- = \{x \mid x(a) = -\}$ ist die Menge der Gründe, die gegen die Option a sprechen, und $A^+ = \{x \mid x(a) = +\}$ entsprechend die Menge der Gründe, die für a sprechen. Unter Verwendung dieses Werkzeugs können zwei Optionen $a, b \in D$ verglichen werden, indem die Mengen-Paare (A^-, A^+) und (B^-, B^+) miteinander verglichen werden.

7.1.2. Levelwise-Tallying

Mit dem Levelwise-Tallying nach Dubois et al. (2008) existiert eine Entscheidungsregel, mit der (Handlungs-)Optionen, für und gegen die qualitativ gewichtete Pros und Cons bekannt sind, in eine Präferenzordnung gebracht werden können. Levelwise-Tallying funktioniert ähnlich zu dem Verfahren von Benjamin Franklin (s.o.). In empirischen Untersuchung von Bonnefon et al. (2008) erwies sich Levelwise-Tallying zudem als die Entscheidungsregeln unter vielen, die Entscheidungen von menschlichen Versuchspersonen am besten vorausszusagen vermochte.

Levelwise-Tallying vergleicht zwei (Handlungs-)Optionen miteinander, indem es zunächst die ihre stärksten Gründe vergleicht, und sollte sich hinsichtlich der stärksten Gründe keine Präferenz abzeichnen, werden die zweitstärksten Gründe betrachtet etc. In jedem Schritt zieht Levelwise-Tallying für jede der beiden Optionen die jeweilige Anzahl der Cons von der Anzahl der Pros ab. Sobald die Differenz erstmals für eine Option A größer ist als für die andere Option B, wird die Option A der Option B gegenüber präferiert. Beim Vergleich von Mengen von Gründen gleicher Stärke macht die Anzahl der Gründe also einen Unterschied. Ein starker Grund kann aber auch durch beliebig viele weniger starke Gründe nicht aufgewogen werden.

Levelwise-Tallying erzeugt eine lexikalische Präferenzordnung über den (Handlungs-)Optionen bezüglich der Gründe, die für und gegen sie sprechen. Formal lautet die Regel: $A \succeq^{\text{Lexi}} B$ genau dann, wenn es ein $\lambda \in L \setminus 0_L$ gibt, so dass für alle $\gamma > \lambda$ gilt $|A_\gamma^+| - |A_\gamma^-| = |B_\gamma^+| - |B_\gamma^-|$ sowie $|A_\lambda^+| - |A_\lambda^-| > |B_\lambda^+| - |B_\lambda^-|$, wobei A_λ^- die Menge der Gründe ist, die gegen Option A sprechen und die Wichtigkeit λ besitzen (entsprechend enthält A_λ^+ genau die Gründe, die für Option A sprechen und λ -wichtig sind).

Eine nützliche Eigenschaft der durch Levelwise-Tallying erzeugten Ordnung ist, dass jeweils eine Nutzenfunktion existiert, die dieselbe Ordnung erzeugt. Insbesondere kann man Funktionen σ^+ und σ^- finden, so dass gilt

(Dubois et al., 2008) :

$$A \succeq^{\text{Lexi}} B \text{ gdw. } \sigma^+(A^+) - \sigma^-(A^-) \geq \sigma^+(B^+) - \sigma^-(B^-)$$

Diese Eigenschaft kann beispielsweise dafür genutzt werden, um die Bewertung von Platz-Kandidaten in Kosten-basierten Entscheidungs- und Planungsverfahren zu integrieren. Dubois und Kollegen geben folgendes Funktionenpaar an, womit sich die Netto-Stärke der Gründe für/gegen eine jede (Handlungs-)Option A effizient als $\sigma^+(A^+) - \sigma^-(A^-)$ berechnen lässt. Die Elemente aus D können dann nach diesem berechneten Wert sortiert werden.

$$\sigma^+(A^+) = \sum_{\lambda_i \in L} |A_{\lambda}^+| \cdot |X|^i, \sigma^-(A^-) = \sum_{\lambda_i \in L} |A_{\lambda}^-| \cdot |X|^i$$

7.2. Rechtfertigende und erklärende Gründe

Das Rahmenwerk von Dubois et al. (2008) zum bipolaren, qualitativen Entscheiden gibt bereits Aufschluss über grundsätzliche Eigenschaften von Gründen: Gründe haben eine Polarität (das heißt, sie sind Pro oder Con), sie besitzen eine Stärke und sie beziehen sich auf (Handlungs-)Optionen.

In der philosophischen Auseinandersetzung mit dem Begriff des Grundes finden sich ganz analoge Charakterisierungen. Beispielsweise schreibt Joseph Raz:

»Normative reasons are facts that have normative bearing or force. They are called »reasons« because they can serve as stepping-stones in reasoning about what to believe or what to do. Deliberating from the reasons that apply to us we become aware of the attractions and drawbacks of options.« (Raz, 2011, S. 23)

Auch in diesem Zitat finden sich die Eigenschaften Polarität und Stärke von Gründen wieder. Außerdem werden bei Raz normative Gründe als Tatsachen (»facts«) klassifiziert.

Da der Begriff des Grundes in der Alltagssprache in vielerlei Bedeutungen genutzt wird, soll eine Unterscheidung zweier (nicht notwendigerweise disjunkten) Typen praktischer Gründe kurz erläutert werden: Das Adjektiv »normativ« im Zitat von Raz wird in diesem Zusammenhang gebraucht, um auszudrücken, dass diese Gründe durch Sachverhalte hervorgebracht werden. Manche Autoren verwenden stattdessen auch den Begriff des rechtfertigenden Grundes (»justificatory reason«). Neben normativen/rechtfertigenden Gründen gibt es erklärende Gründe (»explanatory reasons«) (z.B.

Heuer, 2004). Erklärende Gründe werden manchmal auch als motivierende Gründe bezeichnet. Im Gegensatz zu normativen/rechtfertigenden Gründen, die durch Sachverhalte hervorgebracht werden, sind erklärende/motivierende Gründe mentale Zustände:

Angenommen, dass ein rücksichtsvoller Akteur α_1 seine Handlung in einen Platz-Kandidaten sp_1 statt in in einen anderen Platz-Kandidaten sp_2 platziert, weil die Nutzung von sp_2 zur Störung einer Handlung eines anderen Akteurs α_2 führen würde. In diesem Fall rechtfertigt und erklärt die Handlung von α_2 das Verhalten von α_1 . Die Handlung von α_2 liefert einen normativen/rechtfertigenden und erklärenden/motivierenden Grund gegen die Nutzung von sp_2 und somit für das Verhalten von α_1 .

Falls andererseits α_1 seine Handlung in sp_1 platziert, ohne von der Handlung von α_2 in Kenntnis zu sein, erklärt/motiviert die Handlung von α_2 das Verhalten von α_1 nicht mehr, aber sie rechtfertigt sein Verhalten nach wie vor. Die Handlung von α_2 liefert dem Akteur α_1 einen normativen/rechtfertigenden Grund gegen die Nutzung von sp_2 , aber das ist nicht der Grund, aus dem α_1 handelt, d.h. der Grund, der α_1 motiviert.

Schließlich könnte α_1 irrtümlich im Glauben sein, dass α_2 eine Handlung ausführt, die durch die Nutzung von sp_2 gestört werden würde. In diesem Fall ist dieser mentale Zustand von α_1 ein erklärender Grund gegen die Nutzung von sp_2 , d.h., α_1 fühlt sich von diesem Glauben zu seiner Handlung motiviert, aber es existiert kein normativer/rechtfertigender Grund.

Wenn also nachfolgend die Rede davon ist, dass es Gründe gibt, eine Handlung so-oder-so zu platzieren, dann ist das zunächst eine Behauptung über Sachverhalte, die Gründe hervorbringen, d.h., es sind normative/rechtfertigende Gründe gemeint. Ein intelligentes System, ein sozialer Roboter zum Beispiel, soll in die Lage versetzt werden, diese Gründe zu erkennen, damit sein Handeln durch sie motiviert sein kann:

»Reasons are facts, aspects of the world. But our reaction to them is necessarily mediated by awareness of them.« (Raz, 2011, S. 103)

Die Unterscheidung zwischen »rechtfertigend« und »erklärend« weist auch darauf hin, dass Gründe unterschiedliche Rollen bei der Begründung von Entscheidungen oder Handlungen haben können: Einerseits sind sie bei der Entscheidungsfindung selbst beteiligt, indem die motivierenden Gründe abgewogen werden. Zweitens sind sie bei der Begründung und Rechtfertigung von Entscheidungen beteiligt, indem sie vom Handelnden in verbaler Form hervorgebracht werden.

7.3. Sozio-räumliche Gründe

7.3.1. Charakterisierung von sozio-räumlichen Gründen

Sozio-räumliche Gründe werden nachfolgend als Partikulare im Sinne von DOLCE-CORE modelliert (vgl. Abschnitt 4), die durch andere Partikulare wie laufende Handlungen, Menschen, Handlungsmöglichkeiten etc. hervorgerufen werden. Um beschreiben zu können, dass ein Partikular einen Grund hervorbringt, wird die zweistellige Relation `SOURCE-OF` eingeführt, die Partikulare mit sozio-räumlichen Gründen in Beziehung setzt (**R.A1**). Der Ausdruck `SOURCE-OF(o,ρ)` steht dafür, dass das Partikular *o* einen Grund *ρ* hervorbringt.

Die vorangegangene Analyse in den Abschnitten 7.1 und 7.2 ergab, dass Gründe eine Polarität besitzen. Axiom **R.A2** sichert zu, dass jeder Grund entweder ein Grund für (PRO) oder ein Grund gegen (CON) ist.

$$\mathbf{R.A1} \quad \forall x, \rho [\text{SOURCE-OF}(x, \rho) \Rightarrow [\text{PT}(x) \wedge \text{REASON}(\rho)]]$$

$$\mathbf{R.A2} \quad \forall \rho [\text{REASON}(\rho) \Rightarrow [\text{PRO}(\rho) \Leftrightarrow \neg \text{CON}(\rho)]]$$

Neben der Eigenschaft, ein Grund der Polarität Pro oder Con zu sein, besitzen Gründe eine Stärke. Zur Modellierung der Stärke von Gründen wird die Relation `HAS-FORCE` eingeführt. Sie setzt Gründe mit ihren Stärken in Verbindung (**R.A3**). Ein Grund kann nicht zugleich ein starker und ein schwacher Grund sein. Somit fordert Axiom **R.A4**, dass die Stärke eines Grundes eindeutig ist.

Die Stärken von Gründen sind Elemente eines Werte-Raumes (vgl. Abschnitt 4.1). Über den Werte-Raum der Stärken ist eine reflexive und transitive Relation »mindestens so stark wie« ($\succeq_{\text{force}}$) definiert. $\succeq_{\text{force}}$ setzt Stärken miteinander in Beziehung (**R.A6**). Jedes Paar von Stärken soll bezüglich $\succeq_{\text{force}}$ vergleichbar sein (**R.A7**). Die Definitionen **R.D1** und **R.D2** führen darauf aufbauend die üblichen Sub-Relationen »echt stärker als« und »genau so stark wie« ein.

$$\mathbf{R.A3} \quad \forall \rho, x [\text{HAS-FORCE}(\rho, x) \Rightarrow [\text{REASON}(\rho) \wedge \text{FORCE}(x)]]$$

$$\mathbf{R.A4} \quad \forall \rho, x, y [[\text{HAS-FORCE}(\rho, x) \wedge \text{HAS-FORCE}(\rho, y)] \Rightarrow x = y]$$

$$\mathbf{R.A5} \quad \forall \rho [\text{REASON}(\rho) \Rightarrow \exists x [\text{HAS-FORCE}(\rho, x)]]$$

$$\mathbf{R.A6} \quad \forall x, y [x \succeq_{\text{force}} y \Rightarrow [\text{FORCE}(x) \wedge \text{FORCE}(y)]]$$

$$\mathbf{R.A7} \quad \forall x, y [[\text{FORCE}(x) \wedge \text{FORCE}(y)] \Rightarrow [(x \succeq_{\text{force}} y) \vee (y \succeq_{\text{force}} x)]]$$

$$\mathbf{R.D1} \quad \forall x, y [(x \succ_{\text{force}} y) \Leftrightarrow_{\text{def}} [(x \succeq_{\text{force}} y) \wedge \neg(y \succeq_{\text{force}} x)]]$$

$$\mathbf{R.D2} \quad \forall x, y [(x \equiv_{force} y) \Leftrightarrow_{\text{def}} [(x \succeq_{force} y) \wedge (y \succeq_{force} x)]]$$

Nun können Partikulare Quellen ganz unterschiedlicher Gründe sein. Ein bestimmter Mensch kann einen Grund dafür hervorbringen, sich so zu platzieren, dass sein persönlicher Raum nicht verletzt wird; aber er kann auch Quelle eines Grundes dafür sein, ihn anzurufen oder für ihn einkaufen zu gehen. Im Rahmen dieser Arbeit über soziale Räume sind solche Gründe interessant, die Gründe für oder gegen Platzierungen sind. Gründe dieser Art werden nachfolgend als *sozio-räumliche Gründe* bezeichnet (S-REASON). Sie sind spezifische Gründe, sodass alles bisher gesagte auch für sie gilt.

Bezüglich der Anzahl sozio-räumlicher Gründe, die Partikulare hervorbringen können, gibt es Grund anzunehmen, dass jedes Partikular Quelle von maximal zwei sozio-räumlichen Gründen ist: einem Grund positiver Polarität und einem Grund negativer Polarität. Es gibt beispielsweise einen sozio-räumlichen Grund, den persönlichen Raum eines Menschen zu beachten, und Quelle dieses sozio-räumlichen Grundes ist der Mensch selbst. Es gibt diesen einen sozio-räumlichen Grund und nicht zwei oder drei. Axiome **R.A8** und **R.A9** stellen sicher, dass jedes Partikular Quelle höchstens eines sozio-räumlichen Grundes der Polarität Pro und höchstens eines sozio-räumlichen Grundes der Polarität Con ist.

$$\mathbf{R.A8} \quad \forall \rho_1, \rho_2 [\text{S-REASON}(\rho_1) \wedge \text{PRO}(\rho_1) \wedge \text{SOURCE-OF}(x, \rho_1) \wedge \text{S-REASON}(\rho_2) \wedge \text{PRO}(\rho_2) \wedge \text{SOURCE-OF}(x, \rho_2)] \Rightarrow \rho_1 = \rho_2]$$

$$\mathbf{R.A9} \quad \forall \rho_1, \rho_2 [\text{S-REASON}(\rho_1) \wedge \text{CON}(\rho_1) \wedge \text{SOURCE-OF}(x, \rho_1) \wedge \text{S-REASON}(\rho_2) \wedge \text{CON}(\rho_2) \wedge \text{SOURCE-OF}(x, \rho_2)] \Rightarrow \rho_1 = \rho_2]$$

Gemäß der Modellierung von Gründen, sind die Eigenschaften von Gründen zeit-unabhängig. Jeder Grund besitzt eine feste Polarität, eine feste Stärke und eine feste Quelle. Als Einwand gegen diese Charakterisierung könnte hervorgebracht werden, dass es so scheint, dass in unterschiedlichen Situationen Gründe mehr oder weniger stark wiegen. Moralische Partikularisten (z.B. Dancy, 2004) vertreten die Ansicht, dass in jeder Situation Gründe neu bewertet werden müssen. Andere Autoren (z.B. Berker, 2007) vertreten hingegen die Ansicht, dass Gründe unter dieser partikularistischen Perspektive die Eigenschaft verlieren, verlässlich in Entscheidungssituationen zu wirken. Wenn der Roboter unter Berücksichtigung von bestimmten Gründen Entscheidungen trifft und Handlungen auswählt, dann sichert die zeit-unabhängige Modellierung zu, dass dieselben Gründe in der nächsten Entscheidung genauso gewichtet werden, wie in der vorherigen Entscheidung. Wenn der soziale

Roboter den persönlichen Raum eines Menschen stark berücksichtigt, sollte man sich als Mensch darauf verlassen können, dass er den persönlichen Raum auch im nächsten Moment noch stark berücksichtigt. Auf diese Weise wird die Transparenz der Entscheidungsfindung sichergestellt. Durch die feste Stärke von Gründen wird aber nicht ausgeschlossen, dass sich der Roboter in zwei unterschiedlichen Situationen unterschiedlich entscheidet, da ja andere Gründe hinzukommen können, die die Entscheidung in eine andere Richtung beeinflussen.

Das neu eingeführte Konzept- und Relationen-Inventar zur Beschreibung sozio-räumlicher Gründe ist in der Übersicht B.7 im Anhang dargestellt.

7.3.2. Sieben Arten sozio-räumlicher Gründe

Erstens sind es laufende Handlungen, die Quellen sozio-räumlicher Gründe sind: Eine Handlung, die einen Affordanzraum nutzt, produziert einen Aktivitätsraum (vgl. Abschnitt 6.1.1) und bringt einen sozio-räumlichen Grund gegen die Platzierung von Handlungen in Affordanzräume hervor, die mit dem gegenwärtig genutzten Affordanzraum in Konflikt stehen. Insbesondere sind also transitive Handlungen Quellen von Gründen negativer Polarität nach dem Prinzip I, das da lautet »Laufende Handlungen sollen nicht gestört werden« (vgl. Abschnitt 7.4.1). Das Axiom **R.G1** fordert entsprechend, dass es zu jeder transitiven Handlung einen Grund negativer Polarität gibt.²

$$\mathbf{R.G1} \quad \forall ac [T\text{-ACTIVITY}(ac) \Rightarrow \exists \rho [S\text{-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(ac, \rho) \wedge \text{CON}(\rho)]]$$

Neben Handlungen sind es Handlungsmöglichkeiten, also Affordanzen, die als Quellen sozio-räumlicher Gründe fungieren: Wenn erwartbar ist, dass ein Affordanzraum für eine Handlung genutzt wird (vgl. Abschnitt 6.1.2), dann bringt die Affordanz, die diesen Affordanzraum produziert (vgl. Abschnitt 5.2.2), einen sozio-räumlichen Grund nicht erwartbare Handlungen in diesen Affordanzraum hervor; und gleichsam bringt die Affordanz einen Grund für erwartungskonforme Handlungen in diesen Affordanzraum hervor. Eine Affordanz bringt also sozio-räumliche Gründe der Polarität Con (**R.G2**) und der Polarität Pro (**R.G3**) hervor. Die Cons wirken nach dem Prinzip II, das da lautet »Handlungsmöglichkeiten Anderer sollen gewahrt bleiben« (vgl. Abschnitt 7.4.2), und die Pros nach dem Prinzip III »Erwartungs-

²Das **G** in **R.G1** steht für »Generator«. Die Axiome in diesem Abschnitt fordern, dass zu bestimmten Partikularen auch stets Gründe generiert werden.

konforme Platzierungen sind vorzuziehen« (vgl. Abschnitt 7.4.3).

$$\mathbf{R.G2} \quad \forall aff' [\text{AFFORDANCE}(aff') \Rightarrow \exists \rho [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(aff', \rho) \wedge \text{CON}(\rho)]]$$

$$\mathbf{R.G3} \quad \forall aff' [\text{AFFORDANCE}(aff') \Rightarrow \exists \rho [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(aff', \rho) \wedge \text{PRO}(\rho)]]$$

Drittens werden sozio-räumliche Gründe durch Gruppen von Akteuren hervorgebracht. Gruppen von Akteuren können exklusive Nutzungsrechte auf Affordanzräume beanspruchen und so Affordanzräume territorialisieren (vgl. Abschnitt 6.1.3). Solche Gruppen geben jenen Akteuren einen Grund für die Nutzung von Territorien, die für die Nutzung autorisiert sind. Gleichsam geben sie anderen Akteuren Gründe gegen das Betreten oder die Nutzung des Territoriums. Gruppen von Akteuren sind also Quelle sozio-räumlicher Gründe der Polarität Pro (**R.G4**) als auch der Polarität Con (**R.G5**). Die Pros wirken nach dem Prinzip IV »Eigens eingerichtete Territorien sind auch zu nutzen« (vgl. Abschnitt 7.4.4), während die Cons nach den Prinzipien V und VI wirken, die da lauten »Fremde Territorien sollen nicht genutzt werden« (vgl. Abschnitt 7.4.5) und »Fremde Territorien sollen nicht betreten werden« (vgl. Abschnitt 7.4.6).

$$\mathbf{R.G4} \quad \forall \gamma [\text{GROUP}(\gamma) \Rightarrow \exists \rho [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho) \wedge \text{PRO}(\rho)]]$$

$$\mathbf{R.G5} \quad \forall \gamma [\text{GROUP}(\gamma) \Rightarrow \exists \rho [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho) \wedge \text{CON}(\rho)]]$$

Schließlich werden sozio-räumliche Gründe eingeführt, die mit dem persönlichen Raum in Zusammenhang stehen. Individuelle Menschen bringen sozio-räumliche Gründe für (**R.G6**) und gegen (**R.G7**) die Platzierung von Handlungen in den persönlichen Raum hervor, je nachdem, wie die soziale Beziehung zwischen dem Träger des persönlichen Raumes und dem potentiellen Agenten der geplanten Handlung ausgestaltet ist (vgl. Abschnitt 6.1.4). Die sozio-räumlichen Gründe der Polarität Pro wirken hier nach dem Prinzip VII »Bei Interaktionen sollen präferierte Abstände eingehalten werden« (vgl. Abschnitt 7.4.7 und die Con-Gründe nach dem Prinzip VIII »Zu große Nähe zu einem Menschen ist zu vermeiden« (vgl. Abschnitt 7.4.8).

$$\mathbf{R.G6} \quad \forall o [\text{HUMAN}(o) \Rightarrow \exists \rho [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(o, \rho) \wedge \text{PRO}(\rho)]]$$

$$\mathbf{R.G7} \quad \forall o [\text{HUMAN}(o) \Rightarrow \exists \rho [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{SOURCE-OF}(o, \rho) \wedge \text{CON}(\rho)]]$$

Die Partikulare, die Quellen sozio-räumlicher Gründe sind, sind also genau

Prinzip	Quelle	Polarität	Formulierung
I	Handlung	CON	Laufende Handlungen sollen nicht gestört werden.
II	Affordanz	CON	Handlungsmöglichkeiten Anderer sollen gewahrt bleiben.
III	Affordanz	PRO	Erwartungskonforme Platzierungen sind vorzuziehen.
IV	Gruppe	PRO	Eigens eingerichtete Territorien sind auch zu nutzen.
V	Gruppe	CON	Fremde Territorien sollen nicht genutzt werden.
VI	Gruppe	CON	Fremde Territorien sollen nicht betreten werden.
VII	Mensch	PRO	Bei Interaktionen sollen präferierte Abstände eingehalten werden.
VIII	Mensch	CON	Zu große Nähe zu einem Menschen ist zu vermeiden.

Tabelle 7.1.: Modellierungsziel dieses Kapitels: Acht Prinzipien, nach denen Partikulare sozio-räumliche Gründe für und gegen die Platzierung von Handlungen in Affordanzräume hervorbringen.

jene Partikulare, die soziale Räume produzieren: Handlungen, Affordanzen, Gruppen und individuelle Menschen als Träger persönlicher Räume. Hier liegt eine unmittelbare Beziehung zwischen sozialen Räumen nach Kapitel 6 und sozio-räumlichen Gründen vor: Immer wenn ein sozialer Raum besteht, dann gibt es auch sozio-räumliche Gründe, die die Platzierung von Handlungen in ihm oder durch ihn überdeckten Affordanzräumen betreffen.

Tabelle 7.1 führt die acht Prinzipien auf, nach denen Dinge sozio-räumliche Gründe hervorbringen. Die nachfolgende Darstellung befasst sich mit der Frage, wie bestimmt werden kann, auf welche Platz-Kandidaten sich die sozio-räumlichen Gründe zu unterschiedlichen Zeitpunkten beziehen; welche zu platzierenden Handlungen also jeweils von ihnen betroffen sind.

7.4. Gründe-basierte Bewertung von Platz-Kandidaten

Um eine Entscheidung zwischen mehreren Platz-Kandidaten treffen zu können, bedarf es zweier Schritte: Im ersten Schritt werden jene sozio-räumlichen Gründe identifiziert, die für oder gegen die Nutzung des jeweiligen Platz-

Kandidaten sprechen. Im zweiten Schritt werden diese Gründe unter Berücksichtigung ihrer Polarität und Stärke zu einer Entscheidung über die beste Alternative zusammengefasst.

Bei den Prinzipien, die nachfolgend eingeführt werden, handelt sich um Prinzipien, nach denen Aspekte einer Situation (laufende Handlungen, Affordanzen, Territoriumsbesitzer und Menschen als Träger persönlicher Räume) sozio-räumliche Gründe für und gegen die Nutzung eines Affordanzraumes zur Platzierung einer geplanten Handlung hervorbringen. Die Prinzipien schreiben also nicht direkt vor, wie eine Handlung platziert werden soll, sondern sie sondieren jene Aspekte einer Situation, die für eine Entscheidung zwischen Platz-Kandidaten relevant sind.

Nachfolgend werden unter dieser Perspektive die acht Prinzipien aus Tabelle 7.1 detaillierter diskutiert, formalisiert und exemplarisch vorgeführt. Dabei umfasst jedes Prinzip Generatoren, nach denen Sachverhalte sozio-räumliche Gründe hervorbringen und Applikatoren, nach denen diese Gründe für oder gegen bestimmte Handlungen in bestimmten Affordanzräumen sprechen. Außerdem wird jeweils diskutiert, wie aus den vorliegenden Gründen Entscheidungen durch einen sozialen Roboter getroffen und Menschen gegenüber begründet werden können.

7.4.1. Vermeidung von Störungen laufender Handlungen

Das erste Prinzip lautet »Laufende Handlungen sollen nicht gestört werden«. Dieses Prinzip identifiziert laufende Handlungen als relevanten Aspekt für die Platzierung weiterer Handlungen. Abbildung 7.1 stellt eine Szene dar, in der dieses Prinzip Anwendung findet:

Eine Handlung des Anschließens (*plug*) an eine Steckdose durch den Roboter *rob*₁ soll platziert werden. Dazu stehen die Affordanzräume *sp*₁ und *sp*₂ als Platz-Kandidaten zur Verfügung. In einen dritten Affordanzraum *sp*₃ ist eine laufende Handlung *act*₁ platziert, deren Agent der Bewohner *hum*₁ ist. Ein Ausschnitt aus der Situationsbeschreibung umfasst folgenden Fakt:³

$$\text{PLACED-AT}(\text{act}_1, \text{sp}_3).$$

Nach **A.A14** (S. 91) handelt es sich bei *act*₁ um eine transitive Handlung. Gemäß Axiom **R.G1** (S. 129) gibt es dann auch einen sozio-räumlichen Grund

³Wie auch schon in den vorangegangenen Darstellungen von Wissensbasisinhalten wird hier auf das Zeitargument in den Formeln verzichtet, weil es nicht vorrangig um eine zeitliche Sequenz von Zuständen geht. Eine vollständige Darstellung der Domäne findet sich im Anhang C.1.1.

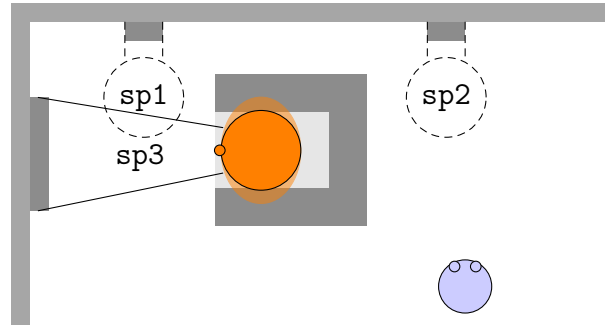


Abbildung 7.1.: Darstellung einer Szene zur Demonstration von Prinzip I. Roboter (blau) soll sich unter Affordanzräumen sp_1 und sp_2 entscheiden. Die laufende Handlung des Fernsehens durch den Menschen auf dem Sofa ist Quelle eines sozio-räumlichen Grundes gegen die Nutzung von sp_1 .

negativer Polarität, dessen Quelle act_1 ist. Dieser Grund heiße ρ_9 . Nach Axiom **R.A5** (S. 127) besitzt ρ_9 eine Stärke. Es wurde bisher noch nichts darüber ausgesagt, woraus sich die Stärke von Gründen ergibt. Dieser Punkt wird im Rahmen dieser Arbeit bewusst ausgespart. Der Grund dafür besteht darin, dass es einer umfangreicheren Untersuchung bedarf, wie sich Stärken von Gründen ergeben. Für die Gründe, die durch (transitive) Handlungen hervorgebracht werden, scheint die Stärke davon abzuhängen, welchen Typs die Handlung ist, ob sie dringend ist oder eher beiläufig, wer an ihr beteiligt ist etc. Daher werden hier und im Rest der Arbeit die Stärken von Gründen domänen-spezifisch gesetzt. Für dieses Beispiel sei ρ_9 ein starker Grund, weil ein Mensch beteiligt ist:

$$\text{S-REASON}(\rho_9). \text{CON}(\rho_9). \text{SOURCE-OF}(act_1, \rho_9). \text{HAS-FORCE}(\rho_9, \text{strong}).$$

Es soll gelten, dass nach Prinzip I der sozio-räumliche Grund ρ_1 gegen die Platzierung von Handlungen des Anschließens (*plug*) durch rob_1 in den Platz-Kandidaten sp_1 spricht. Die Definition **1.D** von APPLIES-TO_I definiert: Ein sozio-räumlicher Grund ρ , der durch eine Handlung hervorgebracht wird und negativer Polarität ist, spricht nach dem Prinzip I genau dann gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen, die durch den Akteur α in Affordanzraum sp ausgeführt werden, wenn es sich bei sp um einen Platz-Kandidaten für solche Handlungen handelt, sp mit einem gegenwärtig genutzten Affordanzraum konfiguriert und α nicht selbst Teilnehmer der nutzenden Handlung ist. Definitionen von APPLIES-TO -Relationen wie **1.D** können als »Applikatoren« bezeichnet werden. Während die Axiome unter Abschnitt 7.3.2 beschreiben, welche Entitäten sozio-räumliche Gründe hervorbringen, werden durch Applikato-

ren bestimmt, für oder gegen welche Platzierungen diese sozio-räumlichen Gründe sprechen.

$$\begin{aligned} \text{I.D} \quad & \forall \rho, sp_1, \phi, \alpha, t [\text{APPLIES-TO}_I(\rho, sp_1, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \\ & [\text{CANDIDATE}(sp_1, \phi, \alpha, t) \wedge \text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{CON}(\rho) \wedge \\ & \exists sp_2, ac [\text{CONFLICT}(sp_1, sp_2, t) \wedge \text{PLACED-AT}(ac, sp_2, t) \wedge \\ & \neg \text{PC}(\alpha, ac, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(ac, \rho)]]] \end{aligned}$$

Für das Beispiel aus Abbildung 7.1 bedeutet **I.D**, dass ρ_9 gegen die Platzierung von Handlungen des Typ *plug* durch rob_1 in Affordanzraum sp_1 spricht. Denn: sp_1 ist tatsächlich ein Platz-Kandidat für die Platzierung von *plug*-Handlungen durch rob_1 und es gibt einen Affordanzraum, in dem bereits eine laufende Handlung platziert ist und mit dem sp_1 konfligiert; tatsächlich ist auch rob_1 nicht Teilnehmer dieser Handlung. Es kann mittels **I.D** also der Fakt abgeleitet werden:

$$\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, sp_1, \text{plug}, rob_1).$$

Es existiert damit ein starker sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung der Handlung in den Platz-Kandidaten sp_1 , während es keine sozio-räumlichen Gründe für oder gegen die Platzierung der Handlung nach sp_2 gibt. Die unter Abschnitt 7.1.2 eingeführte Entscheidungsregel präferiert somit sp_2 gegenüber sp_1 .

Aufbauend auf der Definition **I.D** kann die Platzierung der *plug*-Handlung durch rob_1 in sp_2 begründet werden: Weil es nach Prinzip **I** einen Grund gegen die Nutzung von sp_1 gibt und die Handlung act_1 die Quelle dieses Grundes ist, lässt sich sagen, dass die Platzierung der geplanten Handlung in sp_1 act_1 stört (**INFRINGES-ACT**); und weil die Platzierung der geplanten Handlung in sp_1 die Handlung act_1 stört und die Platzierung der geplanten Handlung in sp_2 die Handlung act_1 nicht stört, gilt, dass die Platzierung der geplanten Handlung in sp_2 auf die laufende Handlung act_1 Rücksicht nimmt (**CONSIDERS-ACT**).

Die Idee ist, dass es sich nur dann um eine echte Rücksichtnahme auf eine laufenden Handlung handeln kann, wenn es tatsächlich eine Alternative gibt, unter der die laufende Handlung gestört wird. Würde es sich bei dem Beispiel in Abbildung 7.1 bei der ersten Steckdose um eine Steckdose handeln, die nicht zu dem Stecker des Roboters kompatibel ist, dann würde die Nutzung von sp_2 auch nicht die Handlung act_1 berücksichtigen— sp_1 wäre kein Platz-Kandidat und eine störende Alternative wäre gar nicht erst Gegenstand der

Entscheidungsfindung.

Die beiden Prädikate sind durch die Definitionen **R.D3** und **R.D4** definiert.

R.D3 $\forall sp, \alpha, ac [\text{INFRINGES-ACT}(sp, \phi, \alpha, ac, t) \Leftrightarrow_{\text{def}}$

$\exists \rho [\text{APPLIES-TO}_{\mathbf{R.G1}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(ac, \rho)]]$

R.D4 $\forall sp, \alpha, ac [\text{CONSIDERS-ACT}(sp, \phi, \alpha, ac, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge$
 $\neg \text{INFRINGES-ACT}(sp, \phi, \alpha, ac, t) \wedge \exists sp_2 \text{INFRINGES-ACT}(sp_2, \phi, \alpha, ac, t)]]$

Ableitbar sind aus dem Beispiel-Szenario mittels **R.D3** und **R.D4** schließlich folgende Fakten:

$\text{INFRINGES-ACT}(sp_1, \text{plug}, \text{rob}_1, \text{act}_1). \text{CONSIDERS-ACT}(sp_2, \text{plug}, \text{rob}_1, \text{act}_1).$

Diese Faktenmenge kann verbalisiert werden als »Es stört eine Handlung (act_1), wenn rob_1 den Affordanzraum sp_1 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen« und »Es nimmt rücksicht auf die Handlung act_1 , wenn rob_1 den Affordanzraum sp_2 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen«. Sollte rob_1 aus irgendeinem Grunde dazu gezwungen sein, dennoch sp_1 zu nutzen, kann er das Wissen um die Störung der Handlung nutzen, um sich beim Agenten von act_1 zu entschuldigen. Wer der Agent von act_1 ist, kann er aus zusätzlichem Wissen über diese spezielle Handlung (vgl. C.1.1) und über Handlungen im Allgemeinen (vgl. 4.3) ableiten.

Eine Übersicht über die neu eingeführten Prädikate ist in Tabelle B.8 im Anhang enthalten.

7.4.2. Wahrung von Handlungsmöglichkeiten Anderer

Im nächsten Beispiel in Abbildung 7.2 ist der Affordanzraum sp_3 , der zum Fernsehen genutzt werden kann, gegenwärtig ungenutzt. Anders als im vorherigen Szenario ist also keine Handlung im Affordanzraum sp_3 platziert. Somit gibt es zumindest nach Prinzip I keinen sozio-räumlichen Grund gegen die Platzierung von rob_1 s *plug*-Handlungen in den Affordanzraum sp_1 .

Angenommen aber, dass erwartbar ist, dass der Affordanzraum sp_3 genutzt wird, etwa weil es gerade kurz vor 20 Uhr ist und erfahrungsgemäß täglich um 20 Uhr dieser Affordanzraum von Hausbewohnern zum Fernsehen genutzt wird. In diesem Fall soll es einen sozio-räumlichen Grund gegen die Platzierung der *plug*-Handlung von rob_1 in den Affordanzraum sp_1 geben.

Ein Ausschnitt aus der Wissensbasis (vgl. Anhang C.1.2) beschreibt diese Situation: Die Affordanz aff_3 produziert den Affordanzraum sp_3 , und es ist er-

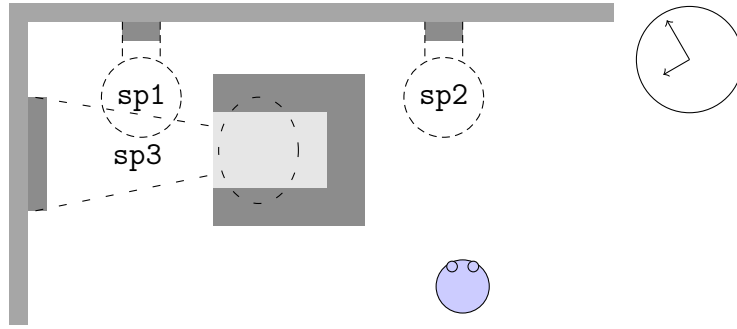


Abbildung 7.2.: Darstellung einer Szene zur Demonstration von Prinzip II. Es ist kurz vor 20 Uhr. Somit ist erwartbar, dass ein Bewohner des Hauses sp_3 nutzt, um fernzusehen. Die Affordanz des Fernsehens ist nach Prinzip II ein Grund gegen die Nutzung von sp_1 seitens des Roboters.

wartbar, dass ein menschlicher Bewohner des Hauses (vom Typ *human-resident*) den Affordanzraum sp_3 nutzt (vgl. Abschnitt 6.1.2):

$$\text{PRODUCES}(\text{aff}_3, sp_3). \text{EXPECTABLE}(\text{human-resident}, sp_3).$$

Bezüglich der Frage nach den sozio-räumlichen Gründen, die hier wirksam werden, fordert Axiom **R.G2** (S. 130), dass die Affordanz aff_3 Quelle eines sozio-räumlichen Grundes negativer Polarität ist. Da keine generellen Prinzipien formuliert wurden, nach denen die Stärke des Grundes allgemein bestimmt werden kann, wird die Stärke hier domänen-spezifisch als *medium* modelliert:

$$\text{S-REASON}(\rho_5). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_3, \rho_5). \text{CON}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, \text{medium}).$$

Um zu bestimmen, gegen welche Platzierungen dieser Grund ρ_5 nach dem Prinzip II »die Handlungsmöglichkeiten Anderer sollen gewahrt bleiben« spricht, definiert **II.D**: Eine Affordanz, die einen Affordanzraum produziert, dessen Nutzung durch Handlungen Anderer erwartbar ist, ist Quelle eines sozio-räumlichen Grundes gegen Platzierung von Handlungen in konfligierende Affordanzräume.

$$\begin{aligned} \text{II.D} \quad \forall \rho, sp_1, \phi, \alpha_1, t \quad & [\text{APPLIES-TO}_{\text{II}}(\rho, sp_1, \phi, \alpha_1, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \\ & \text{CON}(\rho) \wedge \text{CANDIDATE}(sp_1, \phi, \alpha_1, t) \wedge \exists \text{aff}', sp_2 \quad [\text{PRODUCES}(\text{aff}', sp_2) \wedge \\ & \text{SOURCE-OF}(\text{aff}', \rho) \wedge \text{CONFLICT}(sp_1, sp_2, t) \wedge \\ & \exists sr, \alpha_2 [\text{EXPECTABLE}(sr, sp_2, t) \wedge \text{CF}(sr, \alpha_2, t) \wedge \alpha_1 \neq \alpha_2]]]] \end{aligned}$$

Die Definition **II.D** nutzt die Klassifikationsrelation von DOLCE-CORE, die verwendet werden kann, um Akteure dynamisch zu klassifizieren, beispielsweise als »Bewohner des Hauses« (vergleiche Abschnitt 4.1). Im Beispiel in Abbildung 7.2 ist die Nutzung von sp_3 durch Bewohner (*human-resident*) erwartbar. Da es mit hum_1 jemanden gibt, der als menschliches Familienmitglied klassifiziert ist und der nicht identisch mit rob_1 ist, gibt es mit ρ_5 einen sozio-räumlichen Grund, gegen die Platzierung der *plug*-Handlung nach sp_1 .

$$\text{APPLIES-TO}_{\text{II}}(\rho_5, sp_1, \text{plug}, rob_1).$$

Es existiert damit ein mittelstarker sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung der Handlung in den Platz-Kandidaten sp_1 , während es keine sozio-räumlichen Gründe bezüglich der Platzierung der Handlung nach sp_2 gibt. Die unter Abschnitt 7.1.2 eingeführte Entscheidungsregel präferiert somit sp_2 gegenüber sp_1 .

Auf Basis von **II.D** können Begründungen formuliert werden: Gegen die Platzierung einer Handlung des Anschließens an die Steckdose durchgeführt durch rob_1 spricht, dass sie die Handlungsmöglichkeit des Fernsehens, die Affordanz aff_3 , blockiert, wohingegen die Nutzung von sp_2 auf die Affordanz aff_3 Rücksicht nimmt.

Generell gilt, dass die Platzierung einer Handlung in einen Affordanzraum genau dann eine Affordanz blockiert, wenn eine Affordanz einen sozio-räumlichen Grund hervorbringt, der nach Definition **II.D** gegen die Nutzung des Affordanzraumes spricht (**R.D5**). Die Platzierung einer Handlung in einen Affordanzraum nimmt genau dann Rücksicht auf eine Affordanz, wenn sie die Affordanz nicht blockiert und es einen alternativen Platz-Kandidaten gibt, dessen Nutzung die Affordanz blockieren würde (**R.D6**).

$$\mathbf{R.D5} \quad \forall sp, \alpha, aff' [\text{BLOCKS-AFF}(sp, \phi, \alpha, aff', t) \Leftrightarrow_{\text{def}}$$

$$\exists \rho [\text{APPLIES-TO}_{\text{II}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(aff', \rho)]$$

$$\mathbf{R.D6} \quad \forall sp, \alpha, aff' [\text{CONSIDERS-AFF}(sp_1, \phi, \alpha, aff', t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \neg \text{BLOCKS-AFF}(sp_1, \phi, \alpha, aff', t) \wedge \exists sp_2 \text{BLOCKS-AFF}(sp_2, \phi, \alpha, aff', t)]]$$

Ableitbar aus dem Beispiel-Szenario sind mittels **R.D5** und **R.D6** also folgende Fakten:

$$\text{BLOCKS-AFF}(sp_1, \text{plug}, rob_1, aff_3). \text{CONSIDERS-AFF}(sp_2, \text{plug}, rob_1, aff_3).$$

Diese Faktenmenge kann verbalisiert werden als »Es blockiert eine Handlungsmöglichkeit (aff_3), wenn rob_1 den Affordanzraum sp_1 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen« und »Es nimmt Rücksicht auf die Handlungsmöglichkeit aff_3 , wenn rob_1 den Affordanzraum sp_2 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen«.

Eine Übersicht über die neu eingeführten Prädikate ist in Tabelle B.9 im Anhang enthalten.

7.4.3. Erwartungskonforme Platzierung

Das dritte Prinzip besagt, dass Handlungen erwartungskonform platziert werden sollen. Angenommen, dass im Beispiel aus dem vorangegangenen Abschnitt zusätzlich gelte, dass es erwartbar ist, dass der Roboter die hintere Steckdose benutzt. In diesem Fall gibt es einen zusätzlichen sozio-räumlichen Grund für die Nutzung von sp_2 . Wenn der Roboter üblicherweise sp_2 nutzt, dann soll er auch zukünftig sp_2 vorziehen.

Generell soll zur Implementation des Prinzips **III** gelten: Wenn erwartbar ist, dass ein Affordanzraum von einer ϕ -Handlung durch den Akteur α genutzt wird, dann bringt die Affordanz einen sozio-räumlichen Grund für die Platzierung der Handlung in den Affordanzraum hervor (**III.D**).

$$\begin{aligned} \text{III.D} \quad \forall \rho, sp, \phi, \alpha, t \quad & [\text{APPLIES-TO}_{\text{III}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{PRO}(\rho) \wedge \\ & \text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \exists aff' [\text{PRODUCES}(aff', sp) \wedge \\ & \text{SOURCE-OF}(aff', \rho)] \wedge \exists sr [\text{EXPECTABLE}(sr, sp, t) \wedge \text{CF}(sr, \alpha, t)]]] \end{aligned}$$

Um diesen sozio-räumlichen Grund im Beispiel aus Abbildung 7.2 geltend zu machen, wird die Wissensbasis um zusätzliche Fakten erweitert. Sie enthält jetzt sowohl Fakten darüber, dass es erwartbar ist, dass Hausroboter den Affordanzraum sp_2 nutzen, als auch darüber, dass erwartbar ist, dass der Affordanzraum sp_3 durch einen Bewohner des Hauses genutzt wird (vgl. Anhang C.1.3):

$$\begin{aligned} & \text{EXPECTABLE}(\text{home-robot}, sp_2). \text{CF}(\text{home-robot}, rob_1). \\ & \text{EXPECTABLE}(\text{home-resident}, sp_3). \text{CF}(\text{home-resident}, hum_1). \end{aligned}$$

Wie im vorherigen Abschnitt spricht der sozio-räumliche Grund ρ_5 gegen die Platzierung der Handlung in den Affordanzraum sp_1 . Nach Definition **III.D** spricht jetzt zusätzlich der sozio-räumliche Pro-Grund ρ_4 , der durch aff_2 hervorgebracht wird (vgl. Anhang C.1.3), für die Platzierung von Anschleiß-

Handlungen des Roboters rob_1 in den Affordanzraum sp_2 .

$$APPLIES-TO_{II}(\rho_5, sp_1, plug, rob_1). APPLIES-TO_{III}(\rho_4, sp_2, plug, rob_1).$$

Es existiert mit ρ_5 ein mittelstarker sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung der Handlung in den Platz-Kandidaten sp_1 , und mit ρ_4 existiert ein schwacher sozio-räumlicher Grund für die Platzierung der Handlung in den Platz-Kandidaten sp_2 . Die unter Abschnitt 7.1.2 eingeführte Entscheidungsregel präferiert sp_2 gegenüber sp_1 .

Auf Basis von **III.D** können wiederum Erklärungen abgeleitet werden, nach denen Platzierungen anderen Platzierungen vorzuziehen sind: Die Platzierung von Handlungen des Anschließens an eine Steckdose durch rob_1 in Affordanzraum sp_2 entspricht erwartbarem, üblichem Verhalten (**USUAL**), während die Platzierung derselben Handlung in sp_1 unerwartbar, unüblich ist (**UNUSUAL**).

Generell soll gelten, dass eine Platzierung genau dann üblich ist, wenn es nach Prinzip **III** einen sozio-räumlichen Grund gibt, der für sie spricht (**R.D7**). Eine Platzierung ist hingegen unüblich, wenn sie nicht üblich ist und es aber eine alternative Platzierung gibt, die üblich ist (**R.D8**).

$$\mathbf{R.D7} \quad \forall sp, \phi, \alpha, aff', t [USUAL(sp, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists \rho [APPLIES-TO_{III}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)]]$$

$$\mathbf{R.D8} \quad \forall sp_1, \phi, \alpha, t [UNUSUAL(sp_1, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [CANDIDATE(sp_1, \phi, \alpha, t) \wedge \neg USUAL(sp_1, \phi, \alpha, t) \wedge \exists sp_2 [USUAL(sp_2, \phi, \alpha, t)]]]$$

Im Gegensatz zu den anderen vierstelligen Prädikaten **INFRINGES-ACT** und **CONSIDERS-ACT**, **BLOCKS-AFF** und **CONSIDERS-AFF** sind **USUAL** und **UNUSUAL** dreistellig. Das reflektiert die Intuition, dass eine bestimmte Handlung gestört und berücksichtigt werden kann, so wie eine bestimmte Affordanz blockiert und berücksichtigt werden kann, während eine Platzierung nicht üblich oder unüblich bezüglich irgendetwas Drittem ist—sie ist einfach üblich oder unüblich (bzw. erwartungskonform oder nicht erwartungskonform).

Ableitbar sind aus dem Beispiel-Szenario mittels **R.D7** und **R.D8** also folgende Fakten:

$$BLOCKS-AFF(sp_1, plug, rob_1, aff_3). CONSIDERS-AFF(sp_2, plug, rob_1, aff_3). \\ UNUSUAL(sp_1, plug, rob_1, aff_3). USUAL(sp_2, plug, rob_1, aff_3).$$

Diese Faktenmenge kann verbalisiert werden als »Es ist unüblich und es

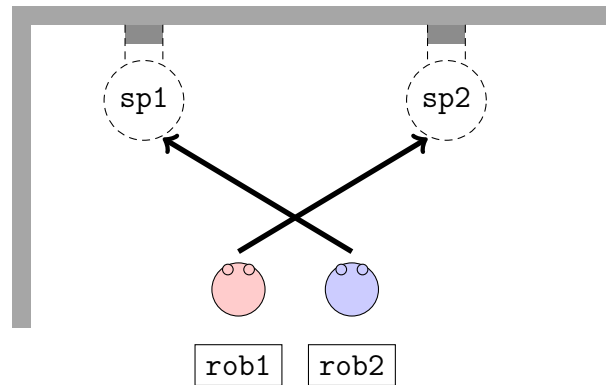


Abbildung 7.3.: Darstellung einer Szene zur Demonstration von Prinzip IV. Die Roboter rob_1 und rob_2 sollen einen Affordanzraum für ihre Auflade-Handlungen auswählen. Territorien vereinfachen die Koordination.

blockiert außerdem die Handlungsmöglichkeit aff_3 , wenn rob_1 den Affordanzraum sp_1 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen« und »Es ist üblich und es nimmt Rücksicht auf die Handlungsmöglichkeit aff_3 , wenn rob_1 den Affordanzraum sp_2 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen«.

Eine Übersicht über die neu eingeführten Prädikate ist in Tabelle B.9 im Anhang enthalten.

7.4.4. Platzierung von Handlungen in eigene Territorien

Gruppen von Akteuren, die exklusive, territoriale Ansprüche auf Affordanzräume erheben (vgl. Abschnitt 6.1.3), bringen weitere sozio-räumliche Gründe hervor. Angenommen, dass man eine Sonnenliege am Hotel-Pool für sich in Anspruch nimmt und sein Territorium durch persönliche Utensilien markiert. Nicht nur handelt man erwartungskonform, wenn man nach dem Bad im Pool an diese Sonnenliege zurückkehrt, sondern man zeigt zudem angemessenes Territorialverhalten. In gleicher Weise sollte man den Tisch im Restaurant nutzen, der für einen reserviert ist, den Platz im Flugzeug besetzen, den man gebucht hat, als Besitzer einer Parkerlaubnis für Behindertenparkplätze auf Behindertenparkplätzen parken etc. Das Prinzip IV, das solche Anforderungen abbildet, lautet »Eigens eingerichtete Territorien sind auch zu nutzen«.

Zur Illustration wird hier das Beispiel aus den vorangegangenen Abschnitten modifiziert. Abbildung 7.3 zeigt dazu eine Szene, in der zwei Handlungen des Anschließens an eine Steckdose durch die beiden Akteure rob_1 und rob_2 platziert werden sollen. Zur Vereinfachung der Koordination haben die Bewohner des Hauses (und Besitzer der Roboter), bezeichnet durch die Entität $family_1$ vom Typ GROUP, verfügt, dass sich ihre Pflegeroboter (*care-robot*) an

der ersten (linken) Steckdose anschließen sollen und ihre Haushaltsroboter (*chore-robot*) die zweite (rechte) Steckdose nutzen sollen. (Roboter rob_1 ist ein Haushaltsroboter der Familie und rob_2 ein Pflegeroboter der Familie.) Die Affordanzräume sind damit territorialisiert (vgl. Abschnitt 6.1.3). Folgende Fakten repräsentieren diesen Sachverhalt (die vollständige Domänenbeschreibung zu diesem Beispiel findet sich im Anhang C.1.4):

$$\begin{aligned} & \text{CLAIMS-USE}(\text{family}_1, sp_1, \text{plug}, \text{care-robot}). \\ & \text{CLAIMS-USE}(\text{family}_1, sp_2, \text{plug}, \text{chore-robot}). \\ & \text{SOCIAL-REL}(rob_1, \text{family}_1, \text{chore-robot}). \text{SOCIAL-REL}(rob_2, \text{family}_1, \text{care-robot}). \end{aligned}$$

Nach Axiom **R.G4** bringen Gruppen sozio-räumliche Gründe positiver Polarität hervor. Dieser Grund heißt ρ_6 , der hier als starker positiver Grund modelliert wird:

$$\text{S-REASON}(\rho_6). \text{SOURCE-OF}(\text{family}_1, \rho_6). \text{PRO}(\rho_6). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, \text{strong}).$$

Gemäß Prinzip **IV** definiert **IV.D**, dass eine Gruppe, die einen Affordanzraum für die exklusive Nutzung für Handlungen eines bestimmten Typs durch bestimmte Akteure beansprucht, ebendiesen Akteuren einen sozio-räumlichen Grund liefert, den territorialisierten Affordanzraum auch tatsächlich zu nutzen.

$$\begin{aligned} \text{IV.D} \quad \forall \rho, sp_1, \phi, \alpha, t \quad & [\text{APPLIES-TOIV}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \\ & \text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{PRO}(\rho) \wedge \exists \gamma, sp, sr \quad [\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t) \wedge \\ & \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho) \wedge \text{SOCIAL-REL}(\alpha, \gamma, sr, t)]]]] \end{aligned}$$

Mit **IV.D** ist aus der Wissensbasis (Anhang C.1.4) ableitbar, dass der positive sozio-räumliche Grund, den family_1 hervorbringt, für die Platzierung der *plug*-Handlung durch rob_2 in Platz-Kandidaten sp_1 spricht und für die Platzierung der *plug*-Handlung durch rob_1 in Platz-Kandidaten sp_2 :

$$\text{APPLIES-TOIV}(\rho_6, sp_1, \text{plug}, rob_2). \text{APPLIES-TOIV}(\rho_6, sp_2, \text{plug}, rob_1).$$

Sofern also danach gefragt wird, wohin eine *plug*-Handlung platziert werden soll, deren Agent rob_1 ist, spricht ein starker Grund für Platz-Kandidaten sp_2 und es gibt soweit keine Gründe für oder gegen die Nutzung der Alternative sp_1 . Die Entscheidungsregel, die unter Abschnitt 7.1.2 beschrieben ist,

präferiert folglich sp_2 gegenüber sp_1 . Genau andersherum fällt die Entscheidung aus, wenn angefragt wird, wohin eine *plug*-Handlung platziert werden soll, deren Agent rob_2 ist.

Auf Basis von **IV.D** können wiederum Prädikate definiert werden, die für Begründungen genutzt werden können. Wenn rob_1 aus dem Beispiel, der Pool-Liegen-Beansprucher, der Flugzeugpassagier und der Parkplatzsucher ihre Handlungen gemäß den Territorien platzieren, die für sie eingerichtet sind (oder die sie sich selbst eingerichtet haben), dann richten sich diese Platzierungen nach den Verfügungen der Territorienbeansprucher (**R.D9**). Platzierungen, die sich nach keinem Territoriumsbeansprucher richten, obwohl alternative Platzierungen existieren, die dies tun, weichen von den Verfügungen der Territorienbeansprucher ab (**R.D10**). Die Platzierung der geplanten Handlung von rob_1 in Abbildung 7.3 in Affordanzraum sp_2 richtet sich also nach $family_1$, während die Platzierung derselben Handlung in sp_1 von der Verfügung von $family_1$ abweicht.

$$\mathbf{R.D9} \quad \forall sp, \alpha, \gamma [\text{CONFORMS-TO}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists \rho [\text{APPLIES-TO}_{\text{IV}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho)]]$$

$$\mathbf{R.D10} \quad \forall sp, \alpha, aff' [\text{DEPARTS-FROM}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \neg \text{CONFORMS-TO}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t) \wedge \exists sp_2 \text{CONFORMS-TO}(sp_2, \phi, \alpha, \gamma, t)]]$$

Ableitbar sind aus dem Beispiel-Szenario mittels **R.D9** und **R.D10** also folgende Fakten:

$$\begin{aligned} &\text{CONFORMS-TO}(sp_2, \text{plug}, rob_1, family_1). \text{DEPARTS-FROM}(sp_1, \text{plug}, rob_1, family_1). \\ &\text{CONFORMS-TO}(sp_1, \text{plug}, rob_2, family_1). \text{DEPARTS-FROM}(sp_2, \text{plug}, rob_2, family_1). \end{aligned}$$

Diese Faktenmenge kann verbalisiert werden als »Es ist konform zur Verfügung von $family_1$, wenn rob_2 den Affordanzraum sp_1 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen, und gleichsam wenn rob_1 den Affordanzraum sp_2 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen« und »Es verstößt gegen die Verfügung von $family_1$, wenn rob_2 den Affordanzraum sp_1 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen, und gleichsam wenn rob_1 den Affordanzraum sp_2 nutzt, um sich an eine Steckdose anzuschließen«. Sollte einer der Roboter aus irgendeinem Grunde dazu getrieben sein, gegen Prinzip **IV** zu verstoßen, könnte er eine Entschuldigung entweder an die Gruppe, die das Territorium etabliert, richten, oder auch an den anderen Roboter, für den das Territorium eingerichtet ist.

Eine Übersicht über die neu eingeführten Prädikate ist in Tabelle B.10 im Anhang enthalten.

7.4.5. Meidung von unbefugter Platzierung von Handlungen in fremde Territorien

Territorien als koordinierender Faktor für räumliches Verhalten haben eine Kehrseite. Einerseits bringen Territorien sozio-räumliche Gründe für Platzierungen hervor, also Gründe positiver Polarität, andererseits auch sozio-räumliche Gründe gegen Platzierungen, also Gründe negativer Polarität.

Falls der Haushaltsroboter aus dem vorherigen Beispiel in Abbildung 7.3 (S. 140) die Steckdose nutzt, die für den Pflegeroboter vorgesehen ist, dann verhält er sich nicht nur abweichend, sondern auch aktiv territorialverletzend. Das bedeutet nicht, dass jede Handlungsplatzierung, die abweichend gemäß Definition **R.D10** auch automatisch verletzend ist. So könnte es eine dritte Steckdose geben, über deren Nutzung $family_1$ gar nichts verfügt hat. In diesem Fall wäre die Nutzung der dritten Steckdose abweichend (von den Verfügungen von $family_1$), würde aber keine Territoriumsverletzung darstellen.

Das Prinzip **V** lautet »Fremde Territorien sollen nicht genutzt werden«: Der sozio-räumliche Grund gegen die Platzierung von Handlungen, der von Territoriumsbesitzern hervorgebracht wird (vgl. Axiom **R.G5**, S. 130), spricht genau dann gegen die Nutzung eines Affordanzraumes, wenn der potentielle Agent der zu platzierenden Handlung nicht in einer autorisierten sozialen Beziehung zu den Territoriumsbesitzern steht. Das Prinzip modelliert das Phänomen der unbefugten Nutzung von Territorien im Gegensatz zum unbefugten Betreten; vgl. »violation« vs. »invasion« bei Sommer (1969).

$$\begin{aligned} \mathbf{V.D} \quad & \forall \rho, sp, \phi, \alpha, t [\text{APPLIES-TOV}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \\ & \text{S-REASON}(\rho) \wedge \text{CON}(\rho) \wedge \exists \gamma [\exists sr [\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t) \wedge \\ & \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho)] \wedge \forall sr [\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t) \Rightarrow \\ & \neg \text{SOCIAL-REL}(\alpha, \gamma, sr, t)]]]]] \end{aligned}$$

Die Faktenmenge, die die Beispiel-Szene aus Abbildung 7.3 (S. 140) beschreibt, enthält also nach Axiom **R.G5** auch einen Con-Grund ρ_5 , der durch die Gruppe $family_1$ hervorgebracht wird (vgl. Anhang C.1.4):

$$\text{S-REASON}(\rho_5). \text{SOURCE-OF}(family_1, \rho_5). \text{CON}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, strong).$$

Der Grund ρ_5 spricht gemäß Definition **V.D** gegen die Platzierung von einer

plug-Handlung durch *rob*₁ in Platz-Kandidaten *sp*₁ und gegen die Platzierung einer *plug*-Handlung durch *rob*₂ in Platz-Kandidaten *sp*₂:

$$\text{APPLIES-TO}_V(\rho_5, sp_1, plug, rob_1). \text{APPLIES-TO}_V(\rho_5, sp_2, plug, rob_2).$$

Wird beispielsweise danach gefragt, welchen der Platz-Kandidaten *sp*₁ und *sp*₂ für *plug*-Handlungen durch *rob*₁ genutzt werden sollen, dann kann bestimmt werden, dass für den Kandidaten *sp*₂ ein starker Grund spricht (ρ_6) und ebenso gegen den Kandidaten *sp*₁ (ρ_5). Die Entscheidungsregel aus Abschnitt 7.1.2 präferiert folglich *sp*₂ gegenüber *sp*₁.

Auf Basis von Definition **V.D** können wiederum Prädikate definiert werden, die zur Begründung von Entscheidungen für Platzierungen genutzt werden können: Genau dann, wenn es durch Prinzip **V** einen Grund gegen die Nutzung eines Affordanzraumes für eine Handlung gibt, verletzt die trotzige Nutzung dieses Affordanzraumes ein Territorium (**VIOLATES-TERR**; **R.D11**). Die Nutzung eines Affordanzraumes für eine Handlung respektiert genau dann ein Territorium (**CONSIDERS-TERR**), wenn sie es nicht verletzt, es aber eine alternative Platzierung gibt, die das Territorium verletzen würde (**R.D12**).

$$\begin{aligned} \mathbf{R.D11} \quad & \forall sp, \alpha, \gamma [\text{VIOLATES-TERR}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \\ & \exists \rho [\text{APPLIES-TO}_V(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho)]] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R.D12} \quad & \forall sp, \alpha, aff' [\text{CONSIDERS-TERR}(sp, \phi, \alpha, aff', t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \\ & [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \neg \text{VIOLATES-TERR}(sp, \phi, \alpha, aff', t) \wedge \\ & \exists sp_2 [\text{VIOLATES-TERR}(sp_2, \phi, \alpha, aff', t)]]] \end{aligned}$$

Aus dem dem Beispiel-Szenario sind mittels **R.D11** und **R.D12** also folgende vier Fakten ableitbar:

$$\begin{aligned} & \text{CONSIDERS-TERR}(sp_2, plug, rob_1, family_1). \\ & \text{CONSIDERS-TERR}(sp_1, plug, rob_2, family_1). \\ & \text{VIOLATES-TERR}(sp_1, plug, rob_1, family_1). \\ & \text{VIOLATES-TERR}(sp_2, plug, rob_2, family_1). \end{aligned}$$

Auf den ersten Blick sieht das wie eine Verdoppelung der Begründung von Seite 142 aus, denn diejenigen Platzierungen, die sich nach der Verfügung von *family*₁ richten (**CONFORMS-TO**), berücksichtigen sie auch (**CONSIDERS-TERR**), und diejenigen Platzierungen, die von den Verfügungen von *family*₁ abweichen (**DEPARTS-FROM**), verletzen sie auch (**VIOLATES-TERR**). Angenommen aber,

es existierte auch noch eine dritte Steckdose, deren Affordanzraum nicht territorialisiert ist. Falls beispielsweise rob_1 diesen dritten Affordanzraum nutzen würde, dann wäre das gemäß Prinzip IV eine Abweichung der Verfügung von $family_1$, aber keine Territoriumsverletzung nach Prinzip V. Gleichsam würde diese Platzierung auch gemäß Definition R.D12 ein Territorium berücksichtigen (viz., das Territorium, das $family_1$ für rob_2 eingerichtet hat), aber die Platzierung wäre nicht konform nach Definition R.D9, weil sie nicht das für rob_1 eingerichtete Territorium nutzt.

Eine Übersicht über die neu eingeführten Prädikate ist in Tabelle B.10 im Anhang enthalten.

7.4.6. Meidung von unbefugtem Betreten von Territorien

Prinzip VI, das da lautet »Fremde Territorien sollen nicht betreten werden«, behandelt den Fall der Störung eines Territoriums durch Betreten. Sommer (1969) nennt diese Form der Störung »invasion«. Der Unterschied zwischen »violation« und »invasion« wurde bereits in Abschnitt 6.1.3 behandelt. Hier wurden mit den beiden Relationen CLAIMS-USE und CLAIMS-BE-AT zwei Relationen eingeführt, mit denen Territorien auf unterschiedliche Weise behauptet werden können.

Mit Rückgriff auf das Beispiel der vorangegangenen zwei Abschnitte könnte $family_1$ zusätzlich verfügt haben, dass rob_2 den Affordanzraum sp_2 nicht betreten soll. Damit wäre nicht bloß die Nutzung von sp_2 durch rob_2 eine Störung des Territoriums, das für rob_1 etabliert wurde, sondern die reine Tatsache, dass sich rob_2 in sp_2 aufhält, erfüllte bereits diesen Tatbestand.

Eine Gruppe von Territoriumsbeanspruchern liefert nach Prinzip VI genau dann einen sozio-räumlichen Grund gegen die Platzierung einer Handlung in einen bestimmten Platz-Kandidaten, wenn der Platz-Kandidat mit einem Affordanzraum in einem potentiellen Konflikt vom Typ »AC« steht (vgl. Definition A.D14, S. 96), für dessen Betretung der potentiellen Agent der zu platzierenden Handlung durch die Gruppe nicht autorisiert ist.

$$\begin{aligned}
 \text{VI.D} \quad & \forall \rho, sp_1, \phi, \alpha, t [\text{APPLIES-TO}_{\text{VI}}(\rho, sp_1, \phi, \alpha, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \\
 & \text{CON}(\rho) \wedge \text{CANDIDATE}(sp_1, \phi, \alpha, t) \wedge \\
 & \exists \gamma, sp_2, sr [\text{CLAIMS-BE-AT}(\gamma, sp_2, sr, t) \wedge \text{CONFLICT-AC}(sp_1, sp_2, t) \wedge \\
 & \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho) \wedge \forall sr_2 [\text{CLAIMS-BE-AT}(\gamma, sp_2, sr_2, t) \Rightarrow \\
 & \neg \text{SOCIAL-REL}(\alpha, \gamma, sr_2, t)]]]]
 \end{aligned}$$

Die Verwendung von CONFLICT-AC in der Definition VI.D reflektiert, dass es

hier darum geht, dass der Agent den territorialisierten Affordanzraum nicht betreten soll. Relevant sind auch die Fälle, in denen eine potentielle Agentenregion mit der Kernregion eines territorialisierten Affordanzraumes überlappt, also die Konflikte vom Typ »AC«.

Auf Basis von Definition VI.D können wiederum Prädikate definiert werden, die für Begründungen genutzt werden können. Die Platzierung einer Handlung dringt genau dann in ein Territorium ein (INVADES-TERR), wenn es nach Prinzip VI einen Grund gegen die Handlungsplatzierung gibt (R.D13). Eine Handlungsplatzierung respektiert genau dann ein Territorium (Relation AVOIDS-TERR), wenn sie nicht in das Territorium eindringt, es aber eine alternative Platzierung gibt, die in das Territorium eindringen würde (R.D14).

$$\text{R.D13} \quad \forall sp, \alpha, \gamma [\text{INVADES-TERR}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists \rho [\text{APPLIES-TO}_{\text{VI}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(\gamma, \rho)]]$$

$$\text{R.D14} \quad \forall sp, \alpha, aff' [\text{AVOIDS-TERR}(sp, \phi, \alpha, aff', t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \neg \text{INVADES-TERR}(sp, \phi, \alpha, aff', t) \wedge \exists sp_2 [\text{INVADES-TERR}(sp_2, \phi, \alpha, aff', t)]]]$$

Eine Situation, die das bisherige Beispiel erweitert, wäre derart beschaffen, dass neben den beiden Steckdosen eine dritte Steckdose existiert, deren Affordanzraum sp_3 mit dem Affordanzraum von sp_2 in einem Konflikt steht. Wenn weiterhin der Akteur rob_1 mittels CLAIMS-BE-AT für die Nutzung von sp_2 gegenüber Akteur rob_2 begünstigt wird, dann ist mittels R.D13 auch ableitbar, dass die Platzierung von *plug*-Handlungen durch rob_2 in ein Territorium, das durch $family_1$ etabliert wurde, eindringen:

$$\text{INVADES-TERR}(sp_3, \text{plug}, rob_2, family_1).$$

Das kann verbalisiert werden als »Die Platzierung des Anschließens an eine Steckdose durch rob_2 in den Platz-Kandidaten sp_3 führt zu einem unbefugten Betreten eines Territoriums, das von $family_1$ etabliert wurde.«

Tabelle B.10 im Anhang fasst in einem Überblick die für die Behandlung von Territorien neu definierten Prädikate zusammen.

7.4.7. Berücksichtigung persönlicher Räume bei fokussierter Interaktion

Die zwei verbleibenden Prinzipien VII und VIII beziehen sich auf Platzierungen unter Berücksichtigung persönlicher Räume (vgl. Tabelle 7.1, S. 131). Dazu sei zunächst an die Terminologie von Goffman (1971) erinnert (vgl. Ab-

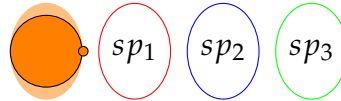


Abbildung 7.4.: Darstellung einer Szene zur Demonstration von Prinzip VII. Ein Mensch mit drei Affordanzräumen, die von anderen Akteuren zu Unterhaltungen mit dem Menschen genutzt werden können. Eingezeichnet sind die potentiellen Agentenregionen von sp_1 , sp_2 und sp_3 .

schnitt 6.1.4), nach der fokussierte von unfokussierten Interaktionen (»focused interaction« und »unfocused interaction«) unterschieden werden können. In fokussierten Interaktionen treten Akteure direkt miteinander in Interaktion, etwa wenn sie sich miteinander unterhalten, wenn sie einander die Hand geben etc. Unter unfokussierten Interaktionen versteht Goffman (1971) Situationen, in denen sich Akteure zwar gegenseitig bemerken, ihre Handlungen aber nicht direkt aufeinander ausrichten. Der folgende Absatz behandelt das Prinzip VII »Bei Interaktionen sollen präferierte Abstände eingehalten werden« mit dem Fokus auf den persönlichen Raum nach Hall (1966), bevor im darauffolgenden Absatz das Prinzip »Zu große Nähe zu einem Menschen ist zu vermeiden« diskutiert wird, das den Fall unfokussierter Interaktion abdecken soll.

Für gewöhnlich gibt es mehrere Affordanzräume zur Platzierung fokussierter Handlungen. Unter anderem unterscheiden sich diese Affordanzräume darin, wie weit ihre Agentenregionen vom Affordanten entfernt sind, dem sie anhängen. In Abbildung 7.4 ist ein Szenario dargestellt, in dem drei unterschiedliche Affordanzräume sp_1 , sp_2 und sp_3 zur Auswahl stehen, um mit dem Menschen hum_1 eine Unterhaltung zu führen.

Der Mensch hum_1 als Träger des persönlichen Raumes akzeptiert, wenn andere Akteure, zu denen er momentan in einer vertrauten (»intimate«) Beziehung steht, den Affordanzraum sp_1 nutzen, um sich mit ihm zu unterhalten, während jene Akteure, zu denen er eine persönliche Beziehung (»personal«) hegt, ihre Unterhaltungs-Handlungen in sp_2 platzieren sollen. Der Affordanzraum sp_3 ist Unterhaltungen mit Akteuren vorbehalten, zu denen hum_1 eine soziale Beziehung (»social«) hegt.

ACCEPTS-USE(sp_1 , talk-to, intimate). ACCEPTS-USE(sp_2 , talk-to, personal).
ACCEPTS-USE(sp_3 , talk-to, social).

Soweit folgt die Modellierung des persönlichen Raumes von hum_1 der Darstellung in Abschnitt 6.1.4. Neu kommt hinzu, dass, wie Axiom R.G6 auf Seite 130 bereits fordert, der Mensch hum_1 einen sozio-räumlichen Grund hervor-

bringt, der hier als starker Grund angenommen wird (vgl. Anhang C.1.5 für eine vollständige Domänenbeschreibung):

$$\begin{aligned} &\text{S-REASON}(\rho_1). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_1). \text{CON}(\rho_1). \text{HAS-FORCE}(\rho_1, \text{strong}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_2). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_2). \text{PRO}(\rho_2). \text{HAS-FORCE}(\rho_2, \text{strong}). \end{aligned}$$

Angenommen, dass der Roboter rob_1 sich für eine Unterhaltung zum Menschen hum_1 positionieren soll. Um zu bestimmen, welcher der drei Platz-Kandidaten $\text{sp}_1, \text{sp}_2, \text{sp}_3$ dafür genutzt werden sollten, muss spezifiziert sein, in welcher sozialen Beziehung rob_1 zu hum_1 steht. Der folgende Fakt beschreibt, dass rob_1 zu hum_1 in einer persönlichen Beziehung steht (gemäß der Terminologie sozialer Beziehungen bei Hall (1966)):

$$\text{SOCIAL-REL}(\text{rob}_1, \text{hum}_1, \text{personal}).$$

Nun soll ableitbar sein, dass der sozio-räumliche Grund ρ_2 , der durch den Menschen hum_1 hervorgebracht wird, gemäß Prinzip VII für die Platzierung von *talk-to*-Handlungen durch rob_1 in den Platz-Kandidaten sp_2 spricht:

$$\text{APPLIES-TO}_{\text{VII}}(\rho_2, \text{sp}_2, \text{talk-to}, \text{hum}_1).$$

Generell besagt dazu Definition VII.D: Ein sozio-räumlicher Pro-Grund, der durch einen Menschen⁴ hervorgebracht wird, spricht genau dann für die Platzierung einer ϕ -Handlung mit Agenten α in den Platz-Kandidaten sp , wenn α mit dem Träger des persönlichen Raumes in einer solchen Beziehung steht, dass der Träger des persönlichen Raumes ϕ -Handlungen mit Agenten α in sp akzeptiert.

$$\begin{aligned} \text{VII.D} \quad \forall \rho, \text{sp}, \phi, \alpha_1, t \quad &[\text{APPLIES-TO}_{\text{VII}}(\rho, \text{sp}, \phi, \alpha_1, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \\ &\text{PRO}(\rho) \wedge \text{CANDIDATE}(\text{sp}, \phi, \alpha_1, t) \wedge \exists sr, \alpha_2 [\text{ACCEPTS-USE}(\text{sp}, \phi, sr, t) \wedge \\ &\text{ATTACHED-TO}(\text{sp}, \alpha_2) \wedge \text{SOCIAL-REL}(\alpha_1, \alpha_2, sr) \wedge \\ &\text{SOURCE-OF}(\alpha_2, \rho)]]]] \end{aligned}$$

Für das Beispiel in Abbildung 7.4 ergibt sich damit, dass rob_1 einen sozio-räumlichen Grund hat, für seine geplante Unterhaltung mit hum_1 den Platz-Kandidaten sp_2 zu nutzen. Die Entscheidungsregel unter Abschnitt 7.1.2 prä-

⁴Vergleiche Charakterisierung von ACCEPTS-USE in Abschnitt 6.1.4, nach der Affordanzräume in der ACCEPTS-USE-Relation immer an Menschen hängen.

feriert sp_2 gegenüber den anderen beiden Alternativen.

Platziert rob_1 seine Unterhaltung mit hum_1 tatsächlich in sp_2 , so wird dadurch der persönliche Raum von hum_1 respektiert, während der persönliche Raum von hum_1 missachtet würde, wenn für die Unterhaltung sp_1 oder sp_3 genutzt würde.

Generell soll mit Rückgriff auf **VII.D** gelten: Eine Platzierung, für die es nach Prinzip **VII** einen sozio-räumlichen Grund gibt, der durch den Träger eines persönlichen Raumes hervorgebracht wird, respektiert den persönlichen Raum des Trägers (**R.D15**). Eine Platzierung, die einen persönlichen Raum nicht respektiert, obwohl es alternative Platzierungen gibt, die diesen persönlichen Raum respektieren, missachtet den persönlichen Raum (**R.D16**).

$$\mathbf{R.D15} \quad \forall sp, \alpha_1, \alpha_2 [\text{RESPECTS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \exists \rho [\text{APPLIES-TO}_{\text{VII.D}}(\rho, sp, \phi, \alpha_1, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(\alpha_2, \rho)]]$$

$$\mathbf{R.D16} \quad \forall sp, \alpha, aff' [\text{DISRESPECTS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{ATTACHED-TO}(sp, \alpha_2) \wedge \neg \text{RESPECTS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t) \wedge \exists sp_2 [\text{RESPECTS-PS}(sp_2, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t)]]]$$

Aus der Beispieldomäne sind somit unter Verwendung von **R.D15** und **R.D16** die folgenden Fakten ableitbar:

$$\begin{aligned} &\text{RESPECTS-PS}(sp_2, \text{talk-to}, rob_1, hum_1). \text{DISRESPECTS-PS}(sp_1, \text{talk-to}, rob_1, hum_1). \\ &\text{DISRESPECTS-PS}(sp_3, \text{talk-to}, rob_1, hum_1). \end{aligned}$$

7.4.8. Berücksichtigung persönlicher Räume bei unfokussierter Interaktion

Für den Fall unfokussierter Interaktion wird schließlich Prinzip **VIII** eingeführt. In Situationen unfokussierter Handlungen führt ein Akteur eine Handlung aus, an der der Mensch, dessen persönlicher Raum zu berücksichtigen ist, weder aktiv noch passiv teilnimmt.

Abbildung 7.5 stellt ein Beispiel dar. Wie schon im vorherigen Abschnitt soll der Roboter rob_1 in eine Unterhaltung mit hum_1 eintreten. Hinzu kommt, dass auch der persönliche Raum des Menschen hum_2 nicht verletzt werden soll, der zufällig in der Nähe steht. Über hum_2 ist bekannt, dass hum_2 es als Verletzung ihres persönlichen Raumes empfindet, wenn Akteure, zu denen hum_2 derzeit eine öffentliche Beziehung unterhält (also insbesondere Fremde), die Affordanzräume sp_4, sp_5, sp_6 betreten. Das wird unter Nutzung des

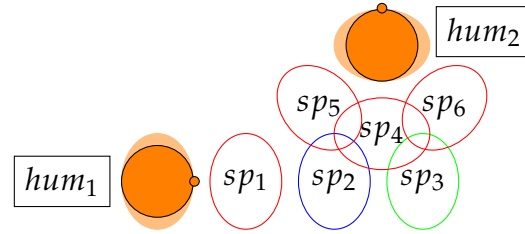


Abbildung 7.5.: Darstellung einer Szene zur Demonstration von Prinzip VIII. Ein Mensch hum_1 mit drei Affordanzräumen, die von anderen Akteuren zu Unterhaltungen mit hum_1 genutzt werden können. Eingezeichnet sind die potentiellen Agentenregionen von sp_1 , sp_2 und sp_3 . In der Nähe steht ein anderer Mensch hum_2 , dem ebenfalls Affordanzräume anhängen: sp_5 , sp_6 und sp_7 . Diese Affordanzräume sollten von Fremden nicht betreten werden.

Prädikats *TOO-CLOSE* (vgl. **S.A6**, S. 115) durch folgende Fakten repräsentiert (siehe Anhang C.1.6 für eine vollständige Domänenbeschreibung):

$$\text{TOO-CLOSE}(sp_4, \text{public}). \text{TOO-CLOSE}(sp_5, \text{public}). \text{TOO-CLOSE}(sp_6, \text{public}).$$

Während rob_1 mit hum_1 in einer persönlichen Beziehung steht (siehe vorherigen Abschnitt), steht er mit hum_2 nur in einer öffentlichen Beziehung (gemäß der Terminologie von Hall (1966)):

$$\text{SOCIAL-REL}(rob_1, hum_1, \text{personal}). \text{SOCIAL-REL}(rob_1, hum_2, \text{public}).$$

Während der Mensch hum_1 einen sozio-räumlichen Grund für die Platzierung der Unterhaltung zwischen Roboter und Mensch in Affordanzraum sp_2 hervorbringt, bringt der Mensch hum_2 hier einen sozio-räumlichen Grund gegen diese Platzierung hervor. Nach Axiom **R.G7** ist hum_2 Quelle eines sozio-räumlichen Grundes negativer Polarität:

$$\text{S-REASON}(\rho_5). \text{SOURCE-OF}(hum_2, \rho_5). \text{CON}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, \text{strong}).$$

Es soll ableitbar sein, dass dieser sozio-räumliche Grund ρ_5 nach Prinzip VIII gegen die Platzierung der *talk-to*-Handlung durch Akteur rob_2 in Platz-Kandidaten sp_2 spricht: $\text{APPLIES-TO}_{\text{VIII}}(\rho, sp_1, \phi, \alpha_1)$.

Zu diesem Zweck definiert **VIII.D** generell: Ein sozio-räumlicher Grund negativer Polarität, der durch einen Menschen⁵ hervorgebracht wird, spricht

⁵Vergleiche Charakterisierung von *TOO-CLOSE* in Abschnitt 6.1.4, nach der Affordanzräume in der *TOO-CLOSE*-Relation immer an Menschen hängen.

genau dann gegen die Platzierung einer ϕ -Handlung mit Agenten α in den Platz-Kandidaten sp , wenn α mit der Quelle des sozio-räumlichen Grundes in einer solchen Beziehung steht, dass die Quelle es als »zu nahe« empfindet, wenn α sich in der potentiellen Kernregion von sp aufhält.

$$\begin{aligned} \text{VIII.D } \forall \rho, sp_1, \phi, \alpha_1, t \ [\text{APPLIES-TO}_{\text{VIII}}(\rho, sp_1, \phi, \alpha_1, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} & [\text{S-REASON}(\rho) \wedge \\ & \text{CON}(\rho) \wedge \text{CANDIDATE}(sp_1, \phi, \alpha_1, t) \wedge \\ & \exists sr, \alpha_2, sp_2 \ [\text{TOO-CLOSE}(sp_2, sr, t) \wedge \text{ATTACHED-TO}(sp_2, \alpha_2) \wedge \\ & \neg \text{ATTACHED-TO}(sp_1, \alpha_2) \wedge \text{SOCIAL-REL}(\alpha_1, \alpha_2, sr) \wedge \\ & \text{SOURCE-OF}(\alpha_2, \rho) \wedge \text{CONFLICT-AC}(sp_1, sp_2)]]] \end{aligned}$$

In dieser Entscheidungssituation gibt es also einen sozio-räumlichen Grund für die Platzierung der Unterhaltung in den Affordanzraum sp_2 (weil der Mensch hum_1 dies präferiert) und einen sozio-räumlichen Grund dagegen (weil der Mensch hum_2 dies als Verletzung seines persönlichen Raumes empfindet). Diese beiden Gründe wurden als gleichstark (*strong*) modelliert. Bezüglich sp_1 gibt es keine sozio-räumlichen Gründe, und derselbe Grund, der gegen sp_2 spricht, spricht auch gegen sp_3 . Die Entscheidungsregel in Abschnitt 7.1.2 sieht die beiden Optionen sp_1 und sp_2 als äquivalent an und ordnet die Option sp_3 hinter den beiden anderen Optionen an.

Platzierte rob_1 seine Unterhaltung in Affordanzraum sp_2 , dann würde der Roboter zwar nach wie vor den persönlichen Raum des Menschen hum_1 respektieren, aber auch in den persönlichen Raum des Menschen hum_2 eindringen. Die Nutzung von sp_1 würde hingegen den persönlichen Raum von hum_2 berücksichtigen, aber die Präferenzen von hum_1 missachten.⁶

VIII.D definiert, dass eine Platzierung genau dann in einen persönlichen Raum eines Menschen α_2 eindringt, wenn α_2 nach Prinzip **VIII** einen sozio-räumlichen Grund gegen die Platzierung hervorbringt (**R.D17**). Eine Platzierung berücksichtigt hingegen genau dann einen persönlichen Raum des Menschen α_2 , wenn die Platzierung nicht in den persönlichen Raum von α_2 eindringt, obwohl es eine Platzierung gibt, die in den persönlichen Raum von α_2 eindringen würde (**R.D18**).

$$\begin{aligned} \text{R.D17 } \forall sp, \alpha_1, \alpha_2 \ [\text{INFRINGES-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} & \\ & \exists \rho \ [\text{APPLIES-TO}_{\text{VIII.D}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t) \wedge \text{SOURCE-OF}(\alpha_2, \rho)]] \end{aligned}$$

⁶Eine Möglichkeit für rob_1 ist hier, einen nicht eingezeichneten Affordanzraum zu nutzen, der einem um ein paar Grad um den Mittelpunkt von hum_1 rotierten Affordanzraum sp_2 entspricht und der so den persönlichen Raum von hum_2 nicht mehr tangiert.

$$\begin{aligned}
\mathbf{R.D18} \quad & \forall sp, \alpha, aff' [\text{CONSIDERS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t) \Leftrightarrow_{\text{def}} \\
& [\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha_1, t) \wedge \neg \text{INFRINGES-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t) \wedge \\
& \exists sp_2 [\text{INFRINGES-PS}(sp_2, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t)]]]
\end{aligned}$$

Würde der Mensch hum_2 also weit weg von hum_1 stehen, dann gäbe es für Unterhaltungen mit hum_1 auch gar keine Platz-Kandidaten, die in den persönlichen Raum von hum_2 eindringen. Dann soll aber auch nicht behauptet werden können, dass die Platzierung der Unterhaltung den persönlichen Raum von hum_2 berücksichtigt.

Unter Berücksichtigung von **R.D15**, **R.D16**, **R.D17** und **R.D18** sind aus der Beispieldomäne folgende Fakten ableitbar:

$\text{RESPECTS-PS}(sp_2, \text{talk-to}, rob_1, hum_1).$ $\text{DISRESPECTS-PS}(sp_1, \text{talk-to}, rob_1, hum_1).$
 $\text{DISRESPECTS-PS}(sp_3, \text{talk-to}, rob_1, hum_1).$ $\text{INFRINGES-PS}(sp_2, \text{talk-to}, rob_1, hum_2).$
 $\text{INFRINGES-PS}(sp_3, \text{talk-to}, rob_1, hum_2).$ $\text{CONSIDERS-PS}(sp_1, \text{talk-to}, rob_1, hum_2).$

Die Tabelle B.11 im Anhang gibt einen Überblick über das Inventar, das neu hinzugekommen ist, um die sozio-räumlichen Gründe zu beschreiben, die für die Platzierung hinsichtlich persönlicher Räume gelten.

KAPITEL 8

Anwendung der Affordanz-basierten Konzeption bei der Platzierung von Interaktionen zwischen Mensch und Roboter

Ob die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume nützlich ist, zeigt sich insbesondere darin, wie gut sie sich eignet, um reale soziale Umgebungen zu beschreiben und Probleme zu lösen, insbesondere das soziale Handlungsplatzierungsproblem, das eingangs in Abschnitt 1.1 definiert wurde. Um zu demonstrieren, dass die vorgestellte Konzeption diese Anforderungen zu leisten vermag, werden in diesem Kapitel mit den Studien von Torta et al. (2012) und von Kim und Mutlu (2014) zwei Studien zur Proxemik in der Mensch-Roboter-Interaktion unter der Affordanz-basierten Perspektive nachvollzogen. Darüber hinaus demonstriert dieses Kapitel, dass eine wissensbasierte softwaretechnische Realisierung der Affordanz-basierten Konzeption sozialer Räume in der Lage ist, die in den Studien dargestellten Platzierungsprobleme mit akzeptablem Laufzeitaufwand zu lösen.

Mit Abschnitt 8.1 findet eine kurze Darstellung der entstandenen Softwarekomponenten statt, unter der die Studien simuliert wurden. In Abschnitt 8.2 werden die Studien jeweils in drei Schritten behandelt: Erst werden die Studienergebnisse dargestellt, danach wird eine Affordanz-basierte Modellierung diskutiert und schließlich wird gezeigt, wie diese Modellierung genutzt wird, um das soziale Handlungsplatzierungsproblem zu lösen.

8.1. Wissensbasierte softwaretechnische Realisierung

Die softwaretechnische Realisierung besteht aus einer Zweiteilung zwischen einer Wissensbasis, in der Situationen in Form von Fakten beschrieben sind,

und Services, die auf Basis der Fakten in der Wissensbasis operieren (vgl. Abbildung 8.1).

Die Wissensbasis enthält zu jedem Zeitpunkt eine Beschreibung der relevanten Aspekte der Umgebung in Form von Fakten über Affordanzen und Fähigkeiten, Affordanzräume, soziale Räume und sozio-räumliche Gründe. Die Fakten über Affordanzen und Fähigkeiten sind gemäß der Darstellung in Kapitel 4 strukturiert und anhand der Prädikate aus Tabellen B.1 und B.2 beschrieben (siehe Anhang B). Entsprechend ist das Wissen über Affordanzräume unter Verwendung des Vokabulars aus Tabelle B.4 repräsentiert, das das Ergebnis der Analyse in Kapitel 5 ist. Die räumlichen Relationen zwischen Regionen der Affordanzräume und zwischen Regionen und Objekten sind unter Verwendung des Vokabulars der Basic-Place-Theory beschrieben (vgl. Tabelle B.3). Soziale Räume sind unter Verwendung des Vokabulars in Tabellen B.5 und B.6 entsprechend der Analyse in Kapitel 6 repräsentiert. Und zur Beschreibung der sozio-räumlichen Gründe wird das Vokabular aus Tabellen B.7, B.8, B.9, B.10 und B.11 verwendet, die das Ergebnis der Analyse der acht Prinzipien zur Platzierung von Handlungen in sozialen Räumen sind (vgl. Kapitel 7).

Technisch ist die Wissensbasis als relationale Datenbank realisiert.¹ Zu jedem Basis-Prädikat der Affordanz-basierten Konzeption, d.h. solchen, die nicht definiert, sondern als Primitive der Modellierung genutzt wurden, existiert eine Tabelle in der Datenbank.² Zusätzlich zu den Prädikaten, die zur Affordanz-basierten Konzeption gehören, werden Geometrien von Regionen in der Datenbank abgelegt (jeweils im Referenzsystem des Affordanten, an dem die Regionen hängen) sowie Posen (Positionen und Orientierungen) von Affordanten und Akteuren im Welt-Koordinatensystem.³

Die definierten Prädikate der Affordanz-basierten Konzeption sozialer Räume werden durch Sichten in der Datenbank (gespeicherte Abfragen) abgebildet. Die AFFORDS-Relation ist beispielsweise durch eine Abfrage realisiert, die gemäß Definition **A.D1** auf Seite 71 die Datenbank nach Affordanten und Akteuren befragt, deren Affordanzen und Fähigkeiten in entsprechenden Relationen bezüglich Handlungstypen zueinander stehen.

¹Verwendet wurde das Datenbankmanagementsystem PostgreSQL, <http://www.postgresql.org>

²Eine Ausnahme bildet die Abbildung des räumlichen Wissens. Während die Basic-Place-Theory von Donnelly (2005) das Prädikat MT als Basis-Prädikat annimmt. Aus MT-Fakten können PCOIN-Fakten abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 5.1.1). In der hier vorgestellten Realisierung wurden PCOIN-Fakten durch geometrische Überlappungsberechnungen zwischen den Geometrien der Affordanzräume bestimmt.

³Zur Speicherung und Abfrage von geometrischen Objekten wird die Geodatenbank PostGIS, eine Erweiterung von PostgreSQL, verwendet, <http://postgis.net>

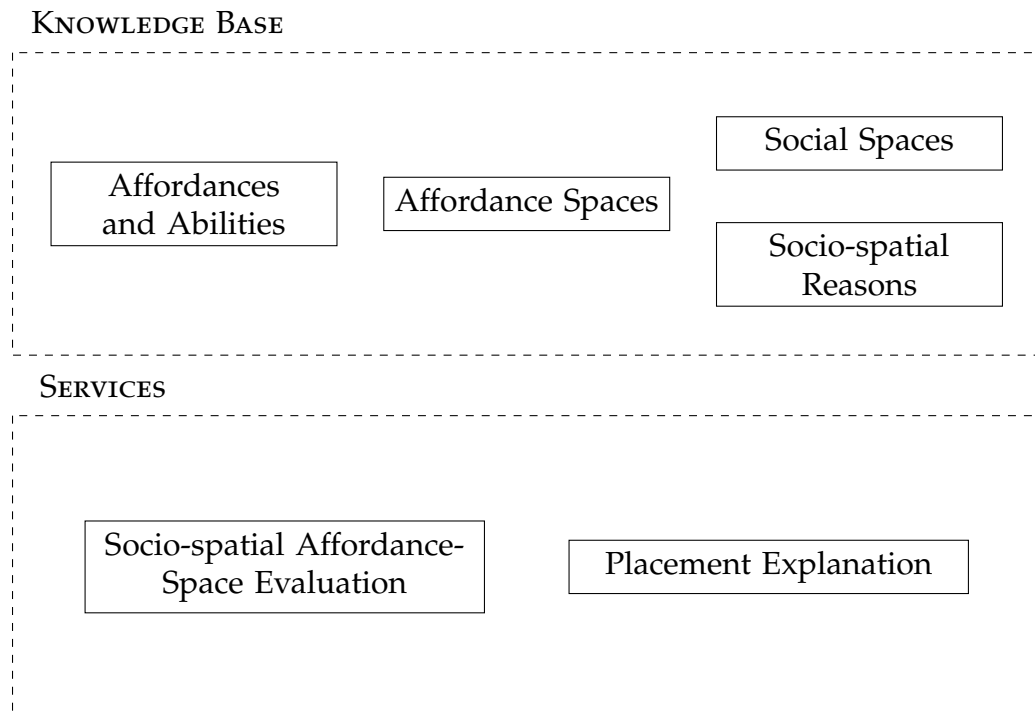


Abbildung 8.1.: Der Kern der Softwarearchitektur besteht aus einer Wissensbasis und zwei Services, die auf Basis der Fakten in der Wissensbasis operieren.

Es existieren mit der sozio-räumlichen Bewertung von Affordanzräumen (»Socio-spatial Affordance-Space Evaluation«) und der Platzierungsbegründung (»Placement Explanation«) zwei Services, die auf die Wissensbasis zugreifen. Der erste Service nimmt als Parameter einen Handlungstypen ϕ , einen Akteur α und optional einen Affordanten o entgegen. Als Ergebnis gibt der Service eine Ordnung über alle verfügbaren Affordanzräume aus, in die Handlungen vom Typ ϕ platziert werden können, deren Agent α ist. Falls ein Affordant als optionaler Parameter übergeben wurde, wird die Ordnung nur über die verfügbaren Platz-Kandidaten gebildet, die an dem spezifischen Affordanten hängen.⁴ Basierend auf der Ordnung, die das Ergebnis der sozio-räumlichen Bewertung von Affordanzräumen ist, kann das soziale Handlungsplatzierungsproblem aus Abschnitt 1.1 gelöst werden, indem einer der am besten bewerteten Affordanzräume zur Platzierung ausgewählt wird.

Ein zweiter Service namens Platzierungsbegründung (»Placement Explanation«) liefert zu einem Handlungstypen ϕ , einem Akteur α und einem Affordanzraum sp eine Menge von Fakten, die die positiven und negativen

⁴So ist es beispielsweise möglich anzufragen, wie die Affordanzräume sozio-räumlich zu bewerten sind, die ein bestimmter Roboter gerade nutzen könnte, um seine Batterien aufzuladen. Dabei bleibt offen, welche Steckdose der Affordant ist. Wenn aber bereits bestimmt ist, dass sich der Roboter an einer bestimmten Steckdose anschließen soll, kann durch Angabe dieser Steckdose als dritten Parameter angefragt werden, wie die Platzierung einer Handlung in Affordanzräume dieser speziellen Steckdose sozio-räumlich zu bewerten sind.

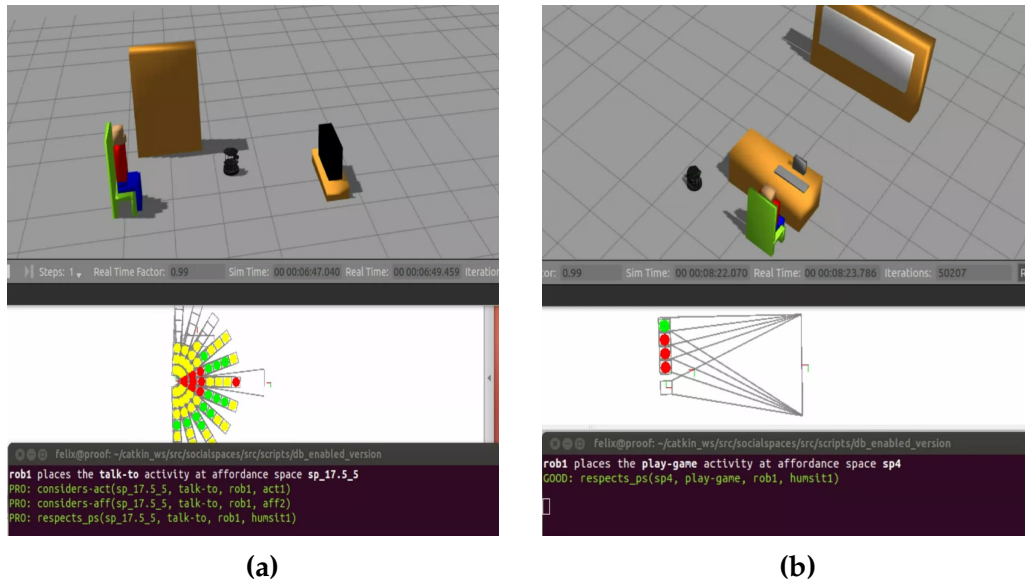


Abbildung 8.2.: Exemplarische Darstellung der Simulationsumgebung anhand zweier Szenarien. Modellierung von (a) wird in Abschnitt 8.2.2 besprochen und Modellierung von (b) in Abschnitt 8.2.3. Darstellungen zeigen die simulierte Umgebung (oberes Drittel), die Affordanzraumkarte mit bewerteten Platz-Kandidaten (mittleres Drittel) und die Begründungen für die aktuell eingenommene Position des Roboters (unteres Drittel).

Aspekte der Nutzung von sp für ϕ -Handlungen durch Akteur α repräsentieren. Das Ergebnis eines Aufrufs könnte zum Beispiel die Fakten-Menge $\{\text{RESPECTS-PS}(sp, \phi, \alpha, human), \text{INFRINGES-ACT}(sp, \phi, \alpha, act1)\}$ sein, die repräsentiert, dass die Nutzung von sp für die ϕ -Handlung durch Akteur α den persönlichen Raum von $human$ respektiert, aber die laufende Handlung $act1$ stört (vgl. Definitionen **R.D15** und **R.D3**, S. 149 und 135).

Abbildung 8.2 zeigt zwei beispielhaft Bildschirmdarstellungen jener Simulationsumgebung, anhand der die Softwarearchitektur erprobt wurde. Im oberen Bildschirmteil ist jeweils die simulierte Umgebung abgebildet.⁵ Im mittleren Teil sind die Geometrien jener Affordanzräume zu sehen, die durch die Affordanzen in der Umgebung produziert werden.⁶ Nach jedem Aufruf der sozio-räumlichen Affordanzraum-Bewertung werden die verfügbaren Platz-Kandidaten gemäß des Grades ihrer sozialen Angemessenheit eingefärbt. Im unteren Bildschirmrand wird jeweils ausgegeben, für welchen Platz-Kandidaten sich der Roboter entscheidet. Außerdem wird auf dieser Konsole das Ergebnis des Begründungs-Service ausgegeben, also die positiven und negativen Aspekte der ausgewählten Platzierung, über die sich der Roboter bewusst ist.

⁵Genutzt wurde eine Simulation des Turtlebot 2 der Firma Willow Garage: http://wiki.ros.org/turtlebot_gazebo

⁶Die Darstellung erfolgt in Rviz, <http://wiki.ros.org/rviz>

8.2. Nachbildung von Studien zur Proxemik in der Mensch-Roboter-Interaktion

Die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume wird nachfolgend anhand von Fallstudien dahingehend untersucht, wie gut empirische Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der sozialen Robotik modelliert werden können. Neben dem rein deskriptiven Modellieren der Studienergebnisse werden die originalen sozialen Umgebungen in einigen Details verkompliziert, um zu zeigen, dass die Affordanz-basierten Konzeption sozialer Räume ausdrucksstark genug ist, um auch komplexe soziale Kontexte zu beschreiben.

8.2.1. Platzierung eines Roboters zur verbalen Interaktion mit einem Menschen nach Torta und Kollegen (2012)

Darstellung der Studienergebnisse

Die Studie von Torta et al. (2012) geht der Fragestellung nach, wie sich ein humanoider Roboter zu einem Menschen positionieren soll, um mit ihm in eine verbale Interaktion zu treten, während der Mensch auf einem Sessel sitzt. Dazu wird eine empirische Studie mit Versuchspersonen durchgeführt. Während die Versuchsperson auf einem Sessel sitzt, wird der humanoide Roboter unter drei verschiedenen Bedingungen von unterschiedlichen Positionen vor der Versuchsperson aus in Richtung Versuchsperson geschickt. Unter der ersten Bedingung soll die Versuchsperson den Roboter durch einen Knopfdruck stoppen, wenn sie der Meinung ist, dass der Roboter die beste Position erreicht hat, um komfortabel mit dem Roboter zu reden. Unter der zweiten Bedingung soll die Versuchsperson den Roboter stoppen, wenn der Roboter eine Position nahe der Versuchsperson erreicht hat, die gerade noch akzeptabel ist, um komfortabel mit dem Roboter zu reden. Unter der dritten und letzten Bedingung stoppt die Versuchsperson den Roboter, sobald er, von der Ferne gestartet, eine Position erreicht, die gerade nahe genug ist, um komfortabel zu reden.

Das Ergebnis dieser Studie ist ein Modell des persönlichen Raumes, das dafür vorgesehen ist, den humanoiden Roboter die jeweils beste Position zum Interaktionspartner einnehmen zu lassen. Innerhalb dieses Modells des persönlichen Raumes gibt es eine bestimmte Region, die Torta et al. (2012) »Region of Approach« nennen. Abbildung 8.3 (nächste Seite) enthält eine Darstellung dieser Region. In dieser Region befinden sich die Positionen, die als sozial angemessen gelten und die der Roboter also einnehmen sollte, um mit einem Menschen zu kommunizieren.

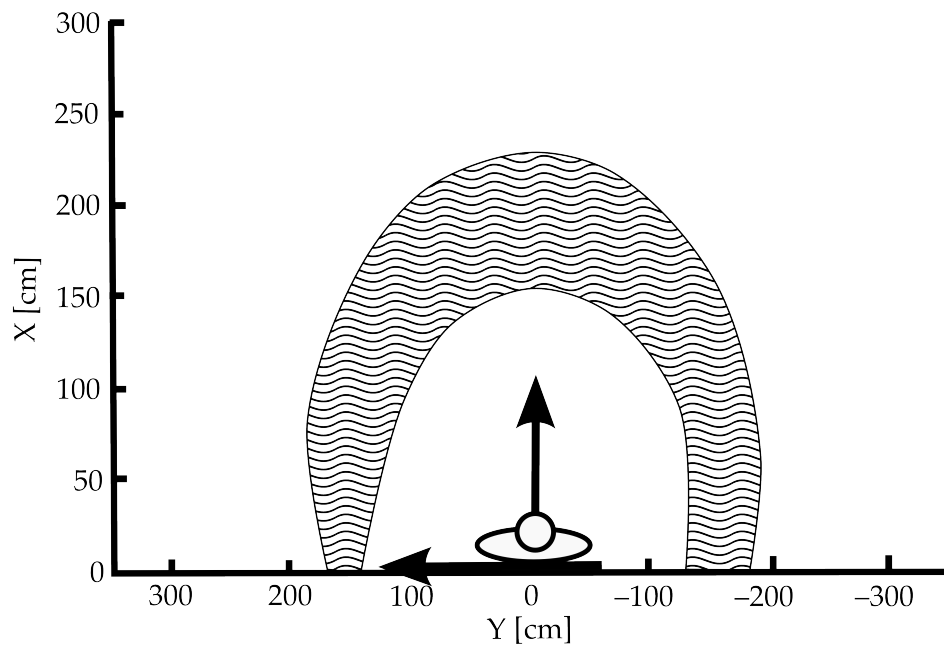


Abbildung 8.3.: Die »Region of Approach« nach der Studie von Torta et al. (2012) ist hier schraffiert dargestellt. Sie markiert die möglichen Positionen vor dem Menschen, aus denen ein Roboter auswählen sollte, um mit dem Menschen in verbale Interaktion zu treten. Vereinfachte Darstellung nach Abbildung 6 in (Torta et al., 2012).

Affordanz-basierte Modellierung

Zur Affordanz-basierten Modellierung dieses Szenarios werden zunächst die beteiligten Akteure, Affordanten und Handlungstypen identifiziert. Es ist der humanoide Roboter, der mit dem Menschen reden soll. Es gibt also einen Handlungstyp des mit jemandem Redens, der mit dem Symbol *talk-to* bezeichnet sein soll. Damit eine Handlung vom Typ *talk-to* existieren kann, muss es einen Akteur geben, der die Fähigkeit besitzt zu reden, sowie einen Affordanten, der die Affordanz besitzt, angesprochen zu werden. Es gibt also einen Fähigkeits-Wert *can-talk* und einen Affordanz-Wert *talk-to-able*, die bezüglich des Handlungstyps *talk-to* zusammenpassen (vgl. Abschnitt 4.2). Diese Beziehung gilt zeitlich unbegrenzt und wird als Fakt folgendermaßen repräsentiert:

$$\text{CPL}(\text{talk-to}, \text{can-talk}, \text{talk-to-able}).$$

Die Tatsache, dass der Roboter die Fähigkeit zu reden besitzt und der Mensch die Affordanz, angesprochen zu werden, wird anhand von Inhärenz- und Lokations-Fakten repräsentiert (vgl. Abschnitt 4.2). Dem Roboter *rob₁* ist eine Fähigkeit *ab₁* inhärent, die gerade den Wert *can-talk* hat, und dem Menschen

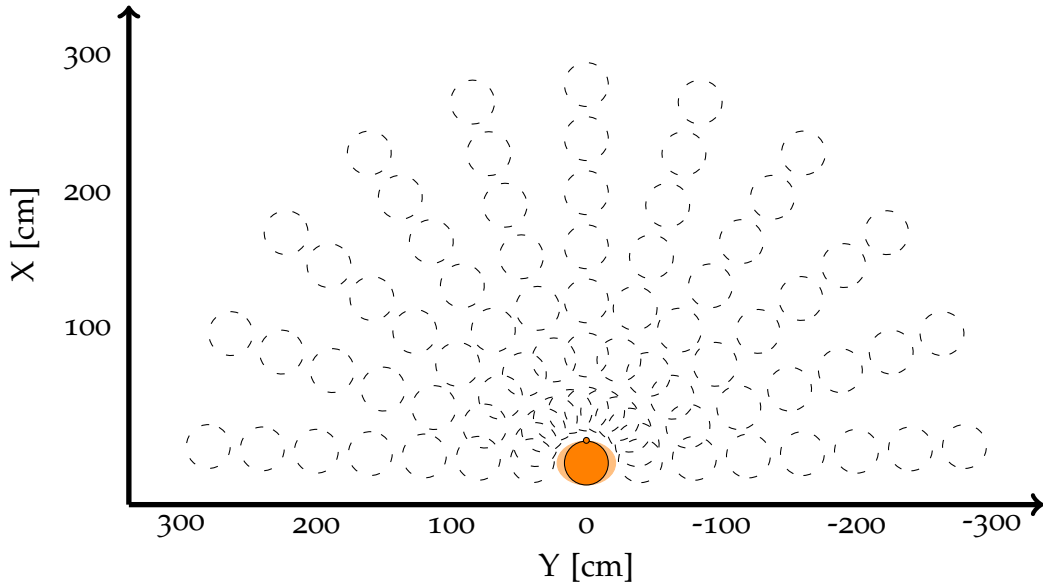


Abbildung 8.4.: Affordanzräume, die vom Roboter genutzt werden können, um mit dem Menschen zu reden. Um die Übersicht zu bewahren, sind nur die potentiellen Agentenregionen von 77 Affordanzräumen dargestellt.

hum_1 ist eine Affordanz aff_1 inhärent, die gerade den Wert *talk-to-able* hat:⁷

$$I(ab_1, rob_1). I(aff_1, hum_1). \\ L(can-talk, ab_1). L(talk-to-able, aff_1).$$

Damit ist bereits die Modellierung der Affordanzen und Fähigkeiten abgeschlossen, und mit Definition **A.D1** auf Seite 71 kann der Fakt abgeleitet werden, der repräsentiert, dass der Mensch dem Roboter ermöglicht, mit ihm zu reden:

$$AFFORDS(hum_1, rob_1, talk-to).$$

Im nächsten Schritt werden der Situationsbeschreibung Affordanzräume hinzugefügt, die der Roboter nutzen kann, um mit dem Menschen zu reden. Die Darstellung in Abbildung 8.4 enthält 77 Affordanzräume, aus denen der Roboter auswählen kann. Jeder dieser Affordanzräume besitzt eine potentielle Agentenregion, eine potentielle Transaktionsregion und eine Affordantenregion (vergleiche Abschnitt 5.2.1), und jeder dieser Affordanzräume wird von der Affordanz aff_1 produziert (vergleiche Abschnitt 5.2.2). Der Wissensbasis

⁷So wie in vorherigen Kapiteln auch wird hier stets das Zeitargument weggelassen, weil es sich hier nicht um die Betrachtung von Veränderungen über die Zeit dreht. Das heißt, dass nicht berücksichtigt werden braucht, dass der Roboter eventuell zu einem späteren Zeitpunkt die Fähigkeit des Redens verändern oder verlieren könnte.

werden entsprechend für jeden Affordanzraum $sp_{n.m}$ folgende Fakten hinzugefügt:

$$\begin{aligned} & \text{PRODUCES}(aff_1, sp_{n.m}). \text{P-AGENT-REG}(sp_{n.m}, r_{n.m.ar}). \\ & \text{P-TRANS-REG}(sp_{n.m}, r_{n.m.tr}). \text{AFFORDANT-REG}(sp_{n.m}, r_{afr}). \end{aligned}$$

Dabei soll $sp_{n.m}$ für den Affordanzraum stehen, der im n-ten Strahl an der m-ten Stelle steht. Die Zählung von »n« verläuft gegen den Uhrzeigersinn, beginnt in Abbildung 8.4 rechts vom Menschen auf drei Uhr und endet links vom Menschen auf 9 Uhr. Die Zählung von »m« beginnt beim Affordanzraum, dessen Agentenregion dem Menschen am nächsten ist und endet beim Affordanzraum, der jeweils dem Menschen am weitesten entfernt liegt. Nach Definition **S.D9** (S. 114) handelt es sich bei den Affordanzräumen um Hall-Affordanzräume des persönlichen Raumes von hum_1 .

Unter Abschnitt 5.2.3 wurde eine weitere Eigenschaft von Affordanzräumen motiviert: Affordanzräume unterscheiden sich darin, welche räumlichen Fähigkeiten sie unterstützen. Manche Affordanzräume sind beispielsweise so weit von einem Affordanten entfernt, dass in sie nur Handlungen platziert werden können, deren Agenten sich hinreichend lang machen können. Andere Affordanzräume wiederum halten nur für schlanke Agenten ausreichend Platz vor. Der Wissensbasis müssen hier also noch Fakten darüber hinzugefügt werden, dass die Affordanzräume auch die räumlichen Fähigkeiten des humanoiden Roboters unterstützen. Dem Roboter ist eine weitere Fähigkeit ab_2 inhärent, deren Fähigkeits-Wert *nao-spatial-ability* lautet (weil es sich in der Studie um einen Nao-Humanoiden handelt). Jeder der 77 Affordanzräume unterstützt *nao-spatial-ability*.

$$I(ab_2, rob_1). L(nao-spatial-ability, ab_2). \text{SUPPORTS}(sp_{n.m}, nao-spatial-ability).$$

In diesem Zustand handelt es sich nach Definition **A.D9** auf Seite 94 bei jedem der Affordanzräume um einen designierten Kandidaten zur Platzierung von *talk-to*-Handlungen mit Agenten rob_1 . Weil zudem kein Hindernis bekannt ist, das einen der Affordanzräume versperrt, kann abgeleitet werden, dass es sich nach Definition **A.D10** bei allen 77 Affordanzräumen um tatsächliche Platz-Kandidaten handelt:

$$\text{CANDIDATE}(sp_{n.m}, talk-to, rob_1).$$

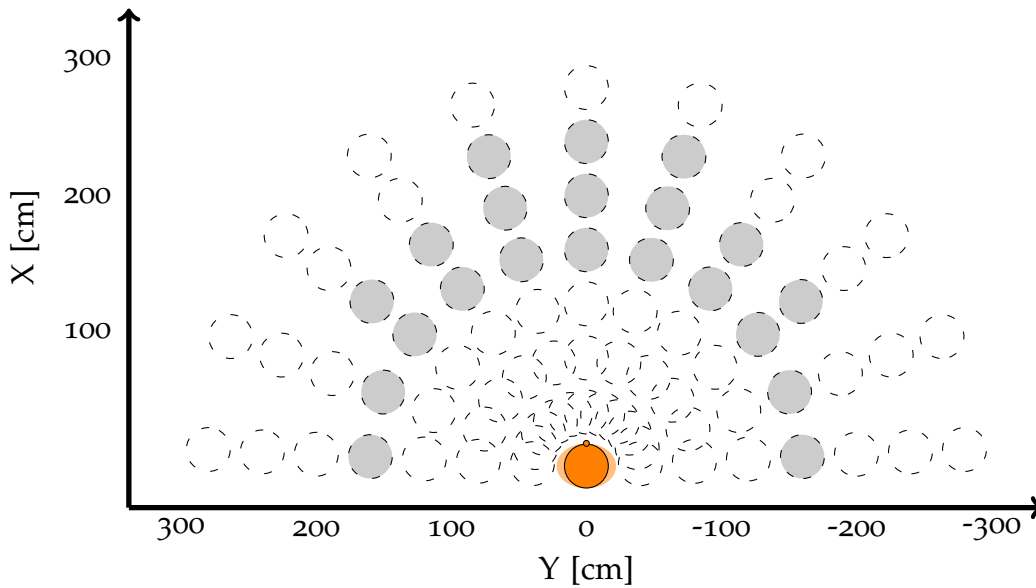


Abbildung 8.5.: Die potentiellen Agentenregionen der Affordanzräume, die nach den Daten von Torta et al. (2012) in der »Region of Approach« liegen, sind grau hinterlegt.

Schließlich soll die »Region of Approach« von Torta und Kollegen repräsentiert werden. Zu diesem Zweck werden für alle Affordanzräume, deren potentielle Agentenregion gemäß der empirisch erhobenen Daten von (Torta et al., 2012) in der »Region of Approach« liegen, ACCEPTS-USE-Fakten hinzugefügt, die repräsentieren, dass die Nutzung dieser Affordanzräume für *talk-to*-Handlungen durch hauseigene Humanoiden akzeptabel ist (vgl. Abschnitt 6.1.4). Abbildung 8.5 stellt jene potentiellen Agentenregionen grau hinterlegt dar, die in der »Region of Approach« liegen.

ACCEPTS-USE($sp_{1,4}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{2,4}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{3,4}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{3,5}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{4,4}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{4,5}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{5,4}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{5,5}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{5,6}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{6,4}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{6,5}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{6,6}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{7,4}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{7,5}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{7,6}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{8,4}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{8,5}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{9,4}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{9,5}$, *talk-to*, *home-robot*). ACCEPTS-USE($sp_{10,4}$, *talk-to*, *home-robot*).
 ACCEPTS-USE($sp_{11,4}$, *talk-to*, *home-robot*).

Zuletzt repräsentiert ein Fakt, dass der humanoide Roboter rob_1 der hausei-

gene Roboter von hum_1 ist (also dass rob_1 in der sozialen Beziehung *home-robot* zu hum_1 steht):

$$SOCIAL-REL(rob_1, hum_1, home-robot)$$

Entscheiden und Begründen

Das aufgestellte Modell von den Affordanzräumen in der Umgebung soll nun verwendet werden, um den Roboter für die Interaktion mit dem Menschen zu positionieren. Dazu wird zunächst ermittelt, welche sozio-räumlichen Gründe in dieser Situation bestehen. Nach Prinzip VII bringt hum_1 qua Mensch einen sozio-räumlichen Grund positiver Polarität hervor (Abschnitt 7.3.2). Da keine allgemeinen Prinzipien darüber aufgestellt wurden, wie sich die Stärken von Gründen bestimmen, werden diese domänen-abhängig gesetzt. Für diese Beispieldomäne soll die Nutzung der Affordanzräume innerhalb der »Region of Approach« besonders obligatorisch sein. Daher sei der sozio-räumliche Grund, der hier nach Prinzip VII generiert wird, ein starker Grund:

$$S-REASON(\rho_1).SOURCE-OF(hum_1, \rho_1).PRO(\rho_1).HAS-FORCE(\rho_1, strong).$$

Im nächsten Schritt ist zu bestimmen, auf welche Platzierungen sich der sozio-räumliche Grund ρ_1 bezieht, das heißt, welche Platzierungen er als Pro-Grund begünstigt. Nach Definition VII.D bezieht sich der Pro-Grund auf gerade diejenigen Platzierungen, die von dem Menschen hum_1 , durch den der Grund hervorgebracht wird, akzeptiert werden. Es ist also:

$$\begin{aligned} &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{1.4}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{2.4}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{3.4}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{3.5}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{4.4}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{4.5}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{5.4}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{5.5}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{5.6}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{6.4}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{6.5}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{6.6}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{7.4}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{7.5}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{7.6}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{8.4}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{8.5}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{9.4}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{9.5}, talk-to, rob_1). APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{10.4}, talk-to, rob_1). \\ &APPLIES-TO_{VII}(\rho_1, sp_{11.4}, talk-to, rob_1). \end{aligned}$$

	PRO	CON	Rang
$sp_{1.4}, sp_{2.4}, sp_{3.4}, sp_{3.5},$ $sp_{4.4}, sp_{4.5}, sp_{5.4}, sp_{5.5},$ $sp_{5.6}, sp_{6.4}, sp_{6.5}, sp_{6.6},$ $sp_{7.4}, sp_{7.5}, sp_{7.6}, sp_{8.4},$ $sp_{8.5}, sp_{9.4}, sp_{9.5}, sp_{10.4},$ $sp_{11.4}$	ρ_1		1
alle anderen			2

Tabelle 8.1.: Sozio-räumliche Gründe bei der Bewertung der Platz-Kandidaten für die Interaktion zwischen rob_1 und hum_1 im Szenario nach Torta et al. (2012). Die Rangfolge ergibt sich mit der Entscheidungsregel Levelwise-Tallying (Abschnitt 7.1.2).

Diese abgeleiteten Fakten werden vom Service zur sozio-räumlichen Bewertung von Affordanzräumen genutzt (vgl. Abschnitt 8.1). Der Service jene Affordanzräume sozio-räumlich zu bewerten, die Roboter rob_1 nutzen kann, um mit hum_1 in eine Interaktion *talk-to* zu treten. Das sind gerade die 77 Affordanzräume, die im vorherigen Abschnitt eingeführt wurden (vgl. auch Abbildung 8.4), da sie alle tatsächliche Platz-Kandidaten für *talk-to*-Handlungen von rob_1 sind (vgl. Abschnitt 5.3).

Zu jedem dieser 77 Platz-Kandidaten werden die sozio-räumlichen Gründe abgefragt, die für bzw. gegen seine Nutzung für *talk-to*-Handlungen von rob_1 sprechen. Tabelle 8.1 fasst das Ergebnis dieser Abfrage zusammen, wonach der sozio-räumliche Grund ρ_1 für genau jene Platz-Kandidaten spricht, deren potentielle Agentenregion in der »Region of Approach« liegt. Diese Platz-Kandidaten in der »Region of Approach« werden durch Anwendung der Levelwise-Tallying-Regel nach Abschnitt 7.1 paarweise als gleichwertig bewertet und als echt besser als die Platz-Kandidaten, für die kein Grund spricht, deren potentielle Agentenregionen also außerhalb der in der »Region of Approach« liegen. Abbildung 8.6 (nächste Seite) stellt die sozio-räumlichen Bewertungen der Platz-Kandidaten graphisch dar.

Unter den 21 besten Platz-Kandidaten kann nun einer ausgewählt werden. Ein Pfadplaner kann daraufhin einen Pfad von der aktuellen Position des Roboters in die potentielle Agentenregion des ausgewählten Affordanzraumes planen. Soll der Roboter zusätzlich begründen, weshalb er sich für einen der Platz-Kandidaten entschieden hat, wird der Service zur Platzierungs-Begründung aufgerufen. Angenommen, die Entscheidung ist auf den Platz-Kandidaten $sp_{4.5}$ gefallen. Dann wird der Begründungs-Service mit den Parametern $sp_{4.5}, rob_1, talk-to$ aufgerufen. Das Ergebnis lautet in diesem Beispiel

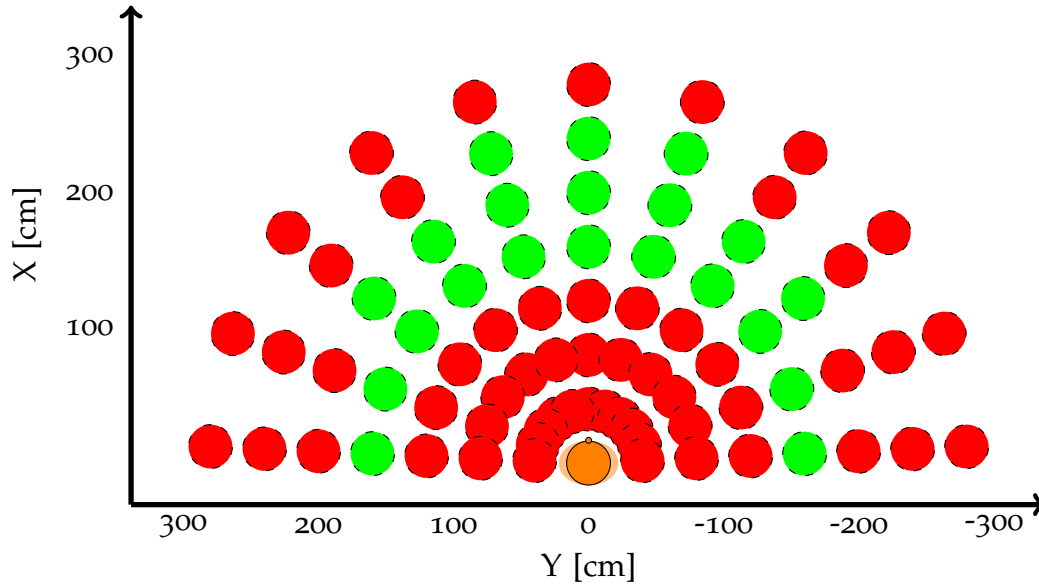


Abbildung 8.6.: Bewertung der Platz-Kandidaten hinsichtlich des Aspektes, wie angemessen es ist, *talk-to*-Handlungen durch rob_1 in ihnen zu platzieren. Grün: rücksichtsvoll; Rot: nimmt keinen Rücksicht auf persönlichen Raum.

nach Definition **R.D15** auf Seite 149:

$$\text{RESPECTS-PS}(sp_{4.5}, \text{talk-to}, rob_1, hum_1).$$

Dieses Resultat der Anfrage an den Service zur Platzierungs-Begründung kann als » rob_1 nimmt Rücksicht auf den persönlichen Raum von hum_1 , indem er die *talk-to*-Handlung in $sp_{4.5}$ platziert« und somit als Begründung für die ausgewählte Platzierung gelesen werden.

Die Platz-Kandidaten wurden innerhalb von 63 ms bestimmt. Die Abfrage der sozio-räumlichen Gründe und die anschließende Gründe-basierte Bewertung der Platz-Kandidaten dauert auf dem System 251 ms. Die Abfrage der Begründung nimmt 457 ms in Anspruch.⁸

8.2.2. Platzierung eines Roboters zur verbalen Interaktion mit einem Menschen in einem komplexen sozialen Kontext

Das Beispiel aus den vorangegangenen Abschnitten soll nun konservativ erweitert werden. Das heißt, die bisherige Modellierung kann genau so beibehalten werden und wird nun durch zusätzliche Fakten angereichert, die eine komplexere soziale Umgebung beschreiben. Diese Erweiterung wird von Torta et al. (2012) nicht beschrieben. Der Grund, weswegen die Erweiterung hier vorgenommen wird, besteht darin zu zeigen, dass die Affordanz-basierte

⁸Simuliert auf einem Rechner mit 1.8 Ghz und 4 GB RAM; gemittelt über 100 Läufe.

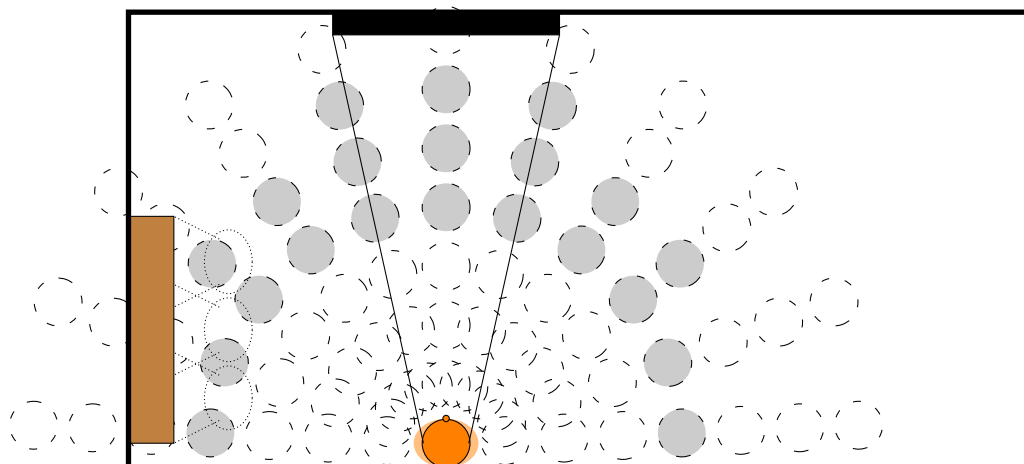


Abbildung 8.7.: Erweiterung des Szenarios von Torta et al. (2012). Neben dem persönlichen Raum ist ein Fernseher (oberer Rand, schwarz) und ein Bücherregal zu berücksichtigen (linker Rand, braun) sowie die gerade laufende Handlung des Fernsehens und die Möglichkeit, ein Buch aus dem Bücherregal zu entnehmen.

Konzeption sozialer Räume hinreichend ausdrucksstark ist, um auch über die einfachen Szenarien, die in empirischen Studien der Mensch-Roboter-Interaktion gegenwärtig untersucht werden, hinauszugehen. Es ist nicht ersichtlich, wie die Modellierung von Torta und Kollegen auf solche komplexere Situationen erweitert werden kann. Dagegen ist die Erweiterung unter der Affordanz-basierten Perspektive unproblematisch und erfordert nur diejenigen Konzepte, die in vorherigen Kapiteln bereits eingeführt wurden.

Abbildung 8.7 stellt die erweiterte Umgebung dar. Hier ist der Mensch hum_1 in einen Kontext eingebettet. Er befindet sich in einem Zimmer, das von Wänden begrenzt ist. Zu seiner Linken steht neben dem Menschen ein Bücherregal, aus dem man Bücher entnehmen kann. Vor dem Menschen steht ein Fernseher. Dem Bücherregal hängen hier drei weitere Affordanzräume an, und dem Fernseher ein weiterer Affordanzraum. Die 77 Hall-Affordanzräume des persönlichen Raumes von hum_1 bleiben unangetastet sowie auch die »Region of Approach« bestehend aus den Hall-Affordanzräumen, deren potentielle Agentenregionen gemäß der Daten von Torta et al. (2012) im sozial angemessensten Bereich liegen.

Diese komplexere Umgebung bringt zwei Herausforderungen ins Spiel: Die erste ergibt sich aus den zusätzlichen Objekten in der Umgebung, die manche Affordanzräume blockieren und so unnutzbar machen. In dieser Situation sind also manche der designierten Platz-Kandidaten keine tatsächlichen Platz-Kandidaten (vgl. Definitionen **A.D9** und **A.D10** auf Seite 94), da sie nicht frei im Sinne von Definition **A.D11** sind. Nur 66 der 77 designierten Platz-Kandidaten sind hier tatsächliche Platz-Kandidaten, und nur diese 66 Platz-Kandidaten werden nachfolgend noch eine Rolle spielen, da die ande-

ren aus dem Auswahlprozess ausgeschlossen werden. Die anderen 11 Platz-Kandidaten werden entweder durch eine Wand, das Bücherregal oder den Fernseher blockiert. In Abbildung 8.8 (S. 171) ist zu erkennen, dass diese designierten, aber nicht tatsächlichen Platz-Kandidaten nicht sozial bewertet werden.

Die zweite Herausforderung ergibt sich daraus, dass bei der Platzierung der *talk-to*-Handlung durch *rob*₁ die zusätzlichen Affordanzräume berücksichtigt werden sollen: Niemand soll daran gehindert werden, ein Buch aus dem Bücherregal zu nehmen, und andererseits schaut *hum*₁ gerade fern und seine Sicht auf den Fernseher soll nicht versperrt werden.

Affordanz-basierte Modellierung

Die Modellierung der Erweiterungen beginnt damit, die neuen Affordanzen einzuführen: Es gibt die Affordanz, ein Buch aus dem Bücherregal zu nehmen (*take-out-book-affordance*) und die Affordanz, das Fernsehen zu ermöglichen (*watch-tv-affordance*). Passend zur Affordanz, ein Buch aus dem Bücherregal zu nehmen existiert die Fähigkeit, ein Buch aus dem Bücherregal zu nehmen (*can-take-out-book*), und passend zur Affordanz, Fernsehen zu ermöglichen, existiert die Fähigkeit, fernzusehen (*can-watch-tv*). Die Affordanz, ein Buch aus dem Bücherregal zu nehmen, passt mit der Fähigkeit, ein Buch zu entnehmen, bezüglich des Handlungstyps »Buch entnehmen« (*take-out-book*) zusammen, so wie die Affordanz, das Fernsehen zu ermöglichen, bezüglich des Handlungstyps »Fernsehen« (*watch-tv*) mit der Fähigkeit des Fernsehen könnens zusammenpasst (vgl. Abschnitt 4.2):

$$\begin{aligned} & \text{CPL}(\textit{take-out}, \textit{can-take-out-book}, \textit{take-out-book-affordance}). \\ & \text{CPL}(\textit{watch-tv}, \textit{can-watch-tv}, \textit{watch-tv-affordance}). \end{aligned}$$

Dass das Bücherregal *shelf*₁ eine Affordanz besitzt, die den Affordanz-Wert *take-out-book-affordance* hat, und dass der Fernseher *tv*₁ eine Affordanz besitzt, deren Affordanz-Wert *watch-tv-affordance* ist, wird durch folgende Fakten repräsentiert (vgl. Abschnitt 4.2):

$$\begin{aligned} & \text{I}(\textit{aff}_2, \textit{shelf}_1). \text{I}(\textit{aff}_3, \textit{tv}_1). \\ & \text{L}(\textit{take-out-book-affordance}, \textit{aff}_2). \text{L}(\textit{watch-tv-affordance}, \textit{aff}_3). \end{aligned}$$

Außerdem besitzt der Mensch *hum*₁ die Fähigkeit *ab*₃ fernzusehen:

$$I(ab_3, hum_1). L(can-watch-tv, ab_3).$$

Die drei Affordanzräume, die dem Bücherregal anhängen und von der Affordanz aff_1 produziert werden, sollen mit $sp_{shelf.1}$, $sp_{shelf.2}$, $sp_{shelf.3}$ bezeichnet sein, und der Affordanzraum, der dem Fernseher anhängt und von der Affordanz aff_3 produziert wird, soll $sp_{tv.1}$ heißen:

$$PRODUCES(aff_2, sp_{shelf.1}). PRODUCES(aff_2, sp_{shelf.2}). PRODUCES(aff_2, sp_{shelf.3}). \\ PRODUCES(aff_3, sp_{tv.1}).$$

Diese vier zusätzlichen Affordanzräume verfügen gemäß Axiom **A.A11** (S. 88) über potentielle Agentenregionen, potentielle Transaktionsregionen und Affordantenregionen (siehe Abschnitt C.2.2 im Anhang für eine vollständige Darstellung aller Basis-Fakten). Wichtig ist hier, dass einige der Platz-Kandidaten, die der Roboter nutzen kann, um mit dem Menschen ins Gespräch zu kommen, mit den neuen Affordanzräumen in Konflikt stehen (vgl. Abschnitt 5.4). So kann beispielsweise der Hall-Affordanzraum $sp_{6.5}$ nicht konfliktfrei gleichzeitig mit $sp_{tv.1}$ genutzt werden; gemäß Definition **A.D13** (S. 96) liegt ein Konflikt vom Typ »AT« vor, da die potentielle Agentenregion von $sp_{6.5}$ und die potentielle Transaktionsregion von $sp_{tv.1}$ partiell koinzidieren. Dasselbe gilt für alle Hall-Affordanzräume, die mit der potentiellen Transaktionsregion von $sp_{tv.1}$ koinzidieren, oder auch mit den Affordanzraumregionen jener Affordanzräume, die dem Bücherregal anhängen.

Bevor diese Konflikte bei der Platzierungsplanung berücksichtigt werden können, wird zunächst die Modellierung der sozialen Umgebung komplettiert. Zunächst soll festgehalten sein, dass der Mensch hum_1 gegenwärtig fernsieht. Das wird dadurch ausgedrückt, dass es eine transitive Handlung act_1 gibt, die im Affordanzraum $sp_{tv.1}$ platziert ist, die Affordanz aff_3 des Fernsehers realisiert und die Fähigkeit ab_3 von hum_1 benutzt (vgl. Abschnitt 4.3):

$$REALIZES(act_1, aff_3). USES(act_1, ab_3). PLACED-AT(act_1, sp_{tv.1}).$$

Nach Definition **S.D1** (S. 105) handelt es sich bei $sp_{tv.1}$ also gegenwärtig um einen Aktivitätsraum. Darüber hinaus soll berücksichtigt werden, dass es erwartbar ist, dass ein Bewohner des Hauses $flatmate$ einen Affordanzraum des Bücherregals benutzt. Die drei Affordanzräume sollen also soziale Affordanzräume gemäß Definition **S.D7** (S. 108) sein. Die Erwartbarkeit der Nutzung

der drei Affordanzräume am Bücherregal wird durch folgende Fakten repräsentiert:

$$\text{EXPECTABLE}(\text{flatmate}, sp_{\text{shelf}.1}). \text{EXPECTABLE}(\text{flatmate}, sp_{\text{shelf}.2}). \\ \text{EXPECTABLE}(\text{flatmate}, sp_{\text{shelf}.3}).$$

Damit die Erwartung auch wirkungsvoll ist, wird mit hum_2 ein Mensch angenommen, der ein Mitbewohner ist. Definition II.D (S. 136) erfordert, dass hier tatsächlich ein Akteur existiert, der als *flatmate* klassifiziert ist. Andererseits gäbe es keinen Grund, einen sozialen Affordanzraum dennoch zu blockieren:

$$CF(\text{flatmate}, hum_2).$$

Entscheiden und Begründen

Nach Prinzip I der Platzierungsprinzipien wird gemäß **R.G1** (vgl. Seite 129) ein sozio-räumlicher Grund negativer Polarität erzeugt, der durch die transitive Handlung act_1 hervorgebracht wird. Dieser Grund sei ρ_9 . Die Stärke dieses Grundes kann spezifisch für die Domäne gesetzt werden, und hängt möglicherweise von der Wichtigkeit der Handlung ab. Wenn es wichtiger sein soll, eine akzeptable Position im persönlichen Raum einzunehmen als die Sicht auf den Fernseher nicht zu versperren, wird ρ_9 als weniger stark als ρ_1 modelliert. Die Stärke von ρ_9 sei hier *medium*, das echt schwächer ist als *strong* (die Stärke von ρ_1):

$$S\text{-REASON}(\rho_9). \text{SOURCE-OF}(act_1, \rho_9) \text{CON}(\rho_9). \text{HAS-FORCE}(\rho_9, \text{medium}). \\ \text{strong} \succ_{\text{force}} \text{medium}$$

Gemäß Prinzip II, nach dem die Handlungsmöglichkeiten anderer Akteure gewahrt bleiben sollen, bringen Affordanzen sozio-räumliche Gründe hervor (vgl. **R.G2**, S. 130). Tatsächliche Relevanz für die Entscheidung zwischen Platz-Kandidaten entfalten nach Definition II.D nur solche sozio-räumlichen Gründe, die von Affordanzen hervorgebracht werden, die Affordanzräume produzieren, deren Nutzung erwartbar ist. In dem Beispiel gilt das für die Affordanz aff_2 , die dem Bücherregal inhärent ist. Die Stärke dieses sozio-räumlichen Grundes (ρ_6) wird in Ermangelung allgemeiner Prinzipien, nach denen die Stärke von Gründen gesetzt werden können, hier als schwächer

Grund beschrieben, der echt schwächer ist als der mittelstarke Grund, der gegen die Störung der Fernseh-Handlung spricht:

$$\text{S-REASON}(\rho_6). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_2, \rho_6) \text{CON}(\rho_6). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, \text{weak}).$$

$$\text{medium} \succ_{\text{force}} \text{weak}$$

Auf Basis der sozio-räumlichen Gründe ρ_1 (die Tatsache, dass der persönliche Raum von hum_1 berücksichtigt werden soll), ρ_9 (die Tatsache, dass die Handlung des Fernsehens berücksichtigt werden soll) und ρ_6 (die Tatsache, dass die Möglichkeit, Bücher aus dem Bücherregal zu nehmen berücksichtigt werden soll) kann nun ermittelt werden, welche Platz-Kandidaten zu den sozial angemessensten gehören:

Der sozio-räumliche Grund ρ_1 spricht nach wie vor für die Platzierung einer *talk-to*-Handlung von rob_1 mit hum_1 in einen der Hall-Affordanzräume, deren potentielle Agentenregionen in der »Region of Approach« liegen (vgl. Seite 162f). Diese Fakten werden hier nicht nochmals aufgelistet.

Bezüglich der Frage, gegen welche Platzierungen der Grund ρ_9 spricht, sind nach Definition **I.D** (S. 134) folgende Fakten ableitbar, die sich auf die Hall-Affordanzräume beziehen, in denen der Roboter dem Menschen die Sicht auf den Fernseher versperren würde:

$$\begin{aligned} &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{3,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{4,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{5,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{5,2}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{5,3}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{5,4}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{5,6}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{5,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{6,2}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{6,3}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{6,4}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{6,5}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{6,6}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{7,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{7,2}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{7,3}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{7,4}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{7,5}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{7,6}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{8,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \\ &\text{APPLIES-TO}_I(\rho_9, \text{sp}_{9,1}, \text{talk-to}, \text{rob}_1). \end{aligned}$$

Nach Definition **II.D** (S. 136) spricht der sozio-räumliche Grund ρ_6 gegen alle Platz-Kandidaten, die mit einem Affordanzraum in Konflikt stehen, dessen Nutzung durch Andere erwartbar ist, hier also gegen die Hall-Affordanzräume, in denen der Roboter einer möglichen Handlung am Bücherregal im Weg stehen würde:

	PRO	CON	Rang
<i>sp</i> _{1.4} , <i>sp</i> _{2.4} , <i>sp</i> _{3.4} , <i>sp</i> _{3.5} , <i>sp</i> _{4.4} , <i>sp</i> _{4.5} , <i>sp</i> _{8.4} , <i>sp</i> _{8.5}	ρ_1		1
<i>sp</i> _{11.4} , <i>sp</i> _{10.4} , <i>sp</i> _{9.4} , <i>sp</i> _{9.5}	ρ_1	ρ_6	2
<i>sp</i> _{5.4} , <i>sp</i> _{5.5} , <i>sp</i> _{5.6} , <i>sp</i> _{6.4} , <i>sp</i> _{6.5} , <i>sp</i> _{6.6} , <i>sp</i> _{7.4} , <i>sp</i> _{7.5} , <i>sp</i> _{7.6}	ρ_1	ρ_9	3
<i>sp</i> _{1.1} , <i>sp</i> _{1.2} , <i>sp</i> _{1.3} , <i>sp</i> _{1.5} , <i>sp</i> _{1.6} , <i>sp</i> _{1.7} , <i>sp</i> _{2.1} , <i>sp</i> _{2.2} , <i>sp</i> _{2.3} , <i>sp</i> _{2.5} , <i>sp</i> _{2.6} , <i>sp</i> _{2.7} , <i>sp</i> _{3.2} , <i>sp</i> _{3.3} , <i>sp</i> _{3.6} , <i>sp</i> _{3.7} , <i>sp</i> _{4.2} , <i>sp</i> _{4.3} , <i>sp</i> _{4.6} , <i>sp</i> _{4.7} , <i>sp</i> _{8.2} , <i>sp</i> _{8.3} , <i>sp</i> _{8.6} , <i>sp</i> _{8.7} , <i>sp</i> _{9.2} , <i>sp</i> _{9.3} , <i>sp</i> _{10.1} , <i>sp</i> _{10.2} , <i>sp</i> _{10.3} , <i>sp</i> _{10.1} , <i>sp</i> _{10.2} , <i>sp</i> _{10.3}			4
<i>sp</i> _{3.1} , <i>sp</i> _{4.1} , <i>sp</i> _{5.1} , <i>sp</i> _{5.2} , <i>sp</i> _{5.3} , <i>sp</i> _{6.1} , <i>sp</i> _{6.2} , <i>sp</i> _{6.3} , <i>sp</i> _{7.1} , <i>sp</i> _{7.2} , <i>sp</i> _{7.3} , <i>sp</i> _{8.1} , <i>sp</i> _{9.1}		ρ_9	5

Tabelle 8.2.: Sozio-räumliche Gründe bei der Bewertung der Platz-Kandidaten für die Interaktion zwischen *rob*₁ und *hum*₁ im erweiterten Szenario. Die Rangfolge ergibt sich mit der Entscheidungsregel Levelwise-Tallying (Abschnitt 7.1.2).

APPLIES-TO_{II}(ρ_6 , *sp*_{9.4}, *talk-to*, *rob*₁). APPLIES-TO_{II}(ρ_6 , *sp*_{9.5}, *talk-to*, *rob*₁).
APPLIES-TO_{II}(ρ_6 , *sp*_{10.4}, *talk-to*, *rob*₁). APPLIES-TO_{II}(ρ_6 , *sp*_{11.4}, *talk-to*, *rob*₁).

Unter Berücksichtigung der sozio-räumlichen Gründe können fünf Arten von Platz-Kandidaten unterschieden werden: 1) Platz-Kandidaten, für die ρ_1 spricht und gegen die kein anderer Grund spricht, 2) Platz-Kandidaten, für die ρ_1 spricht und gegen die ρ_6 spricht, 3) Platz-Kandidaten, für die ρ_1 spricht und gegen die ρ_9 spricht, 4) Platz-Kandidaten, für/gegen die keine sozio-räumlichen Gründe sprechen, 5) Platz-Kandidaten, gegen die ρ_9 spricht, ohne dass irgendein sozio-räumlicher Grund für sie spricht.

Unter Anwendung der Levelwise-Tallying-Entscheidungsregel zur Gründe-basierten Bewertung von Handlungsalternativen (Abschnitt 7.1.2) werden die Platz-Kandidaten in eine Ordnung gebracht. Tabelle 8.2 stellt diese Ordnung inklusive der Zuordnung der sozio-räumlichen Gründe zu den Affordanzräumen dar.

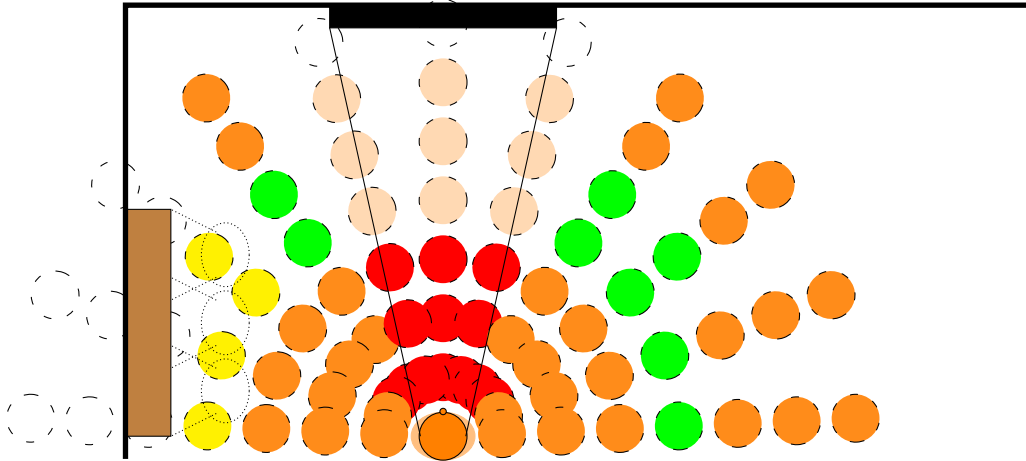


Abbildung 8.8.: Bewertung der Platz-Kandidaten, die von rob_1 genutzt werden können, um mit hum_1 verbal zu interagieren, unter Berücksichtigung des erweiterten sozialen Kontexts der Handlung.

Abbildung 8.8 zeigt die sozio-räumliche Bewertung der Platz-Kandidaten als Ergebnis der Anfrage an den Service zur sozio-räumlichen Bewertung der Affordanzräume, die von rob_1 für *talk-to*-Handlungen mit hum_1 genutzt werden können. Während Abbildung 8.6 (S. 164) eine binäre Unterscheidung zwischen Platz-Kandidaten, die den persönlichen Raum respektieren, und solchen, die es nicht tun, erkennen lässt, sind in Abbildung 8.8 nun fünf Klassen unterschieden.

Angenommen, es wird Affordanzraum $sp_{3,4}$ ausgewählt⁹, um in ihn die verbale Interaktion zwischen Roboter und Mensch zu platzieren. Um eine Begründung für die Wahl von $sp_{3,4}$ zu generieren, wird der Begründungs-Service mit Parametern $sp_{3,4}$, *talk-to* und rob_1 aufgerufen. Das Ergebnis ist unter Anwendung von Definitionen **R.D4** (S. 135), **R.D6** (S. 137) und **R.D15** (S. 149) folgende Faktenmenge:

$CONSIDERS-ACT(sp_{3,4}, talk-to, rob_1, act_1).$
 $CONSIDERS-AFF(sp_{3,4}, talk-to, rob_1, aff_2).$
 $RESPECTS-PS(sp_{3,4}, talk-to, rob_1, hum_1).$

Diese Faktenmenge kann verbalisiert werden als »die Nutzung von $sp_{3,4}$ für die verbale Interaktion zwischen Roboter und Mensch nimmt auf die laufende Handlung des Fernsehens (act_1) Rücksicht, sie nimmt Rücksicht auf die Handlungsmöglichkeit des Entferns eines Buches aus dem Bücherregal (aff_2), und sie nimmt Rücksicht auf den persönlichen Raum des Interaktions-

⁹Affordanzraum $sp_{3,4}$ ist jener Affordanzraum im dritten Strahl zur Rechten des Menschen, dessen potentielle Agentenregion sich am viertweitesten vom Menschen befindet.

partners (*hum*₁).«

Die tatsächlichen Platz-Kandidaten, das heißt jene, die nicht durch Wände, das Regal oder den Fernseher blockiert sind, wurden in der Simulation innerhalb von 75 ms identifiziert. Das Zusammentragen der sozio-räumlichen Gründe und die nachfolgende Bewertung der Platz-Kandidaten nahm 516 ms in Anspruch. Die Abfrage der Begründungen erfolgte in 1210 ms.¹⁰

8.2.3. Proxemik und soziale Beziehungen zwischen Mensch und Roboter nach Kim & Mutlu (2014)

Die Studienergebnisse von Kim und Mutlu (2014) zeigen, dass soziale Beziehungen zwischen Mensch und Roboter die proxemischen Präferenzen von Menschen beeinflussen. Die folgende Darstellung modelliert ein Resultat von Kim und Mutlu (2014) unter der Affordanz-basierten Perspektive.

Darstellung der Studienergebnisse

Das Studiendesign von Kim und Mutlu (2014) ist in Abbildung 8.9 dargestellt. Eine Versuchsperson sitzt an einem Tisch vor einer Leinwand. Der Roboter kommt hinzu. Die Aufgabe der Versuchsperson besteht darin, gemeinsam mit dem Roboter ein Spiel zu spielen, das auf der Leinwand angezeigt wird.

Kim und Mutlu (2014) variieren zwei Parameter: die proxemische Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter (»proxemic distance«) und die Macht-Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter (»power distance«).

Die proxemische Distanz wird in Orientierung an die Distanzen des persönlichen Raumes nach Hall (1966) variiert. Nach Halls Modell positionieren sich Kollegen im Abstand von 46 cm bis 120 cm zueinander. Der Roboter wurde darauf programmiert, sich entweder im Abstand von 46 cm zu positionieren (die nahe Distanz, in Abbildung 8.9 mit C gekennzeichnet) oder im Abstand von 120 cm (die ferne Distanz in Abbildung 8.9 mit D gekennzeichnet). Während des Experiments orientiert sich der Roboter zur Leinwand.

Die Macht-Distanz zwischen Mensch und Roboter wird variiert, indem der Versuchsperson entweder erzählt wird, dass der Roboter sein Supervisor ist, also in der Rolle eines Aufsehers agiert, oder aber dass der Roboter der Subordinate ist, also der Versuchsperson unterstellt ist. In Abhängigkeit seiner sozialen Rolle verwendet der Roboter im Dialog mit der Versuchsperson angepasste Redewendungen. So sagt der Supervisor-Roboter beispielsweise »Drehe die Karte nummer drei um«, während der Subordinate-Roboter sagt »Ich

¹⁰Simuliert auf einem Rechner mit 1.8 Ghz und 4 GB RAM; gemittelt über 100 Läufe.

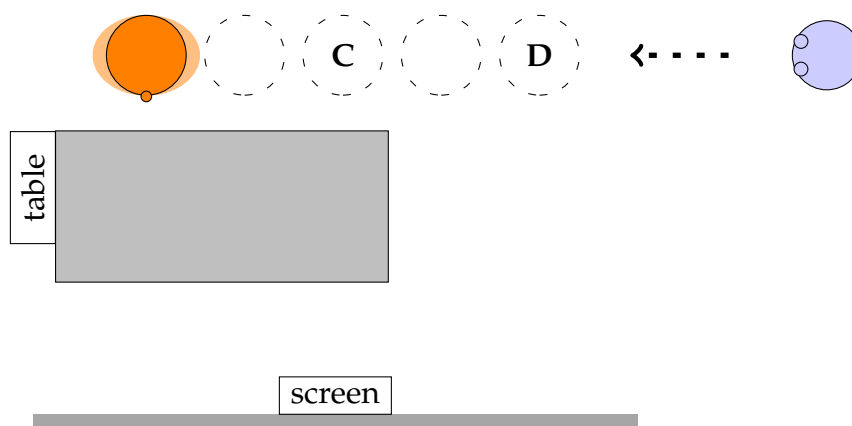


Abbildung 8.9.: Darstellung des Studiendesigns bei Kim und Mutlu (2014). Die Versuchsperson (orange) sitzt an einem Tisch und blickt auf eine Leinwand. Die Aufgabe besteht darin, gemeinsam mit dem Roboter ein Spiel zu spielen, das auf der Leinwand erscheint. Je nach Studienbedingung platziert sich der Roboter (blau) entweder an der Position C nahe der Versuchsperson (46 cm) oder an der Position D (120 cm).

schlage vor, dass Du die Karte nummer drei umdrehst« (vgl. Kim & Mutlu, 2014, S. 787).

Ein Resultat der Studie ist, dass die Teilnehmer der Studie die Interaktion mit dem Roboter in der Supervisor-Rolle besser und harmonischer einschätzen, wenn sich der Roboter in der Nähe aufhielt (an Position C), während sie die Interaktion mit dem Roboter in der Subordinate-Rolle besser und harmonischer einschätzten, wenn sich er sich im größeren Abstand zum Menschen positionierte (an Position D).

Dieses Resultat legt nahe, so Kim und Mutlu, dass die Versuchsteilnehmer die größere Distanz, die der Roboter zu ihnen einhält, als konsistent mit dem Status des Subordinaten empfinden, und dass entsprechend der Supervisor-Status mit dem dem geringeren Abstand zusammenpasst.

Kim und Mutlu (2014) variieren zwei Variablen: die proxemische Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter (»proxemic distance«) und die Macht-Distanz zwischen Versuchsperson und Roboter (»power distance«).

Die proxemische Distanz wird in Orientierung an die Distanzen des persönlichen Raumes nach Hall (1966) variiert. Nach Halls Modell positionieren sich Kollegen im Abstand von 46 cm bis 120 cm zueinander. Der Roboter wurde darauf programmiert, sich entweder im Abstand von 46 cm zur Versuchsperson zu positionieren (die nahe Distanz, in Abbildung 8.9 mit C gekennzeichnet) oder im Abstand von 120 cm zur Versuchsperson zu positionieren (die ferne Distanz in Abbildung 8.9 mit D gekennzeichnet). Während des Experiments orientiert sich der Roboter zur Leinwand.

Die Macht-Distanz zwischen Mensch und Roboter wird variiert, indem der

Versuchsperson entweder erzählt wird, dass der Roboter sein Supervisor ist, also in der Rolle eines Aufsehers agiert, oder aber dass der Roboter der Subordinate ist, also der Versuchsperson unterstellt ist. In Abhängigkeit seiner sozialen Rolle verwendet der Roboter im Dialog mit der Versuchsperson angepasste Redewendungen. So sagt der Supervisor-Roboter beispielsweise »Drehe die Karte Nummer drei um«, während der Subordinate-Roboter sagt »Ich schlage vor, dass Du die Karte Nummer drei umdrehst« (vgl. Kim & Mutlu, 2014, S. 787).

Ein Resultat der Studie ist, dass die Versuchspersonen die Interaktion mit dem Roboter in der Supervisor-Rolle besser und harmonischer einschätzten, wenn sich der Roboter in der Nähe aufhielt (an Position C), während sie die Interaktion mit dem Roboter in der Subordinate-Rolle besser und harmonischer einschätzten, wenn sich der Roboter im größeren Abstand positionierte (an Position D). Dieses Resultat legt nahe, so Kim und Mutlu, dass die Versuchsteilnehmer die größere Distanz, die der Roboter zu ihnen einhält, als konsistent mit dem Status des Subordinaten empfinden, und dass entsprechend der Supervisor-Status mit dem geringeren Abstand zusammenpasst.

Affordanz-basierte Modellierung

Um zu einer Affordanz-basierten Modellierung zu gelangen, ist zunächst festzustellen, dass aus Sicht des Roboters zwei Handlungsmöglichkeiten relevant sind: Die Möglichkeit, mit dem Menschen zu verbal zu interagieren, sowie die Möglichkeit, auf die Leinwand zu sehen. Das Ziel ist, eine Position für den Roboter zu finden, von der aus er mit dem Menschen interagieren kann und von der aus er auf die Leinwand blicken kann.

Zunächst stehe *visible* für die Affordanz, sichtbar zu sein, und *talk-to-able* steht wie auch in der Modellierung des persönlichen Raumes von Torta et al. (2012) für die Affordanz, angesprochen werden zu können (vgl. Seite 158). Entsprechend gibt es die Fähigkeit zu sehen *can-see* und die Fähigkeit zu reden *can-talk*. Die Affordanz der Sichtbarkeit passt bezüglich Handlungen des Sehens *see* mit der Fähigkeit zu sehen zusammen, und die Affordanz des verbal interagieren Könnens passt bezüglich Handlungen des Redens *talk-to* mit der Fähigkeit zu reden zusammen. Diese Tatsachen werden gemäß der Konzeption in Abschnitt 4.2 durch folgende Fakten repräsentiert:

$$\begin{aligned} & \text{CPL}(\textit{see}, \textit{can-see}, \textit{visible}). \\ & \text{CPL}(\textit{talk-to}, \textit{can-talk}, \textit{talk-to-able}). \end{aligned}$$

Der Mensch hum_1 trägt die Affordanz aff_1 , verbal interagieren zu können, und die Leinwand $screen_1$ trägt die Affordanz aff_2 , sichtbar zu sein. Der Roboter rob_1 ist Träger entsprechend dazu passender Fähigkeiten ab_1 und ab_2 (vgl. Abschnitt 4.2 zur Modellierungen von Affordanzen und Fähigkeiten), und auch der Mensch besitzt die Fähigkeit ab_3 , auf die Leinwand zu sehen:¹¹

$$\begin{aligned} &I(aff_1, hum_1). I(aff_2, screen_1). I(ab_1, rob_1). I(ab_2, rob_1). I(ab_3, hum_1). \\ &L(talk-to-able, aff_1). L(visible, aff_2). L(can-talk, ab_1). L(can-see, ab_2). L(can-see, ab_3). \end{aligned}$$

Die Affordanz der Leinwand produziert Affordanzräume, die genutzt werden können, um auf die Leinwand zu blicken. Einer dieser Affordanzräume wird durch die Versuchsperson hum_1 genutzt und ein anderer soll durch den Roboter rob_1 genutzt werden. Da der Roboter an zwei möglichen Positionen stehen kann (an Position **C** oder an Position **D**), muss das Modell mindestens drei Affordanzräume enthalten, die für den Blick auf die Leinwand genutzt werden können. Um auch die Lücken zwischen diesen Positionen aufzufüllen, werden insgesamt fünf Affordanzräume $sp_1, sp_2, sp_3, sp_4, sp_5$ eingeführt, die von der Affordanz der Leinwand produziert werden und sowohl für Mensch als auch für Roboter nutzbar sind (vgl. Abschnitt 5.2.2):

$$\begin{aligned} &PRODUCES(aff_2, sp_1). PRODUCES(aff_2, sp_2). PRODUCES(aff_2, sp_3). \\ &PRODUCES(aff_2, sp_4). PRODUCES(aff_2, sp_5). \end{aligned}$$

Diese Affordanzräume sind wie immer durch eine potentielle Agentenregion, eine potentielle Transaktionsregion und eine Affordantenregion räumlich strukturiert (vgl. Abschnitt 5.2.1). Eine Repräsentation der räumlichen Struktur der Affordanzräume ist im Anhang C.3 gegeben. Im linken Teil von Abbildung 8.10 sind die Affordanzräume der Leinwand mit ihren potentiellen Agentenregionen (kreisförmig) und potentiellen Transaktionsregionen (dreieckig) eingezeichnet.

Als der Roboter sich positioniert, benutzt die Versuchsperson bereits den Affordanzraum sp_1 der Leinwand (vgl. Abbildung 8.9). Diese Handlung von hum_1 wird durch eine transitive Handlung act_1 modelliert, die ab_3 nutzt und aff_2 realisiert (vgl. Abschnitte 4.3, S. 73 und 5.2.2, S. 90f):

¹¹ Auch hier werden in den Formeln wieder systematisch Zeitargumente weggelassen. Es kommt für dieses Beispiel nicht darauf an, dass sich die Werte von Affordanzen und Fähigkeiten über die Zeit ändern können.

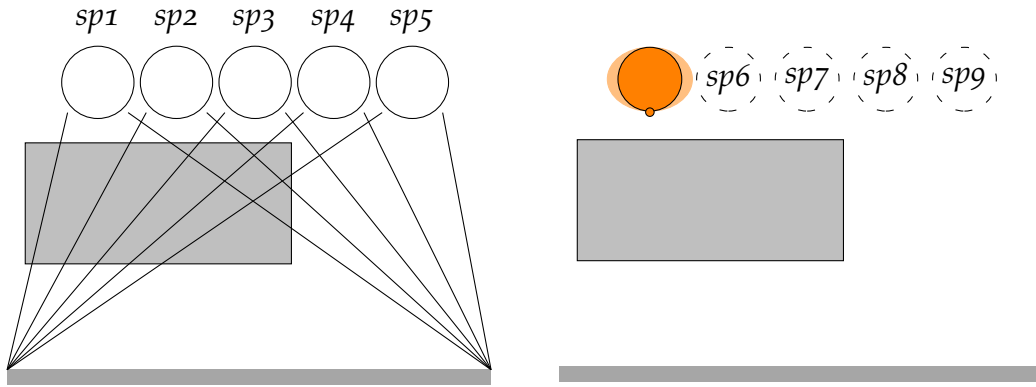


Abbildung 8.10.: Links: Fünf Affordanzräume, die zum Blick auf die Leinwand genutzt werden können. Rechts: Vier Affordanzräume, die für die Interaktion mit dem Menschen genutzt werden können.

$$\text{REALIZES}(\text{act}_1, \text{aff}_2). \text{USES}(\text{act}_1, \text{ab}_3). \text{PLACED-AT}(\text{act}_1, \text{sp}_1).$$

Eine Möglichkeit zur Modellierung des persönlichen Raumes besteht darin, den relativ komplexen persönlichen Raum aus der Modellierung der Studie von Torta und Kollegen wiederzuverwenden. Da aber nur ein kleiner Teil des persönlichen Raumes zur Linken der Versuchsperson relevant ist, um die Studie von Kim und Mutlu (2014) nachzustellen, reicht hier ein einfaches Modell des persönlichen Raumes aus. Da die Studie nur zwei mögliche Positionen für den Roboter relativ zur Versuchsperson unterscheidet, würde es sogar genügen, den persönlichen Raum mit nur zwei Affordanzräumen zu modellieren. Um Raum für Diskussionen über mögliche Erweiterungen des Modells zu lassen, unternimmt die nachfolgende Modellierung einen Mittelweg, indem vier Affordanzräume links der Versuchsperson berücksichtigt werden. Sie heißen sp_6 , sp_7 , sp_8 und sp_9 und werden von hum_1 produziert:

$$\begin{aligned} &\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, \text{sp}_6). \text{PRODUCES}(\text{aff}_1, \text{sp}_7). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, \text{sp}_8). \text{PRODUCES}(\text{aff}_1, \text{sp}_9). \end{aligned}$$

(Die Fakten zur Repräsentation der räumlichen Struktur der Affordanzräume sp_6 bis sp_9 ist wiederum Anhang C.3 zu entnehmen.)

Schließlich wird das Resultat der Studie von Kim und Mutlu (2014) modelliert: Wenn der Roboter den sozialen Status des Supervisors hat, dann bevorzugt der Mensch die nahe Position, und wenn der Roboter den sozialen Status des Subordinaten hat, dann bevorzugt der Mensch die ferne Position. In der Sprache der Affordanz-basierten Konzeption wird diese Situation durch zwei

Fakten repräsentiert. Der erste steht dafür, dass die Nutzung von Affordanzraum sp_7 für Handlungen vom Typ *talk-to* akzeptiert wird, sofern der Agent der Handlung ein Supervisor ist, und der zweite Fakt steht dafür, dass die Nutzung von Affordanzraum sp_9 für Handlungen vom Typ *talk-to* akzeptiert wird, sofern der Agent der Handlung ein Subordinate ist:

$ACCEPTS-USE(sp_7, talk-to, supervisor). ACCEPTS-USE(sp_9, talk-to, subordinate).$

Entscheiden und Begründen

Bevor es zur Bewertung von Platzierungsmöglichkeiten kommen kann, muss bestimmt werden, was hier in diesem Beispiel eigentlich die Alternativen sind, unter denen sich der Roboter entscheiden kann. Anders als in der Modellierung der Studie von Torta und Kollegen unter Abschnitt 8.2.1 sollen gewissermaßen zwei Handlungen zugleich platziert werden: Der Roboter soll auf den Screen sehen, während er mit dem Menschen einen Dialog führt. Für beide Handlungstypen existieren eigene Affordanzräume. Die Idee besteht nun darin, Paare von Platz-Kandidaten zu bewerten: Steht der Roboter in zwei potentiellen Agentenregionen, die zwei unterschiedlichen Affordanten anhängen, kann er an beiden Affordanten Handlungen ausüben.¹² Die sozio-räumlichen Gründe, die für bzw. gegen die Nutzung von Affordanzraum-Paaren sprechen, sind gerade die Vereinigung der sozio-räumlichen Gründe, die für bzw. gegen einen der beiden Affordanzräume sprechen.

Aus der Modellierung der Studie bis zu diesem Punkt ergibt sich, dass die Affordanzraum-Paare (sp_2, sp_6) , (sp_3, sp_7) , (sp_4, sp_8) , (sp_5, sp_9) jeweils vom Roboter parallel genutzt werden können, um an die Leinwand zu sehen und gleichzeitig mit dem Menschen zu interagieren.

Bezüglich der sozio-räumlichen Gründe, die für Platzierungen in dieser Situation gelten, kann zunächst festgestellt werden, dass nach Prinzip **I** die Handlung act_1 Quelle sozio-räumlicher Gründe ist (vgl. Abschnitt 7.4.1), nach Prinzipien **II** und **III** die Affordanzen aff_1 und aff_2 Quellen sozio-räumlicher Gründe sind (vgl. Abschnitte 7.4.2 und 7.4.3), und dass nach Prinzipien **VII** und **VIII** (vgl. Abschnitte 7.4.7 und 7.4.8) der Mensch hum_1 Quelle sozio-räumlicher Gründe ist.

¹²Es kann sein, dass dann nur abwechselnd die Ausführung einer der beiden Handlungen möglich ist und sich der Roboter jeweils extra umorientieren muss. Beispielsweise wenn der eine Affordant vor dem Roboter steht und der andere Affordant hinter dem Roboter. Von dieser zusätzlichen Schwierigkeit wird hier einmal abgesehen, da sie in dem zu modellierenden Szenario nicht relevant ist.

	PRO	CON	Rang
(sp_3, sp_7)	ρ_{hum_1+}		1
$(sp_2, sp_6), (sp_4, sp_8), (sp_5, sp_9)$			2
	PRO	CON	Rang
(sp_5, sp_9)	ρ_{hum_1+}		1
$(sp_2, sp_6), (sp_3, sp_7), (sp_4, sp_8)$			2

Tabelle 8.3.: Oben: Sozio-räumliche Gründe für den Fall, dass der Roboter in der Supervisor-Beziehung zum Menschen steht. Unten: Sozio-räumliche Gründe für den Fall, dass der Roboter in der Subordinate-Beziehung zum Menschen steht.

Da keiner der Platz-Kandidaten sp_2 bis sp_7 mit dem Affordanzraum sp_1 konfligiert, in dem act_1 platziert ist, bringt act_1 nach **I.D** (S. 134) keinen sozio-räumlichen Grund gegen irgendeinen Kandidaten hervor. Die Affordanzen liefern ebenso wenig sozio-räumliche Gründe gegen irgendeinen Kandidaten, da hier kein Wissen darüber bekannt ist, nach dem die Nutzung irgendwelcher Affordanzräume (generell) erwartbar ist. Somit besteht keine Gefahr, dass durch die Nutzung eines der Platz-Kandidaten die Handlungsmöglichkeit anderer Akteure blockiert werden könnte, oder sich der Roboter unüblich verhielte, wenn er einen Platz-Kandidaten einem anderen Platz-Kandidaten gegenüber bevorzugen würde (weder **II.D**, S. 136, noch **II.D**, S. 138, treffen hier zu).

Relevant für die Bewertung der Platz-Kandidaten ist der sozio-räumliche Grund, der durch **R.G6** (S. 130) erzeugt wird. Dieser Grund sei hier mit ρ_{hum_1+} bezeichnet. Gemäß **VII.D** ist ρ_{hum_1+} hier ein sozio-räumlicher Grund für die Nutzung von sp_7 , wenn der Roboter in der Supervisor-Beziehung zu hum_1 steht, und ein sozio-räumlicher Grund für die Nutzung von sp_9 , falls der Roboter in der Subordinate-Beziehung zu hum_1 steht:

Ist also $SOCIAL-REL(rob_1, hum_1, supervisor)$, dann kann mittels dem Applikator **VII.D** (S. 148) der Fakt $APPLIES-TO_{VII}(\rho_{hum_1+}, sp_7, talk-to, rob_1)$ abgeleitet werden. Ist hingegen $SOCIAL-REL(rob_1, hum_1, subordinate)$, dann wird mit demselben Applikator **VII.D** der Fakt $APPLIES-TO_{VII}(\rho_{hum_1+}, sp_9, talk-to, rob_1)$ abgeleitet. Tabelle 8.3 und Abbildung 8.11 stellen diesen Sachverhalt dar.

Wenn also der Roboter der Supervisor von hum_1 ist, dann gibt der Aufruf des Begründungs-Services (vgl. Abschnitt 8.1) mit den Parametern (sp_3, sp_7) ,

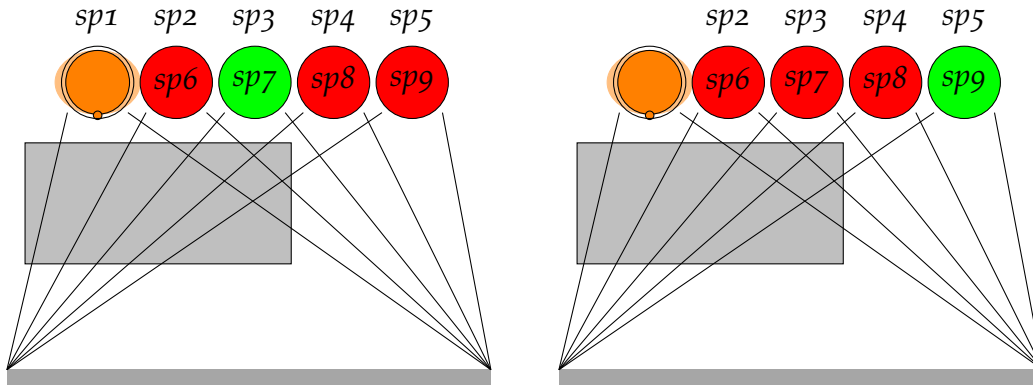


Abbildung 8.11.: Links: Bewertung der Platz-Kandidaten-Paare für den Fall, dass der Roboter der Supervisor des Menschen ist. Rechts: Bewertung der Platz-Kandidaten-Paare für den Fall, dass der Roboter in der Subordinaten-Beziehung zum Menschen steht.

(*see, talk-to*), rob_1 folgende Faktenmenge zurück (mit **R.D4**, S. 135, und **R.D16**, S. 149):

$$\text{RESPECTS-PS}(sp_7, \text{talk-to}, rob_1, hum_1).$$

Diese Antwort kann in Hinblick auf die Anfrage verbalisiert werden als »Es ist rücksichtsvoll dem persönlichen Raum von hum_1 gegenüber, wenn rob_1 seine (*see, talk-to*)-Handlung in den Affordanzraum (sp_3, sp_7) platziert.« Zusätzlich zu sagen, dass die Platzierung die Handlung act_1 nicht stört, ist unnötig, da keiner der Platz-Kandidaten zu einer Störung von act_1 führen würde (vgl. Definitionen **R.D3** und **R.D4** sowie die dazugehörigen Diskussion).

In der Simulation wurden die Paare von Platz-Kandidaten innerhalb von 54 ms identifiziert. Das Zusammentragen der sozio-räumlichen Gründe und die nachfolgende Bewertung der Platz-Kandidaten nimmt 90 ms in Anspruch. Die Abfrage der Begründungen erfolgte in 167 ms.¹³

Mögliche Erweiterung

Kim und Mutlu (2014) haben in ihrer Studie nur zwei mögliche Distanzen einbezogen, die der Roboter zur Versuchsperson einnehmen kann. Sollte sich in weiteren Studien herausstellen, dass beispielsweise für den Supervisor auch eine Position zwischen der nahen und der fernen Position akzeptabel ist, kann das Modell einfach durch den Fakt erweitert werden, der genau das repräsentiert: $\text{ACCEPTS-USE}(sp_8, \text{talk-to}, \text{supervisor})$. Dann wäre ρ_{hum_1+} automatisch auch ein sozio-räumlicher Grund, der für das Affordanzraum-Paar (sp_4, sp_8)

¹³Simuliert auf einem Rechner mit 1.8 Ghz und 4 GB RAM; gemittelt über 100 Läufe.

sprechen würde, sofern der Roboter in der Supervisor-Beziehung zu hum_1 steht und die Bewertung würde sich entsprechend anpassen. In einem numerischen Modellierungsansatz, der die Präferenz für die Positionen beispielsweise als Gaußfunktionen modelliert, müssten numerische Funktionen extra neu angepasst werden.

Eine zweite Eigenschaft der Modellierung mit Affordanzräumen und sozio-räumlichen Gründen ist, dass der persönliche Raum sehr einfach erweitert werden kann. So ist es denkbar, dass sich ein Platz-Kandidat auch an der vom Menschen aus gesehen linken oberen Tischkante befindet. Nach Prinzip I würde sich automatisch ableiten, dass die Handlung des Menschen act_1 einen sozio-räumlichen Grund gegen die Nutzung dieses Platz-Kandidaten hervorbringt (vgl. Abschnitt 7.4). In diesem Fall würde der oben diskutierte Aufruf des Begründungs-Services mit den Parametern (sp_3, sp_7) , $(see, talk-to)$, rob_1 folgende Faktenmenge zurückgeben (mit **R.D4**, S. 135, und **R.D16**, S. 149):

CONSIDERS-ACT(sp_3, see, rob_1, act_1). CONSIDERS-ACT($sp_7, talk-to, rob_1, act_1$).
RESPECTS-PS($sp_7, talk-to, rob_1, hum_1$).

Es gibt in diesem Fall also sowohl Möglichkeiten der Platzierung, die den persönlichen Raum verletzen, als auch solche, die die laufende Handlung act_1 stören. In Hinblick auf die Anfrage kann das Ergebnis des Aufrufs als »Es nimmt Rücksicht auf den persönlichen Raum von hum_1 und die laufende Handlung act_1 , wenn der Roboter rob_1 seine $(see, talk-to)$ -Handlung in den Affordanzraum (sp_3, sp_7) platziert.« verbalisiert werden.

KAPITEL 9

Schlussbetrachtung

9.1. Zusammenfassung

Die Arbeit setzte sich zum Ziel, eine Konzeption zum rücksichtsvollen Handeln im realen Raum zu entwerfen, unter der räumliches Verhalten sozialer Roboter modelliert werden kann. Damit soll es möglich sein, in sozialen Umgebungen, in denen Mensch und Roboter kooperativ oder co-präsent handeln, zu gewährleisten, dass Störungen, die aus konfligierenden räumlichen Bedürfnissen resultieren, möglichst vermieden werden. Zu diesem Zweck wird eine Konzeption vorgelegt, die es erlaubt, vier Typen sozialer Räume einheitlich zu formalisieren: den persönlichen Raum, den Aktivitätsraum, das Territorium und den sozialen Affordanzraum. Während bisher für die Modellierung unterschiedlicher sozialer Räume auch unterschiedliche Formalismen genutzt wurden (vgl. Abschnitt 2), können soziale Räume unter der Affordanz-basierten Konzeption anhand eines gemeinsamen Vokabulars beschrieben werden, und sind so gleichermaßen Wissensverarbeitungsverfahren wie zum Beispiel der Produktion von Sprache oder der Generierung von Aktionsplänen zugänglich.

Diese Vereinheitlichung der Repräsentation von vier Typen sozialer Räume wird dadurch geschaffen, dass die Modellierung auf der gemeinsamen Basis des funktionalen Affordanzraumes vorgenommen wird: Soziale Räume sind Räume, die durch Handlungsmöglichkeiten entstehen und in die Handlungen platziert werden können (d.h., Affordanzräume). Zusätzliche soziale Eigenschaften von Affordanzräumen (wie ihre gegenwärtige oder erwartbare Nutzung) bestimmen, ob sie Aktivitätsräume, soziale Affordanzräume, Territorien oder persönliche Räume sind (vgl. Kapitel 6). In diesem Sinne gibt die

Konzeption auch eine mögliche Antwort auf die Frage, was soziale Räume eigentlich sind.

Die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume wurde anhand des Problems der Handlungsplatzierung in sozialen Umgebungen motiviert und angewandt. Das Handlungsplatzierungsproblem besteht darin, für einen gegebenen Handlungstypen und einen gegebenen Akteur zu bestimmen, an welchem Ort die Handlung ausgeführt werden soll (vgl. Abschnitt 1.2). In der Robotik wird dieses Problem unter der Bezeichnung »pose selection«, »target selection« oder »placement planning« behandelt. Es existieren bislang nur wenige Lösungen, die auch soziale Aspekte in die Auswahl von Platzierungen einbeziehen. Der Lösungsansatz, der in dieser Arbeit vorgeschlagen wird, realisiert die Idee, dass die Bestimmung eines geeigneten Ortes für eine Handlung darauf reduziert werden kann, einen Affordanzraum auszuwählen, in dem die Handlung platziert werden kann. Dieser Lösungsansatz ist der erste, durch den es auch möglich wird, den globalen sozio-räumlichen Kontext zu berücksichtigen, in dem eine Handlung stattfinden soll. Das wird dadurch erreicht, dass Repräsentationen der Handlungsmöglichkeiten und der räumlichen Bedürfnisse von Handlungen anderer Akteure ausgenutzt werden. Diese Repräsentationen erfassen, dass Handlungen platziert werden, deren Raumbedürfnisse über die reine Position von Agenten hinausgehen können.

Der Affordanzraum selbst wurde aus einem Verständnis von Affordanz begründet (vgl. Kapitel 3): Affordanzen sind Eigenschaften von Objekten, die Handlungen ermöglichen. Eine Formalisierung von Affordanz wurde unter Verwendung der Ontologie DOLCE-CORE (Borgo & Masolo, 2009) vorgenommen (Kapitel 4). Diese Ontologie umfasst bereits ein formal spezifiziertes, aus der philosophischen Forschung motiviertes Vokabular zur Beschreibung von Objekten, Eigenschaften und Ereignissen.

Ausgehend von einem Modell über die räumliche Verortung von Handlungen nach Kendon (1990) wurde die räumliche Struktur des Affordanzraumes abgeleitet und unter Nutzung der Basic-Place-Theory (Donnelly, 2005) formal charakterisiert (Kapitel 5). Affordanzräume wurden als Strukturen begriffen, in denen systematisch drei Regionen unterschieden werden können, die für die Ausführung von Handlungen relevante Rollen spielen: in der potentiellen Agentenregion befindet sich der Agent der Handlung, in der Affordantenregion befindet sich der Affordant (der zum Patiens einer Handlung wird), und über den Raum hinaus, den Agent und Patiens einnehmen, benutzt eine Handlung eine potentielle Transaktionsregion, in die der Agent spricht, greift, blickt etc. Affordanzräume werden von Affordanzen produziert, können von Handlungen genutzt werden und sind topologisch stabil bezüglich

eines Affordanten verortet.

Schließlich konnten soziale Räume als Affordanzräume mit besonderen Eigenschaften definiert werden. Menschen, Gruppen, die Territorien beanspruchen, Affordanzen, die Affordanzräume produzieren, deren Nutzung erwartbar ist und laufende Handlungen machen Affordanzräume (zeitweise) zu sozialen Räumen (Kapitel 6). Diese Entitäten, die Affordanzräume zu sozialen Räumen machen, bringen gleichzeitig Gründe für die Platzierung von Handlungen in bestimmte Affordanzräume und gegen die Platzierung von Handlungen in andere Affordanzräume hervor. Diese Gründe wurden als sozio-räumliche Gründe bezeichnet (vgl. Abschnitt 7.3). Die Umstände, unter denen sozio-räumliche Gründe für und gegen die Nutzung von Affordanzräumen für bestimmte geplante Handlungen gelten, wurden durch acht Prinzipien zur Handlungsplatzierung beschrieben (vgl. Abschnitt 7.4). Diese Prinzipien berücksichtigen sowohl, dass soziale Räume nicht verletzt werden sollen, als auch, dass soziale Räume angemessen genutzt werden sollen. Zu jedem Prinzip gibt es einen Generator und einen Applikator. Die Generatoren beschreiben hinreichende Bedingungen dafür, dass ein Grund existiert und Applikatoren definieren, für oder gegen welche Affordanzraumnutzungen sich der Grund zu einem Zeitpunkt richtet.

Die Auswahl einer Platzierung wurde auf das bipolare, qualitative Entscheidungsproblem reduziert (vgl. Dubois et al., 2008; Bonnefon et al., 2008): Gegeben eine Menge von (Handlungs-)Alternativen und eine Menge von Gründen (Pros und Cons, die unterschiedlich stark sein können), werden die (Handlungs-)Alternativen in eine Präferenzordnung gebracht. Damit können einzelne Affordanzräume als Platz-Kandidaten (vgl. Abschnitt 5.3) dahingehend gegeneinander angeordnet werden, wie sehr sie zur Nutzung für eine Handlung aus sozialer Sicht geeignet sind.

Repräsentationen sozio-räumlicher Gründe können des Weiteren genutzt werden, um zu begründen, warum manche Platzierungen anderen Platzierungen gegenüber zu bevorzugen sind. Damit besitzt der Roboter die Fähigkeit, Platzierungsentscheidungen zu treffen und zu begründen. Die Konzeption sorgt insgesamt dafür, dass soziale Roboter unter Rücksichtnahme auf andere Akteure im realen Raum handeln können. Zwar kann auch durch diese Konzeption nicht verhindert werden, dass ein Roboter eventuell in Situationen kommt, in denen er zu störenden Handlungen getrieben ist, weil keine störungsfreie Lösung existiert. In solchen Fällen aber kann das symbolische Wissen über sozio-räumliche Gründe genutzt werden, um die Entscheidung des Roboters Menschen gegenüber transparent zu machen. Beispielsweise kann sich der soziale Roboter für seine Störung entschuldigen.

9.2. Diskussion und Ausblick

Die Affordanz-basierte Konzeption umfasst ein formal spezifiziertes Vokabular, mit dem räumliche Aspekte sozialer Umgebungen einheitlich beschrieben werden können (vgl. Anhand B). Die Evaluationsergebnisse aus Kapitel 8 zeigen, dass dieses Vokabular hinreichend ausdrucksstark ist, um empirische Forschungsergebnisse aus der Mensch-Roboter-Interaktion zu modellieren und ihre Resultate nachzuvollziehen. Die Modellierungen sozialer Umgebungen mittels der Affordanz-basierten Konzeption können zudem zu komplexeren Umgebungen erweitert werden, in denen mehrere soziale Räume berücksichtigt werden müssen.

Kapitel 8 konnte zeigen, dass das soziale Handlungsplatzierungsproblem in realistischen sozialen Umgebungen mit vertretbarem Aufwand gelöst werden kann, indem alle Platz-Kandidaten bezüglich der sozio-räumlichen Gründe, die für bzw. gegen ihre Nutzung sprechen, geordnet werden. In größeren Umgebungen allerdings steigt auch der Berechnungsaufwand quadratisch an: Die Bewertung von Platz-Kandidaten hängt insbesondere von der Berechnung von Konflikten zwischen Affordanzräumen ab und somit mittelbar davon, Überlappungen zwischen Affordanzraum-Regionen zu berechnen. Der Zeitaufwand steigt quadratisch mit der Anzahl von Affordanzräumen. Bei der algorithmischen Behandlung des sozialen Handlungsplatzierungsproblems wurde bereits berücksichtigt, dass Affordanzräume, die denselben Affordanten anhängen, nur einmal auf Konflikt geprüft werden brauchen, da ihre Affordanzraumregionen untereinander in topologisch stabilen Beziehungen stehen (vgl. Theorem A.T2, S. 91). Dennoch ist erwartbar, dass es einen zu großen Zeitaufwand bedeutet, bei hinreichend großer Anzahl von Affordanzraumregionen noch alle Platz-Kandidaten zu bewerten und anzuordnen. Eine Lösung könnte darin bestehen, andere Optimierungsverfahren oder Entscheidungsheuristiken zu verwenden, die nicht mehr unter Garantie den besten Platz-Kandidaten finden, sondern sich mit einem hinreichend akzeptablen Platz-Kandidaten zufrieden geben. In der Literatur zur Entscheidungstheorie werden solche Verfahren auch unter »bounded rationality« oder »satisficing« behandelt (vgl. Gigerenzer & Goldstein, 1996).

Darüber hinaus muss stets abgewogen werden, wie viele Affordanzräume wirklich repräsentiert werden sollen, das heißt, wie groß die Dichte von Affordanzräumen um einen Affordanten sein soll. Eine große Anzahl von Affordanzräumen bedeutet eine große Auswahl unterschiedlicher Platzierungen und somit steigt die Chance, auch in komplexeren Situationen eine gute Platzierung zu finden. Andererseits steigt damit auch der Aufwand, die

Platz-Kandidaten zu bewerten. Es wäre also auch denkbar, dass die Anzahl betrachteter Platz-Kandidaten in komplexen Umgebungen vergrößert und in einfachen Umgebungen verringert wird, um zumindest in einfachen Fällen schnell Entscheidungen treffen zu können.

Erfolgreich konnte das Problem der Platzierung von Handlungen eines bestimmten Akteurs gelöst werden. Bei der sozialen Bewertung von möglichen Handlungsplatzierungen wurden dabei auch die Handlungsmöglichkeiten anderer Akteure einbezogen. Die Repräsentationen der Handlungsmöglichkeiten mehrerer Akteure wurden aber noch nicht dafür genutzt, mehrere Handlungen unterschiedlicher Akteure parallel zu platzieren. Das Ziel einer guten Platzierung mehrerer paralleler Handlungen muss sein, dass unter Berücksichtigung der sozio-räumlichen Gründe für die einzelnen zu platzierenden Handlungen, insgesamt die sozio-räumliche Angemessenheit maximiert wird. An diesem Punkt ist zu untersuchen, ob der Übergang von einem entscheidungstheoretischen Ansatz zu einem spieltheoretischen Ansatz fruchtbar ist. Eine weitere Erweiterung in dieser Hinsicht besteht darin, bei der Platzierung von Handlungen verstärkt den zeitlichen Aspekt zu berücksichtigen, da Handlungen sowohl räumliche als auch zeitliche Ressourcen voraussetzen, und somit auch sowohl räumlich als auch zeitlich platziert sind. So wie eine Handlung Raumbedarf hat, hat sie auch einen Zeitbedarf, der gegebenenfalls mit den Zeitressourcen von Interaktionspartnern konfligiert.

Außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit befindet sich die Fragestellung, inwieweit die Prognosen des Modells über die Angemessenheit von Platzierungen in komplexeren sozialen Umgebungen empirisch bestätigt werden können (vgl. Abschnitt 8.2.2). Diese Fragestellung wirft insbesondere die Frage auf, wie relevant der Aspekt der Handlungsmöglichkeit (Affordanz) bei der Einschätzung des Roboterhaltens tatsächlich ist. Ebenfalls fehlen empirische Untersuchungen darüber, welche Faktoren die Stärken sozio-räumlicher Gründe bestimmen und wie diese zu aggregieren sind: Eine mögliche Frage besteht darin, welche Rolle die Anzahl von Verletzungen bei der Bewertung von Platz-Kandidaten spielen, das heißt, ob es beispielsweise unangemessener ist, einen persönlichen Raum zu verletzen als zwei persönliche Räume zu verletzen; oder ob es Handlungen gibt, die eher gestört werden dürfen als andere.

Außerdem ist noch offen, in welchem Wortlaut und in welcher Häufigkeit Roboter die Platzierung ihrer Handlungen begründen, rechtfertigen, entschuldigen sollten; in welchen Situationen also der Begründungs-Service (vgl. Abschnitt 8.1) aufgerufen werden sollte, und mit welchen Worten seine Ausgabe verbalisiert werden sollte.

Eine weitere, zentrale Einschränkung der vorgelegten Konzeption sozialer Räume besteht darin, dass Handlungen eines bestimmten (wenn auch sehr generellen) Typs betrachtet wurden, die »transitive Handlungen« genannt wurden (vgl. Abschnitt 4.3). Transitive Handlungen weisen eine bestimmte Teilnehmerstruktur auf: Sie verfügen über einen Patiens, der von der Handlung betroffen ist, und über einen Agenten, der die Handlung ausführt. Eine natürliche Erweiterung der Konzeption bestünde darin, sie auf weitere Handlungen zu generalisieren, um auch Handlungen ohne Patiens (zum Beispiel die Handlung des Navigierens) oder Interaktionen mit mehreren Teilnehmern zu berücksichtigen. In dieser Hinsicht müsste untersucht werden, ob und inwiefern sich komplexere Affordanzräume durch die einfacheren Affordanzräume komponieren lassen, oder ob es nötig ist, komplexere Affordanzräume, die über mehr als eine potentielle Agentenregion bzw. potentielle Transaktionsregion verfügen, als eigene Entitäten einzuführen.

Als weitere Vereinfachung wurde auch der zeitliche Verlauf von Handlungen von der Analyse ausgeklammert. Es gibt Handlungen, die während der Zeit ihrer Ausführung unterschiedliche räumliche Voraussetzungen haben. Ein einfaches Beispiel ist die Bedienung eines Berührungsbildschirms: Zu manchen Zeitpunkten berührt der Agent den Bildschirm und zu anderen Zeitpunkten nicht. Eine noch stärkere Dynamik weist die Handlung des Staubsaugens auf. Hier besetzt der Agent der Handlung während der Handlungsausführung unterschiedliche Teile des Affordanzraumes.

Nach Lindner und Eschenbach (2011) existiert mit dem Penetrationsraum (»penetrated space«) neben den vier sozialen Räumen, die in der vorliegenden Arbeit behandelt wurden, ein weiterer Raum, der für die soziale Bewertung von Handlungsplatzierungen relevant ist. Penetrationsraum entsteht als Nebenprodukt von manchen Handlungen, die mit der Produktion von Lärm, Qualm, Licht o.ä. einhergehen, und auf diese Weise andere Handlungen stören können. Während der Untersuchungen stellte sich heraus, dass sich der Penetrationsraum nicht auf dieselbe Weise wie die anderen vier sozialen Räume in die Affordanz-basierte Konzeption sozialer Räume integrieren lässt. Das liegt insbesondere darin begründet, dass Penetrationsräume eine zentrale Charakteristik besitzen, die sie von sozialen Räumen abgrenzt: Sie können nicht aktiv verletzt oder genutzt werden, sondern sie selbst verletzen möglicherweise andere soziale Räume. Bezüglich der Terminologie Sommers sind sie unter anderem bei der Kontamination (»contamination«) von Territorien beteiligt. Aber sie können auch positive Effekte haben, beispielsweise, wenn sie gezielt erzeugt werden, um Handlungen erst zu ermöglichen: die Lampe, die zum Lesen eingeschaltet wird, das Radio, das zum Musikhören einge-

schaltet wird etc. Diese Einschätzungen lassen vermuten, dass es sich beim Penetrationsraum um ein Phänomen handelt, das gesonderter Betrachtung bedarf.

Schließlich ergeben sich weitere Forschungsfragen hinsichtlich der Nutzung von Affordanz-basierten Modellen sozialer Räume über die Handlungsplatzierung hinaus. Obgleich das Problem der sozialen Handlungsplatzierung leitend für die Entwicklung der Affordanz-basierten Konzeption war, können auch andere Module der Handlungsplanung und -ausführung von Repräsentationen sozialer Räume profitieren. So könnten Roboter basierend auf sozio-räumlichen Gründen Wege planen und Umwege transparent begründen. Außerdem könnten sie ihre Navigationsgeschwindigkeit anpassen, um sich beispielsweise zu beeilen, damit sie, falls unvermeidbar, möglichst kurze Störungen verursachen, wenn sie zum Beispiel durch Aktivitätsräume navigieren. Die sozialen Bewertungen der Platz-Kandidaten können außerdem einen Aktionsplaner informieren. In dieser Arbeit wurde noch davon ausgegangen, dass ein Aktionsplaner bereits eine Handlungssequenz bestimmt hat, die der Roboter ausführen soll. Das Problem bestand darin, diese Handlungen rücksichtsvoll zu platzieren. Andererseits kann die soziale Bewertung von Platz-Kandidaten aber auch als Teil der Kostenfunktion, die ein Aktionsplaner optimiert, fungieren. In diesem Fall würden erst die Platz-Kandidaten sozial bewertet und dann Aktionen geplant.

Schließlich ist die Nutzung weiterer kommunikativer Modalitäten denkbar. Dadurch, dass der Roboter sich für einen Affordanzraum für seine Handlung entscheidet, kann er das Wissen über den ausgewählten Affordanzraum nutzen, um seinen Raumbedarf anderen Akteuren mitzuteilen. Auch andere soziale Signale wie das Anklopfen an eine Tür vor dem Betreten eines fremden Territoriums sind modellierbar, oder das Ablegen eines persönlichen Gegenstandes, um ein Territorium gezielt zu etablieren—und sei es, dass der persönliche Roboter zukünftig die beste Sonnenliege am Hotelpool aussucht und sie mit einem Handtuch markiert.

ANHANG A

Index zur Literaturstudie

① Alonso-Martín, Gorostiza, Malfaz und Salichs (2012), ② Althaus et al. (2004), ③ Ayush und Agarwal (2012), ④ Brooks und Arkin (2007), ⑤ Chung und Huang (2012), ⑥ Cooney, Zanolungo, Nishio und Ishiguro (2012), ⑦ Cuntoor, Collins und Hoogs (2012), ⑧ Ding et al. (2011), ⑨ Dylla, Coors und Bhatt (2012), ⑩ Escobedo, Spalanzani und Laugier (2012), ⑪ Garrell und Sanfeliu (2012), ⑫ Gockley, Forlizzi und Simmons (2007), ⑬ Granata und Bidaud (2012), ⑭ Green und Hüttenrauch (2006), ⑮ Hanheide, Peters, und Bellotto (2012), ⑯ Henkel, Murphy, Srinivasan und Bethel (2012), ⑰ Hoeller, Schulz, Moors und Schneider (2007), ⑱ Holthaus, Pitsch und Wachsmuth (2011), ⑲ Kessler et al. (2011), ⑳ Kirby et al. (2009), ㉑ Knepper und Rus (2012), ㉒ Lam et al. (2011), ㉓ Lubner et al. (2012), ㉔ Mainprice, Gharbi, Siméon und Alami (2012), ㉕ Martínez-Garíá, Akihisa und Yuta (2005), ㉖ Mead (2012), ㉗ Michalowski, Sabanovic und Simmons (2006), ㉘ Mitsunaga, Smith, Kanda, Ishiguro und Hagita (2008), ㉙ Morales et al. (2012), ㉚ Nakauchi und Simmons (2002), ㉛ Asghari Oskoei, Walters und Dautenhahn (2010), ㉜ Pacchierotti, Christensen und Jensfeld (2006), ㉝ Pandey und Alami (2010), ㉞ Qian, Ma, Dai und Fang (2010), ㉟ Rios-Martinez et al. (2011), ㊱ Satake et al. (2009), ㊲ Scandolo und Fraichard (2011), ㊳ Sehestedt, Kodagoda und Dissanayake (2010), ㊴ Shi, Shimada, Kanda, Ishiguro und Hagita (2011), ㊵ Shiotani, Maegawa und Lee (2011), ㊶ Sisbot et al. (2007), ㊷ Sisbot et al. (2010), ㊸ Suzuki et al. (2012), ㊹ Svenstrup et al. (2011), ㊺ Tamura et al. (2012), ㊻ Tasaki, Ozaki, Matsuhira, Ogata und Okuno (2011), ㊼ Tipaldi und Arras (2011a), ㊽ Tomari et al. (2012), ㊾ Torta et al. (2012), ㊿ Trautman, Ma, Murray und Krause (2013),

⑤① Urcola und Montano (2011), ⑤② Yamaoka et al. (2010), ⑤③ Yoda und Shiota (1997), ⑤④ Yousuf, Kobayashi, Kuno, Yamazaki und Yamazaki (2012)

ANHANG B

Konzept- und Relationeninventar

Formel	Bedeutung
$o(x)$	x ist ein Objekt
$e(x)$	x ist ein Ereignis
$c(x)$	x ist ein Konzept
$Q(x)$	x ist eine Eigenschaft
$Q_i(x)$	x ist eine Eigenschaft der Art i
$TQ(x)$	t ist eine Zeit-Eigenschaft
$R(x)$	x ist eine Region
$s_{ij}(x)$	x ist eine Region im j -ten Werte-Raum, der dem i -ten Eigenschaftstypen zugeordnet ist
$P(x, y)$	x ist Teil von y
$I(x, y)$	x ist eine Eigenschaft von y
$PRE(x, t)$	x ist zur Zeit t präsent
$L(x, y, t)$	x ist der Wert von Eigenschaft y zur Zeit t
$CF(x, y, t)$	Zur Zeit t klassifiziert Konzept y Partikular x als x
$PC(x, y, t)$	Objekt x nimmt zum Zeitpunkt t am Ereignis y teil

Tabelle B.1.: Konzepte und Relationen in DOLCE-CORE und ihre intendierten Bedeutungen nach Borgo und Masolo (2009); vgl. Abschnitt 4.1.

Formel	Bedeutung
$\text{ACTIVITY-TYPE}(\phi)$	ϕ ist ein Handlungstyp
$\text{AFFORDANCE-VALUE}(\text{aff})$	aff ist ein Affordanz-Wert
$\text{ABILITY-VALUE}(\text{ab})$	ab ist ein Fähigkeiten-Wert
$\text{AFFORDANCE}(\text{aff}')^*$	aff' ist eine Affordanz
$\text{ABILITY}(\text{ab}')^*$	ab' ist eine Fähigkeit
$\text{T-ACTIVITY}(\text{ac})$	ac ist eine transitive Handlung
$\text{CPL}(\phi, \text{ab}, \text{aff})$	die Werte ab und aff sind ϕ -komplementär
$\text{REALIZES}(\text{ac}, \text{aff}', t)$	Die Handlung ac realisiert die Affordanz aff' zum Zeitpunkt t
$\text{USES}(\text{ac}, \text{ab}', t)$	Die Handlung ac benutzt die Fähigkeit ab' zum Zeitpunkt t
$\text{AFFORDANT}(o)$	o ist ein Affordant (A.D2)
$\text{ACTANT}(\alpha)$	α ist ein Akteur (A.D3)
$\text{AGENT}(\alpha, \text{ac}, t)$	Akteur α ist zum Zeitpunkt t Agent der Handlung ac (A.D4)
$\text{PATIENT}(\alpha, \text{ac}, t)$	Affordant o ist zum Zeitpunkt t Patiens der Handlung ac (A.D5)
$\text{AFFORDS}(o, \alpha, \phi, t)$	Affordant o affordiert dem Akteur α zum Zeitpunkt t Handlungen vom Typ ϕ (A.D1)

Tabelle B.2.: Konzepte und Relationen zur Beschreibung von Affordanzen, Fähigkeiten und transitiver Handlungen; vgl. Abschnitt 4.2 und folgende. Basis-Prädikate sind über der Mittellinie aufgeführt, definierte Prädikate unter der Mittellinie.

Formel	Bedeutung
$\text{REGION}_{\text{BPT}}(r)$	r ist eine Region im Sinne von »place« in der Basic Place Theory
$\text{MT}(r_1, r_2, t)$	Regionen r_1 und r_2 berühren sich zum Zeitpunkt t
$\text{RO}(o, r)$	Objekt o ist Referenzobjekt der Region r
$\text{COV}(r_1, r_2, t)$	Regionen r_1 ist vollständig von Region r_2 überlagert (B.D1)
$\text{ECOIN}(r_1, r_2, t)$	Regionen r_1 und r_2 koinzidieren exakt zum Zeitpunkt t (B.D2)
$\text{PCOIN}(r_1, r_2, t)$	Regionen r_1 und r_2 koinzidieren partiell zum Zeitpunkt t (B.D3)
$\text{MT}^o(o, r, t), \text{ECOIN}^o(t, o, r),$ $\text{PCOIN}^o(t, o, r)$ etc.	Entsprechende zeit-abhängige Relationen zwischen Objekten und Regionen
$\text{RF}(r_1, r_2)$	Regionen r_1 und r_2 sind relativ fixiert (B.D4)
$\text{P}_{\text{BTP}}(r_1, r_2), \text{O}_{\text{BTP}}(r_1, r_2),$ $\text{C}_{\text{BTP}}(r_1, r_2)$	Mereotopologische (zeit-unabhängige) Relationen zwischen Regionen (B.D5, B.D6, B.D7)
$\text{SUM}(r_1, r_2, r_3)$	Region r_1 die Summe von Regionen r_2 und r_3 (B.D8)

Tabelle B.3.: Konzepte und Relationen zur Beschreibung räumlicher Relationen nach der Basic-Place-Theory von Donnelly (2005); vgl. Abschnitt 5.1. Basis-Prädikate sind über der Mittellinie aufgeführt, definierte Prädikate unter der Mittellinie.

Formel	Bedeutung
$\text{AFFORDANCE-SPACE}(sp)$	sp ist ein Affordanzraum
$\text{P-AGENT-REG}(sp, r)$	Regionen r ist Agentenregion des Affordanzraumes sp
$\text{P-TRANS-REG}(sp, r)$	Regionen r ist Transaktionsregion des Affordanzraumes sp
$\text{AFFORDANT-REG}(sp, r)$	Regionen r ist Affordantenregion des Affordanzraumes sp
$\text{PLACED-AT}(ac, sp, t)$	Transitive Handlung ac nutzt zum Zeitpunkt t den Affordanzraum sp
$\text{PRODUCES}(aff', sp)$	Affordanz aff' produziert Affordanzraum sp
$\text{SUPPORTS}(sp, ab)$	Affordanzraum unterstützt die räumliche Fähigkeit ab
$\text{PHYS-USED-REG}(sp, r)$	Affordanzraumregion r wird bei der Nutzung von sp physikalisch vom Agenten genutzt
$\text{ATTACHED-TO}(sp, o)$	Affordanzraum sp hängt an Affordanten o (A.D8)
$\text{CONFLICT-TA}(sp_1, sp_2, t),$ $\text{CONFLICT-AT}(sp_1, sp_2, t),$ $\text{CONFLICT-AC}(sp_1, sp_2, t),$ $\text{CONFLICT-TA}(sp_1, sp_2, t),$ $\text{CONFLICT-TT}(sp_1, sp_2, t),$ $\text{CONFLICT}(sp_1, sp_2, t)$	Affordanzräume sp_1 und sp_2 stehen im potentiellen Konflikt; verschiedene Varianten (A.D12 – A.D17)
$\text{D-CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t)$	Affordanzraum ist ein potentieller Platz-Kandidat für Handlungen des Typs ϕ , die von Agent α ausgeführt werden (A.D9)
$\text{CANDIDATE}(sp, \phi, \alpha, t)$	Affordanzraum ist ein freier potentieller Affordanzraum (A.D10)
$\text{FREE}(sp, t)$	Affordanzraum ist zum Zeitpunkt t frei von Blockaden (A.D11)

Tabelle B.4.: Konzepte und Relationen zur Charakterisierung von Affordanzräumen und ihrer Nutzung durch transitive Handlungen; vgl. Abschnitt 5.2 und folgende. Basis-Prädikate sind über der Mittellinie aufgeführt, definierte Prädikate unter der Mittellinie.

Formel	Bedeutung
$\text{HUMAN}(\alpha)$	α ist ein Mensch.
$\text{EXPECTABLE}(sr, sp, t)$	Zum Zeitpunkt t ist erwartbar, dass Akteure vom Typ sr den Affordanzraum sp nutzen.
$\text{GROUP}(\gamma)$	γ ist eine Gruppe (die Territorien behaupten kann)
$\text{CLAIMS-USE}(\gamma, sp, \phi, sr, t)$	Die Gruppe γ behauptet Affordanzraum sp als Territorium für Handlungen des Typs ϕ durch Akteure, die in einer sr -Beziehung zu γ stehen.
$\text{CLAIMS-BE-AT}(\gamma, sp, sr, t)$	Die Gruppe γ gibt solchen Akteuren exklusiven Zutritt zu sp , die in einer Beziehung sr zur Gruppe stehen.
$\text{SOCIAL-REL}(x, y, sr, t)$	Zum Zeitpunkt t steht die Gruppe/der Akteur x mit der Gruppe/dem Akteur y in der sozialen Beziehung sr .
$\text{ACCEPTS-USE}(sp, \phi, sr, t)$	Der Mensch, an dem sp hängt, akzeptiert die Platzierung von ϕ -Handlungen in sp , deren Agenten in einer sr -Beziehung zu ihm stehen.
$\text{TOO-CLOSE}(sp, sr, t)$	Der Mensch, an dem sp hängt, empfindet die pure Präsenz von Akteuren in sp , zu denen er eine sr -Beziehung pflegt, als »zu nahe«.
$\text{ACTIVITY-SPACE}(sp, t)$	Affordanzraum sp ist zum Zeitpunkt t ein Aktivitätsraum (S.D1).
$\text{SOCIAL-AFF-SPACE}(sp, t)$	Affordanzraum sp ist zum Zeitpunkt t ein sozialer Affordanzraum (S.D7).
$\text{TERRITORY}(sp, t)$	Affordanzraum sp ist zum Zeitpunkt t ein Territorium (S.D8).
$\text{HALL-AFF-SPACE}(sp)$	Affordanzraum sp ist ein Hall-Affordanzraum (S.D9).

Tabelle B.5.: Konzepte und Relationen zur Beschreibung von soziale Räumen; vgl. Abschnitt 6.1. Basis-Prädikate sind über der Mittellinie aufgeführt, definierte Prädikate unter der Mittellinie.

Formel	Bedeutung
$\text{AGENT-REGION}(sp, r, t)$	Potentielle Agentenregion r von sp ist zum Zeitpunkt t Agentenregion (S.D2).
$\text{TRANSACTIONAL-REGION}(sp, r, t)$	Potentielle Transaktionsregion r von sp ist zum Zeitpunkt t Transaktionsregion (S.D3).
$\text{PATIENT-REGION}(sp, r, t)$	Affordantenregion r von sp ist zum Zeitpunkt t Patiensregion (S.D4).
$\text{CORE-REGION}(sp, r, t)$	Potentielle Kernregion r von sp ist zum Zeitpunkt t Kernregion (S.D5).
$\text{ACTIVITY-REG}(sp, r, t)$	Affordanzregion r von sp ist zum Zeitpunkt t Aktivitätsregion (S.D6).

Tabelle B.6.: Relationen zur Beschreibung von Regionen des Aktivitätsraumes; vgl. Abschnitt 6.1.1.

Formel	Bedeutung
$\text{REASON}(\rho)$	ρ ist ein Grund
$\text{S-REASON}(\rho)$	ρ ist ein sozio-räumlicher Grund
$\text{FORCE}(x)$	x ist eine Stärke
$\text{PRO}(\rho)$	Der Grund ρ ist ein Grund positiver Polarität
$\text{CON}(\rho)$	Der Grund ρ ist ein Grund negativer Polarität
$\text{SOURCE-OF}(x, \rho)$	Das Partikular x ist Quelle des sozio-räumlichen Grundes ρ
$\text{HAS-FORCE}(\rho, x)$	Der Grund ρ besitzt die Stärke x
$x \succeq_{\text{force}} y$	Die Stärke x ist mindestens so stark wie die Stärke y
$x \succ_{\text{force}} y$	Die Stärke x ist stärker als die Stärke y (R.D1)
$x \equiv_{\text{force}} y$	Die Stärke x genauso stark wie die Stärke y (R.D2)

Tabelle B.7.: Konzepte und Relationen zur Beschreibung von sozio-räumlichen Gründen; vgl. Abschnitt 7.3.1.

Formel	Bedeutung
$\text{APPLIES-TO}_I(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip I ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (I.D)
$\text{INFRINGES-ACT}(sp, \phi, \alpha, ac, t)$	Zum Zeitpunkt t stört die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α die Handlung ac (R.D3)
$\text{CONSIDERS-ACT}(sp, \phi, \alpha, ac, t)$	Zum Zeitpunkt t berücksichtigt die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α die laufende Handlung ac (R.D4)

Tabelle B.8.: Konzepte und Relationen zur Beschreibung der sozio-räumlichen Gründe für die Handlungsplatzierung bezüglich laufender Handlungen; vgl. Abschnitt 7.4.1.

Formel	Bedeutung
$\text{APPLIES-TO}_{\text{II}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip II ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (II.D)
$\text{BLOCKS-AFF}(sp, \phi, \alpha, aff', t)$	Zum Zeitpunkt t blockiert die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α die Affordanz ac (R.D5)
$\text{CONSIDERS-AFF}(sp, \phi, \alpha, aff', t)$	Zum Zeitpunkt t berücksichtigt die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α die Affordanz ac (R.D6)
$\text{APPLIES-TO}_{\text{III}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip III ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (III.D)
$\text{USUAL}(sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α üblich (R.D7)
$\text{UNUSUAL}(sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α unüblich (R.D8)

Tabelle B.9.: Konzepte und Relationen zur Beschreibung der sozio-räumlichen Gründe für die Handlungsplatzierung bezüglich Affordanzen und der Erwartbarkeit ihrer Realisierung; vgl. Abschnitte 7.4.2 und 7.4.3.

Formel	Bedeutung
$\text{APPLIES-TO}_{\text{IV}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip IV ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (IV.D)
$\text{CONFORMS-TO}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t)$	Zum Zeitpunkt t richtet sich die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α nach den Territorialansprüchen der Akteursgruppe γ (R.D9)
$\text{DEPARTS-FROM}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t)$	Zum Zeitpunkt t weicht die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α von den Territorialansprüchen der Akteursgruppe γ ab (R.D10)
$\text{APPLIES-TO}_{\text{V}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip V ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (V.D)
$\text{VIOLATES-TERR}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t)$	Zum Zeitpunkt t verletzt die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α ein Territorium von γ (R.D11)
$\text{CONSIDERS-TERR}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t)$	Zum Zeitpunkt t berücksichtigt die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α ein Territorium von γ (R.D12)
$\text{APPLIES-TO}_{\text{VI}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip VI ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (VI.D)
$\text{INVADES-TERR}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t)$	Zum Zeitpunkt t betritt die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α unbefugt ein Territorium von γ (R.D11)
$\text{AVOIDS-TERR}(sp, \phi, \alpha, \gamma, t)$	Zum Zeitpunkt t vermeidet die Nutzung von sp für ϕ -Handlungen mit Agenten α das unbefugte Betreten eines Territoriums von γ (R.D12)

Tabelle B.10.: Prädikate zur Beschreibung der sozio-räumlichen Gründe für die Handlungsplatzierung bezüglich territorialer Ansprüche; vgl. Abschnitte 7.4.4, 7.4.5 und 7.4.6.

Formel	Bedeutung
$\text{APPLIES-TO}_{\text{VII}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip VII ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (VII.D)
$\text{RESPECTS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t)$	Zum Zeitpunkt t respektiert die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in Affordanzraum sp den persönlichen Raum von α_2 (R.D15)
$\text{DISRESPECTS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t)$	Zum Zeitpunkt t respektiert die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in Affordanzraum sp den persönlichen Raum von α_2 nicht (R.D16)
$\text{APPLIES-TO}_{\text{VIII}}(\rho, sp, \phi, \alpha, t)$	Zum Zeitpunkt t ist ρ gemäß Prinzip VIII ein sozio-räumlicher Grund gegen die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in den Affordanzraum sp (VIII.D)
$\text{INFRINGEMENTS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t)$	Zum Zeitpunkt t verletzt die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in Affordanzraum sp den persönlichen Raum von α_2 (R.D17)
$\text{CONSIDERS-PS}(sp, \phi, \alpha_1, \alpha_2, t)$	Zum Zeitpunkt t berücksichtigt die Platzierung von ϕ -Handlungen mit Agenten α in Affordanzraum sp den persönlichen Raum von α_2 (R.D18)

Tabelle B.11.: Prädikate zur Beschreibung der sozio-räumlichen Gründe für die Handlungsplatzierung bezüglich persönlicher Räume; vgl. Abschnitte 7.4.7 und 7.4.8.

ANHANG C

Vollständige Domänenbeschreibungen

In Kapiteln 7 und 8 wurden für Beispiele und zur Nachstellung von Studien Domänenmodelle aufgestellt. Um die Übersicht in den Kapiteln zu wahren, wurden diese Modelle nur in Ausschnitten dargestellt. Die Domänenbeschreibungen in diesem Teil des Anhangs ergänzen diese unvollständigen Darstellungen. In jedem der nachfolgenden Abschnitte ist die Modellierung einer Domäne anhand von Basis-Fakten aufgeführt (vgl. Anhang B für eine Übersicht der in der Konzeption enthaltenen Basis-Prädikate bzw. Primitive und definierten Prädikate).

C.1. Zur Exemplifizierung der acht Prinzipien

C.1.1. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.1

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

$$\text{CPL}(\text{plug}, \text{can-plug}, \text{affords-plug}). \text{CPL}(\text{watch-tv}, \text{can-see}, \text{affords-watch-tv}).$$

Repräsentation der Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\begin{aligned} & \text{I}(\text{aff}_1, \text{out}_1). \text{I}(\text{aff}_2, \text{out}_2). \text{I}(\text{aff}_3, \text{tv-station}_1). \\ & \text{I}(\text{ab}_1, \text{hum}_1). \text{I}(\text{ab}_2, \text{hum}_1). \text{I}(\text{ab}_3, \text{rob}_1). \text{I}(\text{ab}_4, \text{rob}_1). \end{aligned}$$

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\begin{aligned} &L(\text{affords-plug}, \text{aff}_1). L(\text{affords-plug}, \text{aff}_2). L(\text{affords-watch-tv}, \text{aff}_3). \\ &L(\text{can-see}, \text{ab}_1). L(\text{human-spatial-ability}, \text{ab}_2). \\ &L(\text{can-plug}, \text{ab}_3). L(\text{robot-spatial-ability}, \text{ab}_4). \end{aligned}$$

Repräsentation der Affordanzräume sp_1 , sp_2 und sp_3 , die in dieser Situation relevant sind (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

$$\begin{aligned} &\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, sp_1). \text{P-AGENT-REG}(sp_1, r_{11}). \text{P-TRANS-REG}(sp_1, r_{12}). \\ &\text{AFFORDANT-REG}(sp_1, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_1, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_2, sp_2). \text{P-AGENT-REG}(sp_2, r_{21}). \text{P-TRANS-REG}(sp_2, r_{22}). \\ &\text{AFFORDANT-REG}(sp_2, r_{23}). \text{SUPPORTS}(sp_2, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_3, sp_3). \text{P-AGENT-REG}(sp_3, r_{31}). \text{P-TRANS-REG}(sp_3, r_{32}). \\ &\text{AFFORDANT-REG}(sp_3, r_{33}). \text{SUPPORTS}(sp_3, \text{human-spatial-ability}). \end{aligned}$$

Repräsentation der sozio-räumliche Gründe, die von Affordanzen, dem Menschen und seiner Handlung hervorgebracht werden (verwendet Vokabular aus Tabelle B.7):

$$\begin{aligned} &\text{S-REASON}(\rho_1). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_1, \rho_1). \text{CON}(\rho_1). \text{HAS-FORCE}(\rho_1, \text{weak}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_2). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_1, \rho_2). \text{PRO}(\rho_2). \text{HAS-FORCE}(\rho_2, \text{weak}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_3). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_2, \rho_3). \text{CON}(\rho_3). \text{HAS-FORCE}(\rho_3, \text{weak}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_4). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_2, \rho_4). \text{PRO}(\rho_4). \text{HAS-FORCE}(\rho_4, \text{weak}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_5). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_3, \rho_5). \text{CON}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, \text{medium}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_6). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_3, \rho_6). \text{PRO}(\rho_6). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, \text{medium}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_7). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_7). \text{CON}(\rho_7). \text{HAS-FORCE}(\rho_7, \text{strong}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_8). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_8). \text{PRO}(\rho_8). \text{HAS-FORCE}(\rho_8, \text{strong}). \\ &\text{S-REASON}(\rho_9). \text{SOURCE-OF}(\text{act}_1, \rho_9). \text{CON}(\rho_9). \text{HAS-FORCE}(\rho_9, \text{strong}). \\ &\text{strong} \succ_{\text{force}} \text{medium}. \text{medium} \succ_{\text{force}} \text{weak}. \end{aligned}$$

Fakten über die partielle Koinzidenz von Affordanzraum-Regionen zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$$\begin{aligned} &\text{PCOIN}(r_{11}, r_{11}). \text{PCOIN}(r_{12}, r_{12}). \text{PCOIN}(r_{13}, r_{13}). \text{PCOIN}(r_{21}, r_{21}). \\ &\text{PCOIN}(r_{22}, r_{22}). \text{PCOIN}(r_{23}, r_{23}). \text{PCOIN}(r_{31}, r_{31}). \text{PCOIN}(r_{32}, r_{32}). \\ &\text{PCOIN}(r_{33}, r_{33}). \text{PCOIN}(r_{11}, r_{32}). \text{PCOIN}(r_{32}, r_{11}). \end{aligned}$$

Repräsentation der Tatsache, dass eine Handlung act_1 des Fernsehens ge-

genwärtig in sp_3 platziert ist (verwendet Vokabular aus Tabellen B.2, B.4, B.1):

$$\text{PLACED-AT}(act_1, sp_3). \text{USES}(act_1, ab_1). \text{REALIZES}(act_1, aff_3). \text{CF}(watch-tv, act_1).$$

C.1.2. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.2

Wie unter C.1.1, aber mit dem Unterschied, dass die Fakten bezüglich der Handlung act_1 fehlen. Stattdessen ist repräsentiert, dass zum betrachteten Zeitpunkt die Nutzung von sp_3 durch einen Hausbewohner erwartbar ist (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$$\text{EXPECTABLE}(human-resident, sp_3).$$

Zusätzlich ist repräsentiert, dass es sich zum betrachteten Zeitpunkt bei hum_1 um einen Bewohner des Hauses handelt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\text{CF}(home-resident, hum_1)$$

C.1.3. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.3

Wie unter C.1.2, und zusätzlich ist repräsentiert, dass es erwartbar ist, dass der Hausroboter rob_1 den Affordanzraum sp_2 nutzt (verwendet Vokabular aus Tabellen B.5, B.1):

$$\text{EXPECTABLE}(home-robot, sp_2). \text{CF}(home-robot, rob_1).$$

C.1.4. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.4 und zu Abschnitt 7.4.5

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

$$\text{CPL}(plug, can-plug, affords-plug).$$

Fakten über Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$I(aff_1, out_1). I(aff_2, out_2). I(ab_1, rob_1). I(ab_2, rob_1). I(ab_3, rob_2). I(ab_4, rob_2).$$

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\begin{aligned} &L(affords-plug, aff_1). L(affords-plug, aff_2). \\ &L(can-plug, ab_1). L(robot-spatial-ability, ab_2). \\ &L(can-plug, ab_3). L(robot-spatial-ability, ab_4). \end{aligned}$$

Repräsentation der Affordanzräume sp_1 und sp_2 , die in dieser Situation relevant sind (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

$$\begin{aligned} &PRODUCES(aff_1, sp_1). P-AGENT-REG(sp_1, r_{11}). P-TRANS-REG(sp_1, r_{12}). \\ &AFFORDANT-REG(sp_1, r_{13}). SUPPORTS(sp_1, robot-spatial-ability). \\ &PRODUCES(aff_2, sp_2). P-AGENT-REG(sp_2, r_{21}). P-TRANS-REG(sp_2, r_{22}). \\ &AFFORDANT-REG(sp_2, r_{23}). SUPPORTS(sp_2, robot-spatial-ability). \end{aligned}$$

Repräsentation der sozio-räumlichen Gründe, die durch die Affordanzen und durch die Gruppe $family_1$ hervorgebracht werden (verwendet Vokabular aus Tabelle B.7):

$$\begin{aligned} &S-REASON(\rho_1). SOURCE-OF(aff_1, \rho_1). CON(\rho_1). HAS-FORCE(\rho_1, weak). \\ &S-REASON(\rho_2). SOURCE-OF(aff_1, \rho_2). PRO(\rho_2). HAS-FORCE(\rho_2, weak). \\ &S-REASON(\rho_3). SOURCE-OF(aff_2, \rho_3). CON(\rho_3). HAS-FORCE(\rho_3, weak). \\ &S-REASON(\rho_4). SOURCE-OF(aff_2, \rho_4). PRO(\rho_4). HAS-FORCE(\rho_4, weak). \\ &S-REASON(\rho_5). SOURCE-OF(family_1, \rho_5). CON(\rho_5). HAS-FORCE(\rho_5, strong). \\ &S-REASON(\rho_6). SOURCE-OF(family_1, \rho_6). PRO(\rho_6). HAS-FORCE(\rho_6, strong). \\ &strong \succ_{force} weak. \end{aligned}$$

Fakten über die partielle Koinzidenz von Affordanzraum-Regionen zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$$\begin{aligned} &PCOIN(r_{11}, r_{11}). PCOIN(r_{12}, r_{12}). PCOIN(r_{13}, r_{13}). PCOIN(r_{21}, r_{21}). \\ &PCOIN(r_{22}, r_{22}). PCOIN(r_{23}, r_{23}). \end{aligned}$$

Repräsentation der Tatsache, dass die Gruppe $family_1$ die Affordanzräume sp_1 und sp_2 derart territorialisiert, dass der Pflegeroboter (*care-robot*) den

Affordanzraum sp_1 nutzen soll und der Haushaltsroboter (*chore-robot*) den Affordanzraum sp_2 (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$$\begin{aligned} & \text{CLAIMS-USE}(\textit{family}_1, sp_1, \textit{plug}, \textit{care-robot}). \\ & \text{CLAIMS-USE}(\textit{family}_1, sp_2, \textit{plug}, \textit{chore-robot}). \end{aligned}$$

Repräsentation der Tatsache, dass es sich bei Roboter rob_1 um einen Haushaltsroboter der Familie $\textit{family}_1$ handelt und bei Roboter rob_2 um einen Pflegeroboter der Familie $\textit{family}_1$ (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$$\text{SOCIAL-REL}(\textit{rob}_1, \textit{family}_1, \textit{chore-robot}). \text{SOCIAL-REL}(\textit{rob}_2, \textit{family}_1, \textit{care-robot}).$$

C.1.5. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.7

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

$$\text{CPL}(\textit{talk-to}, \textit{can-talk}, \textit{affords-talk-to}).$$

Fakten über Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\text{I}(\textit{aff}_1, \textit{hum}_1). \text{I}(\textit{ab}_1, \textit{rob}_1). \text{I}(\textit{ab}_2, \textit{rob}_1).$$

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\text{L}(\textit{affords-talk-to}, \textit{aff}_1). \text{L}(\textit{can-talk}, \textit{ab}_1). \text{L}(\textit{robot-spatial-ability}, \textit{ab}_2).$$

Repräsentation der Affordanzräume sp_1 , sp_2 und sp_3 , die in dieser Situation relevant sind (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

$$\begin{aligned} & \text{PRODUCES}(\textit{aff}_1, sp_1). \text{P-AGENT-REG}(sp_1, r_{11}). \text{P-TRANS-REG}(sp_1, r_{12}). \\ & \text{AFFORDANT-REG}(sp_1, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_1, \textit{robot-spatial-ability}). \end{aligned}$$

$\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, sp_2). \text{P-AGENT-REG}(sp_2, r_{21}). \text{P-TRANS-REG}(sp_2, r_{22}).$
 $\text{AFFORDANT-REG}(sp_2, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_2, \text{robot-spatial-ability}).$
 $\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, sp_3). \text{P-AGENT-REG}(sp_3, r_{31}). \text{P-TRANS-REG}(sp_3, r_{32}).$
 $\text{AFFORDANT-REG}(sp_3, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_3, \text{robot-spatial-ability}).$

Repräsentation der sozio-räumlichen Gründe, die durch den Menschen und durch die Affordanz hervorgebracht werden (verwendet Vokabular aus Tabelle B.7):

$\text{S-REASON}(\rho_1). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_1). \text{CON}(\rho_1). \text{HAS-FORCE}(\rho_1, \text{strong}).$
 $\text{S-REASON}(\rho_2). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_2). \text{PRO}(\rho_2). \text{HAS-FORCE}(\rho_2, \text{strong}).$
 $\text{S-REASON}(\rho_3). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_1, \rho_3). \text{CON}(\rho_3). \text{HAS-FORCE}(\rho_3, \text{medium}).$
 $\text{S-REASON}(\rho_4). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_1, \rho_4). \text{PRO}(\rho_4). \text{HAS-FORCE}(\rho_4, \text{medium}).$
 $\text{strong} \succ_{\text{force}} \text{medium}.$

Fakten über die partielle Koinzidenz von Affordanzraum-Regionen zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$\text{PCOIN}(r_{11}, r_{11}). \text{PCOIN}(r_{12}, r_{12}). \text{PCOIN}(r_{13}, r_{13}). \text{PCOIN}(r_{21}, r_{21}).$
 $\text{PCOIN}(r_{22}, r_{22}). \text{PCOIN}(r_{31}, r_{31}). \text{PCOIN}(r_{32}, r_{32}).$

Repräsentation der Tatsache, dass hum_1 als Träger des persönlichen Raumes die Platzierung von *talk-to*-Handlungen in Affordanzraum sp_1 akzeptiert, wenn der Gesprächspartner in einer vertrauten Beziehung zu ihm steht (*intimate*), während sich jene Akteure, zu denen hum_1 eine persönliche Beziehung (*personal*) hegt, ihre Unterhaltungs-Handlungen in sp_2 platzieren sollen. Der Affordanzraum sp_3 ist Unterhaltungen mit Akteuren vorbehalten, zu denen hum_1 eine soziale Beziehung (*social*) hegt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$\text{ACCEPTS-USE}(sp_1, \text{talk-to}, \text{intimate}). \text{ACCEPTS-USE}(sp_2, \text{talk-to}, \text{personal}).$
 $\text{ACCEPTS-USE}(sp_3, \text{talk-to}, \text{social}).$

Repräsentation der Tatsache, dass der Roboter rob_1 zum Menschen hum_1 in einer persönlichen Beziehung steht (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$\text{SOCIAL-REL}(\text{rob}_1, \text{hum}_1, \text{personal}).$

C.1.6. Domänenbeschreibung zu Abschnitt 7.4.8

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

$$\text{CPL}(\text{talk-to}, \text{can-talk}, \text{affords-talk-to}).$$

Fakten über Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\text{I}(\text{aff}_1, \text{hum}_1). \text{I}(\text{aff}_2, \text{hum}_2). \text{I}(\text{ab}_1, \text{rob}_1). \text{I}(\text{ab}_2, \text{rob}_1).$$

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$\begin{aligned} &\text{L}(\text{affords-talk-to}, \text{aff}_1). \text{L}(\text{affords-talk-to}, \text{aff}_2). \\ &\text{L}(\text{can-talk}, \text{ab}_1). \text{L}(\text{robot-spatial-ability}, \text{ab}_2). \end{aligned}$$

Repräsentation der Affordanzräume $sp_1, sp_2, sp_3, sp_4, sp_5, sp_6$, die in dieser Situation relevant sind (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

$$\begin{aligned} &\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, sp_1). \text{P-AGENT-REG}(sp_1, r_{11}). \text{P-TRANS-REG}(sp_1, r_{12}). \\ &\quad \text{AFFORDANT-REG}(sp_1, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_1, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, sp_2). \text{P-AGENT-REG}(sp_2, r_{21}). \text{P-TRANS-REG}(sp_2, r_{22}). \\ &\quad \text{AFFORDANT-REG}(sp_2, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_2, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_1, sp_3). \text{P-AGENT-REG}(sp_3, r_{31}). \text{P-TRANS-REG}(sp_3, r_{32}). \\ &\quad \text{AFFORDANT-REG}(sp_3, r_{13}). \text{SUPPORTS}(sp_3, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_2, sp_4). \text{P-AGENT-REG}(sp_4, r_{41}). \text{P-TRANS-REG}(sp_4, r_{42}). \\ &\quad \text{AFFORDANT-REG}(sp_4, r_{43}). \text{SUPPORTS}(sp_4, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_2, sp_5). \text{P-AGENT-REG}(sp_2, r_{51}). \text{P-TRANS-REG}(sp_2, r_{52}). \\ &\quad \text{AFFORDANT-REG}(sp_2, r_{43}). \text{SUPPORTS}(sp_5, \text{robot-spatial-ability}). \\ &\text{PRODUCES}(\text{aff}_2, sp_6). \text{P-AGENT-REG}(sp_6, r_{61}). \text{P-TRANS-REG}(sp_6, r_{62}). \\ &\quad \text{AFFORDANT-REG}(sp_6, r_{43}). \text{SUPPORTS}(sp_6, \text{robot-spatial-ability}). \end{aligned}$$

Repräsentation der sozio-räumlichen Gründe, die durch die Menschen und durch die Affordanzen hervorgebracht werden (verwendet Vokabular aus Tabelle B.7):

$S\text{-REASON}(\rho_1). \text{SOURCE-OF}(hum_1, \rho_1). \text{CON}(\rho_1). \text{HAS-FORCE}(\rho_1, strong).$
 $S\text{-REASON}(\rho_2). \text{SOURCE-OF}(hum_1, \rho_2). \text{PRO}(\rho_2). \text{HAS-FORCE}(\rho_2, strong).$
 $S\text{-REASON}(\rho_3). \text{SOURCE-OF}(aff_1, \rho_3). \text{CON}(\rho_3). \text{HAS-FORCE}(\rho_3, medium).$
 $S\text{-REASON}(\rho_4). \text{SOURCE-OF}(aff_1, \rho_4). \text{PRO}(\rho_4). \text{HAS-FORCE}(\rho_4, medium).$
 $S\text{-REASON}(\rho_5). \text{SOURCE-OF}(hum_2, \rho_5). \text{CON}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, strong).$
 $S\text{-REASON}(\rho_6). \text{SOURCE-OF}(hum_2, \rho_6). \text{PRO}(\rho_6). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, strong).$
 $S\text{-REASON}(\rho_7). \text{SOURCE-OF}(aff_2, \rho_7). \text{CON}(\rho_7). \text{HAS-FORCE}(\rho_7, medium).$
 $S\text{-REASON}(\rho_8). \text{SOURCE-OF}(aff_2, \rho_8). \text{PRO}(\rho_8). \text{HAS-FORCE}(\rho_8, medium).$
 $strong \succ_{force} medium.$

Fakten über die partielle Koinzidenz von Affordanzraum-Regionen zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$\text{PCOIN}(r_{11}, r_{11}). \text{PCOIN}(r_{12}, r_{12}). \text{PCOIN}(r_{13}, r_{13}). \text{PCOIN}(r_{21}, r_{21}).$
 $\text{PCOIN}(r_{22}, r_{22}). \text{PCOIN}(r_{31}, r_{31}). \text{PCOIN}(r_{32}, r_{32}). \text{PCOIN}(r_{41}, r_{41}).$
 $\text{PCOIN}(r_{42}, r_{42}). \text{PCOIN}(r_{43}, r_{43}). \text{PCOIN}(r_{51}, r_{51}). \text{PCOIN}(r_{52}, r_{52}).$
 $\text{PCOIN}(r_{61}, r_{61}). \text{PCOIN}(r_{62}, r_{62}). \text{PCOIN}(r_{51}, r_{21}). \text{PCOIN}(r_{21}, r_{51}).$
 $\text{PCOIN}(r_{41}, r_{21}). \text{PCOIN}(r_{21}, r_{41}). \text{PCOIN}(r_{41}, r_{31}). \text{PCOIN}(r_{31}, r_{41}).$
 $\text{PCOIN}(r_{41}, r_{32}). \text{PCOIN}(r_{32}, r_{41}). \text{PCOIN}(r_{61}, r_{31}). \text{PCOIN}(r_{31}, r_{61}).$

Repräsentation der Tatsache, dass hum_1 als Träger des persönlichen Raumes die Platzierung von *talk – to*-Handlungen in Affordanzraum sp_1 akzeptiert, wenn der Gesprächspartner in einer vertrauten Beziehung zu ihm steht (*intimate*), während sich jene Akteure, zu denen hum_1 eine persönliche Beziehung (*personal*) hegt, ihre Unterhaltungs-Handlungen in sp_2 platzieren sollen. Der Affordanzraum sp_3 ist Unterhaltungen mit Akteuren vorbehalten, zu denen hum_1 eine soziale Beziehung (*social*) hegt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$\text{ACCEPTS-USE}(sp_1, talk\text{-}to, intimate). \text{ACCEPTS-USE}(sp_2, talk\text{-}to, personal).$
 $\text{ACCEPTS-USE}(sp_3, talk\text{-}to, social).$

Repräsentation der Tatsache, dass es der Mensch hum_2 unangenehm findet, wenn Fremde ihm so nahe kommen, dass sie in sp_4 , sp_5 oder sp_6 stehen (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$\text{TOO-CLOSE}(sp_4, public). \text{TOO-CLOSE}(sp_5, public). \text{TOO-CLOSE}(sp_6, public).$

Repräsentation der Tatsache, dass der Roboter rob_1 zum Menschen hum_1 in einer persönlichen Beziehung steht und zum Menschen hum_2 in einer öffentlichen Beziehung (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$\text{SOCIAL-REL}(rob_1, hum_1, personal). \text{SOCIAL-REL}(rob_1, hum_2, public).$

C.2. Domänenbeschreibungen zur Studie von Torta und Kollegen

C.2.1. Originalszenario

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

$\text{CPL}(\text{talk-to}, \text{can-talk}, \text{talk-to-able}).$

Fakten über Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$\text{I}(ab_1, rob_1). \text{I}(ab_2, rob_1). \text{I}(aff_1, hum_1).$

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$\text{L}(\text{can-talk}, ab_1). \text{L}(\text{nao-spatial-ability}, ab_2). \text{L}(\text{talk-to-able}, aff_1).$

Repräsentation der Affordanzräume $sp_{1.1}, \dots, sp_{11.7}$, die in dieser Situation relevant sind (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

$\text{PRODUCES}(aff_1, sp_{1.1}). \text{P-AGENT-REG}(sp_{1.1}, r_{1.1.ar}).$
 $\text{P-TRANS-REG}(sp_{1.1}, r_{1.1.tr}). \text{AFFORDANT-REG}(sp_{1.1}, r_{1.1.af}).$
 $\text{SUPPORTS}(sp_{1.1}, \text{nao-spatial-ability}).$

...

$$\begin{aligned} & \text{PRODUCES}(aff_1, sp_{11.7}). \text{P-AGENT-REG}(sp_{11.7}, r_{11.7.ar}). \\ & \text{P-TRANS-REG}(sp_{11.7}, r_{11.7.tr}). \text{AFFORDANT-REG}(sp_{11.7}, r_{aff}). \\ & \text{SUPPORTS}(sp_{11.7}, nao\text{-}spatial\text{-}ability). \end{aligned}$$

Repräsentation der sozio-räumlichen Gründe, die der Menschen hum_1 und die Affordanz aff_1 hervorbringen (verwendet Vokabular aus Tabelle B.7):

$$\begin{aligned} & \text{S-REASON}(\rho_1). \text{SOURCE-OF}(hum_1, \rho_1). \text{PRO}(\rho_1). \text{HAS-FORCE}(\rho_1, strong). \\ & \text{S-REASON}(\rho_2). \text{SOURCE-OF}(hum_1, \rho_2). \text{CON}(\rho_2). \text{HAS-FORCE}(\rho_2, strong). \\ & \text{S-REASON}(\rho_3). \text{SOURCE-OF}(aff_1, \rho_3). \text{PRO}(\rho_3). \text{HAS-FORCE}(\rho_3, medium). \\ & \text{S-REASON}(\rho_4). \text{SOURCE-OF}(aff_1, \rho_4). \text{CON}(\rho_4). \text{HAS-FORCE}(\rho_4, medium). \\ & strong \succ_{force} medium. \end{aligned}$$

Repräsentation der »Region of Approach«, die in der Studie von Torta et al. (2012) ermittelt wurde, mittels ACCEPTS-USE-Fakten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$$\begin{aligned} & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{1.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{2.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{3.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{3.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{4.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{4.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{5.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{5.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{5.6}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{6.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{6.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{6.6}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{7.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{7.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{7.6}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{8.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{8.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{9.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{9.5}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \text{ACCEPTS-USE}(sp_{10.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \\ & \text{ACCEPTS-USE}(sp_{11.4}, talk\text{-}to, home\text{-}robot). \end{aligned}$$

Fakten über die partielle Koinzidenz der Regionen zum betrachteten Zeitpunkt. Aufgrund der großen Anzahl wird die Menge von PCOIN-Fakten angedeutet. Die Menge kann durch Berechnung der geometrischen Überlappungen der Affordanzraum-Regionen der 77 Affordanzräume berechnet werden (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$$\text{PCOIN}(r_{1.1.ar}, r_{1.1.ar}). \dots \text{PCOIN}(r_{11.7.ar}, r_{11.7.ar}).$$

... PCOIN($r_{1.1.ar}$, $r_{2.1.ar}$). PCOIN($r_{1.1.ar}$, $r_{3.1.ar}$). PCOIN($r_{1.2.ar}$, $r_{2.2.tr}$). ...

Repräsentation der Tatsache, dass der Roboter rob_1 der Hausroboter (*home-robot*) des Menschen hum_1 ist (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

SOCIAL-REL(rob_1 , hum_1 , *home-robot*)

C.2.2. Erweitertes Szenario

Alles unter Abschnitt C.2.1 bleibt erhalten. Die Domänenbeschreibung wird ergänzt, um das erweiterte Szenario abzubilden.

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

CPL(*take-out*, *can-take-out-book*, *take-out-book-affordance*).
CPL(*watch-tv*, *can-watch-tv*, *watch-tv-affordance*).

Fakten über Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

I(aff_2 , $shelf_1$). I(aff_3 , tv_1). I(ab_3 , hum_1).

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

L(*take-out-book-affordance*, aff_2). L(*watch-tv-affordance*, aff_3).
L(*can-watch-tv*, ab_3).

Repräsentation der Affordanzräume die durch das Regal und den Fernseher hinzukommen (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

PRODUCES(aff_2 , $sp_{shelf.1}$). P-AGENT-REG($sp_{shelf.1}$, $r_{shelf.1.ar}$).
P-TRANS-REG($sp_{shelf.1}$, $r_{shelf.1.tr}$). AFFORDANT-REG($sp_{shelf.1}$, r_{shelf}).
SUPPORTS($sp_{shelf.1}$, *human-spatial-ability*).

$\text{PRODUCES}(\text{aff}_2, sp_{shelf.2}). \text{P-AGENT-REG}(sp_{shelf.2}, r_{shelf.2.ar}).$
 $\text{P-TRANS-REG}(sp_{shelf.2}, r_{shelf.2.tr}). \text{AFFORDANT-REG}(sp_{shelf.2}, r_{shelf}).$
 $\text{SUPPORTS}(sp_{shelf.2}, \text{human-spatial-ability}).$
 $\text{PRODUCES}(\text{aff}_2, sp_{shelf.3}). \text{P-AGENT-REG}(sp_{shelf.3}, r_{shelf.3.ar}).$
 $\text{P-TRANS-REG}(sp_{shelf.3}, r_{shelf.3.tr}). \text{AFFORDANT-REG}(sp_{shelf.3}, r_{shelf}).$
 $\text{SUPPORTS}(sp_{shelf.3}, \text{human-spatial-ability}).$
 $\text{PRODUCES}(\text{aff}_3, sp_{tv.1}). \text{P-AGENT-REG}(sp_{tv.1}, r_{tv.1.ar}).$
 $\text{P-TRANS-REG}(sp_{tv.1}, r_{tv.1.tr}). \text{AFFORDANT-REG}(sp_{tv.1}, r_{tv-station}).$
 $\text{SUPPORTS}(sp_{tv.1}, \text{human-spatial-ability}).$

Zusätzliche Fakten über partielle Koinzidenz von Regionen. Die potentielle Transaktionsregion von $sp_{tv.1}$ koinzidiert partiell mit einigen Regionen der Hall-Affordanzräumen, und auch die Regionen der Affordanzräume, die dem Regal anhängen koinzidieren mit einigen Regionen der Hall-Affordanzräume (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{3.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{3.1.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{4.1.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{4.1.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{5.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{5.1.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{5.2.ar}). \text{PCOIN}(r_{5.2.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{5.3.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{5.3.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{5.4.ar}). \text{PCOIN}(r_{5.4.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{5.5.ar}). \text{PCOIN}(r_{5.5.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{5.6.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{5.6.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{6.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{6.1.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{6.2.ar}). \text{PCOIN}(r_{6.2.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{6.3.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{6.3.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{6.4.ar}). \text{PCOIN}(r_{6.4.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{6.5.ar}). \text{PCOIN}(r_{6.5.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{6.6.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{6.6.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{7.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{7.1.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{7.2.ar}). \text{PCOIN}(r_{7.2.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{7.3.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{7.3.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{7.4.ar}). \text{PCOIN}(r_{7.4.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{7.5.ar}). \text{PCOIN}(r_{7.5.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{7.6.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{7.6.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{8.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{8.1.ar}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{9.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{9.1.ar}, r_{tv.1.tr}). \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{11.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{11.1.tr}, r_{tv.1.tr}). \dots \text{PCOIN}(r_{tv.1.tr}, r_{11.7.tr}). \text{PCOIN}(r_{11.7.tr}, r_{tv.1.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{11.4.ar}). \text{PCOIN}(r_{11.4.ar}, r_{shelf.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{10.4.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{10.4.ar}, r_{shelf.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{11.4.tr}). \text{PCOIN}(r_{11.4.tr}, r_{shelf.1.ar}).$
 $\text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{11.5.tr}). \text{PCOIN}(r_{11.5.tr}, r_{shelf.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{11.6.tr}).$
 $\text{PCOIN}(r_{11.6.tr}, r_{shelf.1.ar}). \text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{11.7.tr}). \text{PCOIN}(r_{11.7.tr}, r_{shelf.1.ar}).$

$$\begin{aligned} & \text{PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{10.5.tr}) \text{ PCOIN}(r_{10.5.tr}, r_{shelf.1.ar}) \text{ PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{10.6.tr}) \\ & \text{PCOIN}(r_{10.6.tr}, r_{shelf.1.ar}) \text{ PCOIN}(r_{shelf.1.ar}, r_{10.7.tr}) \text{ PCOIN}(r_{10.7.tr}, r_{shelf.1.ar}) \dots \end{aligned}$$

Außerdem koinzidieren zum betrachteten Zeitpunkt Regal und Fernseher mit einigen der Affordanzraum-Regionen (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

$$\begin{aligned} & \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{11.5.ar}). \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{10.5.ar}). \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{9.5.ar}). \\ & \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{11.6.tr}). \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{11.7.tr}). \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{10.6.tr}). \\ & \text{PCOIN}^O(r_{shelf}, r_{9.7.tr}). \text{PCOIN}^O(r_{tv-station}, r_{5.7.ar}). \text{PCOIN}^O(r_{tv-station}, r_{6.7.ar}). \\ & \text{PCOIN}^O(r_{tv-station}, r_{7.7.ar}). \end{aligned}$$

Die Repräsentation der gegenwärtigen Handlung des Fernsehens (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4, B.2, B.1):

$$\text{REALIZES}(act_1, aff_3). \text{USES}(act_1, ab_3). \text{PLACED-AT}(act_1, sp_{tv.1}). \text{CF}(watch-tv, act_1).$$

Repräsentation der sozio-räumlichen Gründe, die durch die beiden zusätzlichen Affordanzen und durch die gegenwärtige Handlung des Fernsehens hervorgebracht werden (verwendet Vokabular aus Tabelle B.7):

$$\begin{aligned} & \text{S-REASON}(\rho_5). \text{SOURCE-OF}(aff_2, \rho_5). \text{PRO}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, weak). \\ & \text{S-REASON}(\rho_6). \text{SOURCE-OF}(aff_2, \rho_6). \text{CON}(\rho_6). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, weak). \\ & \text{S-REASON}(\rho_7). \text{SOURCE-OF}(aff_3, \rho_7). \text{PRO}(\rho_7). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, weak). \\ & \text{S-REASON}(\rho_8). \text{SOURCE-OF}(aff_3, \rho_8). \text{CON}(\rho_8). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, weak). \\ & \text{S-REASON}(\rho_9). \text{SOURCE-OF}(aff_1, \rho_9). \text{CON}(\rho_9). \text{HAS-FORCE}(\rho_7, medium). \\ & \quad \quad \quad medium \succ_{force} weak. \end{aligned}$$

Repräsentation der Tatsache, dass erwartbar ist, dass ein Mitbewohner das Bücherregal benutzt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.5):

$$\begin{aligned} & \text{EXPECTABLE}(flatmate, sp_{shelf.1}). \text{EXPECTABLE}(flatmate, sp_{shelf.2}). \\ & \text{EXPECTABLE}(flatmate, sp_{shelf.3}). \end{aligned}$$

Repräsentation der Tatsache, dass mit Mensch hum_2 ein Mitwohner existiert (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$CF(\text{flatmate}, \text{hum}_2).$$

C.3. Domänenbeschreibungen zur Studie von Kim und Mutlu

Repräsentation der Passung von Affordanzen und Fähigkeiten auf Ebene von Affordanz- und Fähigkeits-Werten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2):

$$\begin{aligned} &CPL(\text{see}, \text{can-see}, \text{visible}). \\ &CPL(\text{talk-to}, \text{can-talk}, \text{talk-to-able}). \end{aligned}$$

Repräsentation der Inhärenz von Affordanzen und Fähigkeiten in Objekten (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$I(\text{aff}_1, \text{hum}_1). I(\text{aff}_2, \text{screen}_1). I(\text{ab}_1, \text{rob}_1). I(\text{ab}_2, \text{rob}_1). I(\text{ab}_3, \text{hum}_1).$$

Die Werte der Affordanzen und Fähigkeiten zum betrachteten Zeitpunkt (verwendet Vokabular aus Tabelle B.1):

$$L(\text{talk-to-able}, \text{aff}_1). L(\text{visible}, \text{aff}_2). L(\text{can-talk}, \text{ab}_1). L(\text{can-see}, \text{ab}_2). L(\text{can-see}, \text{ab}_3).$$

Repräsentation der Affordanzräume $sp_1, \dots, sp_9$, die in dieser Situation relevant sind (verwendet Vokabular aus Tabelle B.4):

$$\begin{aligned} &PRODUCES(\text{aff}_2, sp_1). P\text{-AGENT-REG}(sp_1, r_{1.1}). P\text{-TRANS-REG}(sp_1, r_{1.2}). \\ &AFFORDANT\text{-REG}(sp_1, r_{screen}). SUPPORTS(sp_1, \text{human-and-robot-spatial-ability}). \\ &PRODUCES(\text{aff}_2, sp_2). P\text{-AGENT-REG}(sp_2, r_{2.1}). P\text{-TRANS-REG}(sp_2, r_{2.2}). \\ &AFFORDANT\text{-REG}(sp_2, r_{screen}). SUPPORTS(sp_2, \text{human-and-robot-spatial-ability}). \\ &PRODUCES(\text{aff}_2, sp_3). P\text{-AGENT-REG}(sp_2, r_{3.1}). P\text{-TRANS-REG}(sp_3, r_{3.2}). \\ &AFFORDANT\text{-REG}(sp_2, r_{screen}). SUPPORTS(sp_3, \text{human-and-robot-spatial-ability}). \\ &PRODUCES(\text{aff}_2, sp_4). P\text{-AGENT-REG}(sp_4, r_{4.1}). P\text{-TRANS-REG}(sp_4, r_{4.2}). \\ &AFFORDANT\text{-REG}(sp_2, r_{screen}). SUPPORTS(sp_4, \text{human-and-robot-spatial-ability}). \\ &PRODUCES(\text{aff}_2, sp_5). P\text{-AGENT-REG}(sp_5, r_{5.1}). P\text{-TRANS-REG}(sp_5, r_{5.2}). \\ &AFFORDANT\text{-REG}(sp_5, r_{screen}). SUPPORTS(sp_5, \text{human-and-robot-spatial-ability}). \end{aligned}$$

PRODUCES(aff_1, sp_6). P-AGENT-REG($sp_6, r_{6.1}$). P-TRANS-REG($sp_6, r_{6.2}$).
 AFFORDANT-REG(sp_6, r_{hum}). SUPPORTS($sp_6, human-and-robot-spatial-ability$).
 PRODUCES(aff_1, sp_7). P-AGENT-REG($sp_7, r_{7.1}$). P-TRANS-REG($sp_7, r_{7.2}$).
 AFFORDANT-REG(sp_7, r_{hum}). SUPPORTS($sp_7, human-and-robot-spatial-ability$).
 PRODUCES(aff_1, sp_8). P-AGENT-REG($sp_8, r_{8.1}$). P-TRANS-REG($sp_8, r_{8.2}$).
 AFFORDANT-REG(sp_8, r_{hum}). SUPPORTS($sp_8, human-and-robot-spatial-ability$).
 PRODUCES(aff_1, sp_9). P-AGENT-REG($sp_9, r_{9.1}$). P-TRANS-REG($sp_9, r_{9.2}$).
 AFFORDANT-REG(sp_9, r_{hum}). SUPPORTS($sp_9, human-and-robot-spatial-ability$).

Fakten über die partielle Koinzidenz von Affordanzraum-Regionen (verwendet Vokabular aus Tabelle B.3):

PCOIN($r_{1.1}, r_{1.1}$). PCOIN($r_{1.2}, r_{1.2}$). PCOIN($r_{2.1}, r_{2.1}$). PCOIN($r_{2.2}, r_{2.2}$).
 PCOIN($r_{3.1}, r_{3.1}$). PCOIN($r_{3.2}, r_{3.2}$). PCOIN($r_{4.1}, r_{4.1}$). PCOIN($r_{4.2}, r_{4.2}$).
 PCOIN($r_{5.1}, r_{5.1}$). PCOIN($r_{5.2}, r_{5.2}$). PCOIN($r_{6.1}, r_{6.1}$). PCOIN($r_{6.2}, r_{6.2}$).
 PCOIN($r_{7.1}, r_{7.1}$). PCOIN($r_{7.2}, r_{7.2}$). PCOIN($r_{8.1}, r_{8.1}$). PCOIN($r_{8.2}, r_{8.2}$).
 PCOIN($r_{9.1}, r_{9.1}$). PCOIN($r_{9.2}, r_{9.2}$). PCOIN(r_{screen}, r_{screen}). PCOIN(r_{hum}, r_{hum}).
 PCOIN($r_{1.2}, r_{2.2}$). PCOIN($r_{1.2}, r_{3.2}$). PCOIN($r_{1.2}, r_{4.2}$). PCOIN($r_{1.2}, r_{5.2}$).
 PCOIN($r_{2.2}, r_{1.2}$). PCOIN($r_{2.2}, r_{3.2}$). PCOIN($r_{2.2}, r_{4.2}$). PCOIN($r_{2.2}, r_{5.2}$).
 PCOIN($r_{3.2}, r_{1.2}$). PCOIN($r_{3.2}, r_{2.2}$). PCOIN($r_{3.2}, r_{4.2}$). PCOIN($r_{3.2}, r_{5.2}$).
 PCOIN($r_{4.2}, r_{1.2}$). PCOIN($r_{4.2}, r_{2.2}$). PCOIN($r_{4.2}, r_{3.2}$). PCOIN($r_{4.2}, r_{5.2}$).
 PCOIN($r_{5.2}, r_{1.2}$). PCOIN($r_{5.2}, r_{2.2}$). PCOIN($r_{5.2}, r_{3.2}$). PCOIN($r_{5.2}, r_{4.2}$).
 PCOIN($r_{6.1}, r_{7.2}$). PCOIN($r_{6.1}, r_{8.2}$). PCOIN($r_{6.1}, r_{9.2}$). PCOIN($r_{6.2}, r_{7.2}$).
 PCOIN($r_{6.2}, r_{8.2}$). PCOIN($r_{6.2}, r_{9.2}$). PCOIN($r_{7.1}, r_{8.2}$). PCOIN($r_{7.1}, r_{9.2}$).
 PCOIN($r_{7.2}, r_{6.1}$). PCOIN($r_{7.2}, r_{6.2}$). PCOIN($r_{7.2}, r_{8.2}$). PCOIN($r_{7.2}, r_{9.2}$).
 PCOIN($r_{8.1}, r_{9.2}$). PCOIN($r_{8.2}, r_{6.1}$). PCOIN($r_{8.2}, r_{6.2}$). PCOIN($r_{8.2}, r_{7.1}$).
 PCOIN($r_{8.2}, r_{7.2}$). PCOIN($r_{8.2}, r_{9.2}$). PCOIN($r_{9.2}, r_{6.1}$). PCOIN($r_{9.2}, r_{6.2}$).
 PCOIN($r_{9.2}, r_{7.1}$). PCOIN($r_{9.2}, r_{7.2}$). PCOIN($r_{9.2}, r_{8.1}$). PCOIN($r_{9.2}, r_{8.2}$).

Die Repräsentation der Handlung des Menschen, der bereits Platz genommen hat und auf die Leinwand schaut (verwendet Vokabular aus Tabelle B.2, B.4, B.1):

REALIZES(act_1, aff_2). USES(act_1, ab_3). PLACED-AT(act_1, sp_1). CF(see, act_1).

Repräsentation der sozio-räumlichen Gründe, die durch den Menschen hum_1 , durch die Affordanzen aff_1 und aff_2 und durch die transitive Handlung act_1

hervorgebracht werden (verwendet Vokabular aus B.7):

$$\begin{aligned}
& \text{S-REASON}(\rho_1). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_1, \rho_5). \text{PRO}(\rho_5). \text{HAS-FORCE}(\rho_5, \text{weak}). \\
& \text{S-REASON}(\rho_2). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_1, \rho_6). \text{CON}(\rho_6). \text{HAS-FORCE}(\rho_6, \text{weak}). \\
& \text{S-REASON}(\rho_3). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_2, \rho_7). \text{PRO}(\rho_7). \text{HAS-FORCE}(\rho_7, \text{weak}). \\
& \text{S-REASON}(\rho_4). \text{SOURCE-OF}(\text{aff}_2, \rho_8). \text{CON}(\rho_8). \text{HAS-FORCE}(\rho_8, \text{weak}). \\
& \text{S-REASON}(\rho_{\text{hum}_1+}). \text{SOURCE-OF}(\text{hum}_1, \rho_{\text{hum}_1+}). \\
& \text{PRO}(\rho_{\text{hum}_1+}). \text{HAS-FORCE}(\rho_{\text{hum}_1+}, \text{strong}). \\
& \text{strong} \succ_{\text{force}} \text{weak}.
\end{aligned}$$

Repräsentation der Tatsache, dass der Mensch hum_1 es akzeptiert, wenn einer Supervisor für *talk-to*-Handlungen den nahen Affordanzraum sp_7 nutzt, und dass es akzeptabel ist, wenn ein Subordinate für *talk-to*-Handlungen den fernen Affordanzraum sp_9 nutzt (verwendet Vokabular aus B.5):

$$\text{ACCEPTS-USE}(\text{sp}_7, \text{talk-to}, \text{supervisor}). \text{ACCEPTS-USE}(\text{sp}_9, \text{talk-to}, \text{subordinate}).$$

In Situationen, in denen der Roboter rob_1 in der Supervisor-Rolle agiert, enthält die Wissensbasis den Eintrag (verwendet Vokabular aus B.5):

$$\text{SOCIAL-REL}(\text{rob}_1, \text{hum}_1, \text{supervisor}).$$

In Situationen, in denen der Roboter rob_1 in der Subordinate-Rolle agiert, enthält die Wissensbasis stattdessen den Eintrag (verwendet Vokabular aus B.5):

$$\text{SOCIAL-REL}(\text{rob}_1, \text{hum}_1, \text{subordinate}).$$

ANHANG D

Planungsdomäne und Planungsproblem zu Abschnitt 4.4

In Kapitel 4 wird exemplarisch demonstriert, wie die Modellierung von Affordanzen und Fähigkeiten für die Aktionsplanung genutzt werden kann. In diesem Anhang sind die dazugehörigen Beschreibungen der Planungsdomäne und des Planungsproblems in der Planning Domain Definition Language (PDDL) aufgeführt. Die Sprachelemente, die in den nachfolgenden Beschreibungen benutzt werden, beschränken sich auf die PDDL in der Version 2.1, deren Spezifikation bei Fox und Long (2003) nachgelesen werden kann. Das Planungsproblem wurde mit dem Aktionsplaner »FF« von Hoffmann und Nebel (2001) gelöst.

D.1. Spezifikation der Planungsdomäne

```
(define (domain affordance-hallway-light)
(:types region affordant activity-type)
(:predicates (c ?a - affordant ?r1 ?r2 - region)
  (robot-at ?r - region)
  (affordant-at ?a - affordant ?r - region)
  (affords ?a - affordant ?y - activity-type)
  (light-on ?r - region)
  (light-switch-for ?a - affordant ?r - region))
(:functions (battery-status) (battery-capacity))
```

Listing D.1: Deklaration der verwendeten Typen, Prädikatssymbole, Funktionsymbole.

```

(:action press
  :parameters (?a - affordant)
  :precondition (and (affords ?a press)
    (exists (?r - region)
      (and (robot-at ?r) (affordant-at ?a ?r)))
    (> (battery-status) 0))
  :effect (and (decrease (battery-status) 1)
    (forall (?r - region) (when (and
      (light-switch-for ?a ?r) (not (light-on ?r)))
      (light-on ?r)))))
)

(:action press
  :parameters (?a - affordant)
  :precondition (and (affords ?a press)
    (exists (?r - region)
      (and (robot-at ?r) (affordant-at ?a ?r)))
    (> (battery-status) 0))
  :effect (and (decrease (battery-status) 1)
    (forall (?r - region) (when (and
      (light-switch-for ?a ?r) (light-on ?r))
      (not (light-on ?r)))))
)

```

Listing D.2: Spezifikation der Handlung vom Typ *press*, d.h., einen Lichtschalter zu drücken.

```

(:action walk-through
  :parameters (?a - affordant)
  :precondition (and (affords ?a walk-through)
    (exists (?r1 ?r2 - region)
      (and (robot-at ?r1) (affordant-at ?a ?r1))))
  :effect (forall (?r1 ?r2 - region) (when
    (and (robot-at ?r1) (c ?a ?r1 ?r2))
    (and (not (robot-at ?r1)) (robot-at ?r2)))))
)

```

Listing D.3: Spezifikation der Handlung vom Typ *walk – through*, d.h., durch eine Tür zu gehen.

```
(:action plug
:parameters (?a - affordant)
:precondition (and (affords ?a plug)
  (exists (?r - region)
    (and (robot-at ?r) (affordant-at ?a ?r)))
    (> (battery-status) 0))
:effect
  (assign (battery-status) (battery-capacity))))
```

Listing D.4: Spezifikation der Handlung vom Typ *plug*, d.h., sich an einer Steckdose anzuschließen.

D.2. Spezifikation des Planungsproblems

```
(define (problem office-environment)
(:domain affordance-hallway-light)
(:objects hw off1 off2 off3 - region
  dw1 dw2 dw3 ls1 ls2 ls3 out1 out2 out3 - affordant
  press plug walk-through - activity-type)
(:init
  (affords ls1 press) (affords ls2 press)
  (affords ls3 press) (affords out3 plug)
  (affords dw1 walk-through)
  (affords dw2 walk-through)
  (affords dw3 walk-through)

  (affordant-at out1 off1) (affordant-at out2 off2)
  (affordant-at out3 off3) (affordant-at ls1 off1)
  (affordant-at ls2 off2) (affordant-at ls3 off3)
  (affordant-at dw1 off1) (affordant-at dw2 off2)
  (affordant-at dw3 off3) (affordant-at dw1 hw)
  (affordant-at dw2 hw) (affordant-at dw3 hw)

  (light-switch-for ls1 off1)
  (light-switch-for ls2 off2)
  (light-switch-for ls3 off3)

  (c dw1 hw off1) (c dw1 off1 hw) (c dw2 hw off2)
  (c dw2 off2 hw) (c dw3 hw off3) (c dw3 off3 hw)
```

```
(light-on off1) (light-on off2) (light-on off3)

(robot-at hw)

(= (battery-capacity) 10) (= (battery-status) 1)
)
(:goal (forall (?r - region) (not (light-on ?r))))
)
```

Listing D.5: Spezifikation des Planungsproblems, d.h., initialer Zustand und Ziel.

Literaturverzeichnis

- Alonso-Martín, F., Gorostiza, J. F., Malfaz, M. & Salichs, M. A. (2012). User localization during human-robot interaction. *Sensors*, 12 (7), 9913–9935.
- Althaus, P., Ishiguro, H., Kanda, T., Miyashita, T. & Christensen, H. I. (2004). Navigation for human-robot interaction tasks. In *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA'04*. (Bd. 2, S. 1894–1900).
- Altman, I. (1975). *The environment and social behavior*. Monterey, California, USA: Brooks/Cole Publishing Company.
- Arkin, R. C. (1989). Motor schema-based mobile robot navigation. *The International Journal of Robotics Research*, 8 (4), 92–112.
- Arkin, R. C. (1990). Integrating behavioral, perceptual, and world knowledge in reactive navigation. *British Journal of Psychology*, 6, 105–122.
- Arksey, H. & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8 (1), 19–32.
- Asghari Oskoei, M., Walters, M. & Dautenhahn, K. (2010). An autonomous proxemic system for a mobile companion robot. In *Proceedings of the AISB 2010 Symposium on New Frontiers for Human Robot Interaction*.
- Ayush, K. & Agarwal, N. K. (2012). Constraint optimised path tracking for social robots. *Undergraduate Academic Research Journal (UARJ)*, 1 (1).
- Berker, S. (2007). Particular reasons. *Ethics*, 118 (1), 109–139.
- Bhatt, M., Hois, J. & Kutz, O. (2012). Ontological modelling of form and function for architectural design. *Applied Ontology*, 7 (3), 233–267.
- Bonnefon, J.-F., Dubois, D., Fargier, H. & Leblois, S. (2008). Qualitative heuristics for balancing the pros and cons. *Theory and Decision*, 65 (1), 71–95.
- Borgo, S. & Masolo, C. (2009). Foundational choices in dolce. In S. Staab & R. Studer (Hrsg.), *Handbook on Ontologies, Second Edition* (S. 361–381). Springer.
- Brachman, R. J. & Levesque, H. J. (2004). *Knowledge representation and reasoning*. Elsevier.

- Brooks, A. G. & Arkin, R. C. (2007). Behavioral overlays for non-verbal communication expression on a humanoid robot. *Autonomous Robots*, 22 (1), 55–74.
- Cakmak, M. & Takayama, L. (2013). Towards a comprehensive chore list for domestic robots. In *Proceedings of the 8th ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction* (S. 93–94).
- Chemero, A. (2003). An outline of a theory of affordances. *Ecological Psychology*, 15 (2), 181–195.
- Chung, S.-Y. & Huang, H.-P. (2012). Incremental learning of human social behaviors with feature-based spatial effects. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 2417–2422).
- Cooney, M., Zanlungo, F., Nishio, S. & Ishiguro, H. (2012). Designing a flying humanoid robot (FHR): Effects of flight on interactive communication. In *Proceedings of the 2012 the 21th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN'12)* (S. 364–371).
- Cuntoor, N., Collins, R. & Hoogs, A. (2012). Human-robot teamwork using activity recognition and human instruction. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 459–465).
- Dancy, J. (2004). *Ethics without principles*. Clarendon Press Oxford.
- Dautenhahn, K., Walters, M., Woods, S., Koay, K. L., Nehaniv, C. L., Sisbot, A., ... Siméon, T. (2006). How may I serve you? A robot companion approaching a seated person in a helping context. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCHI/SIGART Conference on Human-Robot Interaction* (S. 172–179).
- Delaney, D. (2005). *Territory: A short introduction*. Blackwell Publishing.
- de Silva, L., Pandey, A. K. & Alami, R. (2013). An interface for interleaved symbolic-geometric planning and backtracking. In *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 232–239).
- Detry, R., Kraft, D., Kroemer, O., Bodenhagen, L., Peters, J., Krüger, N. & Piater, J. (2011). Learning grasp affordance densities. *Paladyn*, 2 (1), 1–17.
- Ding, H., Reissig, G., Wijaya, K., Bortot, D., Bengler, K. & Stursberg, O. (2011). Human arm motion modeling and long-term prediction for safe and efficient human-robot-interaction. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 5875–5880).
- Donnelly, M. (2005). Relative places. *Applied Ontology*, 1, 55–75.

- Dornhege, C., Eyerich, P., Keller, T., Trüg, S., Brenner, M. & Nebel, B. (2012). Semantic attachments for domain-independent planning systems. In E. Prassler et al. (Hrsg.), *Towards service robots for everyday environments* (S. 99–115). Springer.
- Dubois, D., Fargier, H. & Bonnefon, J.-F. (2008). On the qualitative comparison of decisions having positive and negative features. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 32 (1), 385–417.
- Duchon, A. P., Kaelbling, L. P. & Warren, W. H. (1998). Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, 6 (3–4), 473–507.
- Dylla, F., Coors, M. & Bhatt, M. (2012). Socially compliant navigation in crowded environments. In M. Bhatt, H. W. Guesgen & S. M. Hazarika (Hrsg.), *Proceedings of the ECAI'12 Workshop on Spatio-Temporal Dynamics* (S. 9–16).
- Dylla, F., Kreutzmann, A. & Wolter, D. (2014). A qualitative representation of social conventions for application in robotics. In *Qualitative Representations for Robots: 2014 AAAI Spring Symposium Series* (S. 34–41).
- Ellis, R. & Tucker, M. (2000). Micro-affordance : The potentiation of components of action by seen objects. *British Journal of Psychology*, 91, 451–471.
- Escobedo, A., Spalanzani, A. & Laugier, C. (2012). Experimental setup for human aware navigation. In *Proceedings of the 7th National Conference on Control Architectures of Robots Landscape*.
- Fischer, P. T. & Hornecker, E. (2012). Urban hci: Spatial aspects in the design of shared encounters for media facades. In *Proceedings of the 2012 ACM Annual Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'12)* (S. 307–316). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Fong, T., Nourbakhsh, I. & Dautenhahn, K. (2003). A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42 (3), 143–166.
- Fox, M. & Long, D. (2003). Pddl2.1: An extension to pddl for expressing temporal planning domains. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 20, 61–124.
- Franklin, B. (1956). Prudential algebra. In L. W. Labaree (Hrsg.), *Mr. Franklin: A selection from his personal letters* (S. 25–27). Yale University Press.
- Garrell, A. & Sanfeliu, A. (2012). Cooperative social robots to accompany groups of people. *The International Journal of Robotics Research*, 31 (13), 1675–1701.
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In R. E. Shaw & J. Bransford (Hrsg.), *Perceiving, acting and knowing: Toward an ecological psychology* (S. 67–82). Hillsdale, NJ: Erlbaum.

- Gibson, J. J. (1986). The theory of affordances. In *The ecological approach to visual perception* (S. 127–143). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Gigerenzer, G. & Goldstein, D. G. (1996). Reasoning the fast and frugal way: Models of bounded rationality. *Psychological Review*, 103 (4), 650–669.
- Gockley, R., Forlizzi, J. & Simmons, R. (2007). Natural person-following behavior for social robots. In *Proceedings of the 2nd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction 2007 (HRI'07)* (S. 17–24).
- Goffman, E. (1971). *Relations in public – microstudies of the public order*. New York: Basic Books.
- Gómez, J. V., Mavridis, N. & Garrido, S. (2013). Social path planning: Generic human-robot interaction framework for robotic navigation tasks. In *Proceedings of the Second International Workshop on Cognitive Robotics Systems: Replicating Human Actions and Activities*.
- Granata, C. & Bidaud, P. (2012). A framework for the design of person following behaviors for social mobile robots. In *Intelligent robots and systems (iros), 2012 ieee/rsj international conference on* (S. 4652–4659).
- Green, A. & Hüttenrauch, H. (2006). Making a case for spatial prompting in human-robot communication. In *Workshop on Multimodal Corpora: From Multimodal Behaviour Theories to Usable Models at the Fifth International Conference on Language Resources and Evaluation (LREC2006)*.
- Hall, E. T. (1966). *The hidden dimension, man's use of space in public and private*. London, England: The Bodley Head.
- Hanheide, M., Peters, A., & Bellotto, N. (2012). Analysis of human-robot spatial behaviour applying a qualitative trajectory calculus. In *Proceedings of the 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2012)* (S. 689–694).
- Helbing, D. & Molnar, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51 (5), 4282.
- Henkel, Z., Murphy, R., Srinivasan, V. & Bethel, C. (2012). A proxemic-based hri testbed. In *Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop (PerMIS'12)* (S. 75–81).
- Hertzberg, J., Lingemann, K., Lörken, C., Nüchter, A. & Stiene, S. (2008). Does it help a robot navigate to call navigability an affordance? In *Towards affordance-based robot control* (S. 16–26). Springer.
- Heuer, U. (2004). Reasons for actions and desires. *Philosophical Studies*, 121 (1), 43–63.
- Hoeller, F., Schulz, D., Moors, M. & Schneider, F. E. (2007). Accompanying persons with a mobile robot using motion prediction and probabilistic roadmaps. In *Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on*

- Intelligent Robots and Systems (IROS'07)* (S. 1260–1265).
- Hoffmann, J. & Nebel, B. (2001). The ff planning system: Fast plan generation through heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 14, 253–302.
- Holthaus, P., Pitsch, K. & Wachsmuth, S. (2011). How can i help? – Spatial attention strategies for a receptionist robot. *International Journal of Social Robots*, 3 (4), 383–393.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain sciences*, 17 (02), 187–202.
- Kaelbling, L. P. & Lozano-Pérez, T. (2011). Hierarchical task and motion planning in the now. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'11)* (S. 1470–1477).
- Kahneman, D. & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47 (2), 263–292.
- Kanda, T., Glas, D. F., Shiomi, M. & Hagita, N. (2009). Abstracting people's trajectories for social robots to proactively approach customers. *IEEE Transactions on Robotics*, 25 (6), 1382–1396.
- Kendon, A. (1990). *Conducting interaction: Patterns of behavior and focused encounters*. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Kennedy, D. P., Gläscher, J., Tyszk, J. M. & Adolphs, R. (2009). Personal space regulation by the human amygdala. *Nature Neuroscience*, 12, 1226–1227.
- Keshavdas, S. & Kruijff, G.-J. (2012). Functional mapping for human-robot collaborative exploration. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)* (S. 1–6).
- Kessler, J., Schroeter, C. & Gross, H.-M. (2011). Approaching a person in a socially acceptable manner using a fast marching planner. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Intelligent Robotics and Applications* (S. 368–377).
- Kim, Y. & Mutlu, B. (2014). How social distance shapes human–robot interaction. *International Journal of Human-Computer Studies*, 72, 783–795.
- Kirby, R., Simmons, R. & Forlizzi, J. (2009). COMPANION: A constraint-optimizing method for person-acceptable navigation. In *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication* (S. 607–612).
- Knepper, R. A. & Rus, D. (2012). Pedestrian-inspired sampling-based multi-robot collision avoidance. In *Proceedings of the 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2012)* (S. 94–100).
- Koay, K. L., Walters, M. L., May, A., Dumitriu, A., Christianson, B., Burke,

- N. & Dautenhahn, K. (2013). Exploring robot etiquette: Refining a HRI home companion scenario based on feedback from two artists who lived with robots in the UH robot house. In *Social Robotics – Proceedings of the 5th International Conference (ICSR 2013)* (S. 290–300).
- Koile, K., Tollmar, K., Demirdjian, D., Shrobe, H. & Darrell, T. (2003). Activity zones for context-aware computing. In *Proceedings of the 5th International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2003)* (S. 90–106).
- Krüger, N., Geib, C., Piater, J., Petrick, R., Steedman, M., Wörgötter, F., ... others (2011). Object–action complexes: Grounded abstractions of sensory–motor processes. *Robotics and Autonomous Systems*, 59 (10), 740–757.
- Kruse, T., Pandey, A. K., Alami, R. & Kirsch, A. (2013). Human-aware robot navigation: A survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 61 (12), 1726–1743.
- Lam, C.-P., Chou, C.-T., Chiang, K.-H. & Fu, L.-C. (2011). Human-centered robot navigation – towards a harmoniously human-robot coexisting environment. *IEEE Transactions on Robotics*, 27 (1), 99–112.
- Lawson, B. (2001). *The language of space*. Oxford, England: Architectural Press.
- Lee, D. N., Young, D. S. & McLaughlin, C. M. (1984). A roadside simulation of road crossing for children. *Ergonomics*, 27 (12), 1271–1281.
- Leidner, D. & Borst, C. (2013). Hybrid reasoning for mobile manipulation based on object knowledge. In *Proceedings of the Workshop on AI-based Robotics at the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'13)*.
- Levesque, H. J., & Brachman, R. J. (1985). A fundamental trade-off in knowledge representation and reasoning. In R. Brachman & H. Levesque (Hrsg.), *Readings in knowledge representation* (S. 42–70). San Mateo, Calif.: Morgan Kaufmann.
- Levesque, H. J. (2014). On our best behaviour. *Artificial Intelligence*, 212, 27–35.
- Levesque, H. J. & Lakemeyer, G. (2007). Cognitive robotics. In F. van Harmelen, V. Lifschitz & B. Porter (Hrsg.), *Handbook of knowledge representation* (S. 869–886). Elsevier.
- Levesque, H. J. & Reiter, R. (1998). High-level robotic control: Beyond planning. A position paper. In *AIII 1998 Spring Symposium: Integrating Robotics Research: Taking the Next Big Leap* (Bd. 37).
- Levesque, H. J., Reiter, R., Lespérance, Y., Lin, F. & Scherl, R. (1997). GOLOG: A logic programming language for dynamic domains. *Journal of Logic Programming*, 31, 59–84.
- Lindner, F. & Eschenbach, C. (2011). Towards a formalization of social spaces

- for socially aware robots. In M. Egenhofer, N. Giudice, R. Moratz & M. Worboys (Hrsg.), *Spatial Information Theory. 10th International Conference, COSIT 2011, Belfast, ME, USA* (Bd. 6899, S. 283–303). Springer: Berlin.
- Lindner, F. & Eschenbach, C. (2013). Affordance-based activity placement in human-robot shared environments. In G. Herrmann, M. Pearson, A. Lenz, P. Bremner, A. Spiers & U. Leonards (Hrsg.), *Social Robotics – Proceedings of the 5th International Conference (ICSR 2013)* (Bd. 8239, S. 94–103). Springer International Publishing.
- Lindner, F. & Eschenbach, C. (2014). Affordances and affordance space: A conceptual framework for application in social robotics. In J. Seibt, R. Hakli & M. Nørskov (Hrsg.), *Social Robots and the Future of Social Relations – Proceedings of Robo-Philosophy 2014* (S. 35–46). IOS-Press.
- Lörken, C. & Hertzberg, J. (2008). Grounding planning operators by affordances. In *Proceedings of the 2008 International Conference on Cognitive Systems (CogSys)* (S. 79–84).
- Lu, D. V., Allan, D. B. & Smart, W. D. (2013). Tuning cost functions for social navigation. In *Social Robotics – Proceedings of the 5th International Conference (ICSR 2013)* (S. 442–451). Springer.
- Luber, M., Spinello, L., Silva, J. & Arras, K. O. (2012). Socially-aware robot navigation: A learning approach. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 902–907).
- Mainprice, J., Gharbi, M., Siméon, T. & Alami, R. (2012). Sharing effort in planning human-robot handover tasks. In *Proceedings of the 2012 the 21th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)* (S. 764–770).
- Martínez-Garí, E. A., Akihisa, O. & Yuta, S. (2005). Crowding and guiding groups of humans by teams of mobile robots. In *Proceedings of the 2005 IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts* (S. 91–96).
- McCarthy, J. (1959). Programs with common sense. In *Proceedings of the Teddington Conference on the Mechanization of Thought Processes*.
- Mead, R. (2012). Space, speech, and gesture in human-robot interaction. In *Proceedings of the 14th ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI'12)* (S. 333–336).
- Michaels, C. F. (2003). Affordances: Four points of debate. *Ecological Psychology*, 15 (2), 135–148.
- Michalowski, M. P., Sabanovic, S. & Simmons, R. (2006). A spatial model of engagement for a social robot. In *Proceedings of the 9th IEEE International*

- Workshop on Advanced Motion Control (AMC'06)* (S. 762–767).
- Mitsunaga, N., Smith, C., Kanda, T., Ishiguro, H. & Hagita, N. (2008). Adapting robot behavior for human-robot interaction. *IEEE Transactions on Robotics*, 24 (4), 911–916.
- Morales, Y., Satake, S., Huq, R., Glas, D., Kanda, T. & Hagita, N. (2012). How do people walk side-by-side?—using a computational model of human behavior for a social robot. In *Proceedings of the 7th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI'12)* (S. 301–308).
- Mutlu, B. & Forlizzi, J. (2008). Robots in organizations: Workflow, social, and environmental factors in human-robot interaction. In *Proceedings of the 3rd ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI'08)* (S. 287–294).
- Nakauchi, Y. & Simmons, R. (2002). A social robot that stands in line. *Autonomous Robots*, 12 (3), 313–324.
- Newell, A. (1982). The knowledge level. *Artificial intelligence*, 18 (1), 87–127.
- Nourbakhsh, I. R., Bobenage, J., Grange, S., Lutz, R., Meyer, R. & Soto, A. (1999). An affective mobile robot educator with a full-time job. *Artificial Intelligence*, 114 (1), 95–124.
- Okada, K., Kojima, M., Sagawa, Y., Ichino, T., Sato, K. & Inaba, M. (2006). Vision based behavior verification system of humanoid robot for daily environment tasks. In *Proceedings of the 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* (S. 7–12).
- Olivé, A. (2007). *Conceptual modeling of information systems*. Springer.
- Ostermann, F. & Timpf, S. (2007). Modelling space appropriation in public parks. In *Proceedings of the 10th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2007*.
- Pacchierotti, E., Christensen, H. I. & Jensfeld, P. (2006). Design of an office-guide robot for social interaction studies. In *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (S. 4965–4970).
- Pandey, A. K. & Alami, R. (2009). A framework for adapting social conventions in a mobile robot motion in a human-centered environment. In *Proceedings of the 14th International Conference on Advanced Robotics (ICAR 2009)* (S. 1–8).
- Pandey, A. K. & Alami, R. (2010). A framework towards a socially aware mobile robot motion in human-centered dynamic environment. In *Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 5855–5860).
- Pandey, A. K. & Alami, R. (2013). Affordance graph: A framework to encode

- perspective taking and effort based affordances for day-to-day human-robot interaction. In *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 2180–2187).
- Pedica, C. & Vilhjálmsson, H. (2008). Social perception and steering for online avatars. In H. Prendinger, J. Lester & M. Ishizuka (Hrsg.), *Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Virtual Agents* (S. 104–116). Springer-Verlag Berlin, Heidelberg.
- Qian, K., Ma, X., Dai, X. & Fang, F. (2010). Socially acceptable pre-collision safety strategies for human-compliant navigation of service robots. *Advanced Robotics*, 24 (13), 1813–1840.
- Randell, D. A., Cui, Z. & Cohn, A. G. (1992). A spatial logic based on regions and connections. In *Proceedings of kr'92* (S. 165–176).
- Raubal, M. (2001). Ontology and epistemology for agent-based wayfinding simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 15 (7), 653–665.
- Raubal, M. & Moratz, R. (2008). A functional model for affordance-based agents. In E. Rome, J. Hertzberg & G. Dorffner (Hrsg.), *Towards affordance-based robot control* (S. 91–105). Berlin / Heidelberg: Springer.
- Raz, J. (2011). *From normativity to responsibility*. Oxford University Press.
- Reed, E. S. (1996). *Encountering the world*. New York: Oxford University Press.
- Richter, P. G. (Hrsg.). (2008). *Architekturpsychologie*. Pabst Science Publishers.
- Rios-Martinez, J., Renzaglia, A. & Laugier, C. (2011). Probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach and models of human interaction. In *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*.
- Rockel, S., Neuman, B., Zhang, J., Dubba, K. S. R., Cohn, A. G., Štefan Konečný, ... Hotz, L. (2013). An ontology-based multi-level robot architecture for learning from experiences. In *Designing Intelligent Robots: Reintegrating AI II, AAAI Spring Symposium, March 25–27, Stanford (USA)* (S. 52–57). AAAI Press.
- Rome, E., Paletta, L., Şahin, E., Dorffner, G., Hertzberg, J., Breithaupt, R., ... Uğur, E. (2008). The macs project: an approach to affordance-inspired robot control. In *Towards affordance-based robot control* (S. 173–210). Springer.
- Saerbeck, M. & Bartneck, C. (2010). Perception of affect elicited by robot motion. In *Proceedings of the 5th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction* (S. 53–60).
- Şahin, E., Çakmak, M., Doğar, M. R., Uğur, E. & Üçoluk, G. (2007). To afford or not to afford: A new formalization of affordances toward affordance-

- based robot control. *Adaptive Behavior*, 15, 447—472.
- Satake, S., Iba, H., Kanda, T., Imai, M. & Saiki, Y. M. (2014). May I talk about other shops here? modeling territory and invasion in front of shops. In *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI'14)* (S. 487–494).
- Satake, S., Kanda, T., Glas, D. F., Imai, M., Ishiguro, H. & Hagita, N. (2009). How to approach humans? — Strategies for social robots to initiate interaction. In *Proceedings of the 4th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI'09)* (S. 109–116).
- Scandolo, L. & Fraichard, T. (2011). An anthropomorphic navigation scheme for dynamic scenarios. In *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 809–814).
- Sebba, R. & Churchman, A. (1983). Territories and territoriality in the home. *Environment and Behavior*, 15 (2), 191–210.
- Sehestedt, S., Kodagoda, S. & Dissanayake, G. (2010). Using common motion patterns to improve a robot's operation in populated environments. In *Proceedings of the 2010 11th International Conference on Control Automation Robotics Vision (ICARCV)* (S. 2036–2041).
- Shanahan, M. P. (2004). An attempt to formalise a non-trivial benchmark problem in common sense reasoning. *Artificial Intelligence*, 153 (1), 141–165.
- Shanahan, M. P. & Witkowski, M. (2001). High-level robot control through logic. In *Proceedings of the ATAL-2000 Conference* (S. 104–121).
- Shi, C., Shimada, M., Kanda, T., Ishiguro, H. & Hagita, N. (2011). Spatial formation model for initiating conversation. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems VII*.
- Shiotani, T., Maegawa, K. & Lee, J.-H. (2011). A behavior model of autonomous mobile projection robot for the visual information. In *Proceedings of the 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence* (S. 615–620).
- Sisbot, E. A., Marin-Urias, L. F., Alami, R. & Simeon, T. (2007). A human aware mobile robot motion planner. *IEEE Transactions on Robotics*, 23 (5), 874–883.
- Sisbot, E. A., Marin-Urias, L. F., Broquère, X., Sidobre, D. & Alami, R. (2010). Synthesizing robot motions adapted to human presence. *International Journal of Social Robotics*, 2 (3), 329–343.
- Smith, B. C. (1982). *Reflection and semantics in a procedural language*. Dissertation. Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science.

- Sommer, R. (1969). *Personal space: Behavioural basis of design*. Pentice Hall.
- Stoffregen, T. A. (2003). Affordances as properties of the animal-environment system. *Ecological Psychology*, 15 (2), 115–134.
- Stoytchev, A. (2008). Learning the affordances of tools using a behavior-grounded approach. In E. Rome, J. Hertzberg & G. Dorffner (Hrsg.), *Towards affordance-based robot control* (S. 140–158).
- Stulp, F., Fedrizzi, A., Mösenlechner, L. & Beetz, M. (2012). Learning and reasoning with action-related places for robust mobile manipulation. *Journal of Artificial Intelligence Research (JAIR)*, 43, 1–42.
- Suzuki, S., Goto, J., Igarashi, H., Kobayashi, H., Yasuda, T. & Harashima, F. (2012). Robot motion planning considering the utterance-timing and its experimental evaluation. In *Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC'12)* (S. 1–6).
- Svenstrup, M., Tranberg Hansen, S., Andersen, H. J. & Bak, T. (2011). Adaptive human-aware robot navigation in close proximity to humans. *International Journal of Advances Robotic Systems*, 8 (2), 1–15.
- Tamura, Y., Le, P. D., Hitomi, K., Chandrasiri, N., Bando, T., Yamashita, A. & Asama, H. (2012). Development of pedestrian behavior model taking account of intention. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 382–387).
- Tasaki, T., Ozaki, F., Matsuhira, N., Ogata, T. & Okuno, H. G. (2011). People detection based on spatial mapping of friendliness and floor boundary points for a mobile navigation robot. *Journal of Robotics*, 2011.
- Tenorth, M. & Beetz, M. (2009). KnowRob – Knowledge processing for autonomous personal robots. In *Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'09)* (S. 4261–4266).
- Thielscher, M. (2006). *Reasoning robots — the art and science of programming robotic agents*. Applied Logic Series, Vol. 33. Springer.
- Tipaldi, D. G. & Arras, K. O. (2011a). I want my coffee hot! Learning to find people under spatio-temporal constraints. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Robotics and Automation* (S. 1217–1222).
- Tipaldi, D. G. & Arras, K. O. (2011b). Please do not disturb! Minimum interference coverage for social robots. In *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'11)* (S. 1968–1973).
- Tomari, R., Kobayashi, Y. & Kuno, Y. (2012). Empirical framework for autonomous wheelchair systems in human-shared environments. In *Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation* (S. 493–498).

- Torta, E., Cuijpers, R. H., Juola, J. F. & van der Pol, D. (2012). Modeling and testing proxemic behavior for humanoid robots. *International Journal of Humanoid Robotics*, 9 (4), 1250028-1–1250028-24.
- Trautman, P., Ma, J., Murray, R. M. & Krause, A. (2013). Robot navigation in dense human crowds: the case for cooperation. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 2153–2160).
- Tucker, M. & Ellis, R. (1998). On the relations between seen objects and components of potential actions. *Journal of Experimental Psychology: Human perception and performance*, 24 (3), 830.
- Turvey, M. (1992). Affordances and prospective control: An outline of the ontology. *Ecological Psychology*, 4 (3), 173–187.
- Urcola, P. & Montano, L. (2011). Adapting robot team behavior from interaction with a group of people. In *Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (S. 2887–2894).
- Vahrenkamp, N., Asfour, T. & Dillmann, R. (2013). Robot placement based on reachability inversion. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (S. 1970–1975).
- Walters, M. L., Dautenhahn, K., te Boekhorst, R., Koay, K. L., Syrda, D. S. & Nehaniv, C. L. (2009). An empirical framework for human-robot proxemics. In *Proceedings of the Symposium on New Frontiers in Human-Robot Interaction (AISB2009)* (S. 144–149).
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10 (5), 683–703.
- Warren, W. H. & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13 (3), 371–383.
- Withagen, R., de Poel, H. J., Araújo, D. & Pepping, G.-J. (2012). Affordances can invite behavior: Reconsidering the relationship between affordances and agency. *New Ideas in Psychology*, 30 (2), 250–258.
- Yamaoka, F., Kanda, T., Ishiguro, H. & Hagita, N. (2010). A model of proximity control for information-presenting robots. *IEEE Transactions on Robotics*, 26 (1), 187–195.
- Yoda, M. & Shiota, Y. (1997). The mobile robot which passes a man. In *Proceedings of the 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'97)* (S. 112–117).
- Yousuf, M. A., Kobayashi, Y., Kuno, Y., Yamazaki, A. & Yamazaki, K. (2012).

Development of a mobile museum guide robot that can configure spatial formation with visitors. In *Proceedings 8th International Conference on Intelligent Computing Technology, ICIC 2012* (S. 423–432).

Zacharias, F., Borst, C., Beetz, M. & Hirzinger, G. (2008). Positioning mobile manipulators to perform constrained linear trajectories. In *Proceedings of the 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'08)* (S. 2578–2584).